

Análisis de varianza y coeficiente de variación como criterios de repetibilidad de una estufa de cocción basada en gasificación de pellets

Analysis of variance and variation coefficient as repeatability criteria of a cookstove based on pellets gasification

Jonatan Gutiérrez ^{1a}, Edwin Chica ², Juan F. Pérez ^{1b}

¹ Grupo de Manejo Eficiente de la Energía – GIMEL, Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. Orcid: 0000-0001-7532-8519 ^a, 0000-0002-3811-4471 ^b

Correos electrónicos: jonatan.guierrez@udea.edu.co ^a, juanpb@udea.edu.co ^b

² Grupo de Investigación Energía Alternativa – GEA, Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. Orcid: 0000-0002-5043-6414. Correo electrónico: edwin.chica@udea.edu.co

Recibido: 11 septiembre, 2022. Aceptado: 24 abril, 2023. Versión final: 12 julio, 2023.

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio de repetibilidad aplicado a una estufa de cocción basada en gasificación de pellets de madera (19.03 MJ/kg). El análisis es llevado a cabo mediante un protocolo de ebullición de agua (Water Boling Test, WBT 4.2.3) modificado. La repetibilidad de la estufa basada en gasificación se evaluó mediante 2 metodologías: coeficiente de variación (CV, %) y análisis de varianza (ANOVA), en función de variables respuesta, tales como eficiencia térmica (η , %), potencia (P, kW), consumo de combustible (FC, g/min), consumo específico de combustible (SFC, g/L), consumo específico de energía (SFEC, kJ/L) y consumo específico de energía por unidad de tiempo (SFCT, kJ/L-min). Mediante el análisis de CV se obtuvo un CV promedio global de $4.69\% \pm 0.87\%$. Por tanto, como el $CV \leq 5\%$, se concluye que la estufa de cocción basada en gasificación es repetible. Con respecto al análisis ANOVA, los valores P de las variables estudiadas fueron mayores a 0.05 ($P > 0.05$), por lo tanto, se concluye que la estufa de gasificación es repetible con un nivel de confianza del 95%. Consecuentemente, se concluye la eficiencia térmica promedio alcanzada por la estufa es del $\sim 29\% \pm 2.25\%$, con un nivel de confianza del 95%. Este valor de eficiencia térmica es comparable con otras estufas de cocción basadas en gasificación reportadas en la literatura con valores entre 16 y 38%. La metodología y los resultados de este trabajo constituyen una base teórica para la evaluación de futuros desarrollos de estufas de cocción a biomasa, ya que se puede cuantificar y analizar la confiabilidad de los resultados encontrados en los prototipos probados a nivel de laboratorio.

Palabras clave: estufas de cocción a biomasa mejoradas; pellets de madera; repetibilidad estadística; protocolo de ebullición de agua; coeficiente de variación; análisis de varianza.

Abstract

In this work is presented a repeatability study applied to a cookstove based on wood pellets gasification (19.03 MJ/kg). The analysis is carried out under a modified water boiling test (WBT 4.2.3). The repeatability of the gasification-based cookstove was assessed by means of two methodologies, such as the variation coefficient (CV, %) and the analysis of variance (ANOVA). The answer variables evaluated under repeatability were the efficiency (η , %), power (P, kW), fuel consumption (FC, g/min), fuel specific consumption (SFC, g/L), energy specific consumption (SFEC, kJ/L), and energy specific consumption per unit time (SFCT, kJ/L-min). By the CV analysis, the global average CV was $4.69\% \pm 0.87\%$. Therefore, as $CV \leq 5\%$, it is concluded that the gasification based cookstove is statistically repeatable. Concerning the ANOVA, the P-values of the variables studied were higher than 0.05 ($P > 0.05$), thereby, it is stated that the improved cookstove is repeatable with a confidence level of 95%. Consequently, it is highlighted that the average thermal efficiency reached by the cookstove is $\sim 29\% \pm 2.25\%$, with a confidence level of 95%. This thermal efficiency value is comparable with other biomass cookstoves based on gasification reported in the literature with values between 16 and 38%. The methodology and the results of this work constitute a theoretical foundation for assessing future developments of biomass cookstoves since the results reliability found in the prototypes tested at the laboratory level can be quantified and analyzed.

Keywords: improved biomass cookstoves; wood pellets; statistical repeatability; water boiling test protocol; variation coefficient; analysis of variance.

1. Introducción

Colombia mediante el programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes No Convencionales (PROURE) del Ministerio de Minas y Energía de 2010 [1], y mediante el Plan Energético Nacional 2020-2050 [2], viene tratando de sustituir el uso de leña en regiones rurales por gas licuado de petróleo (GLP). Tal estrategia no ha sido posible debido a la extensión del territorio (1,109,500 km² [3]) y la dificultad de acceso a estas regiones, por lo que la leña continuará siendo el recurso energético que prima en las zonas aisladas, donde el 50% de la población en zonas rurales utiliza combustibles sólidos (leña, carbón y residuos agrícolas) [4]. Por lo tanto, es importante plantear otras alternativas encaminadas a un mejor uso de la biomasa ya que es el combustible renovable disponible en estas zonas rurales. Una de estas alternativas la constituye el desarrollo de estufas eficientes, con menores emisiones contaminantes y menor producción de material particulado (MP). La iniciativa que busca impulsar el desarrollo de estufas de cocción avanzadas ha sido promovida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible a través del Programa Nacional de Estufas Eficientes para Cocción con Leña y por la norma para estufas mejoradas de leña en Colombia (NTC 6358, diciembre de 2019) desarrollada en conjunto con el ICONTEC. El programa de estufas para el año 2014 había instalado alrededor de 28250 estufas eficientes en todo el país [5].

Algunos de los protocolos considerados a nivel mundial para el desarrollo de estufas son la prueba de ebullición de agua (Water Boiling Test, WBT) [6], la prueba de cocción controlada (Controlled Cooking Test, CCT) [7], el protocolo de prueba de emisiones y rendimiento

(Emissions & Performance Test Protocol, EPTP) [8], el estándar chino DB11/T 540-2008 [9], entre otros. Mediante su implementación, es posible calcular el rendimiento y las emisiones contaminantes de las estufas. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que el cálculo debe estar fundamentado estadísticamente para garantizar confiabilidad en los resultados. En este sentido, se consideran las pruebas de repetibilidad estadística, con el fin de determinar la variabilidad de las mediciones al ser realizadas en condiciones controladas. Es decir, manteniendo fijos el observador, el instrumento de medición y el lugar de ejecución de los experimentos [10]. Si para un determinado número de réplicas se obtienen resultados estadísticamente similares, se puede concluir que la instalación experimental es repetible [11]. La repetibilidad en las estufas les atribuye confiabilidad a las conclusiones obtenidas con base en la evaluación energética y ambiental de estos dispositivos.

La literatura generalmente muestra que incluso bajo condiciones cuidadosamente controladas (pruebas en laboratorio bajo condiciones similares entre experimentos, garantizando similitud en las propiedades fisicoquímicas del combustible y en las condiciones ambientales entre pruebas -humedad y temperatura-, seguimiento de un mismo protocolo en la ejecución de las pruebas y uso de equipos de medición calibrados), los resultados de las pruebas (eficiencia, tiempo de ebullición, emisiones de partículas y gases) exhiben una variabilidad de prueba a prueba que va de moderada a alta, incluso para técnicos de estufas experimentados y cuidadosos [12]. Wang et al. [12] encontraron datos estadísticamente significativos, en cuanto a emisiones contaminantes y tiempos de ebullición de agua, a partir de 20 réplicas en cada instalación experimental. Por su

parte L'Orange et al. [13] reportaron que al momento de comparar dos estufas y catalogarlas como estufas con calidad Tier 3 o Tier 4 [6], en cada una de las estufas se deben realizar 63 réplicas para demostrar que son estadísticamente diferentes durante el 80% del tiempo. Adicionalmente, para determinar la concentración de monóxido de carbono (CO) afirman que se requieren 86 réplicas en cada estufa.

Por su parte, L'Orange et al. [13] resaltan que este elevado número de réplicas deben ser realizadas, aunque se requiera mayor cantidad de personal, tiempo y en definitiva un incremento en el costo del estudio. Sin embargo, esto garantiza que los modelos de estufas mejoradas, muchos de ellos diseñados y probados en laboratorios, sean confiables al presentar menores emisiones contaminantes bajo pruebas de campo, y en comparación con los diseños tradicionales.

Otros autores se han dado a la tarea de caracterizar el rendimiento en función del combustible y el tipo de estufa [14], puesto que se ha encontrado que el rendimiento se ve afectado principalmente por el tipo y calidad de la materia prima utilizada para la cocción (biomasa) [15], siendo de especial relevancia propiedades del combustible como la densidad aparente y los contenidos de humedad, material volátil y cenizas. Adicionalmente, se ha demostrado que el usuario u operario de la estufa afecta las emisiones contaminantes, hecho que se atribuye a la selección del combustible y las condiciones de combustión, presentándose menores emisiones contaminantes para usuarios que utilizan troncos de madera pequeños y secos y con relación de exceso de aire de combustión entre 2 y 3 veces [16]. Existen parámetros adicionales que afectan la variabilidad de los resultados, y por ende el rendimiento y las emisiones contaminantes de la estufa. Entre estos parámetros se destacan los recipientes de cocción, operación de la estufa, mantenimiento y calidad del equipo, análisis de datos, protocolo e interpretación de pruebas, así como el ambiente de la prueba [15], [17].

El análisis estadístico de repetibilidad puede ejecutarse por tres métodos: rango y promedio, método corto de Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R), y análisis de varianza (ANOVA). Se ha establecido que el método ANOVA es más efectivo puesto que permite cuantificar e identificar cada fuente de variación durante el estudio [11], [18]. Sin embargo, el tamaño de muestra, es decir, el número de réplicas, ha sido un tema de gran discusión [19]. En este trabajo se presenta un análisis de repetibilidad estadística de una estufa de cocción basada en gasificación de biomasa (tipo TLUD -en inglés *reverse downdraft*, o *top-lit updraft*), y operando bajo condiciones controladas de laboratorio. Se siguió el

protocolo de ebullición de agua WBT 4.2.3 modificado para la ejecución de las pruebas de repetibilidad. La repetibilidad de la estufa TLUD [20] se evaluó mediante 2 metodologías: a) coeficiente de variación (CV), y b) análisis de varianza (ANOVA), en función de las siguientes variables respuesta: eficiencia térmica (η , %), potencia (P, kW), consumo de combustible (FC, g/min), consumo específico de combustible (SFC, g/L), consumo específico de energía (SFEC, kJ/L) y consumo específico de energía por unidad de tiempo (SFCT, kJ/L-min).

2. Metodología

Con la finalidad de garantizar la confiabilidad de la instalación experimental y de igual forma obtener una metodología que permita caracterizar las estufas de gasificación como dispositivos repetibles y confiables, se realizan pruebas de repetibilidad estadística. De esta manera, se busca asegurar que los parámetros de funcionamiento dependientes del operario (parámetros controlables) y el funcionamiento de la estufa de gasificación varíen lo menos posible en el tiempo [11].

El estudio de repetibilidad ejecutado durante el desarrollo de este trabajo se llevó a cabo bajo recomendaciones de la normativa NTC-ISO/IEC17025, en donde se especifica que para realizar análisis de repetibilidad se deben mantener invariables el observador, el instrumento de medición y el lugar [21]. Se utilizó biomasa de *Pinus patula* en forma de pellets como materia prima para ser gasificada en una estufa tipo TLUD, debido al potencial dendroenergético del pino patula en Colombia, con propiedades silviculturales entre la que se encuentran: rendimiento anual de ~ 20 m³/ha-año, tiempo de cosecha de ~ 13 años, y área plantada en el país de ~ 38500 ha [22]. Además, la biomasa densificada cuenta con mayor densidad aparente, factor de empaquetamiento y poder calorífico en comparación con la misma biomasa sin densificar, permitiendo obtener mayores temperaturas en el lecho de gasificación y una menor tasa de consumo de biomasa, lo que favorece de forma global la composición y poder calorífico del gas de gasificación, la eficiencia de gasificación, la cantidad de energía entregada al agua y el rendimiento del biocarbón [23].

La estufa de gasificación se instrumentó y adecuó para el monitoreo y registro de la evolución de la masa de biomasa, masa de agua, temperaturas al interior del lecho, temperatura del agua y control del flujo de aire mediante la variación del voltaje de los ventiladores axiales, responsables del suministro de aire de gasificación y aire de combustión. Adicionalmente, las pruebas se realizaron siguiendo el protocolo de ebullición de agua WBT 4.2.3 modificado, el cual, está compuesto por dos encendidos o arranques (arranque en frío y

arranque en caliente), y a su vez, cada uno de los encendidos está constituido por dos etapas: en la etapa 1 se enciende la estufa TLUD desde la temperatura ambiente (estufa y agua), y se lleva el agua (3 L) hasta el punto de ebullición (~ 94 °C para Medellín-Colombia); en la etapa 2, el agua continúa ebulviendo hasta que en el lecho de gasificación quede solo biocarbón, en este momento finaliza la prueba experimental. La finalidad de la prueba es obtener variables respuesta que puedan ser comparables con otras estufas a nivel internacional. Se analiza la repetibilidad estadística mediante el cálculo de: la eficiencia térmica (η , %), potencia (P , kW), consumo de combustible (FC , g/min), consumo específico de combustible (SFC , g/L), consumo específico de energía del combustible ($SFEC$, kJ/L) y consumo específico de energía por unidad de tiempo ($SFCT$, kJ/L-min). Las metodologías de repetibilidad utilizadas son el coeficiente de variación (CV) y el análisis de varianza (ANOVA).

A continuación, se presenta el procedimiento seguido para la ejecución de las réplicas en la estufa de gasificación TLUD, se describe la instalación experimental, la caracterización fisicoquímica de la biomasa de *Pinus patula*. Adicionalmente, se describe el procedimiento del protocolo WBT 4.2.3 modificado, junto con las ecuaciones utilizadas para el cálculo de las variables respuesta de interés. Finalmente, se presenta el

coeficiente de variación, el modelo estadístico utilizado para el análisis de repetibilidad (ANOVA) y las condiciones experimentales definidas para las pruebas.

2.1. Instalación experimental

La instalación experimental utilizada para las pruebas de repetibilidad está ubicada en el laboratorio de procesos termoquímicos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia. La instalación experimental cuenta con una estufa de gasificación tipo TLUD instrumentada para la ejecución de pruebas bajo protocolo WBT, y para la caracterización térmica del proceso de gasificación. Los diferentes equipos que componen la instalación experimental se muestran en la **Figura 1**.

Constructivamente, la estufa cuenta con una geometría cilíndrica de diámetro interno 0.16 m y altura 0.28 m; adicionalmente, dispone de 5 termopares tipo K (± 1 °C) ubicados longitudinalmente en el reactor y separados cada 40 mm, de tal forma que la temperatura a lo largo del lecho de gasificación puede ser monitoreada. Como el proceso de gasificación es de lecho fijo invertido (en inglés *reverse downdraft*, o *top-lit updraft* - TLUD), el aire de gasificación ingresa por la sección inferior del reactor a través de un ducto de diámetro 40 mm (ver en la **Figura 1** el cilindro inferior del numeral 2).

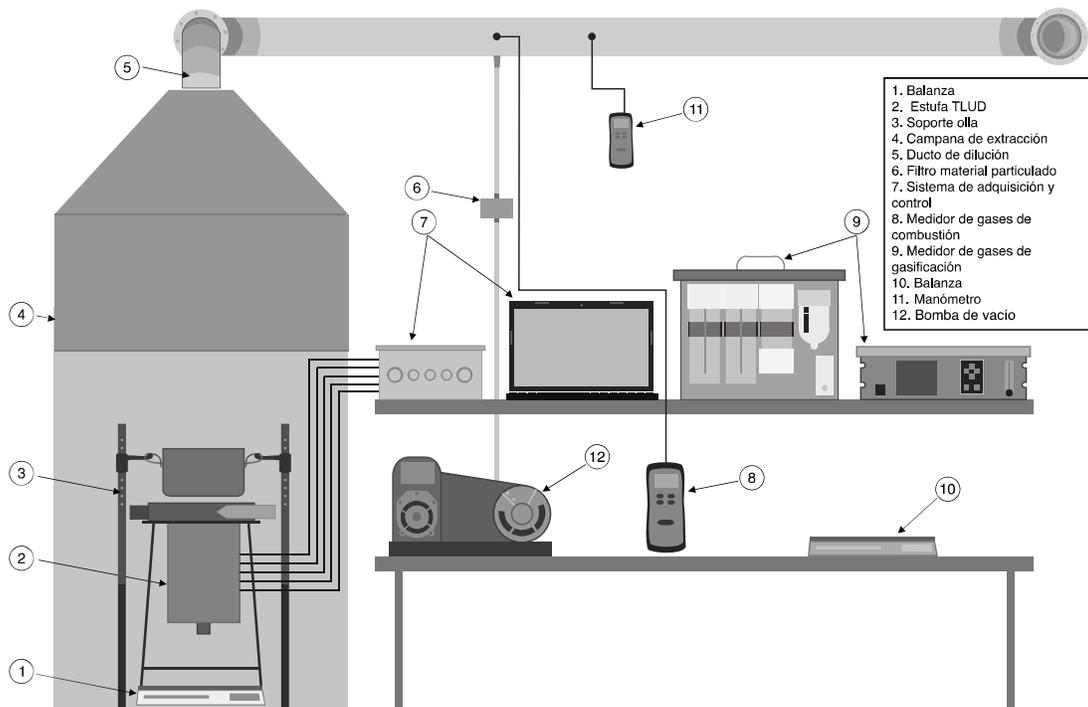


Figura 1. Instalación experimental de la estufa de cocción basada en gasificación de biomasa (TLUD). Fuente: elaboración propia.

Estufa TLUD) y es suministrado por un ventilador axial *GOSTIME® 12 V – 0.06A*. En la sección superior del reactor se encuentra ubicada la cámara de combustión mostrada en la **Figura 2a**. La cámara de combustión posee un diámetro interno de 0.16 m y dos hileras de ranuras, cada hilera con 9 ranuras de altura 8 mm y longitud 24 mm, lo que se traduce en un área total para la salida del aire de combustión de 3209 mm². Con la geometría alargada de los orificios de la cámara de combustión se buscó una mayor turbulencia en la zona de combustión, lo que permitirá un mejor mezclado entre el gas de gasificación y el aire de combustión. El aire de combustión es suministrado por dos ventiladores axiales *GOSTIME® 5 V – 0.14A*, a través de dos ductos de 40 mm de diámetro unidos tangencialmente a la cámara de combustión, tal como se observa en la **Figura 2b**.

El sistema de control y adquisición de datos está conformado por la tarjeta de adquisición (DAQ) *National Instruments USB-6001* y un programa desarrollado en el software *LabView®* (ver **Figura 3**). Mediante estos dos componentes se visualizan y registran las 5 temperaturas a lo largo del lecho de gasificación, y se monitorea y registra la temperatura del agua mediante un sensor LM35 (± 0.5 °C). Adicionalmente, se controla el voltaje de los ventiladores para el aire de gasificación y el aire de combustión, con el fin de regular el caudal suministrado en cada caso.

Por último, se monitorea y registra la masa de biomasa a lo largo de toda la prueba bajo protocolo WBT mediante una balanza *MAG master P* con capacidad de 30 kg (± 0.1 g).

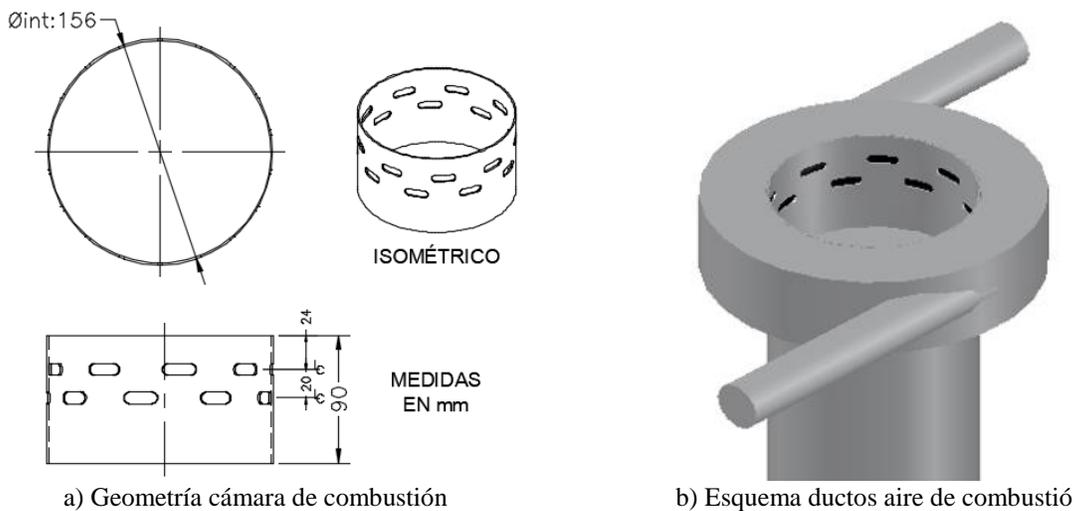


Figura 2. Esquemas cámara de combustión y suministro de aire de oxidación a la estufa TLUD. Fuente: elaboración propia.

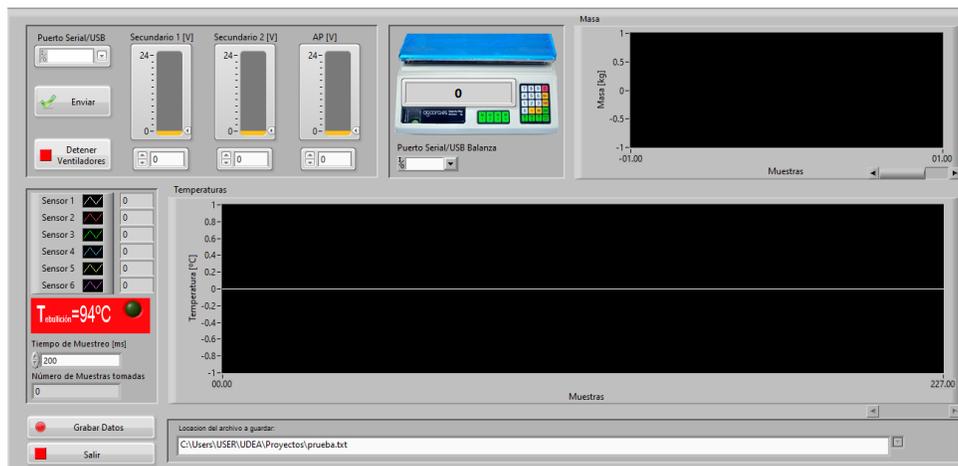


Figura 3. Interfaz gráfica del sistema de control y adquisición de datos. Fuente: elaboración propia.

La masa de agua es medida con una balanza *MAG HAW-10BH* con capacidad de 10 kg (± 1.0 g). Durante la ejecución de la prueba, la olla con agua se encuentra separada de la estufa de gasificación mediante un soporte adicional tal como se muestra en la *Figura 1* (3. Soporte de olla), con el objetivo de medir por separado la pérdida de masa de la biomasa y la masa de agua.

Para la extracción de los gases de combustión, la instalación experimental dispone de una campana extractora de 0.8 m de ancho, 1.0 m de largo y 2.0 m de alto, tal como se muestra en la *Figura 1* (4. Campana de extracción), unida a un ducto de dilución de 0.1 m de diámetro. Las velocidades de extracción son inferiores a 0.25 m/s, esto evita la existencia de corrientes de aire que interfieran con el funcionamiento normal de la estufa [24].

2.2. Caracterización fisicoquímica de la biomasa

Para el estudio de repetibilidad de la estufa de gasificación TLUD se utilizaron pellets de madera de *Pinus patula* (biomasa densificada). La caracterización fisicoquímica de la biomasa está conformada por el análisis último (contenido de C, H, N, S, y O), realizado en el equipo *Leco Truspec micro* y bajo la norma ASTM D-5373-08. El contenido elemental de CHN se determina a 1050 °C y el contenido de azufre se determina a 1350°C ambos en una atmósfera de helio. La concentración de oxígeno (O) se estimó por diferencia [25].

El análisis próximo se determinó utilizando el equipo *TGA Q50*, bajo la norma modificada ASTM D-5142-04. Esta prueba permite cuantificar el contenido de humedad, material volátil, carbono fijo y contenido de cenizas presente en la biomasa. El procedimiento utilizado para realizar el análisis próximo consistió en someter la biomasa a una atmósfera inerte usando gas nitrógeno a un caudal de 100 ml/min. Para determinar el contenido de humedad, la muestra se lleva hasta 105 °C con una rampa de calentamiento de 10 °C/min y se mantiene una isoterma durante 15 min. Posteriormente, se realiza un nuevo calentamiento hasta 900 °C a 10 °C/min, manteniendo una isoterma a los 900 °C durante 25 min, para determinar el contenido de material volátil (pérdida de masa entre 105 °C y 900 °C). Luego, la temperatura interna del horno se equilibra a 715 °C, al llegar a esta temperatura se modifica la atmósfera inerte a atmósfera oxidante, suministrando 100 ml/min de aire durante 20 min. La masa restante después del estado isotérmico (715 °C) se considera como el contenido de cenizas de la muestra, y finalmente, el carbono fijo se determina por diferencia.

La caracterización de las propiedades físicas de las biomásas: densidad de partícula (kg/m^3), densidad aparente (kg/m^3), factor de empaquetamiento y esfericidad de la biomasa se realizó con la metodología presentada por Díez *et al.* [26]. Se indica que la densidad de partícula es la razón entre la masa y el volumen de una partícula de biomasa (ecuación (1)). El método utilizado para su estimación es por inmersión y volumen desplazado en un aceite con densidad conocida. En este caso se utilizó aceite W0-20, cuya densidad a 15.6 °C, ASTM D4052, es de 838 kg/m^3 . La densidad de partícula se estima de acuerdo a lo propuesto por Lenis y Pérez [27] de la siguiente forma.

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p + V_{oil}} \quad (1)$$

Donde ρ_p es la densidad de partícula (kg/m^3) y está dada por la masa de la partícula (m_p , kg) dividida entre la suma del volumen de partícula (V_p , m^3) y el volumen de aceite absorbido por la partícula (V_{oil} , m^3), ver ecuación (2). Donde (m_{oil} , kg) es la masa de aceite retenida por la partícula de biomasa, y (ρ_{oil} , kg/m^3) es la densidad del aceite.

$$V_{oil} = \frac{m_{oil}}{\rho_{oil}} \quad (2)$$

La densidad aparente (ρ , kg/m^3) es la relación entre la masa y el volumen ocupado por las partículas de biomasa. Se conoce como densidad aparente debido a que en su estimación se incluyen los volúmenes de los espacios que quedan entre partículas. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que la relación diámetro de partícula/diámetro del lecho afecta el empaquetamiento de la biomasa. Para relaciones diámetro de partícula/diámetro del lecho bajas (entre 1 y 4) la fracción libre promedio en el lecho es elevada, lo que favorece la formación de caminos preferentes [27]; se recomienda que el diámetro del reactor sea mínimo 10 veces el diámetro medio de las partículas de biomasa para evitar dicho fenómeno [27]. En este estudio, se utiliza un recipiente con igual diámetro interior al diámetro del lecho de la estufa (gasificador) para medir esta propiedad. Para este caso en particular, se utiliza un recipiente de diámetro interior 0.16 m. La estimación de este parámetro se realiza llenando un recipiente de volumen conocido con la biomasa, por último, se procede a pesar el contenido del recipiente.

El factor de empaquetamiento de la biomasa (FE, -) depende tanto del tamaño como de la geometría de la partícula, ver ecuación (3). Es un factor importante puesto que permite identificar fenómenos indeseables

como los caminos preferentes del frente de llama al interior del lecho, esto ocurre en cercanías a las paredes donde el factor de empaquetamiento es menor [27]. El máximo empaquetamiento teórico (MOP por sus siglas en inglés) es de 0.74 y corresponde a partículas esféricas del mismo tamaño. La estimación del factor de empaquetamiento se realiza mediante la ecuación (3) que relaciona la densidad aparente (ρ , kg/m³) y la densidad de partícula (ρ_p , kg/m³).

$$FE = \frac{\rho}{\rho_p} \quad (3)$$

La esfericidad de las partículas (φ , -) es un parámetro que permite identificar que tanto se asemeja la forma de las partículas de biomasa a una esfera, ver ecuación (4). La esfericidad influye de manera directa sobre el factor de empaquetamiento de la biomasa en el lecho, pudiéndose identificar mayores empaquetamientos para biomásas con mayor esfericidad [28], [29]. El cálculo de la esfericidad para los pellets se realiza aproximando la geometría a un cilindro de diámetro (d , m) y longitud (L_o , m). Consiste en la división entre la superficie equivalente de la esfera y la superficie de la partícula (S_p , m), ver ecuación (4). Para el caso de los pellets está dada por la ecuación (5).

$$\varphi = \frac{\pi^{1/3}(6V_p)^{2/3}}{S_p} \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{d^{1/3} \cdot \left(\frac{3}{2} \cdot L_o\right)^{2/3}}{L_o + \frac{1}{2}d} \quad (5)$$

Con respecto a los parámetros energéticos de la biomasa, se realizó la medición del poder calorífico superior (HHV) de los pellets utilizando una bomba calorimétrica 6100 Compensated jacket calorimeter de Parr Instrument Company, siguiendo la norma ASTM E144-14. El poder calorífico inferior (LHV) de la biomasa se determinó mediante el HHV y utilizando la ecuación (6) [30], donde MC_{bms} (g/g) es el contenido de humedad de la biomasa y H_{bms} (g/g) es el contenido de hidrógeno del combustible. La caracterización fisicoquímica de los pellets de *Pinus patula*, como biomasa para las pruebas de repetibilidad de la estufa TLUD, se presentan en la **Tabla 1**.

$$LHV_{bms} = HHV_{bms} - 2260 \cdot MC_{bms} - 20300 \cdot H_{bms} \quad (6)$$

Tabla 1. Características fisicoquímicas de la biomasa de *Pinus patula*

Propiedad	Estándar	Valor
Análisis Último [%masa base seca sin ceniza.]		
C	ASTM D5378-08	46.83
H	ASTM D5378-08	5.67
O	Por diferencia	47.48
N	ASTM D5378-08	0.02
Análisis Próximo [%masa base seca.]		
Material Volátil	ASTM D5142-04	84.64
Carbono Fijo	Por diferencia	14.09
Ceniza	ASTM D5142-04	1.27
Humedad [% masa]	ASTM D5142-04	7.91
Propiedades Físicas		
Densidad Aparente [kg/m ³]	-	559.97
Densidad de Partícula [kg/m ³]	-	1153.62
Factor de empaquetamiento [-]	-	0.48
Esfericidad [-]	-	0.87
Propiedad energética		
HHV [MJ/kg]	ASTM E144-14	20.36
LHV [MJ/kg]	Calculada ecuación (6)	19.03

Fuente: elaboración propia.

2.3. Protocolo WBT y cálculo de parámetros

Los ensayos de repetibilidad de la estufa se realizaron siguiendo un protocolo WBT 4.2.3 modificado, cuya versión original es propuesta por la Alianza Global para Estufas Limpias. El procedimiento seguido para la ejecución de las pruebas se muestra en la **Figura 4**, y se realiza con el objetivo de evaluar la repetibilidad de la estufa con relación a la eficiencia térmica (η , %), potencia (P , kW), consumo de combustible (FC , g/min), consumo específico de combustible (SFC , g/L), consumo específico de energía ($SFEC$, kJ/L) y consumo específico de energía por unidad de tiempo ($SFCT$, kJ/L-min).

El protocolo WBT 4.2.3 está conformado por dos tipos de encendido o arranque para iniciar las pruebas WBT [6]. Estos encendidos de la estufa se denominan arranque en frío y arranque en caliente, y consisten en llevar el agua desde la temperatura ambiente hasta su punto de ebullición. Cada uno de los encendidos, a su vez, está conformado por dos etapas (etapa 1-S1 y etapa 2-S2), ver **Figura 4**. La etapa 1 del arranque en frío se denota por CS.S1, en esta etapa se enciende la estufa TLUD desde

la temperatura ambiente (25 °C) y se lleva el agua de temperatura ambiente hasta el punto de ebullición. La etapa 2 del arranque en frío se denota por CS.S2, en esta etapa el agua ebullicida se vuelve a montar sobre la estufa; el objetivo de CS.S2 es prolongar la operación de la estufa simulando una cocción prolongada, y de este modo registrar por más tiempo (entre 980 s y 1160 s) las emisiones contaminantes, y recolectar una mayor cantidad de material particulado suspendido total en el filtro de material particulado (Figura 1).

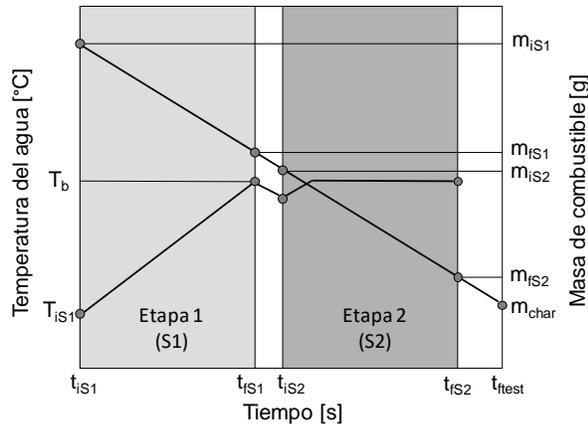


Figura 4. Protocolo WBT 4.2.3 modificado. Fuente: elaboración propia.

El encendido en caliente se realiza después de finalizado el ensayo del arranque en frío. Se retira el biocarbón de la parrilla de la estufa, se carga de nuevo con biomasa fresca, se enciende la estufa precalentada, y se monta la olla con agua a temperatura ambiente. Las etapas 1 y 2 del encendido en caliente se denotan por HS.S1 y HS.S2, respectivamente. Estas etapas son similares a las descritas anteriormente para el encendido en frío. HS.S1 inicia con la estufa precalentada para ebullición del agua desde la temperatura ambiente; HS.S2 continúa ebulliciendo el agua bajo las mismas condiciones de consumo de biomasa para obtener una mayor muestra de datos relacionados con la concentración de gases de combustión, y material particulado suspendido total. En la Tabla 2 se presenta el procedimiento a seguir para la ejecución del arranque en frío.

Al finalizar la etapa CS, se procede a renovar la carga del lecho con aproximadamente 1300 g de biomasa fresca y se realiza el mismo procedimiento indicado en la Tabla 2 para el arranque en caliente. Tal como se muestra en la Figura 4, durante la ejecución de las pruebas se realiza la toma de datos de las siguientes variables en cada una de las etapas: masa inicial de agua ($m_{w,i}$, g), masa final de agua ($m_{w,f}$, g), temperatura inicial de agua ($T_{w,i}$, °C), temperatura final de agua ($T_{w,f}$, °C), masa inicial de combustible ($m_{bms,i}$, g), masa final de combustible

($m_{bms,f}$, g), masa final de biochar ($m_{biochar}$, g), tiempo de duración de la etapa 1 (t_{s1} , s), tiempo de duración de la etapa 2 (t_{s2} , s) y tiempo de duración de la prueba completa (t_{test} , s). Mediante los datos medidos en cada uno de los arranques con sus respectivas etapas, se calcula cada una de las variables que se indican en las ecuaciones (7) - (17) (ver Tabla 3), para finalmente determinar los parámetros de desempeño energético de la estufa TLUD por medio de las ecuaciones (18) - (23) mostradas en la Tabla 3.

Tabla 2. Procedimiento para la ejecución del protocolo WBT 4.2.3 modificado

Protocolo WBT 4.2.3 modificado	
Etapa: CS.S1	
Procedimiento	Variables medidas
1. Inicio de CS, encendido de la estufa	$m_{w,iS1}$: masa de agua inicial etapa 1 [g] $m_{bms,iS1}$: masa de biomasa inicial etapa 1 [g] T_{iS1} : temperatura inicial del agua etapa 1 [°C]
2. Esperar a que el agua alcance la temperatura de ebullición, desmontar la olla de la estufa y registrar los valores de las variables	$m_{w,fS1}$: masa de agua final etapa 1 [g] $m_{bms,iS1}$: masa de biomasa final etapa 1 [g] T_{iS1} : temperatura final del agua etapa 1 [°C] t_{s1} : tiempo transcurrido durante la etapa 1 [s]
Etapa: CS.S2	
3. Montar la olla nuevamente en la estufa con el agua hervida en CS.S1	$m_{w,iS2}$: masa de agua inicial etapa 2 [g] $m_{bms,iS2}$: masa de biomasa inicial etapa 2 [g] T_{iS1} : temperatura inicial del agua etapa 2 [°C]
4. Mantener el agua a temperatura de ebullición hasta alcanzar en el lecho una masa de biomasa final de ~200 g. Retirar la olla y registrar los valores de las variables	$m_{w,fS2}$: masa de agua final etapa 2 [g] $m_{bms,iS2}$: masa de biomasa final etapa 2 [g] T_{iS2} : temperatura final del agua etapa 2 [°C] t_{s2} : tiempo transcurrido durante la etapa 2 [s]
5. Dejar la estufa funcionando hasta que la llama sea completamente azul. Indica que en el lecho sólo queda biocarbón [31]	$m_{biochar}$: masa de biochar [g]

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Modelo de cálculo de los parámetros energéticos del protocolo WBT 4.2.3.

Parámetro	Modelo	Ecuaciones
Masa de agua ebullicida ($m_{w,b}$, g)	$m_{w,b} = m_{w,i} - m_{ce}$ donde: $m_{w,i}$ (g): masa de agua inicial = masa de agua (g) + masa de la olla (g) m_{ce} : masa de la olla (g)	(7)
Masa de agua evaporada ($m_{w,e}$, g)	$m_{w,e} = m_{w,i} - m_{w,f}$ donde: $m_{w,f}$ (g): masa de agua final = masa de agua (g) + masa de la olla (g)	(8)
Energía agua ebullicida ($E_{w,b}$, J)	$E_{w,b} = m_{w,b} \cdot C_{p,water} \cdot (T_{w,f} - T_{w,i})$ donde: $C_{p,water}$: calor específico del agua (4.18 kJ/kg/K) $T_{w,f}$: temperatura final del agua (°C) $T_{w,i}$: temperatura inicial del agua (°C)	(9)
Energía agua evaporada ($E_{w,e}$, J)	$E_{w,e} = m_{w,e} \cdot h_{fg}$ donde: h_{fg} : calor latente de evaporación del agua (2260 kJ/kg)	(10)
Energía total suministrada al agua ($E_{w,t}$, J)	$E_{w,t} = E_{w,b} + E_{w,e}$	(11)
Masa de biomasa consumida ($m_{bms,c}$, g)	$m_{bms,c} = m_{bms,i} - m_{bms,f}$ donde: $m_{bms,i}$: masa de biomasa inicial (g) $m_{bms,f}$: masa de biomasa final (g)	(12)
Masa de biomasa consumida seca ($m_{bms,c,d}$, g)	$m_{bms,c,d} = m_{bms,c} \cdot (1 - MC)$ donde: MC: contenido de humedad de la biomasa (g/g)	(13)
Rendimiento másico del biochar (Y_{char} , %)	$Y_{char} = \frac{m_{biochar}}{m_{bms,i}}$	(14)
Carbón residual (m_c , g)	$m_c = Y_{char} \cdot m_{bms,c}$	(15)
Energía para evaporar el agua de la biomasa ($E_{e,w,bms}$, J)	$E_{e,w,bms} = m_{bms,c} \cdot MC \cdot (C_{p,water} \cdot (T_{d,bms} - T_i) + h_{fg})$ donde: $T_{d,bms}$: Temperatura de secado de la biomasa (°C)	(16)
Energía suministrada por la biomasa para hervir-evaporar el agua ($E_{s,bms}$, J)	$E_{s,bms} = m_{bms,c,d} \cdot LHV_{bms} - m_c \cdot LHV_{biochar} - E_{e,w,bms}$ donde: LHV_{bms} : poder calorífico inferior de la biomasa (kJ/kg) LHV_{char} : poder calorífico inferior del biochar (kJ/kg)	(17)
Eficiencia energética de la estufa (η , %)	$\eta = \frac{E_{w,t}}{E_{s,bms}} \cdot 100$	(18)
Potencia (P, kW)	$P = \frac{m_{bms,c} \cdot LHV_{bms}}{t_{test} \cdot 1000}$ donde: t_{test} : tiempo de duración de la prueba (s)	(19)
Consumo de combustible (FC, g/min)	$FC = \frac{(m_{bms,c,d} - m_c) \cdot 60}{t_{test}}$	(20)
Consumo específico de energía (SFEC, kJ/L)	$SFEC = \frac{m_{bms,c} \cdot \rho_w \cdot LHV_{bms}}{m_{w,b} \cdot 1000}$ donde: ρ_w =densidad del agua (1000 kg/m ³)	(21)
Consumo específico de combustible (SFC, g/L)	$SFC = SFEC \cdot \frac{1000}{LHV_{bms}}$	(22)
Consumo específico de energía por unidad de tiempo (SFCT, kJ/L-min)	$SFCT = \frac{SFEC \cdot 60}{t_{test}}$	(23)

Fuente: elaboración propia.

2.4. Coeficiente de variación (CV)

El procesamiento de los resultados con la metodología CV consiste en determinar la desviación estándar y la media aritmética de la variable de interés. El cálculo de CV se realiza mediante la ecuación(24). Si, $CV \leq 5\%$, se concluye que existe una alta repetibilidad [32].

$$CV = \frac{DE}{M} \cdot 100 \quad (24)$$

donde DE y M son la desviación estándar y la media aritmética del parámetro estudiado, respectivamente.

2.5. Análisis de varianza (modelo de un solo factor categórico)

El análisis de varianza consiste en determinar la cercanía de los datos experimentales a una misma población, es decir, si la variable es repetible. En caso contrario, se evalúa si cada grupo de datos oscila alrededor de una población diferente (variable no repetible). De forma técnica, el análisis ANOVA es apoyado por los estándares internacionales ASTM-E-691 e ISO-5725 [18], [33]. Adicionalmente, el método ANOVA ha sido utilizado en trabajos previos sobre repetibilidad en instalaciones experimentales [10]. Aunque existen otros métodos más simples como el método de promedio y rango, o el método corto R&R, se ha establecido que el método ANOVA es más efectivo puesto que permite cuantificar e identificar cada fuente de variación durante el estudio [11].

Con los datos obtenidos en las 3 réplicas se calculan las variables respuesta: η [%], SFEC [kJ/L], SFC [g/L] y SFCT [kJ/L-min]. Las variables potencia - P [kW] y la tasa de consumo de biomasa - FC [g/min] son combinación lineal de la eficiencia (η) y consumo específico de combustible (SFEC), ver ecuaciones (7) – (23). Por tanto, los parámetros que se analizan desde la ANOVA son η [%], SFC [g/L], SFEC [kJ/L], y SFCT [kJ/L-min]. No obstante, las variables P y FC son analizadas por el método de CV. Todas las variables respuesta de cada uno de los experimentos realizados se consideran variables aleatorias, y su tratamiento se realiza mediante análisis experimental de un solo factor categórico. El modelo a estimar esta dado por la ecuación (25), el cual permite determinar la influencia de diferentes factores sobre la variable respuesta [34].

$$y_i = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (25)$$

donde μ corresponde a la media global, τ_i es el efecto del i -ésimo tratamiento, y ε_{ij} es el error o componente aleatorio.

En este estudio para el procesamiento de los datos y la obtención de la tabla ANOVA se utilizó el software R versión 3.6.1. Se tiene un total de 4 variables independientes (CS.S1, CS.S2, HS.S1 y HS.S2) por parámetro estudiado, y las hipótesis se plantean de la siguiente forma:

Hipótesis nula (H_0) hace referencia a que no existe diferencia significativa entre los tratamientos (réplicas), es decir, la variable respuesta estudiada es repetible para el protocolo WBT modificado.

Hipótesis alternativa (H_1) indica la existencia de una diferencia significativa entre los tratamientos, es decir, la variable respuesta estudiada no es repetible para el protocolo WBT modificado en la estufa de gasificación analizada.

El análisis de repetibilidad de la estufa TLUD se realiza con un nivel de confianza del 95%, es decir, si el valor $P < 0.05$ se rechaza la hipótesis nula. Para asegurar la confiabilidad estadística de los resultados obtenidos se realiza la validación de supuestos, es decir, se garantiza que el error o componente aleatorio es independiente e idénticamente distribuido.

Lo primero que se prueba es la no autocorrelación en los residuos, es decir, residuos independientes. Esta comprobación se realiza mediante la prueba de rachas; se plantea como hipótesis nula la no existencia de autocorrelación y como hipótesis alternativa la existencia de autocorrelación. Lo siguiente es comprobar la normalidad de los residuos mediante la prueba Jarque-Bera, se plantea como hipótesis nula la normalidad en los residuos, y como hipótesis alternativa la no normalidad en los residuos. Finalmente, se determina si los residuos tienen varianza constante mediante la prueba de Levene, la hipótesis nula consiste en que los residuos son homocedásticos, y la hipótesis alternativa es que los residuos son heterocedásticos [34].

Se determina el valor P en cada uno de los supuestos, si el valor $P < 0.05$, se rechaza la hipótesis nula. En la validación de supuestos se busca aceptar la hipótesis nula, lo que garantiza que las conclusiones realizadas sobre los resultados son estadísticamente confiables con un nivel de confianza del 95% [34].

2.6. Condiciones experimentales

Las condiciones experimentales para las pruebas de repetibilidad se presentan en la **Tabla 4**. Los principales parámetros considerados en cada una de las pruebas de la estufa, bajo el protocolo WBT 4.2.3 modificado, son: la masa inicial de agua, la temperatura inicial de agua, y la masa inicial de biomasa. Las pruebas fueron ejecutadas considerando un volumen de agua inicial equivalente a 3 L. La temperatura inicial del agua corresponde a temperatura ambiente de la ciudad de Medellín, y finalmente, se trabaja con una masa de biomasa inicial de aproximadamente 1300 g al iniciar la etapa 1, para ambos encendidos (frío y caliente).

Para realizar las pruebas de repetibilidad se realizó la caracterización de los ventiladores del aire gasificación y del aire de combustión. El aire suministrado para el proceso de gasificación de biomasa es de 146 L/min \pm 4.35 L/min. Se fija una relación aire de combustión/aire de gasificación (AC/AG) igual a 3.0, teniendo en cuenta investigaciones anteriores en la estufa de gasificación TLUD en las que se encontró un mayor rendimiento energético y menos emisiones contaminantes para la relación AC/AG=3.0 [23], por tanto, el aire suministrado por los ventiladores para la combustión del gas de gasificación equivale a 438 L/min, es decir, cada ventilador suministra 219 L/min \pm 4.35 L/min. La biomasa utilizada como combustible es madera densificada de *Pinus patula* (pellets), caracterizada en la sección 2.2. La combustión del gas de gasificación se lleva a cabo en la cámara de combustión mostrada en la **Figura 2a**.

3. Análisis de resultados

En esta sección se presenta el análisis de resultados para las variables de desempeño en la estufa basada en gasificación (TLUD), calculadas mediante el protocolo 4.2.3 modificado. Las variables son analizadas por la metodología de CV y mediante análisis de varianza (ANOVA), con el objetivo de determinar estadísticamente la repetibilidad de la instalación experimental.

Tabla 4. Condiciones experimentales para la prueba de repetibilidad (\pm Desviación Estándar)

	CS.S1	CS.S2	HS.S1	HS.S2
Masa inicial agua [g]	2981.35 \pm 17.03	2912.83 \pm 32.23	3011.78 \pm 36.33	2936.00 \pm 37.98
Temperatura inicial agua [°C]	22.13 \pm 0.43	90.60 \pm 2.16	22.00 \pm 0.22	91.30 \pm 2.72
Masa inicial biomasa [g]	1296.75 \pm 6.13	987.25 \pm 21.05	1300.75 \pm 2.75	981.50 \pm 21.67

Fuente: elaboración propia.

3.1 Método de coeficiente de variación

El CV (%) se calculó mediante el cociente entre la desviación estándar (DE) y la media aritmética (M) del parámetro objeto de estudio (ecuación (24)). En la **Tabla 5** se presentan los valores de CV [%] de los parámetros de desempeño de la estufa de gasificación (η , SFC, P, FC y SFCT) en función de cada una de las etapas del protocolo WBT 4.2.3 modificado. Los datos y resultados experimentales se presentan en la **Tabla 6**.

Tabla 5. CV (%) por etapa del protocolo WBT para cada uno de los parámetros

Parámetro\ Etapa	CS.S1	CS.S2	HS.S1	HS.S2	Promedio
η [%]	4.74	1.59	2.05	4.48	3.22 \pm 1.63
SFC [%]	7.03	2.88	4.44	7.53	5.47 \pm 2.20
P [%]	6.07	5.14	3.25	5.56	5.00 \pm 1.23
FC [%]	7.12	3.70	4.17	3.78	4.69 \pm 1.64
SFCT [%]	6.09	5.42	3.58	5.14	5.06 \pm 1.06
Promedio global [%]	4.69 \pm 0.87				

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos para SFEC no se presentan puesto que los valores para el CV son iguales a los reportados para SFC debido a que están correlacionados (ecuaciones (21) y (22)). Se obtuvo un coeficiente de variación global de 4.69% \pm 0.87%, como consecuencia, la estufa basada en gasificación se considera repetible puesto que el CV \leq 5%, es decir, se cuenta con una instalación experimental estadísticamente confiable para realizar pruebas bajo el protocolo WBT.

En la **Figura 5** se observa el CV de cada variable en las etapas CS.S1, CS.S2, HS.S1 y HS.S2. Se destaca que SFC es el parámetro con mayor CV respecto a las condiciones experimentales de la estufa, con un CV igual a 5.47% \pm 2.20%, siendo CS.S1 y HS.S2 las etapas que mayor variabilidad aportan con valores de 7.03% y 7.53%, respectivamente.

Por lo tanto, los valores alcanzados por el SFC en las etapas CS.S1 y HS.S2 (79.81 ± 4.86 y 207.38 ± 7.04 , respectivamente) tienen un nivel de confianza del 92%.

El parámetro que menor CV presenta es la eficiencia térmica con $3.22\% \pm 1.63\%$. Se observa que los valores para las cuatro etapas se encuentran entre 1.59% y 4.74% (valores inferiores a 5%).

El adecuado CV de la eficiencia permite afirmar que, la eficiencia térmica de la estufa de cocción basada en gasificación alcanza en promedio $28.95\% \pm 2.25\%$ (Tabla 7), con un nivel de confianza del 95 %.

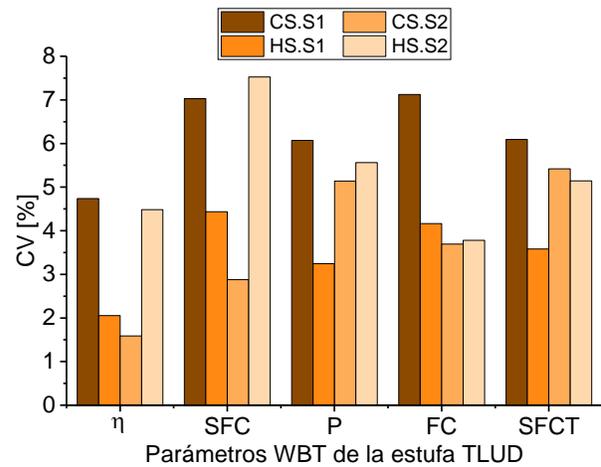


Figura 5. CV por etapa del protocolo WBT para cada uno de los parámetros. Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Resultados experimentales para los parámetros estudiados. Desviación estándar (DE) y promedio (M) para el cálculo del coeficiente de variación (CV)

Parámetro	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	DE	M
Arranque en frío – Fase 1: CS.S1					
η [%]	26.59	27.92	25.39	1.26	26.63
SFC [g/L]	79.21	74.53	85.70	5.61	79.81
P [kW]	7.64	8.00	7.09	0.46	7.58
FC [g/min]	26.32	27.87	24.16	1.86	26.12
SFCT [kJ/L-min]	171.94	181.82	160.93	10.45	171.57
Arranque en frío – Fase 2: CS.S2					
η [%]	30.70	31.09	30.12	0.49	30.64
SFC [g/L]	202.34	198.43	209.95	5.86	203.57
P [kW]	8.13	7.71	8.55	0.42	8.13
FC [g/min]	28.94	27.85	29.99	1.07	28.93
SFCT [kJ/L-min]	189.37	181.26	201.78	10.34	190.80
Arranque en caliente – Fase 1: HS.S1					
η [%]	27.17	28.23	28.07	0.57	27.82
SFC [g/L]	79.04	77.25	72.49	3.38	76.26
P [kW]	7.86	7.90	7.45	0.25	7.74
FC [g/min]	27.38	27.51	25.51	1.12	26.80
SFCT [kJ/L-min]	173.55	179.27	166.88	6.20	173.23
Arranque en caliente – Fase 2: HS.S2					
η [%]	34.07	32.77	31.15	1.46	32.66
SFC [g/L]	184.99	198.83	215.01	15.03	199.61
P [kW]	8.62	8.69	9.51	0.50	8.94
FC [g/min]	31.26	31.38	33.41	1.21	32.02
SFCT [kJ/L-min]	197.77	205.26	218.80	10.66	207.28

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Resultados de eficiencia térmica (η , %) por etapa del protocolo WBT modificado en las 3 réplicas (\pm desviación estándar)

Réplica	Observación	CS.S 1	CS.S 2	HS.S 1	HS.S2
1	1	26.52	30.70	27.14	29.92
	2	26.57	30.69	27.18	29.91
	3	26.69	30.70	27.19	29.94
2	1	27.88	31.09	28.16	32.78
	2	27.85	31.09	28.22	32.77
	3	28.02	31.09	28.31	32.76
3	1	25.33	30.14	26.34	31.13
	2	25.37	30.12	26.38	31.14
	3	25.48	30.11	26.43	31.17
Promedio por etapa		26.63 ± 1.10	30.64 ± 0.42	27.26 ± 0.80	31.28 ± 1.14
Promedio global		28.95 ± 2.25			

Fuente: elaboración propia.

3.2 Método de coeficiente de variación

El análisis estadístico se basa en un solo factor categórico con tres niveles. Los niveles son las réplicas 1, 2 y 3 de la caracterización de la estufa bajo el protocolo WBT 4.2.3 modificado. El objetivo es evaluar el efecto individual de las réplicas sobre las variables respuesta independientes asociadas a cada una de las etapas del protocolo WBT (CS.S1, CS.S2, HS.S1, y HS.S2). La repetibilidad de cada parámetro se determinó mediante análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de confianza del 95% (valor $P > 0.05$). En la **Tabla 6** se presenta el resumen del análisis de varianza para la η [%], SFEC [kJ/L], SFC [g/L] y SFCT [kJ/L-min]. Adicionalmente se realizó la validación de los supuestos: independencia, normalidad y varianza constante en los residuos, con el fin de garantizar la validez de los resultados. En las **Tablas 8, 9, 10** se presentan los datos experimentales para el análisis de varianza. En las **Tablas 11, 12, y 13** contienen las tablas ANOVA para cada uno de los parámetros analizados.

Tabla 8. Resultados de consumo específico de energía (SFEC, kJ/L) por etapa del protocolo WBT en las 3 réplicas (\pm desviación estándar)

Réplica	Observación	CS.S1	CS.S2	HS.S1	HS.S2
1	1	1507.34	3849.08	1504.04	3963.48
	2	1507.39	3850.40	1504.08	3964.29
	3	1507.29	3852.11	1504.13	3964.97
2	1	1418.11	3775.12	1470.03	3782.11
	2	1418.54	3775.76	1470.08	3783.67
	3	1418.02	3777.71	1469.98	3785.37
3	1	1630.59	3993.04	1517.93	4090.87
	2	1631.03	3995.41	1517.83	4091.84
	3	1630.81	3997.50	1517.73	4092.12
Promedio por etapa		1518.79 ± 92.45	3874.01 ± 96.51	1497.31 ± 21.31	3946.52 ± 133.99
Promedio global		2709.16 ± 1221.85			

Tabla 9. Resultados de consumo específico de combustible (SFC, g/L) por etapa del protocolo WBT en las 3 réplicas (\pm desviación estándar)

Réplica	Observación	CS.S1	CS.S2	HS.S1	HS.S2
1	1	79.21	202.26	79.03	208.28
	2	79.21	202.33	79.04	208.32
	3	79.21	202.42	79.04	208.35
2	1	74.52	198.38	77.25	198.74
	2	74.54	198.41	77.25	198.83
	3	74.51	198.51	77.25	198.92
3	1	85.69	209.83	79.77	214.97
	2	85.71	209.95	79.76	215.02
	3	85.70	210.06	79.75	215.03
Promedio por etapa		79.81 ± 4.86	203.57 ± 5.07	78.68 ± 1.12	207.38 ± 7.04
Promedio global		142.36 ± 64.21			

Tabla 10. Resultados de consumo específico de combustible por unidad de tiempo (SFCT, kJ/L-min) por etapa del protocolo WBT en las 3 réplicas (\pm desviación estándar)

Réplica	Observación	CS.S1	CS.S2	HS.S1	HS.S2
1	1	171.94	189.30	173.54	234.99
	2	171.95	189.36	173.55	235.04
	3	171.93	189.45	173.55	235.08
2	1	181.81	181.21	179.27	205.18
	2	181.86	181.24	179.28	205.26
	3	181.80	181.33	179.27	205.35
3	1	160.91	201.67	166.88	218.76
	2	160.96	201.79	166.88	218.81
	3	160.93	201.89	166.88	218.83
Promedio por etapa		171.57 \pm 9.05	190.80 \pm 8.95	173.23 \pm 5.37	219.70 \pm 12.91
Promedio global		188.83 \pm 21.61			

Tabla 11. Tabla ANOVA para la η (%) por etapa del protocolo WBT

Etapa	Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor P*
CS.S1	Réplica	1	2.1500	2.1500	2.0192	0.1983
	Residual	7	7.4534	1.0648		
CS.S2	Réplica	1	0.4930	0.4930	2.8673	0.1342
	Residual	7	0.9278	0.1325		
HS.S1	Réplica	1	0.9286	0.9286	1.5303	0.2560
	Residual	7	4.2478	0.6068		
HS.S2	Réplica	1	2.2432	2.2432	2.0491	0.1954
	Residual	7	9.9812	1.4259		

* Nivel de confianza del 95%

Tabla 12. Tabla ANOVA para el SFEC (kJ/L) por etapa del protocolo WBT

Etapa	Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor P*
CS.S1	Réplica	1	22865	22864.8	3.5168	0.1029
	Residual	7	45511	6501.6		
CS.S2	Réplica	1	31443	31442.9	5.1095	0.05829
	Residual	7	43076	6153.7		
HS.S1	Réplica	1	283.4	283.4	0.5921	0.4668
	Residual	7	3350.4	478.63		
HS.S2	Réplica	1	24331	24331	1.4279	0.271
	Residual	7	119282	17040		

* Nivel de confianza del 95%

Tabla 13. Tabla ANOVA para el SFCT (kJ/L-min) por etapa del protocolo WBT

Etapa	Fuente de variación	Grados de libertad	Suma Cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor P *
CS.S1	Réplica	1	181.68	181.68	2.686	0.1452
	Residual	7	473.48	67.64		
CS.S2	Réplica	1	231.13	231.129	3.9447	0.08739
	Residual	7	410.15	58.592		
HS.S1	Réplica	1	66.724	66.724	2.8462	0.1355
	Residual	7	164.104	23.443		
HS.S2	Réplica	1	395.21	395.21	2.9501	0.1296
	Residual	7	937.76	133.97		

* Nivel de confianza del 95%

Para asegurar la confiabilidad de los resultados, se realizó la validación de supuestos (independencia, normalidad y varianza constante) sobre los residuos de cada una de las variables analizadas. Cada una de las validaciones se realizó con un nivel de confianza del 95%. En la [Tabla 14](#), [Tabla 15](#) y [Tabla 16](#) se presentan los resultados de la validación de supuestos para η (%), SFEC (kJ/L) y SFCT (kJ/L-min), respectivamente. Se concluye que los resultados obtenidos son estadísticamente confiables con un nivel de confianza del 95%, puesto que, el valor $P > 0.05$ en todos los casos, por lo que se acepta la hipótesis nula, es decir, se garantiza que el error o componente aleatorio es independiente e idénticamente distribuido (residuos independientes, normales y con varianza constante).

Tabla 14. Validación de supuesto del modelo para la η (%)

Etapa	Independencia residuos ^a	Normalidad residuos ^b	Varianza constante residuos ^c
	Valor P *		
CS.S1	0.1266	0.0880	0.9833
CS.S2	0.1266	0.0930	0.4883
HS.S1	0.4450	0.0930	0.4883
HS.S2	0.4450	0.0965	0.7604

* Nivel de confianza del 95%. ^a Prueba de rachas. ^b Prueba Jarque-Bera. ^c Prueba Levene

Fuente: elaboración propia.

La tabla ANOVA y validación de supuestos para SFC no se presentan puesto que los valores P obtenidos son iguales a los de SFEC debido a que están correlacionados (ecuación (22)).

Tabla 15. Validación de supuesto del modelo para el SFEC (kJ/L)

Etapa	Independencia residuos ^a	Normalidad residuos ^b	Varianza constante residuos ^c
	Valor P *		
CS.S1	0.1266	0.0935	0.5150
CS.S2	0.1266	0.0960	0.7704
HS.S1	0.4450	0.0950	0.5246
HS.S2	0.4450	0.0965	0.4518

* Nivel de confianza del 95%.

^a Prueba de rachas. ^b Prueba Jarque-Bera. ^c Prueba Levene

Fuente: elaboración propia.

Tabla 16. Validación de supuesto del modelo para el SFCT (kJ/L-min)

Independencia residuos ^a	Normalidad residuos ^b	Varianza constante residuos ^c
Valor P *		
1.0000	0.1050	0.4999
0.1266	0.0945	0.7361
0.1266	0.0985	0.6980
0.4450	0.1070	0.4720

* Nivel de confianza del 95%.

^a Prueba de rachas. ^b Prueba Jarque-Bera. ^c Prueba Levene

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los resultados del análisis de varianza presentados en la [Tabla 17](#), se concluye que la estufa de gasificación TLUD es repetible con un nivel de confianza del 95%. La repetibilidad se cumple para las variables respuesta en cada una de las etapas del protocolo WBT 4.2.3 modificado, puesto que el valor $P > 0.05$ se cumple en todos los casos.

Tabla 17. Resumen del análisis de varianza (ANOVA) para la repetibilidad de la estufa de gasificación TLUD

Variable	Etapa	Valor P *	Hipótesis H ₀	¿Es repetible la estufa para esta variable y etapa?
η [%]	CS.S1	0.1983	No rechazo	Si
	CS.S2	0.1342	No rechazo	Si
	HS.S1	0.2560	No rechazo	Si
	HS.S2	0.1954	No rechazo	Si
SFEC [kJ/L]	CS.S1	0.1029	No rechazo	Si
	CS.S2	0.0583	No rechazo	Si
	HS.S1	0.4668	No rechazo	Si
	HS.S2	0.2710	No rechazo	Si
SFC [g/L]	CS.S1	0.1029	No rechazo	Si
	CS.S2	0.0583	No rechazo	Si
	HS.S1	0.2971	No rechazo	Si
	HS.S2	0.2710	No rechazo	Si
SFCT [kJ/L-min]	CS.S1	0.1452	No rechazo	Si
	CS.S2	0.0874	No rechazo	Si
	HS.S1	0.1355	No rechazo	Si
	HS.S2	0.1296	No rechazo	Si

* Nivel de confianza del 95%

Fuente: elaboración propia.

Con respecto a la validación de supuestos presentada en las Tablas 14 a 16 los resultados son estadísticamente confiables. Por tanto, es posible asegurar que los parámetros de funcionamiento dependientes del operario (parámetros controlables tales como la estandarización y reproducibilidad de los procedimientos y mediciones realizadas), y el funcionamiento de la estufa de gasificación varían de forma mínima entre experimentos.

4. Conclusiones

En este trabajo se presentó una metodología sencilla y confiable basada en el coeficiente de variación y en el análisis ANOVA, para el estudio de la repetibilidad de estufas de cocción a biomasa, aplicado a una estufa desarrollada en la Universidad de Antioquia que opera bajo gasificación (estufa tipo TLUD). Las variables respuesta asociadas al desempeño energético de la estufa tipo TLUD son la eficiencia (η , %), la potencia térmica (P, kW), el consumo de combustible (FC, g/min), el consumo específico de combustible (SFC, g/L), el consumo específico de energía (SFEC, kJ/L), y el consumo específico de energía por unidad de tiempo (SFCT, kJ/L-min). El análisis de la repetibilidad de la estufa mediante estas variables se llevó a cabo siguiendo dos metodologías: a) el coeficiente de variación de la estufa (CV), y b) el análisis de varianza con un nivel de confianza del 95%. Mediante el análisis de CV se obtuvo un CV promedio global de $4.69\% \pm 0.87\%$. Como el CV

$\leq 5\%$, se concluye que la estufa TLUD es repetible. Para el análisis ANOVA, los valores P de las variables estudiadas son mayores a 0.05, por lo tanto, se acepta la hipótesis de que las medias de las diferentes réplicas son iguales. Es decir, se concluye que la estufa de gasificación es repetible con un nivel de confianza del 95%. Dicha conclusión se apoya en la validación de supuestos, donde todas las variables cumplieron con independencia, normalidad y varianza constante en los residuos.

La eficiencia térmica de la estufa de gasificación TLUD alcanza en promedio $\sim 29\% \pm 2.25\%$ bajo las condiciones de operación evaluadas en este trabajo, usando pellets de madera como combustible, con flujo de aire de gasificación ~ 146 L/min, y flujo de aire de combustión del gas de ~ 438 L/min. Esta eficiencia térmica es superior en un 107% frente a estufas tradicionales tipo 3 piedras con eficiencias térmicas de $\sim 14\%$.

La metodología y los resultados de este estudio constituyen el fundamento teórico para evaluar futuros desarrollos de estufas de cocción a biomasa, con el fin de garantizar la veracidad de los resultados encontrados en dichos prototipos probados a nivel de laboratorio. Además, es posible realizar comparaciones precisas con otras estufas de gasificación bajo el protocolo WBT.

El desarrollo de estufas avanzadas de cocción a biomasa en Colombia es aún incipiente. Por lo tanto, como trabajos futuros se propone la caracterización de diferentes diseños de cámara de combustión que maximicen la eficiencia y disminuyan las emisiones específicas; se evaluará el efecto del flujo volumétrico del aire de gasificación, y relaciones aire-combustión/aire-gasificación; además de la caracterización fisicoquímica del material particulado.

Financiación

Sistema General de Regalías (Colombia), proyecto “Investigación: Evaluación de la reducción de emisiones contaminantes y GEI en una estufa de cocción basada en gasificación de biomasa, Antioquia”, códigos BPIN: 2020000100500, PRG2022-51570.

Contribuciones de los autores

J. Gutiérrez: Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Redacción – borrador original. E. Chica: Redacción – revisión y edición, Adquisición de fondos. J. F. Pérez: Conceptualización, Adquisición de fondos, Supervisión, Redacción – revisión y edición.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Referencias

- [1] Ministerio de Minas y Energías, “Programa De Uso Racional Y Eficiente De Energía Y Fuentes No Convencionales – PROURE. República de Colombia.”
- [2] “Ministerio de Minas y Energía, Unidad de Planeación Minero-Energética. Plan Energético Nacional 2020-2050. La transformación energética que habilita el desarrollo sostenible. 2020.” Bogotá Colombia, 2020.

- [3] Banco Mundial, “Área de tierra (kilómetros cuadrados) - Colombia.” [En línea]. Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/AG.LND.TOTL.K2?locations=CO>
- [4] E. Sánchez-Triana, K. Ahmed, A. Yewande, *Prioridades ambientales para la reducción de la pobreza en Colombia: Un análisis ambiental del país para Colombia*. Banco Mundial, 2007.
- [5] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “Lineamientos para un programa nacional de estufas eficientes para cocción con leña. República de Colombia,” 2015.
- [6] Global Alliance for Clean Cookstoves, “The Water Boiling Test,” vol. 2, no. January 2013, 2014.
- [7] S. F. Household Energy and Health Programme, “Controlled Cooking Test (CCT),” no. August, pp. 1–8, 2004.
- [8] M. DeFoort, C. L’Orange, C. Kreutzer, N. Lorenz, W. Kamping, J. Alders, “Stove Manufacturers Emissions & Performance Test Protocol (EPTP),” Colorado State University, p. 30, 2009.
- [9] Quality and Technical Supervision Bureau of Beijing Municipality, “General specifications for biomass household stoves - China,” 2008.
- [10] Y. A. Lenis, A. F. Agudelo, J. F. Pérez, “Analysis of statistical repeatability of a fixed bed downdraft biomass gasification facility,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 51, no. 1–2, pp. 1006–1016, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.09.046>
- [11] H. Gutierrez, *Control estadístico de la calidad y Seis Sigma*, 3re ed. Mcgrawhill, 2013.
- [12] Y. Wang, M. D. Sohn, A. J. Gadgil, Y. Want, K. M. Lask, and T. W. Kirchstetter, “How many replicate tests do I need? - Variability of cookstove performance and emissions has implications for obtaining useful results,” Lawrence Berkeley national Laboratory, no. 500, 2013.
- [13] C. L’Orange, D. Leith, J. Volckens, M. DeFoort, “A quantitative model of cookstove variability and field performance: Implications for sample size,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 72, pp. 233–241, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.10.031>

- [14] T. Makonese, "Heterogeneous stove testing methods for the evaluation of domestic solid-fuel cookstoves," *International Energy Journal*, vol. 18, no. 2, pp. 191–205, 2018.
- [15] Clean Cooking Alliance, "Stove and Fuel Testing - FAQ."
- [16] F. Fachinger, F. Drewnick, R. Gieré, S. Borrmann, "How the user can influence particulate emissions from residential wood and pellet stoves: Emission factors for different fuels and burning conditions," *Atmospheric Environment*, vol. 158, pp. 216–226, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.03.027>
- [17] G. Coulson, R. Bian, E. Somervell, "An investigation of the variability of particulate emissions from woodstoves in New Zealand," *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 15, no. 6, pp. 2346–2356, 2015, doi: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.02.0111>
- [18] ASTM-E691, "Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method".
- [19] R. Trojanowski, T. Butcher, G. Wei, Y. Celebi, "Repeatability in Particulate and Gaseous Emissions from Pellet Stoves for Space Heating," *Energy and Fuels*, vol. 32, no. 3, pp. 3543–3550, 2018, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03977>
- [20] C. Keily De La Hoz, J. F. Pérez, E. L. C. Arrieta, "Design of a top-lit up-draft micro-gasifier biomass cookstove by thermodynamic analysis and fluent modeling," *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 7, no. 4, pp. 2172–2187, 2017, doi: <https://doi.org/10.20508/ijrer.v7i4.6268.g7265>
- [21] E. Llamosa, Marcela. Botero, "Promedios y rangos para el aseguramiento de la calidad de los resultados de calibración de acuerdo con la norma técnica NTC-ISO/IEC 17025," *Scientia et Technica*, no. 35, pp. 455–460, 2007, doi: <https://doi.org/10.22517/23447214.5479>
- [22] J. F. Pérez, M. R. Pelaez-Samaniego, M. Garcia-Perez, "Torrefaction of Fast-Growing Colombian Wood Species," *Waste Biomass Valor*, vol. 10, no. 6, pp. 1655–1667, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0164-y>
- [23] J. Gutiérrez, E. L. Chica, J. F. Pérez, "Parametric Analysis of a Gasification-Based Cookstove as a Function of Biomass Density, Gasification Behavior, Airflow Ratio, and Design," *ACS Omega*, vol. 7, no. 9, pp. 7481–7498, 2022, doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05137>
- [24] T. H. E. United and S. Of, *Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice for Design*, 23rd ed., vol. 552, no. 1. Cincinnati, Ohio: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1997.
- [25] T. de P. Protásio, "Brazilian Lignocellulosic Wastes for Bioenergy Production: Characterization and Comparison with Fossil Fuels," vol. 8, no. 1, pp. 1166–1185, 2013.
- [26] H. E. Díez, J. F. Pérez, "Physicochemical Characterization of Representative Firewood Species Used for Cooking in Some Colombian Regions," *International Journal of Chemical Engineering*, vol. 2017, pp. 1–13, 2017, doi: <https://doi.org/10.1155/2017/4531686>
- [27] Y. A. Lenis and J. F. Perez, "Estudio del Proceso de Gasificación de Biomasa en Lecho Fijo Equicorriente," Universidad de Antioquia, 2013.
- [28] J. Porteiro, D. Patiño, J. Collazo, E. Granada, J. Moran, J. L. Miguez, "Experimental analysis of the ignition front propagation of several biomass fuels in a fixed-bed combustor," *Fuel*, vol. 89, no. 1, pp. 26–35, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.01.024>
- [29] M. Horttanainen, J. Saastamoinen, P. Sarkomaa, "Operational Limits of Ignition Front Propagation against Airflow in Packed Beds of Different Wood Fuels," *Energy & Fuels*, vol. 16, pp. 676–686, 2002.
- [30] E. Díez, I. Gómez, J. Pérez, "Mass, energy, and exergy analysis of the microgasification process in a top-lit updraft reactor: effects of firewood type and forced primary airflow," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 29, pp. 82–91, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.07.003>
- [31] S. Varunkumar, "Packed bed gasification-combustion in biomass based domestic stoves and combustion systems," tesis doctoral, Indian Institute of Science, 2014.

[32] F. Klausner et al., “Emission characterization of modern wood stoves under real-life oriented operating conditions,” *Atmospheric Environment*, vol. 192, no. April 2018, pp. 257–266, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.08.024>

[33] J. Mandel, “Repeatability and Reproducibility,” *Journal of Quality Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 74–85, 1999, doi: <https://doi.org/10.1080/00224065.1972.11980520>

[34] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments by Douglas Montgomery: A Supplement for Using JMP®*, Second edi., vol. 46, no. 2. Arizona: LIMUSA, S.A, 2014. doi: <https://doi.org/10.1080/00224065.2014.11917962>