	<b>UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA</b>			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	<b>FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO</b>	<b>F-AC-DBL-007</b>	<b>08-07-2021</b>	<b>B</b>
Dependencia	Aprobado		Pág.	
<b>DIVISIÓN DE BIBLIOTECA</b>	<b>SUBDIRECTOR ACADEMICO</b>		<b>1(89)</b>	

## RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

<b>AUTORES</b>	Miguel Ángel Pino Cadena		
<b>FACULTAD</b>	Facultad de ingenierías		
<b>PLAN DE ESTUDIOS</b>	Ingeniería Mecánica		
<b>DIRECTOR</b>	MSc. Lisneider Sánchez Ascanio		
<b>TÍTULO DE LA TESIS</b>	Análisis del proceso de gasificación, como principio base para el desarrollo de estufas tradicionales que usan biomasa residual proveniente de la región del Catatumbo, Norte de Santander.		
<b>TITULO EN INGLES</b>	Analysis of the gasification process, as a basic principle for the development of traditional stoves that use residual biomass from the Catatumbo region, Norte de Santander		
<b>RESUMEN</b> (70 palabras)			
<p>El presente análisis se centró en estudiar la gasificación teórica de biomasa vegetal residual y sus propiedades energéticas en la región del Catatumbo, Norte de Santander. Las simulaciones en DWSIM evaluaron variables influyentes, concluyendo que estufas basadas en biomasa son eficientes para cocinar en Catatumbo. Se recomiendan estudios experimentales para mayor precisión y evitar generalizaciones. Considerar la humedad en la gasificación es crucial para evitar pérdidas de energía</p>			
<b>RESUMEN EN INGLES</b>			
<p>This analysis focused on studying the theoretical gasification of residual plant biomass and its energetic properties in the Catatumbo region, Norte de Santander. The DWSIM simulations evaluated influential variables, concluding that biomass-based stoves are efficient for cooking in Catatumbo. Experimental studies are recommended for greater precision and to avoid generalizations. Considering humidity in gasification is crucial to avoid energy losses</p>			
<b>PALABRAS CLAVES</b>	Biomasa, Gasificación, Catatumbo, Ignición, Cocinas tradicionales.		
<b>PALABRAS CLAVES EN INGLES</b>	Biomass, Gasification, Catatumbo, Ignition, Traditional kitchens.		
<b>CARACTERÍSTICAS</b>			
PÁGINAS: 89	PLANOS: 0	ILUSTRACIONES: 14	CD-ROM: 1



**Análisis del proceso de gasificación, como principio base para el desarrollo de estufas tradicionales que usan biomasa residual proveniente de la región del Catatumbo, Norte de Santander.**

**Miguel Ángel Pino Cadena**

**Facultad de ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña**

**Ingeniería Mecánica**

**Director: MSc. Lisneider Sánchez Ascanio**

**Co-Director: MSc. Daniel Andrés Quintero Coronel**

**09 de junio de 2023**

## **Tabla de contenido.**

1. Análisis del proceso de gasificación, como principio base para el desarrollo de estufas, usando biomasa residual como combustible proveniente de la región del Catatumbo, Norte de Santander .....	8
1.1 Planteamiento del problema.....	8
1.2 Formulación del problema.....	9
1.3 Objetivos.....	9
1.3.1 Objetivo general.....	9
1.3.2 Objetivos específicos.....	10
1.4 Justificación.....	10
1.5 Delimitación.....	12
1.5.1 Delimitación geográfica.....	12
1.5.2 Delimitación temporal.....	12
1.5.3 Delimitación conceptual.....	12
1.5.4 Delimitación operativa.....	13
2. Marco referencial.....	14
2.1 Marco histórico.....	14
2.1.1 Antecedentes internacionales.....	14
2.1.2 Antecedentes a nivel nacional.....	17
2.2 Marco contextual.....	22
2.3 Marco conceptual.....	26
2.3.1 Oxidación.....	26

	3
2.3.2 Eco estufas o estufas mejoradas.....	26
2.3.3 Métodos termoquímicos.....	26
2.3.4 Ignición.....	27
2.3.5 Gasificación de biomasa.....	27
2.3.6 Reacciones endotérmicas.....	27
2.3.7 Reacciones exotérmicas.....	28
2.3.8 Poder calorífico.....	28
2.3.9 Poder calorífico superior.....	28
2.3.10 poder calorífico inferior.....	29
2.3.11 Reacción química.....	29
2.4 Marco teórico.....	29
2.4.1 Biomasa.....	29
2.4.2 Gasificación.....	31
2.5. Marco legal.....	37
3. Diseño metodológico.....	39
3.1 Tipo de investigación.....	39
3.2 Población y muestra.....	39
3.2.1 Población.....	39
3.2.2 Muestra.....	39
4. Resultados.....	40

4.1. Desarrollar un análisis teórico que permita la identificación y caracterización del proceso de gasificación de la biomasa vegetal residual, detallando sus etapas y las propiedades del gas, así como su influencia en una estufa gasificadora. ....	40
4.1.1. Determinar la potencia térmica requerida para la cocción de alimentos para grupos familiares integrados en promedio por 4 personas.....	40
4.1.2. Realizar un análisis teórico de las condiciones del agente de gasificación que mejoran las propiedades energéticas del gas de síntesis. ....	44
4.1.3. Desarrollar un análisis comparativo de estufas gasificadoras, identificando condiciones de operación, dimensiones y potencia térmica. ....	54
4.2. Analizar las características energéticas de la biomasa de la zona de Catatumbo, mediante una revisión estructurada de la literatura, permitiendo la determinación de sus propiedades y su influencia sobre una estufa gasificadora. ....	57
4.2.1. Identificar los cultivos agrícolas de la subregión del Catatumbo con mayor potencial para la generación de biomasa residual. (disponibilidad, distribución, composición química, descartar lo que no es bueno gasificar).....	57
4.2.2. Estimar el potencial energético de la biomasa residual, así como la identificación de las condiciones de preprocesamiento requeridos para el correcto funcionamiento del proceso de gasificación en la estufa.....	61
4.3. Evaluar el proceso de gasificación de biomasa como principio base para el desarrollo de estufas, a partir de un análisis termodinámico en el software DWSIM, involucrando un estudio de sensibilidad de las variables más influyentes del proceso. ....	63
4.3.1 Realizar una revisión en la literatura, orientada a la simulación del proceso de gasificación en diferente software de análisis termodinámico.....	64

4.3.2. Desarrollar una simulación en el software DWSIM, del proceso de gasificación de biomasa y posterior combustión del gas de síntesis obtenido. ....	67
4.3.3. Validar la simulación realizada en el software DWSIM, mediante un análisis comparativo con trabajos experimentales reportados en la literatura. ....	70
4.3.4. Efectuar un análisis de sensibilidad de las condiciones de flujo, temperatura y presión, evaluando su influencia sobre el proceso de gasificación y combustión con base en los requerimientos para la cocción de alimentos. ....	71
4.3.4.1. fracción molar según relación de equivalencia. ....	71
4.3.4.2. Alcance de la temperatura según la relación de equivalencia. ....	73
4.3.4.3. Flujo masico necesario para suplir la demanda de potencia térmica. ....	74
5. Conclusiones. ....	76
6. Recomendaciones. ....	78
Bibliografía. ....	79

## Lista de figuras.

<b>Figura 1.</b> <i>Municipios pertenecientes a la subregión del Catatumbo, Norte de Santander</i> .....	23
<b>Figura 2.</b> <i>Diagrama esquemático del funcionamiento de una estufa mejorada.</i> .....	35
<b>Figura 3.</b> <i>Personas por hogar en Norte de Santander</i> .....	41
<b>Figura 4.</b> <i>Composición química con respecto a la relación aire-combustible</i> .....	50
<b>Figura 5.</b> <i>Relación entre el poder calorífico, la humedad y la relación aire-combustible</i> .....	51
<b>Figura 6.</b> <i>Composición química respecto a la humedad en la biomasa</i> .....	52
<b>Figura 7.</b> <i>Estufa Huellas, estacionaria</i> .....	55
<b>Figura 8.</b> <i>Diagrama flujo del proceso de gasificación simulado</i> .....	65
<b>Figura 9.</b> <i>Diagrama de simulación de gasificación de biomasa usando</i> .....	66
<b>Figura 10.</b> <i>Ventana de salida del simulador del Solucionador de ecuaciones de ingeniería (EES) para el gasificador de tiro descendente</i> .....	67
<b>Figura 11.</b> <i>Diagrama de combustión planteado en DWSIM.</i> .....	69
<b>Figura 12.</b> <i>Comportamiento de los productos de la combustión de las biomásas en concordancia con la E.R. y aire teórico</i> .....	72
<b>Figura 13.</b> <i>Comportamiento la temperatura en la combustión según E.R. y aire teórico</i> .....	73
<b>Figura 14.</b> <i>comportamiento del flujo masico según la E.R. y A.T</i> .....	75

**Lista de tablas.**

<b>Tabla 1.</b> <i>Reacciones típicas de gasificación a 25°C.</i> .....	32
<b>Tabla 2.</b> <i>Condiciones ambientales y alimenticias asumidas.</i> .....	42
<b>Tabla 3.</b> <i>Propiedades fisicoquímicas e ingredientes de alimentos típicos de Norte de Santander...</i> .....	44
<b>Tabla 4.</b> <i>Parámetros de partida para la simulación</i> .....	53
<b>Tabla 5.</b> <i>Algunas estufas gasificadoras</i> .....	56
<b>Tabla 6.</b> <i>Producción anual de cultivos permanentes y transitorio en el Catatumbo.</i> .....	58
<b>Tabla 7.</b> <i>Tipos de biomasa y humedad de los cultivos agrícolas</i> .....	60
<b>Tabla 8.</b> <i>Composición química de biomasas</i> .....	61
<b>Tabla 9.</b> <i>Poderes caloríficos superiores de biomasas</i> .....	62



# **1. Análisis del proceso de gasificación, como principio base para el desarrollo de estufas, usando biomasa residual como combustible proveniente de la región del Catatumbo, Norte de Santander**

## **1.1 Planteamiento del problema.**

Colombia es un país en vía de desarrollo, donde hace falta mejorar la implementación de tecnologías que impulsen el progreso de sus regiones, especialmente en las zonas rurales. En estas áreas, debido a dificultades como la situación económica o geográfica (difícil acceso), se implementan métodos convencionales para preparar sus alimentos, los cuales ocasionan problemas de salud en las personas. Por tal motivo, es necesario investigar formas alternas a la cocción tradicional de los alimentos, de manera que pueda mejorarse la calidad de vida de los habitantes.

En la cocción, mediante estufas convencionales, a base de leña, la combustión emite una gran cantidad de material contaminante que entra en contacto directo con las personas que hacen uso de ellas, causando así, afecciones tales como, enfermedades respiratorias, que representan el 8.2% dentro de las diez enfermedades y discapacidades que causan la mortalidad en los países en desarrollo, según la organización mundial de la salud (OMS) (Herrera Viteri, 2010). Los gases liberados, como el monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), así como las emisiones de material particulado (PM), son peligrosas, pues se estima que alrededor de cuatro millones de personas mueren prematuramente cada año debido a la neumonía, enfermedad pulmonar crónica y cáncer de pulmón, a causa de la contaminación en interiores (de la Hoz C &

González, 2020), y por otra parte, este método tradicional de cocción puede consumir una gran cantidad de combustible, debido a su baja eficiencia térmica (Panwar & Rathore, 2008).

De acuerdo con lo anterior, en este trabajo se pretende analizar del proceso de gasificación, como principio base para el desarrollo de estufas, usando biomasa residual como combustible, proveniente de la región del Catatumbo. Se evaluarán las condiciones necesarias para lograr la reducción de las emisiones contaminantes a partir del desarrollo de una simulación del proceso de gasificación que permita analizar la eficiencia térmica del proceso, mientras se determina la viabilidad energética de este proceso para la cocción de alimentos.

## **1.2 Formulación del problema.**

¿Cuál será la reducción de gases contaminantes, así como el mejoramiento de la eficiencia térmica del proceso de cocción de alimentos, empleando una estufa gasificadora, respecto a las estufas tradicionales basadas en combustión directa de leña?

## **1.3 Objetivos.**

### ***1.3.1 Objetivo general.***

Analizar el proceso de gasificación, como principio base para el desarrollo de estufas tradicionales que usan biomasa residual proveniente de la región del Catatumbo, Norte de Santander.

### ***1.3.2 Objetivos específicos.***

- Desarrollar un análisis teórico que permita la identificación y caracterización del proceso de gasificación de la biomasa vegetal residual, detallando sus etapas y las propiedades del gas, así como su influencia en una estufa gasificadora.
- Analizar las características energéticas de la biomasa de la zona de Catatumbo, mediante una revisión estructurada de la literatura, permitiendo la determinación de sus propiedades y su influencia sobre una estufa gasificadora.
- Evaluar el proceso de gasificación de biomasa como principio base para el desarrollo de estufas, a partir de un análisis termodinámico en el software DWSIM, involucrando un estudio de sensibilidad de las variables más influyentes del proceso.

### **1.4 Justificación.**

“Según la alianza global para estufas limpias (GACC), las formas tradicionales de cocción están asociadas a un mayor riesgo para la salud, en especial para mujeres y niños” (Roth, 2014). Debido a que la contaminación emitida por la combustión de la biomasa genera un ambiente nocivo, principalmente en las personas que laboran en la cocina. Además de esto, la organización mundial de la salud resalta que la concentración para los contaminantes en las

estufas tradicionales está aproximadamente entre  $540\mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $610\mu\text{g}/\text{m}^3$ , los cuales exceden los niveles seguros de exposición, lo que hace necesario la modificación del proceso de cocción; por otro lado, las estufas mejoradas planteadas arrojan resultados de material particulado, alrededor de los  $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ , lo cual es lo máximo permitido por esta organización (Zamorano Bohòrquez , 2017).

Las estufas tradicionales y la gran mayoría de las estufas mejoradas funcionan con leña, lo que incide de manera notable en la deforestación. Análisis energéticos realizados en el sector rural establecen un consumo per cápita de 100 kg/persona-mes, evidenciando una gran problemática medioambiental pues la región cuenta con una población alrededor de 282,393 habitantes, de los cuales el 50% es población rural ( Sierra Vargas, Mejia B., & Guerrero F., 2011), en donde situaciones como los precios del gas natural y propano hacen que se continúe usando leña para la preparación de alimentos e ignorando la implementación de biomasa proveniente de los cultivos tanto transitorios como permanentes, los cuales podrían representar una solución a esta problemática.

Por estas razones se ha planteado una investigación acerca de las estufas gasificadoras (mejoradas), contribuyendo al conocimiento en esta área, como forma de contrarrestar los problemas actuales en la cocción de alimentos que se asocian al uso de estufas tradicionales de combustión directa de biomasa (Yogesh Mehta, 2017). Al aplicar algunas de las técnicas ya desarrolladas por otros autores, se pueden aportar al conocimiento para el diseño de equipos, y a futuro, otros investigadores evalúen el impacto de la tecnología sobre la salud y el medio ambiente a través de la puesta en marcha de esta tecnología.

## **1.5 Delimitación.**

Con el fin de poner medida a las expectativas del lector del proyecto o futuros investigadores, se han planteado las siguientes delimitaciones.

### ***1.5.1 Delimitación geográfica.***

Esta investigación se desarrollará en el municipio de Ocaña a través del asesoramiento de los docentes del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Francisco de Paula Santander, Seccional Ocaña. En el desarrollo del proyecto, se evaluarán condiciones de la biomasa, como combustible, proveniente de la región del Catatumbo.

### ***1.5.2 Delimitación temporal.***

El desarrollo del proyecto se contempla para un periodo de cuatro (4) meses, a partir de su aprobación por parte del comité curricular del programa de Ingeniería Mecánica.

### ***1.5.3 Delimitación conceptual.***

Para la comprensión del principio base de las estufas gasificadoras, así como, el análisis de estas, se aplicarán y ampliarán los siguientes conceptos:

Biomasa, impacto ambiental, salud, gasificación, pirolisis, oxidación, ignición, reacción química, calentamiento, combustión.

#### ***1.5.4 Delimitación operativa***

El análisis de una estufa operando bajo el principio de gasificación, usando biomasa como combustible, proveniente de la región del Catatumbo, se llevará a cabo a través de una simulación, empleando el software DWSIM. Además, del apoyo de los docentes del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña (UFPSO).

## **2. Marco referencial.**

### **2.1 Marco histórico.**

Estudios previos evidencian que las estufas de biomasa operando bajo el principio de gasificación han sido estudiadas por diferentes autores, buscando soluciones a diversos problemas presentados por los fogones convencionales, tanto en Colombia como en otros países. A continuación, se presentarán diversos trabajos tanto a nivel nacional como internacional, que han sido publicados en revistas científicas, donde se busca desarrollar este tipo de estufas y solucionar posibles problemáticas, teniendo en cuenta el posicionamiento futuro de esta tecnología en beneficio del ser humano y del planeta.

#### ***2.1.1 Antecedentes internacionales.***

Varunkumar et al. En el 2012 estudió la combustión en los gasificadores modernos (estufas) en relación con los defectos de la densidad del combustible, teniendo en cuenta las diferencias significativas en la tasa de combustión de carbón entre las partículas de madera y de pellets de carbón. Este estudio indica que, en el análisis individual de las partículas de carbón, la capa de ceniza que se forma naturalmente en la superficie de esta en el proceso de combustión es esencial para explicar el comportamiento de este. Además, se observó que las densidades de la capa son mucho más altas para el carbón en pellets, en comparación con el carbón de madera, lo cual desarrolla diferencias significativas en la tasa de liberación de calor (S. Varunkumar, 2012).

Kshirsagar et al. En el 2013, hacen una revisión completa sobre estufas de biomasa y un sistema enfoque para el diseño moderno, en este trabajo, la revisión cubre una discusión detallada sobre varios aspectos de las estufas de biomasa: descripción histórica, características de rendimiento, accesorios de cocción, protocolos de prueba, barreras para la difusión y adopción, y vías futuras. Según la revisión hecha en este artículo, cocinar con biocombustibles sólidos también tiene un impacto global significativo en las emisiones de gases de efecto invernadero y carbono negro, que representan del 1 al 3% de todo el calentamiento global generado por el ser humano, por esta razón muchos investigadores de todo el mundo buscan una solución de estufa de biomasa más limpia que beneficien a esta población, donde, aproximadamente la mitad de las personas en todo el mundo utilizan diferentes tipos de combustibles de biomasa para cocinar una gran cantidad de platos de diversas formas. Además, la adopción y el uso sostenido de estufas es un proceso complejo de varias etapas, en el que se utiliza de forma rutinaria más de un dispositivo, una práctica que a veces se denomina “apilamiento” (Kshirsagar & Kalamkar, 2013).

En el artículo publicado por Thomas Kirch et al en 2016, los autores estudian las propiedades de la combustión de aire primario natural y forzado de un horno de tiro superior, obteniendo como resultados que la alta capacidad de control del flujo de aire en cada una de las distintas fases de combustión de un reactor de corriente ascendente iluminada (TLUD) permite una mejora de la eficiencia del sistema de combustión y una reducción de las emisiones de la combustión incompleta, la cual es la responsable de la muerte de cuatro millones de personas anualmente alrededor del mundo (Thomas Kirch, 2016).



En el 2016 (Nguyen Van Lanh, 2016) estudió el flujo de aire en estufas gasificadoras de tiro ascendente, donde la temperatura en la zona de combustión, el contenido de hidrogeno y la cantidad de monóxido de carbono en el gas aumentaron con el incremento de flujo de aire, concluyendo que el rendimiento de bio-carbón fue mayor cuando se implementó cascarilla de arroz en lugar de aserrín.

En 2017 Yogesh Mehta et al. publicó un estudio experimental de una estufa de cocina de tiro ascendente con un enfoque en la gasificación, evaluando el rendimiento según la variación del flujo de aire primario, además de la geometría del reactor, los resultados mostraron que el contenido energético del gas productor se maximizó a una velocidad de 9 cm/s y el porcentaje de carbón restante al final de la gasificación disminuyó al aumentar el diámetro de la cámara de combustión (Yogesh Mehta, 2017).

En el 2020, (Champion, y otros, 2020) evaluaron las emisiones provocadas por las estufas gasificadoras de pellets. Para ello, se empleó el protocolo de prueba de la Organización Internacional para la Estandarización (ISO), para determinar los factores de emisión (EF) de contaminantes y mutagenicidad para una estufa diseñada a partir de combustible en pellets, de la empresa “Mimi Moto”, y para otras dos estufas de tiro forzado, Xunda y Philips HD4012, que queman pellets de cascos de madera dura o de cacahuete. Esta combinación avanzada de estufa/combustible tiene el potencial de reducir en gran medida las emisiones en comparación con una estufa tradicional, pero, requiere una ventilación adecuada para alcanzar niveles aceptables de calidad del aire interior. El potencial de un combustible homogéneo para reducir las emisiones de combustión se ilustra mediante las pruebas de emisiones en el campo en

Ruanda, donde la estufa Mimi Moto que quema pellets de madera dura, cumplió con los niveles 4 y 5 de la Organización Internacional de Normalización (ISO). En este trabajo, el autor concluyó que se recomienda una combinación cuidadosa del combustible y la estufa, para reducir las emisiones generales y la exposición de esta tecnología avanzada de estufas de biomasa.

En el año 2021, se llevó a cabo la simulación de dos procesos: la transesterificación del aceite de *Jatropha curcas* y la gasificación de la corteza de su fruto. Para esta simulación, se utilizó el software DWSim, el cual ofrece ventajas como ser de código abierto y de descarga gratuita. Los resultados obtenidos del proceso de transesterificación fueron prometedores, con altos rendimientos de productos. Se logró obtener un 11% de glicerol y un 98% de biodiesel, y además se recuperó el 46% del metanol utilizado en el proceso. Por otro lado, la composición del gas de síntesis obtenido durante la gasificación fue consistente con los datos reportados en la literatura. En términos de cantidad, se obtuvo un flujo volumétrico de gas de 92.38 m<sup>3</sup>/h, con un poder calorífico inferior de 5.67 MJ/Nm<sup>3</sup>. Estas propiedades indicaron una eficiencia del proceso del 72%. Sin embargo, durante la simulación del proceso de gasificación en DWSim, se encontraron algunas limitaciones. Para superar estas limitaciones y validar los resultados obtenidos, se realizó una comparación con el software Aspen Plus. Los resultados obtenidos en ambos simuladores fueron iguales, lo que proporcionó confiabilidad y respaldo a los resultados obtenidos con DWSim. ( Escobar Barroso, 2021).

### ***2.1.2 Antecedentes a nivel nacional.***

A través de los años, en Colombia se ha visto la necesidad de investigar nuevas tecnologías asociadas a proceso de cocción, enfocados en la evolución de los fogones que utilizan biomasa como combustible debido a que “la cocción de alimentos es una de las actividades elementales para todas las personas. Por tanto, es conveniente enfocarse en recursos energéticos con alta disponibilidad” (Keily De La Hoz C, 2017), ya que en las zonas rurales los combustibles más comúnmente utilizados hoy en día para la cocción, son de difícil acceso y de alto coste para los habitantes de regiones apartadas, quienes se ven en la necesidad de utilizar biomasa como combustible para suplir estas necesidades. “En Colombia alrededor de 1.6 millones de familia utilizan leña para cocinar, el 87.5% habitan en zonas rurales” (Keily De La Hoz C, 2017), según estudios realizados por diferentes autores, este tipo de actividades, sin ningún control de emisiones contaminantes ha traído muchos problemas a la salud de las personas que utilizan fogones convencionales a fuego abierto, como son infecciones agudas en las vías respiratorias, infecciones del oído medio, cáncer de nasofaringe, enfermedades perinatales y enfermedades oculares.

En el 2017, (Pérez, 2017) caracterizaron fisicoquímicamente algunas especies de leñas representativas *Cordia alliodora*, *Guazuma ulmifolia*, *Eucalyptus grandis* y *Pinus patula* (Gua, Nog, Euc, y Pat) de Colombia, arrojando como resultado que todas las especies estudiadas son adecuadas para el proceso de gasificación debido a sus altos contenido de material volátil y su bajo contenido en ceniza, además de hallar ventajas medio ambientales en comparación de combustibles fósiles. De los resultados obtenidos, se evidenció que un 1.0 m<sup>3</sup> cúbico de eucalipto podría sustituir 113 litros de queroseno o 120 m<sup>3</sup> de gas natural, para su aplicación energética (es decir, para cocinar). Así, el eucalipto podría evitar la producción de entre 248 y 2315 kg de CO<sub>2</sub>

en función del combustible fósil sustituido y los costes asociados al consumo de leña podrían ser seis veces más bajos que los de combustibles fósiles como el gas natural, el GLP y el queroseno.

En 2017, (Keily De La Hoz C, 2017) efectuó un trabajo llamado “Diseño de una estufa de biomasa con microgasificador de tiro ascendente con iluminación superior mediante análisis termodinámico y modelado fluido” en el que se estudia los diferentes problemas de utilizar fogones convencionales de tres piedras, como son los problemas en la salud para las personas que aún utilizan estos sistemas para la cocción de sus alimentos. Por esto, presentaron el diseño termomecánico de una estufa de biomasa. Se diseñaron, dimensionaron y simularon tres modelos mediante dinámica de fluidos computacional (CFD). El estudio permitió analizar el efecto del diseño de las estufas, las entradas de aire primario y secundario (diámetro y configuración del suministro de aire) requerido en los procesos de gasificación y combustión, respectivamente. Los principales parámetros que se tienen en cuenta en el diseño de la estufa son; la potencia térmica y el tipo de combustible. En conclusión, los parámetros analizados en la investigación y según los parámetros controlados, conllevan a un mejor rendimiento de la estufa, un mejor desempeño se refiere a una mayor eficiencia energética térmica (bajo consumo de biomasa) y menores emisiones.

En 2018, (Díez, Gómez, & Pérez, 2018) realizaron un trabajo llamado “Análisis de masa, energía y exergía del proceso de microgasificación en un reactor de corriente ascendente con iluminación superior: efectos del tipo de leña y del flujo de aire primario forzado” en el que se evaluaron cuatro especies representativas de leña de Colombia en un reactor de corriente ascendente iluminada (TLUD) bajo diferentes regímenes de gasificación. El objetivo de ese

trabajo fue realizar una caracterización termodinámica completa de la microgasificación de leña en un reactor TLUD, mediante la evaluación del efecto del tipo de leña y el flujo de aire en el proceso de gasificación por ser la principal transformación termoquímica en las cocinas de biomasa TLUD, y también, se realizó la evaluación del desempeño de masa, energía y exergía del proceso de microgasificación TLUD con respecto al tipo de leña y flujo de aire primario forzado. Una de las conclusiones de este trabajo fue que se confirmó el efecto del flujo de aire en el proceso de gasificación de biomasa TLUD. Cuando el flujo de aire aumentó, la relación de equivalencia combustible/aire ( $F_{rel}$ ), disminuyó. Un valor  $F_{rel}$  bajo da como resultado una temperatura de reacción alta porque el proceso termoquímico tiene una ligera tendencia a provocar la combustión. Sin embargo, predominó el régimen de gasificación y la mayor temperatura de reacción favoreció las reacciones químicas.

En 2019, (Chica & Pérez, 2019) diseñó y desarrolló una estufa de biomasa mejorada (IBCS) que trabaja bajo regímenes de combustión, alcanzando una eficiencia objetivo del 20%. El IBCS tiene una cámara de combustión tipo cohete con faldones alrededor de las ollas para mejorar la transferencia de calor y corriente de gas a las ollas, aumentando la eficiencia. La estufa desarrollada cumplió con características como eliminación de humo y emisiones nocivas del aire interior (cocina), versatilidad que permita cocinar varias comidas a la vez, objetivo de eficiencia térmica del 20%, seguridad temperaturas de la pared externa, e ignición de biomasa simple, rápida y segura. El prototipo definitivo de ICBS tiene capacidad para dos ollas, la olla de alta potencia, que se calienta directamente por los gases de combustión, y la olla mediana, que se coloca dentro del conducto de gas caliente. Adicionalmente, el ahorro de combustible con

respecto a la estufa de fuego de 3 piedras lleva a disminuir el costo de la energía útil de 5.37 USD/kW-h a 3.11 USD/kW-h.

En 2020, (de la Hoz C & González, 2020) realizó el análisis estadístico de repetitividad de una estufa de biomasa diseñada y construida basada en gasificación Top lit Updraft (TLUD). La variabilidad de la estufa se evaluó mediante el análisis de varianza (ANOVA). La estufa se probó bajo un protocolo de Water Boiling Test (WBT) modificado con arranques en frío y en caliente. Para ello, se realizaron tres experimentos y se midieron o calcularon tres observaciones de parámetros en cada fase.

En 2016, Rafael Andrés González et al desarrolló un programa de simulación numérica que permite comprender la conducta de la biomasa en un proceso de gasificación y las características del gas que la biomasa producirá, como la composición y el contenido energético. El lenguaje de programación con el que se desarrolló la simulación es Matlab. El software puede ser implementado en cualquier biomasa de la que se conozca su composición (C, H, O, N, S). Al comparar los resultados, se aprecia que el poder calorífico del gas resultante de la gasificación de cascarilla de café con el poder calorífico de la cascarilla de café, se puede apreciar que el proceso de gasificación en realidad redujo el contenido energético de la biomasa, lo cual es lógico evidente, ya que las leyes de la termodinámica respaldan este comportamiento; la segunda ley de la termodinámica afirma que parte de la energía se pierde irremediamente a raíz de las irreversibilidades presentes en los proceso de transformación de energía (González García, 2016).

## 2.2 Marco contextual.

El Catatumbo es una subregión del departamento de Norte de Santander que limita con la república bolivariana de Venezuela en la parte nororiental del país. Su nombre se deriva de la lengua indígena y significa "casa del trueno". De hecho, el Catatumbo es famoso por ser un lugar donde se pueden ver espectaculares tormentas eléctricas (Ó Loingsigh, 2008). Lo que convierte a este territorio en una potencia energética sin explotar. Asimismo, se caracteriza geográficamente por contar con zonas montañosas y planas en las cuales abundan las fuentes hídricas (ríos). Además, en esta zona se localizan el Parque Natural Nacional Catatumbo-Barí, el Área Natural única Los Estoraques en La Playa de Belén, la Zona de Reserva Forestal Los Motilones (Ley 2 de 1959) y los resguardos del pueblo Barí Catalaura y Motilón Bari en las cuales se asientan cerca de 3.974 indígenas que equivalen al 1.4% de la población de este territorio (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD, 2014), como se muestra en la figura 1.

**Figura 1.**

*Municipios pertenecientes a la subregión del Catatumbo, Norte de Santander.*



*Nota.* Tomado de: (Centro Nacional de Memoria Histórica, 2018)

Como se muestra en la Figura 1, la Región del Catatumbo comprende el 50% del territorio del Departamento Norte de Santander (1,100,000 hectáreas) con 11 municipios:



Abrego, Convención, El Carmen, El Tarra, Hacarí, La Playa, Ocaña, San Calixto, Sardinata, Teorama y Tibú.

Dada la falta de actividad industrial y la limitada oferta de servicios, la mayoría de los habitantes del Catatumbo dependen de las actividades agrícolas, siendo el gran potencial de la región, llegando a tener una participación promedio del 80.9%, seguido de las unidades con fines comerciales cuya participación fue 12.2%. Los otros tipos de unidades (de servicios y de industria) representaban en promedio 7.1% (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2013).

La superficie total aprovechada en siembra es de 72,669 hectáreas, las cuales producen 449,491 toneladas de alimentos, enfocándose principalmente en once (11) productos como la palma de aceite, café, cacao, yuca, plátano, caña panelera, frijol, maíz tradicional, cebolla, tomate y piña. La ganadería genera ingresos importantes a los pobladores, aunque solo la explotación tecnificada se encuentra en los llanos del municipio de Tibú (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD, 2014).

La red vial de la región permite conexiones entre centros poblados, pero tiene importantes inconvenientes causados por la diversidad del terreno, la baja capacidad vial y las condiciones de transporte, y la limitada seguridad vial. La calidad de la infraestructura limita la accesibilidad.

Estas vías son de gran importancia para llegar a la frontera con la república bolivariana de Venezuela desde el interior, conectando la región con la Ruta del Sol, el Río Magdalena y el sistema ferroviario central, dando acceso a los puertos del Caribe y al corazón del país.

El Catatumbo tiene una red vial aproximadamente de 2,000 km, de los cuales se estima que 320 km (16%) corresponden a vías primarias, 317 km (16%) a vías secundarias y 1,373 km (68%) de vías terciarias (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2013).

Según la encuesta nacional de estufas realizada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en julio 2014 se instalaron 28,238 estufas eficientes en todo el país, identificándose 14 prototipos, los cuales han estado promovidos por autoridades ambientales regionales, organizaciones no gubernamentales, autoridades regionales y locales y el sector privado ( Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). Se sabe que el once por ciento de estas estufas se han instalado en la región oriental a la cual pertenece el departamento de Norte de Santander implementado principalmente el prototipo Fundación Natura (FN) pero no se tiene conocimiento de que la subregión del Catatumbo haya sido beneficiada por estas instituciones u organizaciones. Si bien en estas eco estufas reducen el flujo másico de oxidante a la cámara de combustión, no se les da la importancia necesaria a las propiedades energéticas de la biomasa siendo fundamentales para controlar la entrada de oxígeno al sistema. Estas son unas de las razones por la cual se cree que con este proyecto se dará un paso muy importante a este tipo de tecnología en la región.

## 2.3 Marco conceptual.

Para poder comprender el funcionamiento de este proyecto, es necesario aclarar conceptos básicos como los siguientes:

**2.3.1 Oxidación.** La oxidación es la mezcla del oxígeno con otras sustancias. Es de resaltar que existen varios tipos de oxidación, lenta y rápida. La oxidación rápida ocurre en una reacción química llamada combustión, la cual produce calor y altas temperaturas y llamas significativas. Sin embargo, la oxidación lenta se caracteriza por el hecho de que la energía producida se disipa en el medio ambiente, por ejemplo: respiración, corrosión de metales.

**2.3.2 Eco estufas o estufas mejoradas.** Son una extensa serie de tipos y modelo de fogones que poseen como denominador común, brindar mejores alternativas de cocinas de fuego abierto debido a la disminución de humo en el interior de la vivienda y menor consumo de combustible, lo que se traduce en una menor emisión de gases de efecto invernadero, y mejor calidad de vida (Núñez de Balboa, 2012).

**2.3.3 Métodos termoquímicos.** Los métodos termoquímicos convierten la biomasa usando energía térmica(calor). Este procedimiento se encarga de liberar la energía contenida en la biomasa o la transforma en un producto con diferentes composiciones sólidas, líquidas y gaseosas dependiendo de la composición del producto inicial y del proceso utilizado. Un ejemplo simple, común pero ineficiente de conversión termoquímica es el uso de biomasa seca (madera, pasto) como sustituto para cocinar y calentar. (Estrada & Zapata Meneses, 2004).

**2.3.4 Ignición.** La ignición es el evento por el cual los pirógenos pueden iniciar un mecanismo que libera energía química potencial en forma de calor, el primer paso para encender la estufa. Esta liberación de energía ocurre primero en una pequeña región del espacio ocupada por el material reactivo y luego crea una onda de combustión que se propaga a través de él.

El método de encendido (ignición) son diversos: fricción del comburente con un cuerpo caliente, o con un alambre calentado eléctricamente, o con gases inertes calientes; alcanzar una radiación de suficiente potencia; aplicar una llama; aplicar una descarga eléctrica (chispa) al comburente. Todos los métodos mencionados anteriormente aumentan la temperatura iniciando la combustión que después se propaga a todo el volumen ( Moran & Shapiro, 2006).

**2.3.5 Gasificación de biomasa.** La gasificación de biomasa involucra pirólisis y oxidación fragmentada en un entorno oxidante bajo unos parámetros específicos. Conduce a productos, como Dihidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, agua y especies de hidrocarburos. El calor requerido para el secado, calentamiento y pirólisis de la biomasa es proporcionado por la oxidación parcial de la biomasa. En general, el proceso de gasificación convierte la biomasa de bajo valor en una mezcla gaseosa que contiene gas de síntesis (mezcla de  $H_2$  y  $CO$ ) y cantidades variables de metano y dióxido de carbono ( Bundschuh, 2013).

**2.3.6 Reacciones endotérmicas.** Una reacción endotérmica es aquella en la que se absorbe calor del entorno. Esto se debe a que el valor de entalpía de la reacción es positivo, lo que indica que la energía total de los productos es mayor que la energía total de los reactivos. En otras palabras, durante una reacción endotérmica, el sistema químico requiere una entrada de

calor desde el entorno para llevar a cabo la reacción. Matemáticamente, se expresa como  $\Delta H > 0$ , donde  $\Delta H$  representa el cambio de entalpía. (Alvarez Cruz & Marmolejo Correa, 2016).

**2.3.7 Reacciones exotérmicas.** Una reacción exotérmica se refiere a un tipo de reacción química en la cual se libera calor hacia el entorno. Esto se debe a que el valor de entalpía de la reacción es negativo, lo que significa que la energía total de los productos es menor que la energía total de los reactivos. En otras palabras, durante una reacción exotérmica, el sistema químico desprende calor al entorno, lo que se expresa matemáticamente como  $\Delta H < 0$ . (Alvarez Cruz & Marmolejo Correa, 2016).

**2.3.8 Poder calorífico.** Es un rasgo importante de cualquier material del que se desee obtener energía. Este valor indica la cantidad de energía disponible en el material. Su valor como combustible se determina según su poder calorífico. Se define así a la cantidad de calor que es liberada cuando una unidad de peso de combustible se quema completamente y los productos resultantes de la combustión se enfrían a una temperatura estándar de 298 K (Herrera Viteri, 2010).

**2.3.9 Poder calorífico superior.** Es la cantidad de calor que se genera a raíz de la combustión completa de 1 kilogramo de combustible a  $0^{\circ}\text{C}$  y 760 mmHg de presión, cuando todos los productos de la combustión se reducen a las mismas condiciones. Lo que genera que la humedad presente en el comburente se condense. Es decir, que el poder calorífico superior se obtiene cuando la humedad causada por la combustión seta en estado líquido (Moran & Shapiro, 2006).

**2.3.10 poder calorífico inferior.** Energía en forma de calor la cual es producto de la humedad presente en combustible dando como resultado de la combustión vapor ( Moran & Shapiro, 2006).

**2.3.11 Reacción química.** Durante un proceso químico, se generan nuevas sustancias, ya sea en su totalidad o parcialmente. Sin embargo, al final del proceso, la cantidad de materia elemental obtenida es la misma que al inicio. Este fenómeno se puede observar en las operaciones de síntesis y análisis químico, las cuales permiten determinar la composición de una muestra de materia o cómo obtener nuevos productos para satisfacer las necesidades humanas.

Las reacciones químicas ocurren debido al movimiento de las moléculas. Cuando estas moléculas colisionan entre sí con suficiente energía, los enlaces químicos se rompen y los átomos se reorganizan para formar nuevas moléculas. Por otro lado, una molécula que vibra intensamente puede descomponerse en moléculas más pequeñas. (Trujillo Aranda , 2017).

## **2.4 Marco teórico.**

**2.4.1 Biomasa.** El nombre biomasa indica un grupo variado de materiales orgánicos, tanto por su origen como por su tipo y composición, que pueden ser utilizados para producir energía al convertirla en sustancias sólidas, líquidas y gaseosas. Los biocombustibles se definen generalmente como cualquier producto derivado de la biomasa utilizado con fines energéticos, es decir, cualquier materia, generalmente sólida y gaseosa, utilizada con fines térmicos y eléctricos.

Mientras que el nombre de biocarburantes suele reservarse para los productos líquidos derivados de la biomasa (ROMERO SALVADOR , 2010).

Una clasificación de la biomasa ampliamente aceptada por diferentes autores y organizaciones, se basa en las siguientes definiciones:

(i) Biomasa natural: Se refiere a la biomasa que se produce de forma natural sin intervención humana. Estos materiales provienen de las podas de bosques o plantaciones, donde los restos de árboles y plantas caídas se consideran biomasa natural.

(ii) Biomasa residual: Se genera como resultado de actividades humanas y puede provenir de diferentes fuentes, como actividades agrícolas, forestales o de industrias agroalimentarias. Estos residuos se utilizan como biomasa para su aprovechamiento energético.

(iii) Cultivos energéticos: Son cultivos que se siembran específicamente en terrenos dedicados exclusivamente a la producción de biomasa. Estos cultivos se desarrollan con el propósito de obtener biomasa para su uso como fuente de energía.

(iv) Biomasa marina: Se refiere a los organismos vegetales que se encuentran en entornos marinos, como algas, hierbajos marinos y juncos. Estos organismos se pueden utilizar como biomasa para la producción de energía. (Morice Montoya, 2017).

Así mismo, otra forma de clasificarlas aceptada por la comunidad científica es:

(i) Biomasa vegetal: se refiere al resultado directo del proceso de conversión de material inorgánico a material orgánico con la ayuda de la intervención energética de los rayos solares (fotosíntesis) en los vegetales.

(ii) Biomasa animal: se obtiene a través de los enlaces (secuencia) biológicos de los seres vivos que se alimentan de la biomasa vegetal.

**2.4.2 Gasificación.** El proceso de gasificación de biomasa consiste en la conversión de compuestos orgánicos sólidos/líquidos en fases gas/vapor y sólidas. La fase gaseosa, comúnmente conocida como 'syngas', es un combustible gaseoso derivado de materiales ricos en carbono que tiene un poder calorífico intermedio y puede usarse para la generación de energía y la producción de biocombustibles. La fase sólida, denominada "char", comprende la fracción orgánica no convertida y los inertes presentes en la biomasa tratada. Esta conversión es una oxidación parcial del carbono en la materia prima y generalmente se lleva a cabo en presencia de un agente gasificante como aire, oxígeno, vapor o dióxido de carbono. La gasificación de biomasa se considera una forma de aumentar el uso de esta para la producción de energía y permitir su uso generalizado. El desarrollo de los procesos de gasificación de biomasa está impulsado por la creciente conciencia de los impactos climáticos potenciales de los combustibles fósiles y el aumento continuo de los precios del petróleo.

El gas de síntesis (syngas) producido es una mezcla de gases de monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), junto con hidrocarburos ligeros como etano y propano, además de hidrocarburos como lo es el alquitrán, producido a temperaturas entre 250 y 300 °C. En el gas de síntesis también pueden estar presentes gases



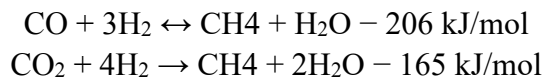
indeseables como el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) y el ácido clorhídrico (HCl) o gases inertes como el nitrógeno (N<sub>2</sub>). Su presencia depende de la biomasa tratada y de las condiciones de operación del proceso de gasificación. El valor calorífico mínimo (LHV) del gas de síntesis oscila entre 4 y 13 MJ/Nm<sup>3</sup>, según la materia prima, la tecnología de gasificación y las condiciones de funcionamiento (Molino, Chianese, & Musmarra, 2015).

Las principales reacciones de la gasificación (Tabla 1), son endotérmicas y la energía necesaria para su aparición es, generalmente, proporcionada por la oxidación de parte de la biomasa, a través de una fase alotérmica la cual es un proceso donde se suministra calor de forma externa al reactor de gasificación (cámara de combustión), evitando de esta manera el uso de aire y por tanto reduciendo drásticamente la cantidad de nitrógeno en el gas de síntesis. O la fase autotérmica que es un proceso para producir gas de síntesis, mediante la oxidación parcial de los hidrocarburos, introducidos con oxígeno y vapor (combustión parcial).

**Tabla 1.**

Reacciones típicas de gasificación a 298 K.

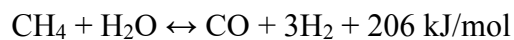
<b>Reacciones</b>
<b>Reacción del Carbono (C)</b>
$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO + 172 \text{ kJ/mol}$
$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 + 131 \text{ kJ/mol}$
$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4 - 74.8 \text{ kJ/mol}$
$C + 0.5O_2 \leftrightarrow CO - 248 \text{ kJ/mol}$
<b>Reacciones de Oxidación (O)</b>
$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2 - 284 \text{ kJ/mol}$
$CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2H_2O - 803 \text{ kJ/mol}$
$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O - 242 \text{ kJ/mol}$
<b>reacción de Cambio</b>
$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 - 41.2 \text{ kJ/mol}$
<b>Reacciones de Metanacion</b>
$2CO + 2H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2 - 247 \text{ kJ/mol}$




---

**Reacciones de Reformado de vapor**

---



*Nota.* Información tomada de (González García, 2016).

A continuación, se muestra los pasos principales del proceso de gasificación los cuales son:

(i) Secado ( $T > 423 \text{ K}$ ). El secado consiste en la evaporación del agua contenida en el comburente; pues por cada kilogramo de agua que se desee eliminar es requerido aproximadamente 2,242 kJ de energía extra la cual no es recuperable. La energía en forma de

(iii) Oxidación o Combustión (973-1773) K. La energía requerida para el proceso de gasificación a través de la zona de secado y la zona de pirólisis es proporcionada por la energía térmica liberada en la zona de combustión debido a la gran cantidad de reacciones químicas que tienen lugar en esta etapa y la liberación de energía en forma de calor (exotérmica), en la zona de combustión. En esta zona, el carbono de la zona de gasificación entra en contacto con el oxígeno que se alimenta al reactor y, si la presión del oxígeno es lo suficientemente alta, reaccionará con el carbono para formar dióxido de carbono, que es altamente exotérmico. Otras reacciones que ocurren en esta zona son entre la combustión de combustible sin reaccionar y algunos compuestos volátiles. ( TORRES VASQUEZ , 2017).

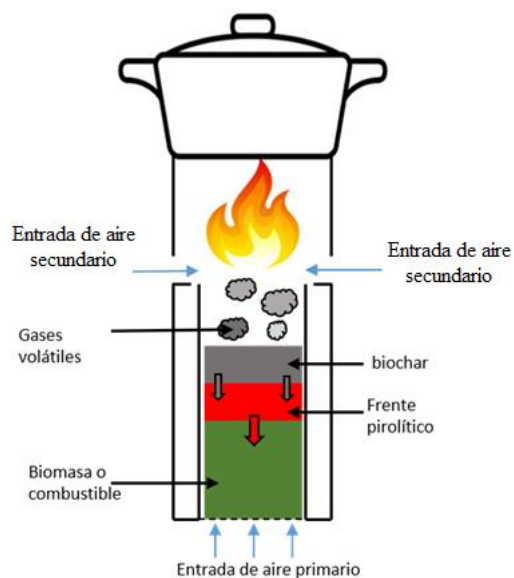
(iv) Reducción (1073-1373) K. Seguido de la zona de pirólisis, inicia una serie de reacciones de tipo heterogéneas entre el carbón de la biomasa, vapor de agua, dióxido de carbono, oxígeno e hidrógeno contenido en el reactor (cámara de combustión). De todas estas reacciones la gasificación del carbón es la de mayor relevancia. El carbón producido en la zona de pirólisis no es carbono puro, sino que contiene hidrógeno y oxígeno. Esta zona es termodinámicamente inerte porque las reacciones que ocurren son exotérmicas y endotérmicas. La temperatura en esta región es de 1073 K a 1373 K y es un parámetro importante del proceso general, ya que determina las propiedades de los desechos sólidos y las propiedades del gas de síntesis. (Torres Vasquez, 2017).

La combustión de cualquier tipo de biomasa produce gases que se emiten y en ocasiones se queman de manera ineficiente. Los científicos son conscientes desde hace décadas que quemar materia sólida (biomasa) es menos limpia que quemar oxígeno mezclado con gas combustible.

La combustión normal es más imperfecta que la combustión de micro gasificación, que es lo que se plantea impulsar en este proyecto, Figura 2. En la combustión normal hay combustible sólido y el fuego continúa donde hay presencia de combustible sólido y los gases en su mayoría no son quemados. La característica principal del gasificador es que el gas combustible se quema en un lugar diferente de donde se produjo.

## Figura 2.

*Diagrama esquemático del funcionamiento de una estufa mejorada.*



*Nota.* Elaboración propia.

Las estufas con principio de gasificación se dividen en dos categorías según su fuente de oxígeno: oxígeno forzado (ventilador) y tiro natural. Las estufas asistidas por ventilador hacen circular el oxígeno para una combustión más limpia, controlan la entrada de oxígeno y disipan el calor. La gasificación funciona con una carga de combustible que se agota en una reacción

termoquímica (pirólisis) y debe llenar la cámara de combustión para su posterior combustión. (Herrera Viteri, 2010).

Varios combustibles son posibles para el uso de estas estufas, pero es importante tener en cuenta algunos parámetros. La biomasa debe tener un contenido de humedad aceptable (con tamaño similar o fracciones pequeñas) a través del cual el flujo de oxígeno primario pueda pasar fácilmente de manera controlada sin que el flujo que circula por el canal sea demasiado alto o bajo (20-30%). Los gránulos y las briquetas de tamaño adecuado son excelentes, al igual que las semillas de tamaño moderado. Madera en forma de tallos leñosos, ramas y virutas y tiras. Algunos combustibles, como la cáscara de arroz, requieren aire forzado en el horno para quemarse bien. Una limitación del uso de este tipo de combustible es el tiempo de combustión reducido debido al arrastre de aire forzado (Herrera Viteri, 2010).

En general, todas estas estufas dependen de su capacidad de flujo de oxígeno. En una estufa de tiro natural, el flujo de oxígeno se mueve por convección. Es decir, las corrientes de aire ascienden al aumentar su temperatura. Una parte importante del diseño de tiro natural es la ubicación y el tamaño de los agujeros. Este es el factor que controla los flujos de entrada de oxígeno primario y secundario para lograr una verdadera gasificación (ver Figura 2). La separación espacial entre la cámara de combustión y la zona de cocción proporciona el espacio y el tiempo necesarios para que la combustión del gas sea lo más completa posible.

## 2.5. Marco legal.

Las consideraciones ecológicas en los trabajos de restauración son fundamentales desde las primeras etapas de cualquier intervención. Sin embargo, las estufas mejorada o eco estufas y su principio de gasificación no disponen de una normativa específica.

Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire, 2010. Adoptada en el documento Conpes 3344 en 2005, esta norma tiene como objetivo alcanzar niveles de calidad del aire suficientes para proteger la salud y el bienestar humanos en el marco del desarrollo sostenible a corto, mediano y largo plazo. Tiene como objetivo promover la gestión de la calidad del aire. De acuerdo con este objetivo; su Plan de Acción establece, entre otras actividades, poner en marcha normas sobre contaminantes que afectan la salud y el bienestar humanos, en particular los contaminantes que pueden afectar la calidad del aire interior (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2005).

Plan Nacional de Desarrollo Forestal. El patrimonio forestal del país, avalado por el documento Conpes 3125 de 2001, es el resultado de la deforestación, proceso que es la consecuencia de la falta de políticas y planes de ocupación del suelo para la colonización, el uso de prácticas de tala y quema y la deforestación. Determinado a ser dañado por actividades agrícolas insostenibles y uso intensivo de leña ( Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Plan Nacional de Aplicación del Convenio de Estocolmo: Considera desarrollar medidas para promover la implementación de las mejores prácticas disponibles y las mejores tecnologías disponibles aplicables a los sectores y actividades que pueden generar contaminantes orgánicos persistentes (COP). El tercero es la emisión de dioxinas y furanos de la combustión doméstica asociada con el uso de carbón y madera para calentar y cocinar en el hogar. Entre fuentes de dioxinas y furano (Dirección de Desarrollo Sectorial Sostenible, 2010).

Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás Formas No Convencionales (PROURE). Dentro de los planes de acción adoptados por la Resolución 1,286 de 2016 del Ministerio de Minas y Energía, el subprograma: Sector Vivienda incluye una línea de acción para estufas eficientes (Ministerio de Minas y Energía, 2016).

### **3. Diseño metodológico.**

#### **3.1 Tipo de investigación.**

Con el fin de darle cumplimiento a este proyecto, se llevó a cabo una investigación de tipo numérica aplicada con un enfoque teórico porque el objetivo principal es abordar una problemática de una población y plantear una estrategia con el fin de brindar solución. Además, se diseña un sistema en el cual hay variables controladas y manipuladas.

#### **3.2 Población y muestra.**

**3.2.1 Población.** No aplica.

**3.2.2 Muestra.** La muestra de esta investigación corresponde a diferentes biomásas residuales provenientes de los cultivos más representativos de la región, los cuales serán objeto de medición teórica del desempeño térmico para implementación en estufas mejoradas, a partir de un análisis termodinámico en el software DWSIM, involucrando un estudio de sensibilidad de las variables más influyentes del proceso.



## **4. Resultados.**

### **4.1. Desarrollar un análisis teórico que permita la identificación y caracterización del proceso de gasificación de la biomasa vegetal residual, detallando sus etapas y las propiedades del gas, así como su influencia en una estufa gasificadora**

Para darle desarrollo a este objetivo, se identificó y caracterizó el proceso de gasificación de la biomasa vegetal residual. Bajo ese enfoque, se desarrollaron las siguientes actividades, las cuales permitieron investigar, filtrar y establecer la información adecuada para los análisis.

#### ***4.1.1. Determinar la potencia térmica requerida para la cocción de alimentos para grupos familiares integrados en promedio por 4 personas***

Según el censo nacional de población y vivienda de 2018 (DANE, 2019), las personas por hogar en Norte de Santander están por debajo de 4 (Figura 3), es por esto por lo que se ha planteado para la primera actividad de la primera fase determinar la potencia térmica requerida para la cocción de alimentos para grupos familiares integrados en promedio por cuatro personas.



La energía teórica para la cocción de un alimento dado equivale al calor sensible, donde despreciando la pérdida de energía, ésta se puede expresar mediante la ecuación 1:

$$Q_{\text{entada}} = m \cdot C_p(T_f - T_i) \quad 1$$

Donde,  $C_p$ , expresa el calor específico (J/kg · K) a una presión constante,  $m$ , la masa en kg; la temperatura final,  $T_f$ , en (K) y la temperatura inicial,  $T_i$ , en (K). En este estudio la temperatura ambiente (297.15 K) se tomará como  $T_i$ . La temperatura de ebullición del agua (368.36 K) se toma a una altitud de 1.158 metros sobre el nivel del mar, que equivale a una presión atmosférica de 88.16 kPa, la cual se asume como temperatura final (Tabla 2). Debido a que estas son las condiciones en las que se encuentra la región (Comisión para el Esclarecimiento de la Verdad y la Convivencia y la No Repetición, 2020).

Un adulto entre los 18 y 64 años debe consumir en gramos diariamente entre 288.7 a 364.5 de carbohidratos y en proteínas alrededor de 78.7g a 99.5g; para un total en gramos ingeridos de 367.4 a 464g por ciudadano colombiano para poder obtener las calorías necesarias para realizar sus actividades diarias. Es decir, que se sugiere un promedio por ración de 0.138 kg. Siempre y cuando se consideren tres raciones por día. Cabe recordar que los cálculos se ejecutan para cuatro personas (0.552 kg), valores se encuentran sustentados en la tabla 4 (Instituto Colombiano de Bienestar Familiar, 2020).

## **Tabla 2.**

*Condiciones ambientales y alimenticias asumidas.*

---

### **Condiciones y requisitos asumidos**

---

Ambientales			Alimentarios (para personas entre 18 y 64 años)						
$T_i(K)$	Altitud (m s.n.m)	Presión atm (kPa)	$T_F(K)$	Carbohidratos por día (gr)		Proteínas por día (gr)		Alimento por día por hogar (gr)	
				mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo
297.15	1.158	88.16	368.36	288.7	364.5	78.7	99.5	1469.6	1856

*Nota.* Se encuentra expresadas las condiciones asumidas según (Instituto Colombiano de Bienestar Familiar, 2020) y (Comisión para el Esclarecimiento de la Verdad y la Convivencia y la No Repetición, 2020).

Según estudios hechos por Rodríguez (Rodriguez De Montes , 1964), existen hábitos alimenticios, los cuales depende de la región donde nos enfoquemos. En el caso de Norte de Santander, la yuca, el plátano, res, cerdo, arroz con verdura, huevo, pollo, pescado y granos como el frijol y lenteja; son los principales ingredientes para los platos preferidos del norte santandereanos (Tabla 3). Donde cada uno de estos alimentos cuenta con características como el calor específico y tiempo de cocción según especialistas en diseños de cocinas como, industrias siemens (SIEMENS, 2014).

**Tabla 3.**

*Propiedades fisicoquímicas e ingredientes de alimentos típicos de Norte de Santander.*

Alimento	Calor específico (kJ/kgK)	Energía térmica (kJ)		Potencia (kW)		Tiempo (seg)
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
pescado salado	3.18	332.79	420.29	1.11	1.40	300
pollo fresco	3.31	346.39	437.47	0.72	0.91	480
cerdo	3.31	346.39	437.47	0.34	0.43	1020
apio	3.98	416.51	526.02	6.94	8.77	60
arroz	1.76	184.18	232.61	0.12	0.16	1500
cebolla	3.77	394.53	498.26	6.58	8.30	60
lenteja	1.84	192.56	243.18	0.16	0.20	1200
papa	3.43	358.95	453.33	0.85	1.08	420
plátano	3.35	350.58	442.76	1.46	1.84	240
tomate	3.98	416.51	526.02	6.94	8.77	60
zanahoria	3.77	394.53	498.26	3.29	4.15	120
huevo	3.18	332.79	420.29	1.11	1.40	300
carne de res	3.35	350.58	442.76	0.73	0.92	480
frijol	3.8	397.67	502.23	0.33	0.42	1200

Nota. Tomado de (Castro M., 1986). Se describe el calor específico. La potencia energética, la energía de cocción y el tiempo que necesita cada uno de los alimentos para el óptimo consumo humano.

Los valores de potencia térmica requeridos para la cocción se determinan con base en la ecuación 1 y con los tiempos mínimos de cocción por alimento. Bajo el supuesto de una estufa con dos puestos se suman los dos máximos valores de potencia expresados en la tabla lo que resulta en una potencia máxima para la estufa de 17.54 kW.

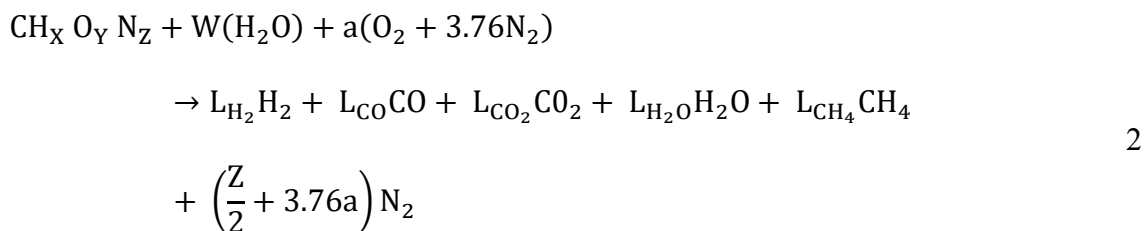
***4.1.2. Realizar un análisis teórico de las condiciones del agente de gasificación que mejoran las propiedades energéticas del gas de síntesis***

Para el desarrollo de este procedimiento se deben tener en cuenta varios parámetros que afectan el proceso:

En las estufas gasificadoras se emplea el aire como agente gasificante, pensando principalmente en la economía. Aunque es un gas de calidad pobre en cuanto a su poder calorífico (4-7 MJ/m<sup>3</sup>) debido a su baja densidad energética, en comparación con otros agentes gasificantes como el oxígeno y vapor de agua, pero sigue siendo suficiente para aplicaciones eléctricas y térmicas.

El proceso de gasificación generalmente implica una serie de reacciones químicas homogéneas y heterogéneas que provocan una combustión incompleta de materiales sólidos (biomasa) en presencia de un agente oxidante, lo que lleva a una fuga de energía térmica que conduce a la liberación de volátiles durante la etapa de pirólisis. Este gas está compuesto principalmente por CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> y otros elementos (Ramírez Rubio, Sierra, & Guerrero, 2011).

A continuación, se expresa la gasificación de biomasa (ecuación 2), despreciando el contenido de azufre, pues este suele presentarse en la biomasa en porcentajes insignificantes, además de simplificar la realización de cálculos.



$$\frac{HM_C}{CM_H} = X \tag{3}$$

$$\frac{OM_C}{CM_O} = Y \tag{4}$$

$$\frac{NM_C}{CM_N} = Z \tag{5}$$

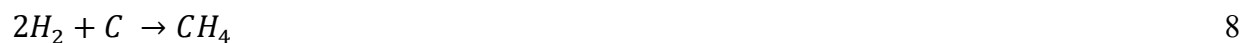
Donde  $CH_X O_Y N_Z$  representa la fórmula química de la materia prima, estimada a partir de su composición elemental. De esta manera, por medio de las ecuaciones 3, 4 y 5 se calcula el número de hidrógeno (X), oxígeno (Y) y nitrógeno (Z), por número de átomos de carbono en la biomasa. W, es la humedad por kmol de biomasa; a, es la cantidad de oxígeno por kmol de materia prima; M representa la masa molar del elemento que acompaña en (kg/kmol)  $L_i$ , son los números de mol de cada compuesto(i). Los reactivos (lado izquierdo de la ecuación) se consideran a condiciones estándar de 298 K y 1.0 atm.

Los moles de agua en los reactivos se pueden estimar usando la ecuación 6:

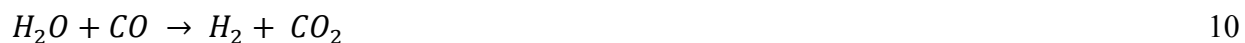
$$W = \frac{\%humedad \cdot MCH_xO_yN_z}{MH_2O \cdot (1 - \%humedad)} \tag{6}$$

Además, se debe tener en cuenta las reacciones comunes de la gasificación, las cuales se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Reacciones heterogéneas.



- Reacciones homogéneas.



Para terminar de resolver la Ecuación 1, se debe tener en cuenta el balance atómico:

- Ecuación balance de carbono.

$$1 = L_{CO} + L_{CO_2} + L_{CH_4} \quad 11$$

- Ecuación para balance de hidrógeno.

$$X + 2W = 2L_{H_2} + 2L_{H_2O} + 4L_{CH_4} \quad 12$$

- Ecuación para balance de oxígeno.



$$W + Y + 2a = L_{CO} + 2L_{CO_2} + L_{H_2O} \quad 13$$

El gas de síntesis ( $H_2 + CO + CO_2 + CH_4 + N_2 + H_2O$ ), generado mediante el proceso de gasificación, puede ser utilizado como combustible gaseoso. La composición de este gas está influenciada por varios factores, como el agente gasificante utilizado, el tipo de residuo y las propiedades de la zona de combustión, como su composición, tamaño, humedad y densidad. Además, la temperatura, la presión, la velocidad de calentamiento y el tiempo de permanencia de los gases en la estufa también afectan la composición del gas de síntesis.

La humedad es un parámetro especialmente relevante en el proceso de gasificación. A una temperatura de aproximadamente 800K, la humedad puede variar en un rango de 20% a 40% (0.2 - 0.4) sin causar cambios significativos en los componentes del gas, ya que esta temperatura es relativamente baja. Sin embargo, a una temperatura de 1200K, los componentes del gas experimentan cambios considerablemente más significativos. A medida que aumenta la humedad (W), es decir, si se incrementa al 40%, los contenidos de  $H_2O$  también aumentan, lo que reduce el poder calorífico del gas de síntesis resultante (Clavijo Ortiz, 2015).

Asimismo, la relación de equivalencia (ER) es una referencia a tener en cuenta. Se interpreta como la relación del oxígeno entregado por kg de biomasa y el requerimiento estequiométrico, fijando de esta manera la porción de requerido para gasificar. La ecuación 14 define la RE como se muestra a continuación:

$$ER = \frac{\frac{\textit{masa de oxidante}}{\textit{masa de combustible seco}}}{\frac{\textit{masa estequimetrico del oxidante}}{\textit{masa estequimetrico del combustible seco}}} \quad 14$$

Para efectos de gasificación, como en este proyecto, esta relación equivalente (ER) oscila entre 0.2 y 0.4 con el fin de obtener una operación estable. Según investigaciones basadas en la práctica y con base en estudios teóricos, esta relación debe estar en  $\pm 0.3$  (US-Pakistan Center of Advanced Studies in Energy , 2016) (A & J. R, 1981).

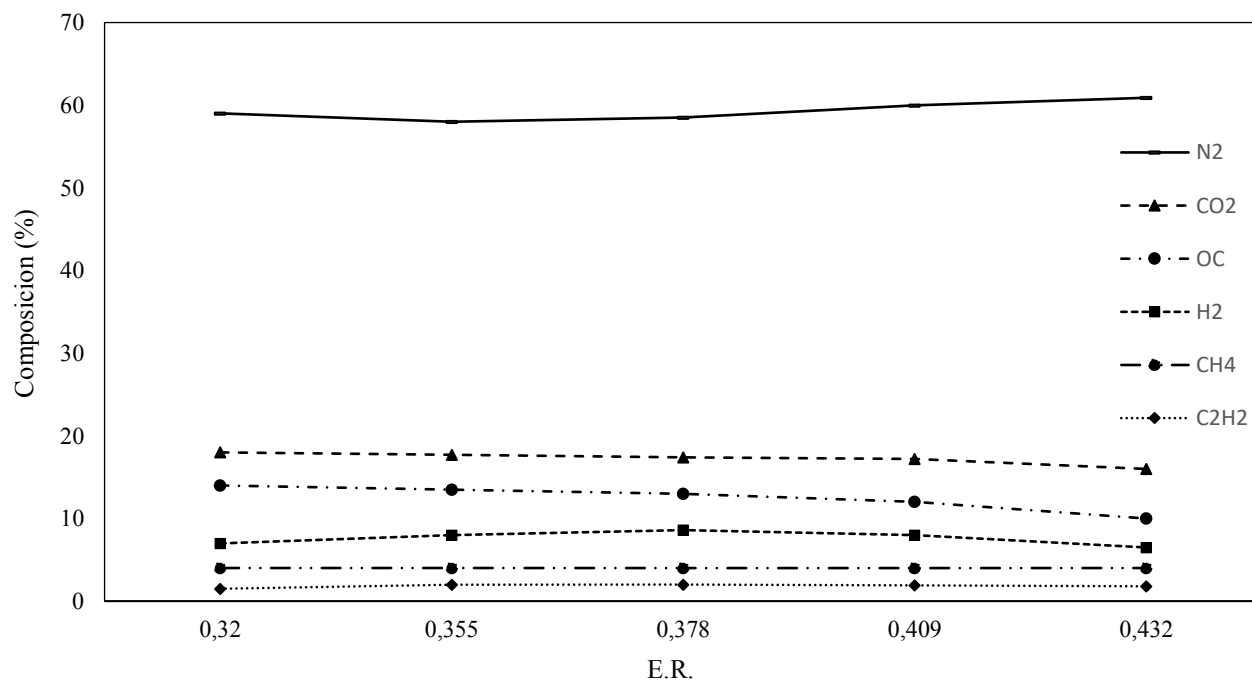
Otra variable esencial en la gasificación es la temperatura, esta puede presentarse entre 1073 a 1473 K, clasificada como baja temperatura ( McKendry, 2002). Bajo esta condición, a medida que aumenta la temperatura habrá mayor formación de gases combustibles, disminuye el contenido de alquitranes y conduce a una conversión más completa del combustible en el gas producto. El gas producto tendrá un nivel considerablemente alto en hidrocarburos, siempre y cuando se compare con la gasificación a altas temperaturas (1473– 1873 K) el cual produce pocos hidrocarburos y una mayor proporción de CO y H<sub>2</sub>. Las temperaturas muy elevadas ocasionan una disminución en la eficiencia energética del proceso e incrementan la aglomeración de la ceniza (US-Pakistan Center of Advanced Studies in Energy , 2016).

En 2009 Sommas Kaewluan et al. estudió el efecto de la relación de equivalencia en las propiedades y rendimiento del gas de síntesis a partir de la gasificación implementando aire como agente oxidante en astillas de madera de caucho; el agente gasificante fue implementado con un caudal fijo de 72 kg/h y un rango para relación de aire combustible entre 0.32 a 0.43. Esto dio resultado a productos gaseosos combustibles (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> y CH) y especies

incombustibles ( $\text{CO}_2$  y  $\text{N}_2$ ). En todos los casos presentados se obtuvo que entre un 50% y un 60% del volumen total de gas obtenido correspondió a  $\text{N}_2$ ; el  $\text{CO}_2$  se presentó en una proporción entre 16-18% y el  $\text{CO}$  entre 10-14% (Figura 4). No obstante, el contenido en los hidrocarburos ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2$ ) fueron mínimas (inferiores al 5%) pero suficientes pues pueden elevar el contenido de calor del gas a diferencia de los incombustibles que al diluirse con el gas de síntesis reducen el poder calorífico. En cuanto a la operación óptima, se logró en una relación de aire combustible de 0.38, lo cual produjo  $2.33 \text{ Nm}^3$  de gas de síntesis por kg de biomasa con un poder calorífico de  $4.94 \text{ MJ/Nm}^3$  (Figura 5) con una eficiencia que oscila entre 70-80% (Kaewluan & Pipatmanomai, 2009).

**Figura 4.**

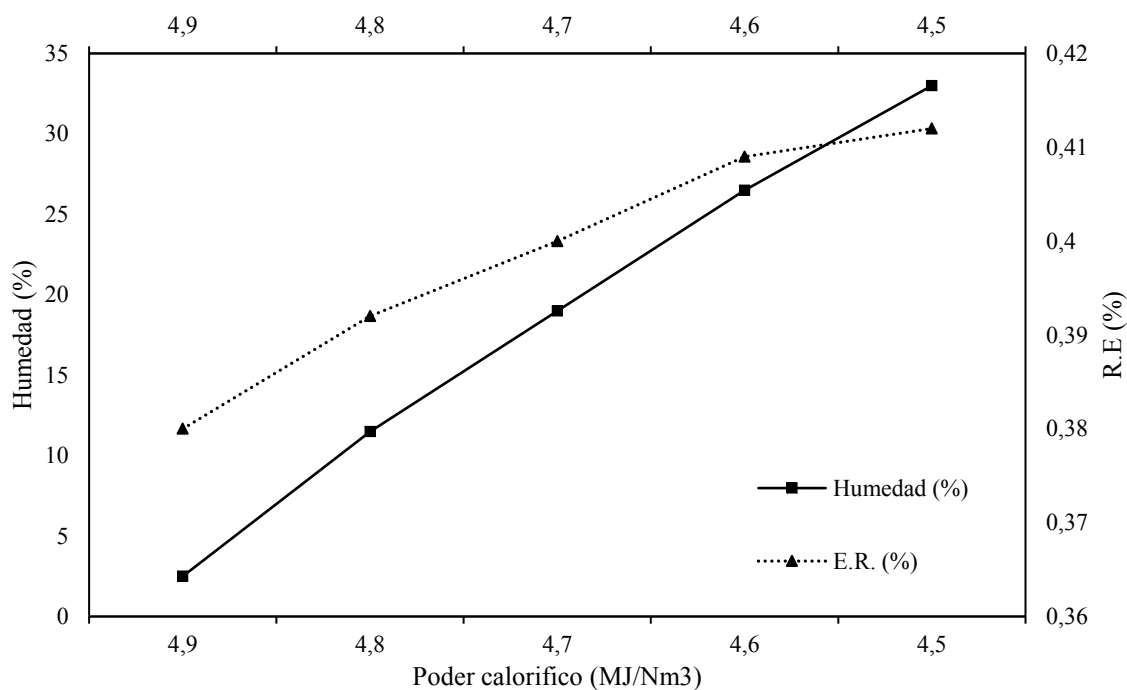
*Composición química con respecto a la relación de equivalencia.*



Nota. Elaboración propia. Datos tomados de (Kaewluan & Pipatmanomai, 2009).

**Figura 5.**

*Relación entre el poder calorífico, la humedad y la relación de equivalencia.*

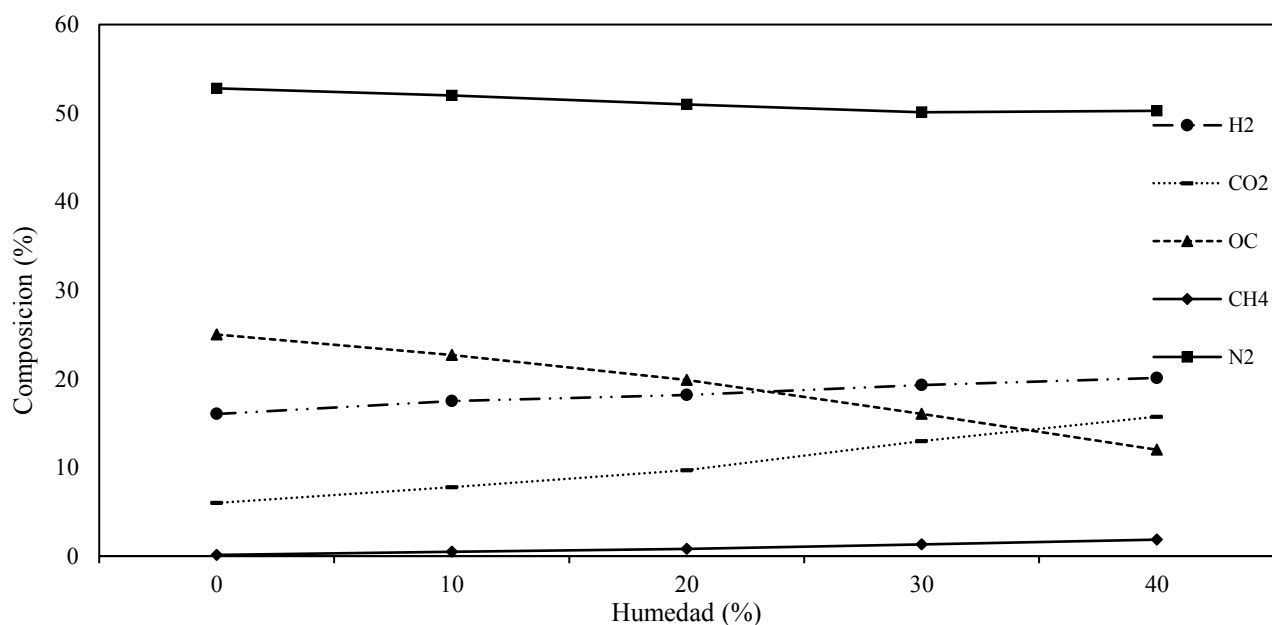


Nota. Obtenido de ( Kaewluan & Pipatmanomai, 2009) y ( Kaewluan & Pipatmanomai, 2009).

Así como se estudió la importancia de la relación de equivalencia en la gasificación, los efectos de la humedad en la composición de gas pobre también se encuentran respaldada por otros autores. En 2006, S. Jarungthammachote et al, examinó los efectos del H<sub>2</sub>O en el contenido de biomasa para la gasificación, bajo la condición de relación de equivalencia (0.4), mostrando que la fracción molar de H<sub>2</sub> se incrementa gradualmente (16.04 – 20.11%); el CO disminuye (25.01 – 12.01%); el CH<sub>4</sub>, el cual tiene una baja proporción. Sin embargo, el producto del gas aumenta (0.134 - 1.86%); mientras, el N<sub>2</sub> se reduce ligeramente (52.80 – 50.25%) y el CO<sub>2</sub> mejora (6.00 – 15.74%) manejando una proporción entre 0 a 40% para la humedad en todos los casos (Figura 6). Por otro lado, la temperatura de reacción y el poder calorífico disminuye cuando la tasa de agua se eleva (Jarungthammachote & Dutta, 2007).

**Figura 6.**

*Composición química respecto a la humedad en la biomasa.*



Nota. Elaboración propia. Datos tomados de (Jarunthammachote & Dutta, 2007).

La velocidad a la que entra el aire a la zona de gasificación es un dato a tener en cuenta y controlar. Pues a mayor entrada de aire habrá mayor producción de gas podre, en consecuencia, un mayor consumo de combustible ( Saravanakumar, Haridasan, Reed, & Kasturi Bai, 2007). Estudios arrojaron que la velocidad óptima para el aire primario está alrededor de 0.13 m/s ( $\pm 0.13$  m/s) mientras el aire secundario de  $\pm 0.45$  m/s. La velocidad del aire se determina a partir de la ecuación 14) (De La Hoz C, Pérez, & Chica Arrieta, 2017).

El tamaño de partícula del combustible es clave en el proceso que se estudia, pues es una característica que determinan la explosividad del producto. En la literatura se establece que las partículas de biomasa de menor tamaño reaccionan más rápidamente que las partículas de mayor tamaño del mismo material. Pero, se maneja un rango pues si son muy pequeñas es contraproducente con lo anteriormente mencionado. Acorde a Chawdhury et al. las estillas de

madera de 30- 70 mm alcanzan un poder calorífico de 5,007 kJ/m<sup>3</sup>, mientras que las partículas que se encuentran entre 15-30mm proporciona un poder calorífico de 4,424 kJ/m<sup>3</sup> (Chawdhury & Mahkamov, Development of a Small Downdraft Biomass Gasifier for Developing Countries, 2010).

Bajo el soporte de las teorías y estudios descritos anteriormente, se han decidido los siguientes parámetros (Tabla 4) para iniciar la simulación, estos pueden ser ajustados según los resultados arrojados por el software DWSIM.

**Tabla 4.**

*Parámetros de partida para la simulación.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor inicial</b>
Temperatura de gasificación	850 °C
Humedad de biomasa.	H ≤ 13%
Relación de equivalencia.	0.4
Velocidad del aire primario.	0.13 m/s
Velocidad del aire secundario.	0.45 m/s
Tamaño de partículas.	50 mm

Nota. Elaboración propia.

**4.1.3. Desarrollar un análisis comparativo de estufas gasificadoras, identificando condiciones de operación, dimensiones y potencia térmica.** Desde 2006 se han venido aumentando el desarrollo de estufas gasificadoras con ayuda de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, con el interés de preservar bosques y promover fuentes de energías renovables. Asociaciones como la Alianza Global para Estufas Limpias (GACC), soluciones energéticas para cocinar en África (ACCES) y desarrollo energizante (EnDev) ( Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015) son algunos de los proyectos con la iniciativa de impulsar la implementación de las estufas gasificadoras a nivel internacional, adoptadas principalmente por el África negra, debido a sus problemáticas ambientales, económicos y de salubridad. Alguna de estas estufas se describe y comparan en la Tabla 5.

Por otra parte, Colombia y la subregión del Catatumbo no son ajenas a estas dificultades, es por esto que se ha venido impulsando estufas eficientes. En la actualidad existen 14 prototipos registrados de estas estufas a nivel nacional (Lorena, dos puestos, Rocket, Hibrido triangular, hibrido lineal, triangular con bloques refractarios, riscaleña, fundación natura, ICA- 1791, huellas, Corantioquia, parque las orquídeas, ecoestufa catalán, ecoestufa) adscritas a diferentes fundaciones o empresas e impulsadas por entidades gubernamentales así como por el sector privado ( Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). Muy pocas de estas estufas cuentan con pruebas de eficiencia que permitan comparar el desempeño con el de las estufas tradicionales lo que representa una dificultad a la hora de tenerlas en cuenta en esta investigación. Además, es de resaltar que estos fogones impulsados en Colombia son estacionarios (Figura 7), es decir, que son diseños que no se pueden conseguir en el mercado, por el contrario, se debe entrar en contacto con estas asociaciones las cuales construirán su diseño en un determinado lugar.

**Figura 7.**

*Estufa Huellas, estacionaria.*



Nota. Tomado de (Gómez Charry, Aristizábal Hernández, & Cárdenas, 2015).



**Tabla 5.***Algunas estufas gasificadoras.*

<b>País de origen</b>	<b>Costos</b>	<b>Condiciones de funcionamiento</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Potencia térmica (kW)</b>	<b>Referencia</b>
India	37 USD	biomasa seca, sólida y gruesa	ancho:200mm altura:280 mm peso depósito:1,6 Kg	1 - 2 kW	(Roth, Micro-gasification: cooking with gas from dry biomass, 2014)
India	15 – 35 USD	se debe preparar el combustible para la estufa; requiere aire comprimido	diámetro: 100 mm altura:130 mm	2-3 kW	(Roth , Micro Gasification: Cooking with gas from biomass , 2011)
China	700 USD	residuos agrícolas y forestales; encendido electrónico	largo: 1150 mm ancho: 650 mm altura: 1230mm	4.7 - 5.1 kW	(Roth , Micro Gasification: Cooking with gas from biomass , 2011)
Swaziland	45 EUR	biomasa de menos de 180 mm de largo; Aire primario y secundario precalentado	Diámetro 300 mm Altura 440 mm	4 kW	(Roth, Micro-gasification: cooking with gas from dry biomass, 2014)
Indonesia	20 USD	diseñado para biomasa paletizada y pequeños trozos de madera; alimentado por ventilador de CC de 12 voltios y 0,12 amperios	Ancho 250 mm Largo 250 mm Alto 380 mm	1 kW	(Roth , Micro Gasification: Cooking with gas from biomass , 2011)
Philippines, Gambia y Senegal	15-20 USD	Cáscara de arroz, cascara de maní	alto: 165 mm diámetro: 178 mm	3.2 – 4.1 kW	(Roth, Micro-gasification: cooking with gas from dry biomass, 2014)
Vietnam	20 USD	no apto para grandes piezas de madera; se mezcla la madera con cascarilla de madera	altura: 400 mm diámetro: 300 mm	3kW	(Roth, Micro-gasification: cooking with gas from dry biomass, 2014)
Philippines	45-50 USD	para ignición aspersión de 1 ml de queroseno; ventilador de 16 Watt, 220 V; para cascarilla de arroz	Ancho: 350 mm largo: 350 mm alto: 800 mm	1.2 kW	( Jetter, y otros, 2012)
Switzerland	572 EUR	controladores de aire primario y secundario; flujo de aire precalentado	Ancho 340 mm largo 340 mm alto 760 mm	1.2 – 2.5 kW	(Schmid, Gutzwiller, & Zellweger, 2015)
Kenya, Chad y Cameroon	5-10 EUR	debe alimentarse con cascarilla de arroz; la salida de gases puede ser regulado a través de una válvula de mariposa en la chimenea.	alto de la chimenea: 2000mm altura de la estufa: 600 mm diámetro de la estufa: 500mm	4.1 kW	(Vitali, Parmigiani, Vaccari, & Collivignarelli, 2013)

Nota. Se muestra algunas de las estufas gasificadoras que se encuentran en el mercado.

**4.2. Analizar las características energéticas de la biomasa de la zona de Catatumbo, mediante una revisión estructurada de la literatura, permitiendo la determinación de sus propiedades y su influencia sobre una estufa gasificadora**

En esta fase del proyecto se llevó a cabo el análisis y selección de la biomasa proveniente de cultivos agrícolas de la subregión, pues es otro de los factores a tener en cuenta para obtener buena eficiencia de gasificación. Lo anterior con ayuda de la literatura.

***4.2.1. Identificar los cultivos agrícolas de la subregión del Catatumbo con mayor potencial para la generación de biomasa residual. (disponibilidad, distribución, composición química, descartar lo que no es bueno gasificar).*** De acuerdo con el plan departamental de extensión agropecuaria 2020 para el departamento de Norte de Santander, los cultivos se pueden clasificar como permanentes y transitorios. Los transitorios se pueden definir como cultivos cuyo ciclo vegetativo está regulado para ser menor o igual a un año. Mientras que los permanentes son cultivos que después de plantados llegan en un tiempo relativamente largo a la edad productiva, dan muchas cosechas y terminada su recolección no se los debe plantar de nuevo (Acevedo Gil & Zapata Rojas, 2021) (Tabla 6). A continuación, se encuentran clasificados los cultivos de la región según lo anterior:

**Tabla 6.**

*Producción anual de cultivos permanentes y transitorio en el Catatumbo.*

<b>Cultivos</b>	
<b>Cultivos Permanentes</b>	
Nombre	Producción (Ton/Año)
Cacao	2800
Aguacate	4151
Café	6213.1
Plátano	11550
Caña Panelera	11956
Palma De Aceite	502440
<b>Cultivos Transitorios</b>	
Nombre	Producción (Ton/Año)
Maíz	4184
Arroz	5745
Frijol	10340.6
Tomate	51575
Cebolla De Bulbo	56560

Nota. Tomado de (Sánchez Duran & Jaimes M., 2020).

En la Tabla 6 se muestran los principales cultivos y la producción de cada uno. Sin embargo, los pisos térmicos de la región permiten la oferta de muchos otros productos, como la alverja, durazno, yuca, arracacha, fresa, maracuyá, papaya, pero en muy pocas proporciones. Se estima que la producción es proporcional a los residuos, es por esto que es importante que el estudio se enfoque en los que tienen mayor producción.

A la hora de utilizar biomasa proveniente de los cultivos anteriormente mencionados se recomienda utilizar los dos tipos de cultivos (transitorio, permanente) pues la materia prima para las estufas resulta en gran cantidad de la postcosecha o época de cosecha, según el cultivo. Estas

épocas a veces toman mucho tiempo desde el momento de siembra, en cultivos permanentes como el plátano que su cultivo toma un tiempo de 12 meses en condiciones óptimas, en el caso de los transitorios como el frijol la cosecha es a los 165-285 días. Es por esto por lo que se hace necesario hacer el estudio para ambos tipos de cultivo para que las estufas consuman la biomasa que esté disponible en ese momento.

Una de las formas con la que se cuenta para identificar el potencial de un cultivo para la realización de este proyecto es evaluar algunos de los parámetros definidos en el capítulo anterior, como el tamaño de partícula y el porcentaje de humedad. En el caso del tamaño del combustible los residuos del arroz (tamo) se descartan como materia prima para este proyecto pues el largo máximo registrado de este es de 7.6 mm (Centro internacional de agricultura tropical, 1981) así como el cuesco de palma 37.5 mm (Becerra Becerra , 2017) los cuales se encuentran por debajo de lo sugerido en la Tabla 4. No es viable plantear un sistema de peletización pues se aumentan los costos en la producción de energía, en cuanto a los demás cultivos el tamaño de partícula depende de la persona encargada de recolectar el combustible. Al aplicar la humedad (Tabla 7) como parámetro de restricción ( $H \leq 13\%$ ) se descarta la biomasa proveniente del frijol, la paja del arroz, el plátano y la caña panelera. Sin embargo, en este estudio se plantea una simulación para compuesto sin azufre para facilidad en los cálculos en enfocándonos en la cascara de cacao, tallos de tomate, madera de aguacate y madera de café.

**Tabla 7.***Tipos de biomasa y humedad de los cultivos agrícolas.*

<b>Cultivo</b>	<b>Biomasa</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Referencia</b>
Cacao	casaca	8.5	(Villavicencio Poveda, Gutiérrez Gualotuña, Carvajal Jara, & Tafur Escanta, 2017)
Café	Cisco	10.1	(Manals-Cutiño, 2018)
	Tallos	11.44	
Arroz	paja	13.61	(Valverde G., Sarria L. , & Monteagudo Y., 2007)
	tamo	8.6	
Tomate	Tallos	3.58	(Hossain, Scott, Berruti, & Briens, 2017)
Maíz	tusa	11.2	(Fonseca, Rodríguez, & Camargo, 2017)
	capacho	12.12	
	rastrojo	4.39	
Plátano	vástago	15.86	(Ordoñez Pineda & Sepúlveda Monroy , 2019)
Caña panelera	bagazo	15	( Agüero, Pisa, Agüero , & Torres Bugeau, 2011)
Cebolla	tallos	sin información	sin información
Frijol	tallos	14	( Escoto Gudiel, 2004)
Aguacate	tallos	7.41	(Santos Mèndez, 2017)
Palma de Aceite	tusa	2.54	( P. Ramírez, Giraldo, Flórez, & Acelas, 2016)
	fibra	6.75	
	casaca	5.74	

Nota. Tomado de diversos autores.

**4.2.2. Estimar el potencial energético de la biomasa residual, así como la identificación de las condiciones de preprocesamiento requeridos para el correcto funcionamiento del proceso de gasificación en la estufa.** Para evaluar el potencial energético de la biomasa a utilizar se determinará el calor producido en la reacción de combustión (poder calorífico superior) y el calor aprovechable a través del poder calorífico inferior. A partir de modelos matemáticos basados en análisis elemental planteados por otros autores, para esto es necesario conocer la composición química de cada combustible (Tabla 8).

**Tabla 8.**

*Composición química de biomosas.*

Biomasa residual	Composición química en valores porcentuales						Referencia
	%C	%H	%N	%O	%S	%ceniza	
Cascara de cacao	42.37	5.29	1.25	48.64	0	2.45	(Sánchez Quezada, 2013)
Cisco de café	47.25	6.49	0.37	44.98	0.138	0.75	(Becerra Cardenas , 2014)
madera de café	49.58	5.9	1.98	41.65	0	0.82	(Manals-Cutiño, 2018)
tallos de tomate	42.77	5.81	1.4	40.37	0	9.62	(Hossain, Scott, Berruti, & Briens, 2017)
rastrojo de maíz	40.06	5.34	0.76	48.57	0.1	5.17	(Fonseca, Rodríguez, & Camargo, 2017)
capacho de maíz	46.83	7.845	2.415	39.73	0.66	2.52	(Causil Villalba & Guzmán Mestra , 2016)
tusa de maíz	47.6	5.54	0.39	44.68	0.09	1.7	(Fonseca, Rodríguez, & Camargo, 2017)
madera de aguacate	48.45	5.71	0	44.32	0	1.52	( Díez & Pérez, 2017)
tusa de palma de aceite	44.4	5.73	0.84	42.42	0	6.48	(Alvarez R., 2012)
fibra de palma de aceite	44.14	5.67	0.2	46.14	0.02	3.83	( P. Ramírez, Giraldo, Flórez, & Acelas, 2016)

Nota. Tomado de diversos autores.

En la Ecuación 15 se describe la fórmula propuesta por Hongliang Qian et al. para definir el poder calorífico superior (HHV) de cualquier tipo de biomasa ( Qian, y otros, 2016).

$$HHV = 0.349C + 1.178H + 0.1005S - 0.1034O - 0.0151N - 0.0211A \quad 15$$

Donde, las variables C, H, S, O, N, A definen los valores porcentuales de carbono, hidrogeno, azufre, oxígeno, nitrógeno y cenizas, respectivamente presentes en el combustible. Teniendo en cuenta la ecuación anteriormente descrita e implementado en ella los datos de la Tabla 8. Los poderes caloríficos superiores, estimados a partir de esta ecuación se exponen en la Tabla 9.

**Tabla 9.**

*Poderes caloríficos superiores de biomosas.*

<b>Biomasa</b>	<b>Poder calorífico superior <math>\frac{MJ}{kg}</math></b>
Capacho de maíz	21.454
Madera de café	19.9
Cisco de café	19.477
Madera de aguacate	19.021
Tusa de maíz	18.486
Tusa de palma de aceite	17.71
Tallos de tomate	17.373

<b>Biomasa</b>	<b>Poder calorífico superior <math>\frac{MJ}{kg}</math></b>
Fibra de palma de aceite	17.231
Cascara de cacao	15.919
Rastrojo de maíz	15.139

Nota. Elaboración propia.

En la biomasa es un parámetro importante en el proceso de gasificación El poder calorífico superior (PCS o HHV) que se refiere a la cantidad de calor que se libera cuando una unidad de biomasa se quema completamente y se convierte en productos de combustión. Uno de los parámetros importantes a destacar es la influencia directa en la calidad y cantidad de gas de síntesis producido. Una biomasa con un alto poder calorífico superior proporcionara un gas de síntesis más rico en contenido energético, lo que es beneficioso para su posterior uso en estufas. En este caso se trabajará con tallos de tomate, madera de café, madera de aguacate y cascará de cacao y analizar su comportamiento. Pero esto no significa que no se pueda trabajar con cualquier otra de las biomasa de la región.

#### **4.3. Evaluar el proceso de gasificación de biomasa como principio base para el desarrollo de estufas, a partir de un análisis termodinámico en el software DWSIM, involucrando un estudio de sensibilidad de las variables más influyentes del proceso**

En esta fase del proyecto se analizó investigaciones similares tanto en DWSIM como en otros softwares de análisis termodinámico y se realizó la simulación teniendo en cuenta estos



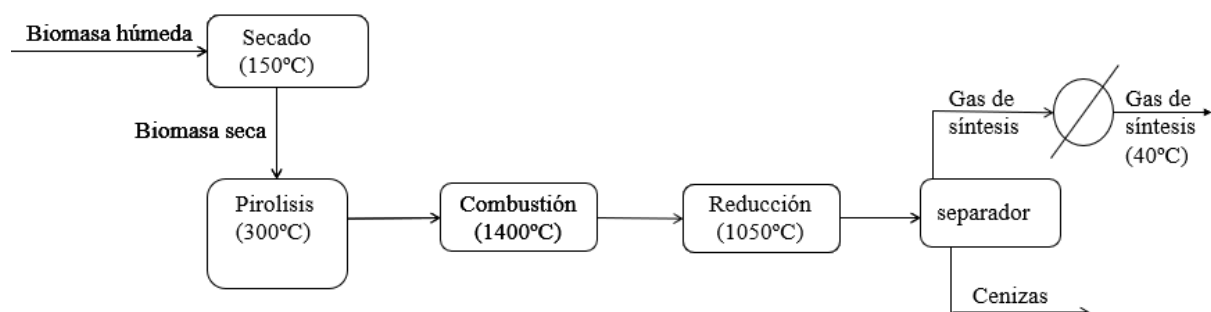
estudios, así como las condiciones propuestas en el capítulo anterior, también fue necesario comprobar los resultados obtenidos.

**4.3.1 Realizar una revisión en la literatura, orientada a la simulación del proceso de gasificación en diferente software de análisis termodinámico.** La gasificación es principalmente una serie de reacciones químicas. Sin embargo, los softwares de análisis termodinámico no cuentan con un módulo que las representen, lo que hace necesario que para llevar a cabo las simulaciones de este tipo se deban seleccionar y crear diferentes módulos (secado, pirolisis, gasificación y combustión) y en determinado orden para poder gasificar determinada biomasa. A continuación, se describen la forma en el que algunos autores abordan la simulación de gasificación y combustión de biomasa.

En 2020 Tobío-Pérez et al simularon el proceso de gasificación en un gasificador downdraft teniendo en cuenta determinadas biomosas donde influenció principalmente la relación aire combustible en el poder calorífico y composición del gas de síntesis. A continuación, se presenta el diagrama de flujo del proceso simulado por los autores (Figura 8). La conducta en la composición del gas pobre, muestra que a medida que aumenta la relación de aire combustible los valores de hidrogeno y dióxido de carbono disminuye, pues pueden combustionar con el oxígeno, de este modo se reduce el valor del poder calorífico inferior mientras. Mientras que los valores de nitrógeno incrementan a medida que la cantidad de aire aumenta (Tobío-Pérez, y otros, 2020).

**Figura 8.**

*Diagrama flujo del proceso de gasificación simulado.*

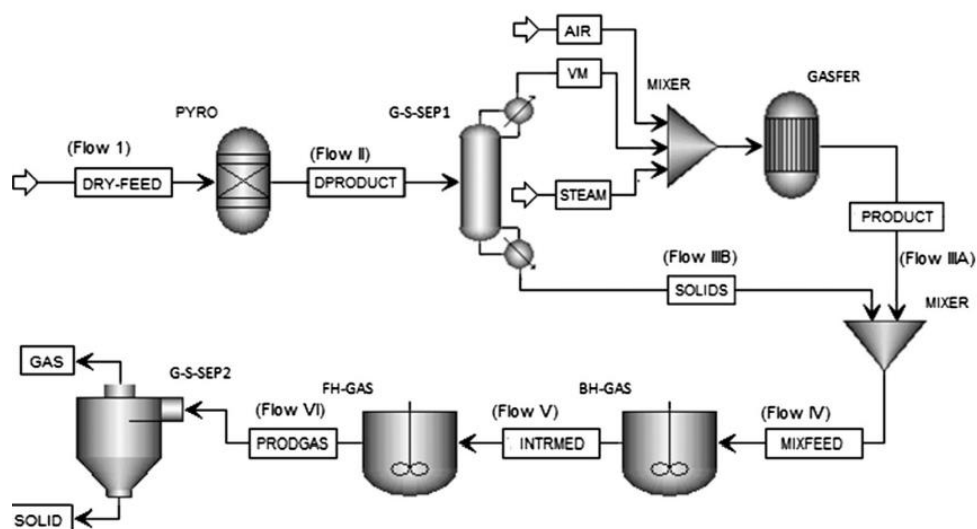


Nota. Elaboración propia con referencia en (Tobío-Pérez, y otros, 2020).

En 2015 se planteó una simulación en el software Aspen Plus con sub algoritmos de lenguaje de programación Fortran; con el fin de estudiar la producción de hidrogeno y gas de síntesis a causa de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fluidizado burbujeante, presentando el siguiente modelo para tal fin (Figura 9), el cual soporta que un tamaño de partícula de combustible favorece la calidad del gas de síntesis y rendimiento del hidrogeno, entre más pequeño se encuentre (Beheshti, Ghassemi, & Shahsavan-Markadeh, 2015).

**Figura 9.**

*Diagrama de simulación de gasificación de biomasa usando.*

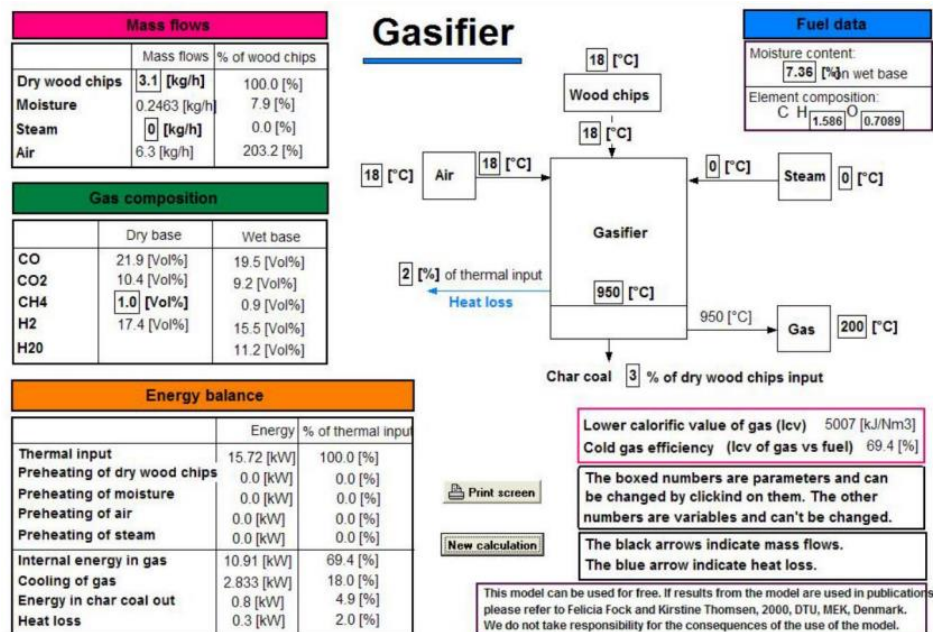


Nota. Referencia (Beheshti, Ghassemi, & Shahsavan-Markadeh, 2015).

Otro software donde se realizan numerosos análisis termodinámicos con gran relevancia ha sido EES (Engineering Equation Solver). En 2011 se desarrolló una simulación para un gasificador de biomasa de tiro descendente para astillas y gránulos de madera, con ayuda de este programa se obtuvo el valor calorífico más bajo del gas de síntesis y la eficiencia del gas frío del gasificador (Figura 10). Concluyendo que el gas de síntesis generado cuenta con un contenido de alquitrán suficientemente bajo para aplicaciones exigentes como en el caso de los motores (Chawdhury & Mahkamov, Development of a Small Downdraft Biomass Gasifier for Developing Countries, 2011).

Figura 10.

Ventana de salida del simulador del Solucionador de ecuaciones de ingeniería (EES) para el gasificador de tiro descendente.



Nota. Tomado de ( Chawdhury & Mahkamov, Development of a Small Downdraft Biomass Gasifier for Developing Countries, 2011).

#### 4.3.2. Desarrollar una simulación en el software DWSIM, del proceso de gasificación de biomasa y posterior combustión del gas de síntesis obtenido

La obtención del gas combustible llamado gas de síntesis se obtuvo en un modelado del proceso de gasificación que se llevó a cabo con el apoyo de un modelo en equilibrio químico previamente publicado y validado, involucrando el análisis elemental y próximo de las biomásas a tratar. Esta conexión de ecuaciones expresa los resultados obtenidos para rangos de temperaturas de 500-1500 K y 1 atm de presión; estas ecuaciones son resueltas mediante el software EES (Quintero Coronel , Espinel Blanco, & Florez Solano, 2019).

La relación de equivalencia se planteó como parámetro principal de variación. Es decir, como variable a cambiar para analizar el comportamiento de los productos de gasificación. La cual, se refiere a la cantidad de aire (oxígeno) que se requiere para que los componentes carbonosos en la corriente de alimentación se conviertan completamente en gas de síntesis. La relación de equivalencia se expresa como una relación entre la cantidad de aire que se alimenta al proceso y la cantidad teórica de aire que se necesita para quemar completamente los componentes carbonosos presentes en la corriente de alimentación. En este orden de ideas, se planteó con valores de 0.3 – 0.4 – 0.5 con excesos de aire de 110 – 150 – 200 para cada uno de los casos de las relaciones de equivalencia. Planteando escenarios en los que se utilizan cantidad de aire mucho mayor a la requerida teóricamente para la combustión completa de los combustibles.

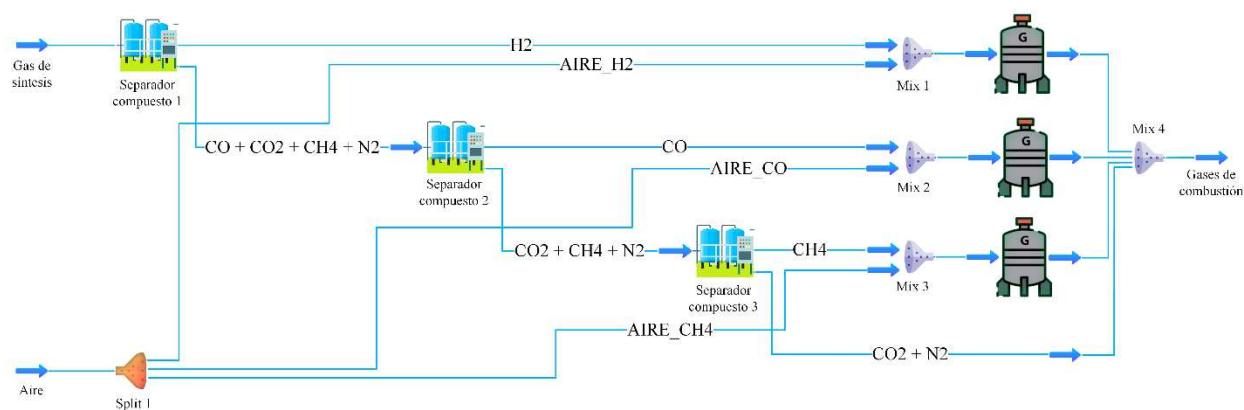
En continuación con lo anterior se realizó el proceso de combustión del gas de síntesis (Figura 11) obtenido a raíz de la gasificación de la biomasa. El desarrollo de la simulación de la combustión del syngas se plantea en DWSIM, planteando el siguiente procedimiento:

- Crear un nuevo archivo de simulación.
- Definir los componentes que se utilizarán en la simulación. En este caso, se debe agregar la composición del gas de síntesis, oxígeno y productos de la combustión.
- Definir las propiedades de los componentes: Una vez que se han especificado los componentes, se deben definir las propiedades de estos. Para ello, se pueden utilizar los datos termodinámicos disponibles en las bibliotecas de DWSIM, en caso de biomasa se recomienda el uso del modelo Peng-Robinson (PR) (tosun, 2013).

- Modelado de la composición del combustible: Los combustibles utilizados en este estudio y en aplicaciones energéticas avanzadas suelen ser mezclas complejas de varios componentes, como hidrocarburos, oxígeno, nitrógeno, azufre, entre otros. Al descomponer los combustibles en sus componentes individuales, se puede especificar la composición exacta de la mezcla y modelar su comportamiento durante la combustión de manera más precisa.
- Configurar el reactor: Agregue un reactor a la simulación y configure las condiciones de operación. En este caso, se debe seleccionar un reactor de Gibbs y definir las condiciones de temperatura y presión.
- Configurar la corriente de alimentación: Configure la corriente de alimentación del reactor. En este caso, se deben agregar las corrientes de gas de síntesis y Aire, y definir las condiciones de temperatura y presión.

**Figura 11.**

*Diagrama de combustión planteado en DWSIM.*



Nota. Elaboración propia.

Para la correcta simulación y evitar errores a la hora de ejecutar el proceso es de suma importancia determinar y seleccionar la o las ecuaciones de estado que influyen en datos como, presión, temperatura, densidad, entalpía, entropía, entre otras.

La ecuación de estado Peng-Robinson es una opción popular en la simulación de procesos de combustión, ya que tiene un buen desempeño en la predicción de las propiedades termodinámicas de las mezclas de gases (Castro Costa , Teixeira Machado, & Emmi Araujo, 2017).

#### ***4.3.3. Validar la simulación realizada en el software DWSIM, mediante un análisis comparativo con trabajos experimentales reportados en la literatura.***

La simulación es una herramienta importante en la ingeniería y la ciencia, ya que permite predecir el comportamiento de sistemas complejos y analizar diferentes escenarios sin necesidad de realizar experimentos costosos y laboriosos en la vida real. La validación de la simulación realizada en DWSIM es un proceso crítico y fundamental para asegurar que los resultados obtenidos sean precisos y confiables, para posteriormente tenerlos en cuenta para el diseño, optimización y ejecución de estufas gasificadoras para la región o procesos que involucren las variables tratadas. Dicha validación se realizó con datos reportados en la literatura. En su investigación “Desarrollo de un modelo de equilibrio químico del proceso de gasificación en un lecho fijo de corrientes descendentes con temperatura conocida del producto, utilizando el aire como agente oxidante” (Quintero Coronel , Espinel Blanco, & Florez Solano, 2019).

El modelo planteado por los autores se basa en un arreglo de ecuaciones a partir de un balance de energía para un sistema de flujo estacionario con base en la primera ley de la termodinámica, dando como resultado la ecuación que expresa la ecuación 16.

$$\begin{aligned}
 0 = & (\bar{h}_{f_{CH_xO_yN_z}}^{\circ} + \Delta\bar{h}_{CH_xO_yN_z}) + a(\bar{h}_{f_{O_2}}^{\circ} + \Delta\bar{h}_{O_2}) + w(\bar{h}_{f_{H_2O(l)}}^{\circ} + \Delta\bar{h}_{H_2O(l)}) + 3.76a(\bar{h}_{f_{N_2}}^{\circ} + \Delta\bar{h}_{N_2}) \\
 & -x_1(\bar{h}_{f_{H_2}}^{\circ} + \Delta\bar{h}_{H_2}) - x_2(\bar{h}_{f_{CO}}^{\circ} + \Delta\bar{h}_{CO}) - x_3(\bar{h}_{f_{CO_2}}^{\circ} + \Delta\bar{h}_{CO_2}) - x_4(\bar{h}_{f_{H_2O(g)}}^{\circ} + \Delta\bar{h}_{H_2O(g)}) \\
 & -x_5(\bar{h}_{f_{CH_4}}^{\circ} + \Delta\bar{h}_{CH_4}) - \left(\frac{z}{2} + 3.76a\right)(\bar{h}_{f_{N_2}}^{\circ} + \Delta\bar{h}_{N_2})
 \end{aligned} \tag{16}$$

Donde,  $\bar{h}_f^{\circ}$  = entalpia de formación,  $\Delta\bar{h}$  = cambio de entalpia,  $n_R$  = moles de los reactivos y  $n_P$  = moles de los productos. Tomado de (Quintero Coronel, Espinel Blanco, & Florez Solano, 2019).

#### ***4.3.4. Efectuar un análisis de sensibilidad de las condiciones de flujo, temperatura y presión, evaluando su influencia sobre el proceso de gasificación y combustión con base en los requerimientos para la cocción de alimentos***

**4.3.4.1. Fracción molar según relación de equivalencia.** En las siguientes figuras se pueden apreciar el comportamiento de las composiciones de los productos de la combustión. El nitrógeno, dióxido de carbono, oxígeno y el agua. En el caso de la cascara de cacao (Figura 12 a.) la de  $CO_2$  y  $H_2O$  disminuyen a medida que aumenta su E.R. Para las relaciones de equivalencia planteadas, la fracción molar de los productos disminuyen para los casos del  $H_2O$  y

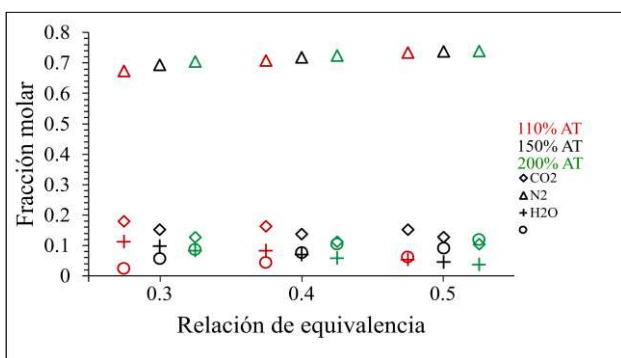


CO<sub>2</sub>, a medida que el aire teórico aumenta ya que se promueve la oxidación adicional de estos, y adicionalmente conduce a la formación de oxígeno adicional como se muestra en esta figura.

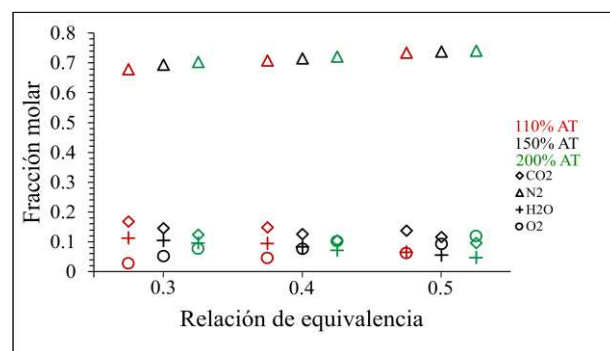
Sin embargo, el nitrógeno (N<sub>2</sub>) va en aumento a medida que las variables aumentan. Dado que, al aumentar relación de equivalencia, hay más moles de aire presentes en relación con otros componentes en la mezcla. Además, el hecho de ser un compuesto inerte genera que la fracción molar aumenta conforme aumentan estas variables. En todas las biomazas se observa el mismo comportamiento en las fracciones molares debido a la estandarización de parámetros como temperatura de entrada, presión y funcionamiento de los reactores (adiabáticos).

**Figura 12.**

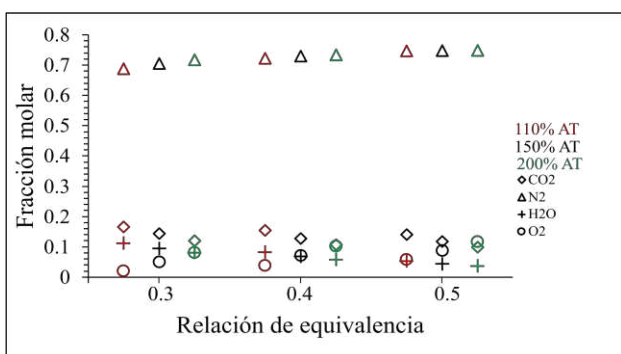
*Comportamiento de los productos de la combustión de las biomazas en concordancia con la E.R. y aire teórico.*



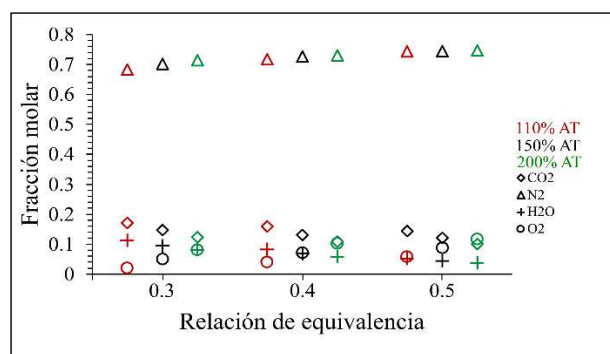
a. Cáscara de Cacao



b. Tallos de tomate



c. Madera de café



d. Madera de aguacate

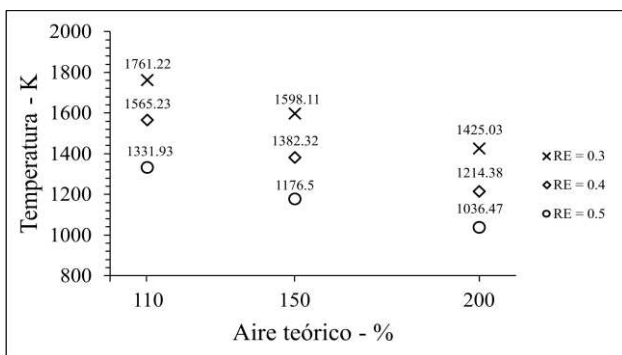
Nota. Elaboración propia

**4.3.4.2. Alcance de la temperatura según la relación de equivalencia.** La temperatura de salida de los gases está relacionada con la eficiencia de combustión de la biomasa. Una temperatura de salida más alta puede indicar una combustión más completa y eficiente, lo que significa que se ha aprovechado más energía de la biomasa y se ha liberado menos combustible no quemado o productos de combustión incompletos.

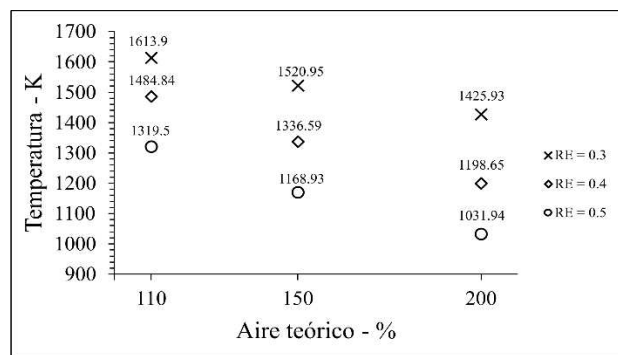
En el proceso de combustión se aprecia que la mayor temperatura alcanzada corresponde a 1827.76 en la madera de aguacate cuando la E.R es 0.3 con un exceso de aire teórico de 110%. En estas imágenes se ven reflejados altas temperaturas los cuales se deben arreglos que se plantean en la simulación principalmente el hecho de ser adiabático el sistema.

**Figura 13.**

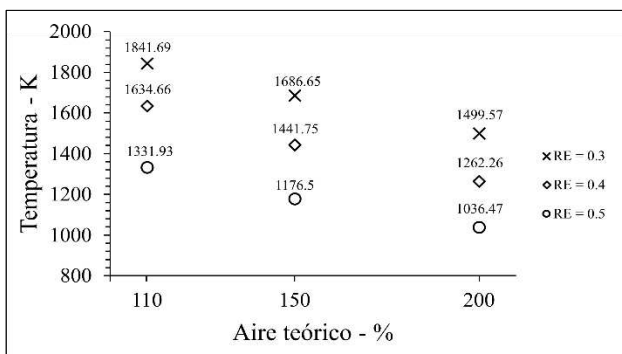
*Comportamiento la temperatura en la combustión según E.R. y aire teórico.*



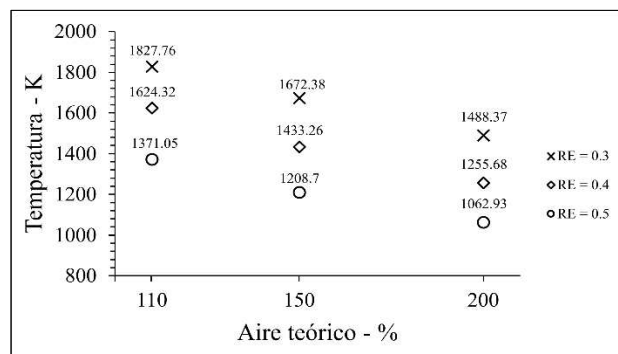
a. Cáscara de Cacao



b. Tallos de tomate



c. Madera de café



d. Madera de aguacate

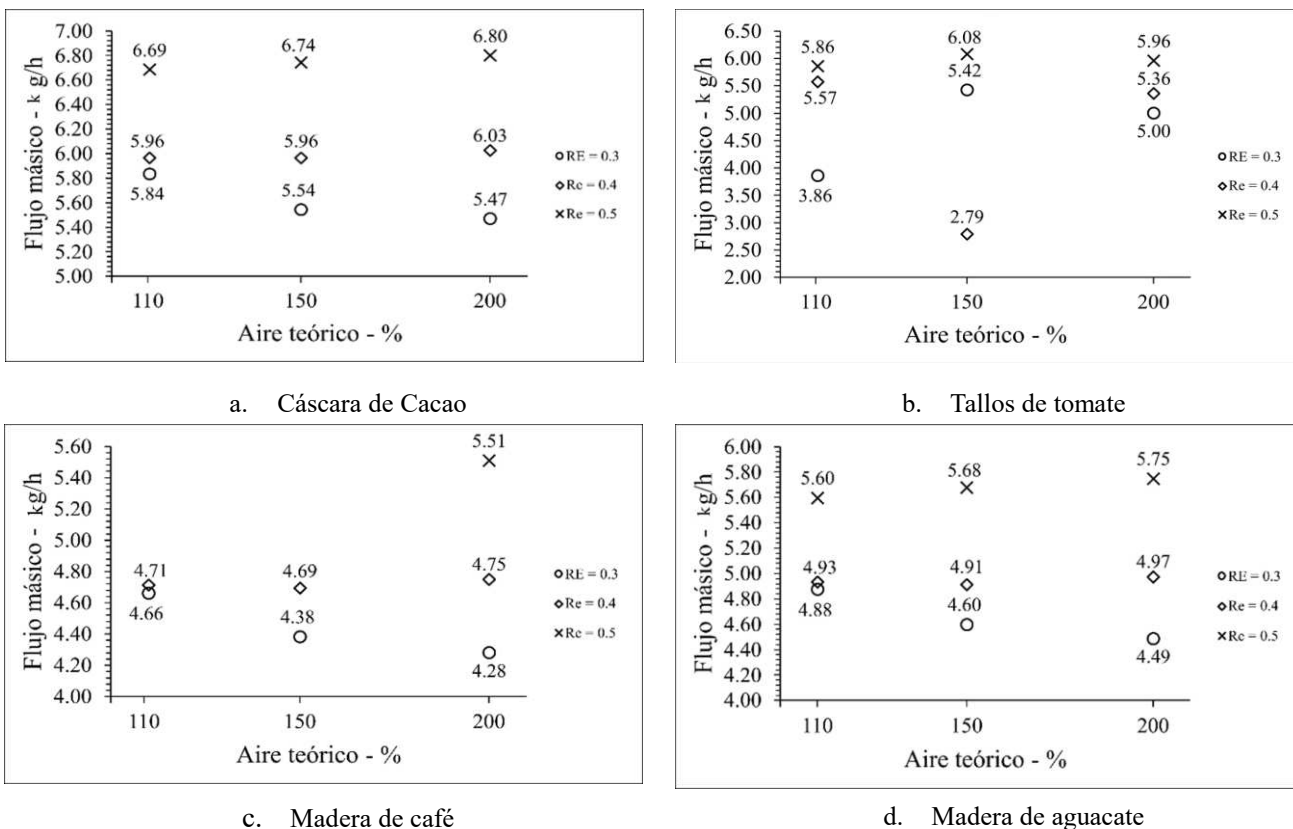
Nota. Elaboración propia.

Una temperatura demasiado baja puede provocar la condensación de ciertos compuestos y la formación de cenizas, lo que puede disminuir la eficiencia del sistema. Sin embargo, el hecho de que se hayan obtenido temperaturas muy bajas no significa que se enfríen los gases producto bruscamente que es la razón principal por la cual aparecen los condensados, otras de las variables que influyen en este fenómeno es la permanencia de que estos productos la cámara de combustión, así como la presión de combustión y las condiciones de enfriamiento a las que estos expuesta estos productos, la suma de estas variables dificulta definir en cada caso de los estudiados se podría presentar fenómenos como la condensación. La menor temperatura fue alcanzada por los tallos de tomate cuando la E.R es 0.5 y el porcentaje de exceso de aire teórico es de 100.

**4.3.4.3. Flujo masico necesario para suplir la demanda de potencia térmica.** el flujo másico de combustible influye directamente en la potencia térmica generada. Cuanto mayor sea el flujo másico de combustible, mayor será la cantidad de calor liberado durante la combustión. Esto se debe a que una mayor cantidad de masa de combustible se quema, lo que resulta en una liberación de energía térmica más intensa. Por lo tanto, un aumento en el flujo másico puede aumentar la potencia térmica generada por la estufa. En la figura 14 se expresa el flujo masico necesario para alcanzar la potencia térmica necesaria determinada anteriormente de 17.54 kW. siendo la cascara de cacao la biomasa que requiere mayor cantidad de gas de síntesis por hora (6.8 kg/h) para alcanzar la potencia requerida. Mientras que los tallos de tomate con una relación de equivalencia de 0.4 y cantidad de aire teórico de 150 la menor cantidad de gas de síntesis (2.70 kg/h).

Figura 14.

comportamiento del flujo masico según la E.R. y A.T



Nota. Elaboración propia.

La potencia térmica de una estufa individual puede variar dependiendo del tipo de estufa, su diseño y las especificaciones del fabricante. En general, las estufas individuales para uso doméstico suelen tener una potencia térmica que oscila entre 2 kW y 5 kW. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este rango puede variar las especificaciones técnicas para cada fabricante. Es decir, que al proporcionar el flujo masico expuesto para cada una de las condiciones y biomazas se cubre la potencia térmica utilizada por la industria para la cocción de alimentos.

## 5. Conclusiones.

La simulación del proceso de gasificación y combustión de las principales biomásas del Catatumbo con el fin de implementar estufas gasificadoras brinda una comprensión detallada de su valor energético, el potencial de generación de energía, la composición de los productos de gasificación y los contaminantes. Además, ofrece oportunidades para optimizar el proceso y mejorar la eficiencia energética. Sin embargo, al aplicar una simulación hay parámetros importantes que son muy complejos para tener en cuenta, por ejemplo, el tamaño de partícula no se tuvo en cuenta en esta simulación, por lo que se invita a acompañar estudios de simulaciones con un posterior estudio experimental para estar más acorde a la realidad del proceso.

La menor cantidad de combustible necesario para satisfacer las necesidades básicas de cocción de alimentos para los habitantes de la región del catatumbo se obtienen a medida que se aumenta la cantidad de aire teórico que ingresa al sistema y la relación de equivalencia es menor. En el caso de la madera de aguacate E.R:0.3 y A.T:200%, lo mismo para la cascara de cacao y madera de café. Sin embargo, no para todos los tipos de biomásas es correcta esta afirmación como los tallos de tomate que alcanzan la menor cantidad de combustible cuando el A.T: 150% y la E.R: 0.4, lo que se hace necesario la no generalización de estas variables para todas las biomásas de la región e invita al análisis individual de cada biomasa.

Una mayor temperatura alcanzada garantiza el aprovechamiento del combustible y por consiguiente menor liberación de combustible no quemado lo cual es material contaminante. Estas temperaturas elevadas se alcanzan a una menor cantidad de exceso de aire (10%) y una

relación de equivalencia de 0.3. este último valor era lo recomendable por la literatura, por lo que se comprueba en esta simulación, para estas biomásas y parámetros planteados.

Independiente de la biomasa a gasificar en una estufa, existe un factor a tener en cuenta, la humedad, ya que se debe esperar un tiempo prudente y someter a ciertas condiciones ambientales (ventilación, por ejemplo) para poder disminuir este valor lo menor posible y evitar así pérdidas de energía en el sistema. Pues, aunque el poder calorífico es un valor que proporciona información sobre el potencial energético de la biomasa. No sirve de nada tener una biomasa con alto contenido de humedad y a su vez alto valor energético como por ejemplo el caso del cisco de café que contiene porcentaje de humedad por encima del 10% y poder calorífico de 19,477 MJ/kg, no obstante, tiene una alta capacidad de producir energía en forma de calor, pero la eliminación de su humedad en la gasificación se ira a consumir energía para su secado.

## **6. Recomendaciones.**

Asegurarse de que la biomasa a utilizar en la gasificación esté lo más seca posible para evitar pérdidas de energía innecesarias. Esto implica tomar medidas anticipadas a la gasificación (ventilación, exposición a rayos solares) para reducir la humedad antes utilización como combustible este hecho no significa que haya biomasa que no se recomienden utilizar por su porcentaje de humedad, lo que se sugiere es dejar en reposo temporal a la biomasa.

Es importante conocer más a fondo este software para poderlo utilizar en este tipo de proyecto pues no se contó con mucha ayuda por parte de la literatura que nos permitiera avanzar de una forma confiada.

Utilizar las simulaciones para optimizar el diseño de la ecoestufa (estufa gasificadora) y plantear parámetros de partida para el posterior diseño de estufas como. Por ejemplo, el flujo masico arrojado por el análisis para cada biomasa brinda una idea de cuanto combustible es necesario dependiendo de cada biomasa y este es un punto de partida para tener en cuenta por ejemplo en las dimensiones de las cámaras de combustión.

### Bibliografía.

- Agüero, A., Pisa, J., Agüero, C., & Torres Bugeau, A. (2011). *Poder Calorífico del Bagazo de Caña de Azúcar*. Tucumán: Universidad Nacional de Tucumán.
- Bundschuh, J. (2013). *Technologies for Converting Biomass to Useful Energy*. Australia: Erik Dahlquist.
- Chawdhury, M. A., & Mahkamov, K. (2011). Development of a Small Downdraft Biomass Gasifier for Developing Countries. *Journal of scientific research*, 51-64.
- Díez, H. E., & Pérez, J. F. (2017). Physicochemical Characterization of Representative Firewood Species Used for Cooking in Some Colombian Regions. *Hindawi*, 1-13 .
- Escobar Barroso, L. (Diciembre de 2021). Simulación mediante DWSim de la producción de biodiesel y gasificación de biomasa de *Jatropha curcas*. La Habana, Cuba.
- Escoto Gudiel, N. D. (2004). *El cultivo de frijol*. Tegucigalpa: PROMOSTA.
- Herrera Viteri, J. A. (Diciembre de 2010). Fabricación y evaluación de la estufa T-LUD con diferentes tipos de combustibles. zamorano, Honduras .
- Jetter, J., Zhao, Y., Smith, K. R., Khan, B., Yelverton, T., DeCarlo, P., & Hays, M. D. (2012). Pollutant Emissions and Energy Efficiency under Controlled Conditions for Household Biomass Cookstoves and Implications for Metrics Useful in Setting International Test Standards. *Environmental Science & Technology*, 10827-10834.
- Kaewluan, S., & Pipatmanomai, S. (2009). Potential of synthesis gas production from rubber wood chip gasification in a bubbling fluidised bed gasifier. *Energy Conversion and Management*, 75-84.
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. *Bioresource Technology*, 55-63.



- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Lineamientos para un programa nacional de estufas eficientes para cocción con leña. BOGOTÁ, D.C., Cundinamarca, Colombia .
- Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2006). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. England: Other Wiley Editorial Offices.
- Ó Loingsigh, G. (2008). *Catatumbo: Un reto por la verdad*. Bogota: Comité de Integración Social del Catatumbo - CISCA.
- P. Ramírez, A., Giraldo, S., Flórez, E., & Acelas, N. (2016). *Preparation of activated carbon from palm oil wastes and their application for methylene blue removal*. Medellin: Colomb. Quim.
- Qian, H., Guo, X., Fan, S., Hagos, K., Lu, X., Liu, C., & Huang, D. (2016). A Simple Prediction Model for Higher Heat Value of Biomass. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 1-7.
- Ramírez Rubio, S., Sierra, F. E., & Guerrero, C. A. (2011). Gasification from waste organic materials. *Ingenieria e investigaciòn*, 17-25.
- Saravanakumar, A., Haridasan, T. M., Reed, T. B., & Kasturi Bai, R. (2007). Experimental investigations of long stick wood gasification in a bottom lit updraft fixed bed gasifier. *Fuel Processing Technology*, 617–622.
- Sierra Vargas, F. E., Mejia B., F., & Guerrero F., C. A. (2011). leña como combustible doméstico en zonas rurales de Usme, bogotá. *Universidad Nacional de Colombia.*, 30-40.
- TORRES VASQUEZ , J. A. (2016 de 09 de 2017). INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD Y EL TAMAÑO DE LOS RESIDUOS DE LA MADERA DE *Copaifera officinalis* L. (copaiba) SOBRE EL PODER CALORIFICO DEL GASOGENO

GENERADO Y LA HUELLA DE CARBONO. UCAYALI, PUCALLPA, República del Perú.

tosun, i. (2013). The Thermodynamics of Phase and Reaction Equilibria. *Elsevier BV*, 163-224.

A, K., & J. R, G. (1981). *State of the art report for small scale (to 50 KW) gas producer-engine systems*. california : university of California.

Acevedo Gil, S., & Zapata Rojas, E. (2021). *Aplicativo móvil para el costeo de cultivos transitorios agrícolas*. Medellín: Tecnológico de Antioquia - Institución Universitaria.

Alvarez Cruz , D. U., & Marmolejo Correa, D. (2016). SIMULACIÓN DE REACTORES ENDOTÉRMICOS CON INTEGRACIÓN TÉRMICA Y MÁSCICA. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 1076-1080.

Alvarez R., J. E. (2012). *Caracterización de la gasificación y de pirolisis de la tusa de la palma de aceite*. Bogota: Universidad de los Andes.

Basu, P. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction Practical Design and Theory*. London: Elsevier.

Becerra Becerra , E. L. (2017). *caracterización de desecho agroindustrial de la palma de aceite "cuesco" para el mejoramientos de las capas granulares de la estructura de pavimento*. Bogotá: Universidad militar nueva granada.

Becerra Cardenas , J. A. (2014). *Modelo cinetico para determinar parametros cineticos de la pirolisis de la cascarilla de café*. Bogota: Universidad de los Andes.

Beheshti, S. M., Ghassemi, H., & Shahsavan-Markadeh, R. (2015). Process simulation of biomass gasification in a bubbling fluidized bed reactor. *Energy Conversion and Management*, 345-352.

- Castro Costa , E., Teixeira Machado, N., & Emmi Araùjo, M. (2017). SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE ÓLEO DE PALMA UTILIZANDO OS SOFTWARES ASPEN HYSYS E DWSIM. *Encontro de profissionais da química da Amazonia*, 796-803.
- Castro M., E. S. (1986). *propiedades termicas de los alimentos* . Universidad de Chile.
- Causil Villalba , R. D., & Guzmán Mestra , V. A. (2016). *caracterizacion de las fibras de capacho de maiz (zea mays) como material de refuerzo alternativo para el concreto mediante ensayoas mecanicos*. Monteria: Universidad de Córdoba .
- Centro internacional de agricultura tropical. (1981). *morfologia de la planta de arroz*. cali: CIAT.
- Centro Nacional de Memoria Histórica. (2018). *CATATUMBO: MEMORIAS DE VIDA Y DIGNIDAD*. Bogotá D.C.: Centro Nacional de Memoria Histórica.
- Champion, W. M., Warren, S. H., Kooter, I. M., Preston, W., Krantz, Q. T., DeMarini, D. M., & Jetter, J. J. (2020). Mutagenicity- and pollutant-emission factors of pellet-fueled gasifier cookstoves: Comparison with other combustion sources. *Science of the Total Environment*, 10.
- Chawdhury, M. A., & Mahkamov, K. (2010). Development of a Small Downdraft Biomass Gasifier for Developing Countries. *JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH*, 51-64.
- Chica, E., & Pérez, J. F. (2019). Development and performance evaluation of an improved biomass. *Case Studies in Thermal Engineering*, 01-07.
- Clavijo Ortiz, G. D. (2015). *formulacion del modelo teorico del proceso de gasificacion de biomasa de un reactor de lecho fijo* . Ocaña: universidad francisco de paula santander ocaña.

Comisión para el Esclarecimiento de la Verdad y la Convivencia y la No Repetición. (diciembre de 2020). *Las verdades y luchas que cuentan las voces del catatumbo*. Obtenido de Las verdades y luchas que cuentan las voces del catatumbo:

<https://rutasdelconflicto.com/especiales/catatumbo/#:~:text=%2D%20Extensi%C3%B3n%20territorial%3A%20829%20km%C2%B2.,Altitud%20m%C3%A1xima%3A%201.076%20m%20s.%20n.%20m.>

Consejo Nacional de Política Económica y Social. ( 14 de marzo de 2005). Documento Conpes 3344. Bogotá, D.C., Cundinamarca, República de Colombia.

Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2013). *Documento Conpes 3739*. Bogotá D.C.: Consejo Nacional de Política Económica y Social.

DANE. (2019). *Resultados censo nacional de población y vivienda 2018*. San José de Cucuta: DANE.

de la Hoz C, K., & González, W. A. (2020). Energy performance and variability of an improved top-lit updraft biomass cookstove under a water boiling test protocol. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 01-21.

De La Hoz C, K., Pérez, J., & Chica Arrieta, E. L. (2017). Design of a Top-Lit Up-Draft Micro-gasifier Biomass Cookstove by Thermodynamic Analysis and Fluent Modeling.

*INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH* , 2172-2187.

Díez, H. E., Gómez, I. N., & Pérez, J. F. (2018). *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 01-10.

Estrada, C. A., & Zapata Meneses, A. (2004). gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. *Scientia et Technica Año X*, 155-159.

- Fonseca, S., Rodríguez, H., & Camargo, G. (2017). Caracterización de residuos de de maíz del municipio de ventaquemada, colombia. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 29-36.
- Gómez Charry, R. L., Aristizábal Hernández, J. D., & Cárdenas, L. M. (2015). *Fundación Natura. Estufas eficientes de leña como contribución a la calidad de vida, al uso eficiente de la energía y la reducción de emisiones de GEI en áreas rurales de Antioquia y Santander, Colombia: Documento de sistematización y Suplemento técnico*. Bogota D.C: Fundación Natura.
- González García, R. A. (2016). *Simulación del proceso de gasificación de biomasa*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Hossain, M. M., Scott, I. M., Berruti, F., & Briens, C. (2017). Application of Novel Pyrolysis Reactor Technology to Concentrate Bio-oil Components with Antioxidant Activity from Tobacco, Tomato and Coffee Ground Biomass. *Springer Science*.
- Instituto Colombiano de Bienestar Familiar. ( 2020). *Guías Alimentarias Basadas en Alimentos para la población colombiana mayor de 2 años*. Bogota D.C.: Instituto Colombiano de Bienestar Familiar.
- Jarunghammachote, S., & Dutta, A. (2007). Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier. *Energy*, 1660–1669.
- K. Kajumba, P., Okello, D., Nyeinga, K., & J. Nydal, O. (2022). Assessment of the energy needs for cooking local food in Uganda: A strategy for sizing thermal energy storage with cooker system. *Energy for Sustainable Development*, 67-80.
- Keily De La Hoz C, J. F. (2017). Design of a Top-Lit Up-Draft Micro-gasifier . *INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH*, 2187.

- Kshirsagar, M. P., & Kalamkar, V. R. (2013). A comprehensive review on biomass cookstoves and a systematic approach for modern cookstove design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24.
- Manals-Cutiño, E. M. (2018). Characterization of vegetable biomass coffee husk. *Universidad de Oriente*, 169-181.
- Molino, A., Chianese, S., & Musmarra, D. (2015). Biomass gasification technology: The state of the art overview. *ELSEVIER*, 10-25.
- Morice Montoya, J. G. (2017). *Evaluacion de la eficiencia energetica de un sistema de gasificacion comercial para la produccion de electricidad apartir de residuos de madera*. San José: Universidad de costa rica.
- Nguyen Van Lanh, N. H. (2016). Effect of the air-flow on the production of syngas, tar and biochar using rice husk and sawdust as feedstock in an updraft gasifier stove. *Livestock Research for Rural Development*, 9.
- Núñez de Balboa, C. (2012). *BIOMASA Y DESARROLLO*. Madrid: Gráficas Áncora, S.A.
- Ordoñez Pineda, K. L., & Sepúlveda Monroy, C. (2019). *caracterización fisico quimica de los residuos del plátano y el café para su posible uso como materias primas en la fabricación de papel*. Bogotá: Universidad distrital Francisco José De Caldas.
- Panwar, N., & Rathore, N. (2008). Design and performance evaluation of a 5 kW producer gas stove. *BIOMASS AND BIOENERGY*, 1349-1352.
- Pérez, H. E. (2017). Physicochemical Characterization of Representative Firewood Species Used for Cooking in Some Colombian Regions. *International Journal of Chemical Engineering*, 13.

- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD. (2014). *Catatumbo: análisis de la conflictividades y construcción de paz*. Bogota D.C.: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Quintero Coronel , D. A., Espinel Blanco, E. E., & Florez Solano, É. N. (2019). Development of a Chemical Equilibrium Model of the Downdraft Fixed Bed Gasification Process with known Product Temperature, Using air as an Oxidizing Agent. *Ingeniería y Universidad*, 1-18.
- Rodriguez De Montes , M. L. (1964). *Lexico de la alimentacion* . centro virtual cervantes.
- ROMERO SALVADOR , A. (2010). APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA ALTERNATIVA A LOS COMBUSTIBLES FÓSILES. *Rev.R.Acad.Cienc.Exact.Fís.Nat.* , 331-345.
- Roth , C. (2011). *Micro Gasification: Cooking with gas from biomass* . Eschborn: GIZ HERA.
- Roth, C. (2014). *Micro-gasification: cooking with gas from dry biomass*. Berlin: GIZ.
- S. Varunkumar, N. K. (2012). SINGLE PARTICLE AND PACKED BED COMBUSTION IN MODERN GASIFIER STOVES—DENSITY EFFECTS. *Taylor & Francis*, 1-18.
- Sánchez Duran, Y., & Jaimes M., E. (2020). *Plan Departamental de Extension Agropecuaria, Norte de Santander*. San Jose de Cucuta: PDEA.
- Sánchez Quezada, J. P. (2013). *Evaluacion energética de cáscaras de cacao nacional y CCN-51*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Santos Mèndez, I. A. (2017). *Secado de residuos de aguacate hass*. Chiapas: Instituto Tecnològico de Tuxtla Gutièrrez.
- Schmid, M. R., Gutzwiller, S., & Zellweger, H. (2015). *Pulpa Pyro Peru – Clean generation of biochar and energy from coffee pulp*. Suiza / Perú / Vietnam: Sofies Emac.

- SIEMENS. (febrero de 2014). *SIEMENS*. Obtenido de SIEMENS: <https://www.siemens-home.bsh-group.com/es/inspiracion/innovaciones/novedades-producto/tabla-temperaturas-coccion-alimentos>
- Thomas Kirch, P. R. (2016). Natural draft and forced primary air combustion properties of a top-lit up-draft research furnace. *Biomass and Bioenergy*, 1-8.
- Tobío-Pérez, I., Díaz-Domínguez, Y., Pfeil, M., Denfeld, D., Piloto-Rodríguez, R., & Pohl, S. (2020). Simulation of the biomass gasification process from *Jatropha curcas* and *Dichrostachys cinerea*. *AFINIDAD LXXVII*, 228-235.
- Trujillo Aranda , E. (2017). produccion y caracterizacion de biochar a partir de residuos organicos avicolas. Lima, LA MOLINA, Perú.
- US-Pakistan Center of Advanced Studies in Energy . (2016). *Biomass Gasification Systems Training Manual*. Islamabad: UNIDO & USPCAS-E National University of Sciences and Technology.
- Valverde G., A., Sarria L. , B., & Monteagudo Y., J. (2007). Comparative analysis of the Physicochemicals Characteristics of the rice husk. *Scientia et Technica*, 255-.
- Villavicencio Poveda, Á. H., Gutiérrez Gualotuña, E. R., Carvajal Jara, C. A., & Tafur Escanta, P. M. (2017). Caracterización de la biomasa residual de cacao CCN51 para obtencion del poder calorifico mediante procesos de gasificacion anaeróbico y termoquimico. *XXIV Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente*, 13 -17.
- Vitali, F., Parmigiani, S., Vaccari, M., & Collivignarelli, C. (2013). Agricultural waste as household fuel: Techno-economic assessment of a new rice-husk cookstove for developing countries. *Waste Management*, 2762–2770.
- Yogesh Mehta, C. R. (2017). Gasification Performance of a Top-Lit Updraft. *energies*, 2.



Zamorano Bohòrquez , D. L. (2017). *Concentracion de material particulado por combustion de leña en la zona rural del municipio de Santa Sofia, Boyaca*. Bogota D.C: Universidad Militar Nueva Granada.