

**Evaluación de la eco-eficiencia del proceso de combustión de biocombustibles de tambo
de arroz y rastrojo de maíz.**

Yurley Paola Villabona Durán

Trabajo de investigación para optar por el título de Magíster en ingeniería química

Director:

Dr.Sc. Viacheslav Kafarov

Doctor en Ciencias Técnicas

Co-directora:

Ph.D. Karina Angélica Ojeda

Doctora en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Maestría en Ingeniería Química

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

Este proyecto de investigación se lo dedico principalmente a mi hijo Mathias quien es el motor de mi vida y quien alegra mis días.

A mis padres Francisco y Doris, a mis hermanos Francisco, Cindy y Silvia por su apoyo incondicional para culminar mis estudios, los tengo siempre presente en mi corazón.

A mis amigos Anibal, Juan Carlos y Andrés, gracias por su apoyo, motivación y por ser incondicionales conmigo.

A mis amigos y demás familiares.

Yurley Paola Villabona Durán

Agradecimientos

Al doctor Viatcheslav Kafarov, por depositar su confianza en mí, dirigir mi proyecto de investigación y brindarme apoyo durante su desarrollo.

A la doctora Karina Angelica Ojeda, por ser mi codirectora y guía en el desarrollo de esta tesis, gracias por compartirme su conocimiento, con sus valiosas enseñanzas profesionales y de vida.

A mis amigos y compañeros del grupo de investigación Cides, por su disposición y apoyo.

Al laboratorio CIDELAC por permitirme instar los equipos para la experimentación.

Al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (COLCIENCIAS) por el apoyo económico a este trabajo que forma parte del proyecto "Estudio y caracterización de la combustión de biocombustibles producidos con biomasa autóctona con el fin de aumentar la eco-eficiencia en los sistemas energéticos de los sectores residenciales rurales" Código de COLCIENCIAS: 1101-543-32153.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción.....	17
1. Planteamiento del problema y justificación	18
2. Generalidades	21
2.1 Biomasa	21
2.1.1 Ecoeficiencia de la combustión:	23
2.1.2 Densificación de la biomasa	23
2.2 Combustión de biomasa	24
2.2.1 Residuos de combustión	28
2.2.2 Estudios previos de Combustión de biomasa en Colombia.....	31
3 Hipótesis	32
4 Objetivos.....	32
4.1 General.....	32
4.2 Específicos.....	32
5 Metodología.....	34
5.1 Etapa 1: selección de la tecnología de combustión de biomosas compactadas de tambo de arroz y rastrojo de maíz.	35
5.1.1 Búsqueda de la información:	35
5.1.2 Selección de la tecnología de combustión:.....	35

5.2 Etapa 2: estimación de los parámetros de combustión de biomosas compactadas de tamo de arroz y rastrojo de maíz y su efecto en la eco-eficiencia y las emisiones del proceso. ...	36
5.2.1 Evaluación del proceso de densificación de los dos tipos de biomasa agrícola	36
5.2.1.1 Pruebas experimentales de densificación:	37
5.2.2 Pruebas experimentales de combustión	42
5.2.3 Análisis de resultados de las pruebas experimentales del proceso de combustión	45
5.2.4 Análisis del proceso de combustión	45
5.3 Etapa 4: evaluación del proceso de combustión biomosas compactadas de tamo de arroz y rastrojo de maíz utilizando software especializado.	51
5.3.1 Simulación del proceso de combustión de los biocombustibles.....	51
5.3.2. Validación de la simulación	52
5.4 Etapa 5: elaboración de recomendaciones para implementación de tecnología de combustión seleccionada.	52
5.4.1 Elaboración del informe técnico que presente recomendaciones respecto a la implementación de la tecnología de combustión seleccionada	52
6 Resultados.....	53
6.1 Etapa 1: selección de la tecnología de combustión de biomosas compactadas de tamo de arroz y rastrojo de maíz.	53
6.1.1 Análisis de la información:.....	53

6.1.2 Análisis de patentes	59
6.2 Etapa 2: estimación de los parámetros de combustión biomásas compactadas de tamo de arroz y rastrojo de maíz y su efecto en la eco-eficiencia y las emisiones del proceso.	66
6.2.1 Evaluación del proceso de densificación de los dos tipos de biomasa agrícola	66
6.2.2 Análisis de resultados de las pruebas experimentales del proceso de combustión:	77
6.2.3. Modelo estadístico para el ajuste de datos.....	89
6.3 Etapa 4: evaluación del proceso de combustión biomásas compactadas de tamo de arroz y rastrojo de maíz utilizando software especializado.	94
6.3.1 Bases de la simulación.....	94
6.3.2. Verificación de la simulación:	97
6.4 Etapa 4: elaboración de recomendaciones para implementación de tecnología de combustión seleccionada.	99
6.4.1 Elaboración del informe técnico que presente recomendaciones respecto a la implementación de la tecnología de combustión seleccionada	99
7 Conclusiones.....	100
8 Divulgación de resultados	102
Referencias bibliográficas	104
Apéndices	112

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Variables independientes proceso de densificación.....	40
Tabla 2. Diseño de experimentos densificación de biomasa	41
Tabla 3. Factores experimentales	44
Tabla 4. Variables respuestas a medir.....	44
Tabla 5. Artículos científicos más referenciados en el periodo evaluado.....	57
Tabla 6. Principales categorías de patentes en el área de combustión de biomasa	60
Tabla 7. Análisis mediante fluorescencia de rayos x por reflexión total del tamo de arroz....	66
Tabla 8. Análisis mediante fluorescencia de rayos x por reflexión total del rastrojo de maíz.	67
Tabla 9. Poder calorífico de las biomasas	67
Tabla 10. Porcentaje de lignina, celulosa y hemicelulosa para el tamo de arroz.....	68
Tabla 11. Porcentaje de lignina, celulosa y hemicelulosa para el rastrojo de maíz.....	68
Tabla 12. Humedad, volátiles, carbono fijo, contenido de cenizas para el tamo de arroz	68
Tabla 13. Humedad, volátiles, carbono fijo, contenido de cenizas para el rastrojo de maíz	69
Tabla 14. Análisis de varianza para poder calorífico de tamo de arroz	71
Tabla 15. Suma de cuadrados de los factores experimentales	72

Tabla 16. Análisis de varianza para poder calorífico del rastrojo de maíz	74
Tabla 17. Suma de cuadrados de los factores experimentales	74
Tabla 18. Contenido de humedad, contenido de ceniza, compuestos volátiles, carbono fijo de los biocombustibles.....	76
Tabla 20. Diseño experimentos combustión de pellets de biomasa.....	77
Tabla 21. Análisis de varianza para emisiones de SO ₂ de combustión de tamo de arroz	79
Tabla 22. Análisis de varianza para emisiones de CO de combustión de tamo de arroz.....	80
Tabla 23. Análisis de varianza para emisiones de SO ₂ de combustión de rastrojo de maíz.....	83
Tabla 24. Análisis de varianza para emisiones de CO de combustión de tamo de arroz.....	84
Tabla 25. Análisis mediante fluorescencia de rayos X por reflexión total tamo de arroz.....	85
Tabla 26. Análisis mediante fluorescencia de rayos X por reflexión total rastrojo de maíz.....	86
Tabla 27. Resultados de relación exceso de aire y eficiencia de la combustión.....	87
Tabla 28. Condiciones de operación en el proceso.....	96
Tabla 29. Resultados simulación tamo de arroz.....	97
Tabla 30. Resultados simulación rastrojo de maíz.....	97
Tabla 31. Pruebas experimentales a partir de datos de la simulación.....	98

Tabla 32. Pruebas experimentales a partir de datos de la simulación.....98

Tabla 33. Poder calorífico de los biocombustibles de tamo de arroz y rastrojo de maíz...112

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Peletizadora.....	39
figura 2. Balances de energía y exergía para la cámara de combustión.....	48
figura 3. Dinámica de publicaciones en combustión de biomasa para el periodo comprendido entre 2005 y 2018.....	55
figura 4. Dinámica de publicaciones en combustión de biomasa para el periodo comprendido entre 2005 y 2018.....	55
figura 5. Principales tipos de combustión de biomasa estudiados.....	58
figura 6. Dinámica general de patentes en calderas de combustión de biomasa.....	59
figura 7. Principales categorías de patentes en el área de combustión de biomasa.....	63
figura 8. Países líderes en patentes relacionadas con eficiencia de calderas de biomasa.....	64
figura 9. Diagrama de flujo cámara de combustión.....	65
figura 10. Poder calorífico de los pellets de tamo de arroz.....	69
figura 11. Poder calorífico de los pellets de rastrojo de maíz.....	70
figura 12. Resultados obtenidos de las emisiones de so ₂ de las pruebas experimentales de la combustión de pellets de tamo de arroz.....	78

figura 13. Resultados obtenidos de las emisiones de co de las pruebas experimentales de la combustión de pellets de tambo de arroz.....	78
figura 14. Resultados obtenidos de las emisiones de so2 de las pruebas experimentales de la combustión de pellets de rastrojo de maíz.....	81
figura 15. Resultados obtenidos de las emisiones de co de las pruebas experimentales de la combustión de pellets de tambo de arroz.....	82
figura 16. Impacto ambiental asociado con las emisiones y usos de las fuentes naturales a través del análisis de la huella de carbono.....	88
figura 17. Diagrama del proceso de combustión.....	95
figura 18. Componentes del tanque de almacenamiento de agua (tqa).....	115
figura 19. (1) sensor eléctrico, (2) visor manual de nivel de agua dentro de la cámara de vapor de agua y (3) salida de purga de agua del sensor de nivel eléctrico.....	116
figura 20. Te con: (1) accionamiento manual o automático de la motobomba y la turbina, (2) indicadores y control de temperatura de llama y temperatura de vapor de agua.....	116

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A: Poder calorífico de los biocombustibles de tamo de arroz y rastrojo de maíz.....	112
Apéndice B: Análisis termogravimétrico (TGA).....	113
Apéndice C: Características propias de funcionamiento del equipo de combustión.....	115

Resumen

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA ECO-EFICIENCIA DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES DE TAMO DE ARROZ Y RASTROJO DE MAÍZ. *

AUTOR: Villabona-Durán, Yurley Paola **

PALABRAS CLAVES: Biomasa, combustión, lecho fijo, simulación.

DESCRIPCIÓN:

La biomasa es una fuente de energía renovable y se puede definir como un material biológico de donde se generan biocombustibles para generar energía térmica y eléctrica por medio de procesos como la combustión. Este proceso termoquímico puede aprovechar el poder calórico de la biomasa de manera más eco-eficiente, si se trata con procesos de densificación como peletización y compactación; no obstante, este genera emisiones contaminantes las cuales ocasionan un impacto negativo sobre la salud y la biodiversidad. Por este motivo, en este proyecto evaluó las emisiones y la eco-eficiencia del proceso de combustión de biocombustibles de tamo de arroz y rastrojo de maíz a nivel experimental con el fin de plantear un modelo estadístico que ajuste los datos experimentales, a partir del mismo se realizó la simulación para encontrar los valores óptimos para el proceso.

A partir de una vigilancia tecnológica, se seleccionó la tecnología de lecho fijo permite la variación de granulometría, tipo de combustible y opera con altos excesos de oxígeno; la tecnología fue evaluada mediante un estudio experimental, donde los resultados experimentales del proceso de combustión muestran que emisiones generadas durante las diferentes pruebas de combustión se encuentran alrededor de 190 ppm para CO, mientras que para el caso de SO₂ se encuentran alrededor de 5 ppm.

Los resultados de la simulación permiten concluir que el coeficiente de exceso de aire es un factor importante para que el proceso de combustión sea casi completo.

* Trabajo de investigación de Maestría en Ingeniería Química

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: PhD. Viatcheslav Kafarov. Codirectora: PhD. Karina Ojeda.

Abstract

TITLE: EVALUATION OF THE ECO-EFFICIENCY OF THE COMBUSTION PROCESS OF RICE HUSK BIOFUELS AND CORN STUBBLE. *

AUTHOR: Villabona-Durán, Yurley Paola **

PALABRAS CLAVES: Biomasa, combustión, lecho fijo, simulación.

DESCRIPCIÓN:

Biomass is a renewable energy source and can be defined as a biological material from which biofuels are generated to generate thermal and electrical energy through processes such as combustion. This thermochemical process can take advantage of the caloric power of biomass in a more eco-efficient way, if it is treated with densification processes such as pelletisation and compaction; however, it generates pollutant emissions which have a negative impact on health and biodiversity. For this reason, this project evaluated the emissions and eco-efficiency of the process of combustion of biofuels of rice tamus and corn stubble at an experimental level in order to propose a statistical model to adjust the experimental data, from it the simulation was performed to find the optimal values for the process.

From a technological surveillance, the fixed bed technology was selected allowing the variation of grain size, fuel type and operates with high excess oxygen; the technology was evaluated through an experimental study, where the experimental results of the combustion process show that emissions generated during the different combustion tests are around 190 ppm for CO, while for SO₂ they are around 5 ppm.

The results of the simulation allow us to conclude that the excess air coefficient is an important factor for the combustion process to be almost complete.

* Master's research work in Chemical Engineering

** Faculty of Physico-chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Phd. Viatcheslav Kafarov. Co-director: Phd. Karina Ojeda.

Introducción

Actualmente existe un creciente interés por el uso de recursos renovables con fines energéticos por razones que incluyen preocupaciones económicas, políticas y ambientales, así como la necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar considerablemente el impacto ambiental (Nunes, Matias, & Catalão, 2016). La biomasa es una fuente de energía renovable, que tiene la característica de ser “energía solar almacenada”, dentro de los cuales, los residuos agrícolas se constituyen en una fuente importante de bioenergía; lo que podría ser una alternativa energética para Colombia porque debido a su ubicación geográfica privilegiada, posee una gran biodiversidad, siendo la agricultura una de las principales fuentes de ingresos del país (Araujo, 2013).

Cada año se producen grandes cantidades de biomasa agrícola residual que puede usarse para generar energía por su alto poder calorífico (Nuñez, 2012) y según el atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia, el potencial energético para residuos agrícolas provenientes de ZNI tiene un orden alrededor de 330.000 TJ/año (Escalante, Orduz Prada, Lesmes, Zapata, Cardona Ruiz, & Duarte Ortega, 2011).

Una posibilidad de generar energía eléctrica mediante el uso de este tipo de biomasa son los procesos de combustión. Este proceso termoquímico puede aprovechar el poder calorífico de la biomasa de manera más eco-eficiente, si se trata con procesos de densificación como peletización y compactación (Zhang, He, Zhang, Li, & Gao, 2018). Desafortunadamente, los procesos de combustión de pellets para biomasa local no se han estudiado lo suficiente en

Colombia, por cual es necesario evaluarlos experimentalmente para su posible implementación.

El presente trabajo estuvo enmarcado dentro del proyecto “Estudio y caracterización de la combustión de los biocombustibles producidos con biomasa autóctona con el fin de aumentar la eco-eficiencia en los sistemas energéticos en los sectores residencial e industrial con énfasis en las zonas no interconectadas de Colombia” financiado por Colciencias y evaluó el proceso de combustión de biocombustibles a partir de biomasas de rastrojo de maíz y tamo de arroz provenientes del departamento del Meta y proponiendo una mejora en las características del proceso evaluando las emisiones y la eficiencia a nivel experimental con el fin de plantear un modelo estadístico que ajuste los datos experimentales, a partir del mismo se realizó la simulación para encontrar los valores óptimos para el proceso.

1. Planteamiento del problema y justificación

En la actualidad el aprovechamiento energético de la biomasa residual agrícola para el sector rural es la autogeneración, apoyada en sistemas de combustión directa para generar calor (Comision Nacional de Energia (CNE), 2007), con el tiempo se han desarrollado modernas calderas de biomasa que producen menos humos que las chimeneas de leña; teniendo una ventaja ambiental comparada con los combustibles fósiles, ya que no aumenta la concentración atmosférica de carbono, porque el carbono que fijó de la planta en su

crecimiento se devuelve a la atmósfera (Reyes Montiel, Perez Bermúdez, & Betancourt Mena, 2003) .

No obstante genera emisiones contaminantes de NO_x y producen emanaciones disminuidas de dióxido de azufre SO₂ los cuales ocasionan un impacto negativo sobre la salud y la biodiversidad, incrementan los niveles de ozono o smog, además, los NO_x junto al dióxido de azufre, aportan a la aparición de la lluvia ácida; a pesar de que el impacto es inferior comparado con otros combustibles fósiles, se deben implementar estudios que ayuden a disminuir estas emisiones (H. García, Corredor, Calderón, & Gómez, 2013).

Es importante mencionar que, existe una gran variedad de combustibles sólidos que se generan de biomasa agrícola lo que complica el establecimiento de valores de referencia y los gases generados en el proceso de combustión de biomasa varían considerablemente en función de las propiedades del combustible quemado y de los equipos de control de partículas (Fournel, Marcos, Godbout, & Heitz, 2015).

Según un estudio realizado por Rodríguez (2016), el rastrojo de maíz y el tamo de arroz son un tipo de biomasa agrícola que tienen un alto grado de productividad y poder calorífico en comparación con otras biomásas de tipo agrícola; además, en Colombia los departamentos que presentan una mayor demanda energética en las ZNI son Chocó (35,3 GWh), Putumayo (18,1 GWh), Caquetá (17,6 GWh) y Meta (13,8 GWh), teniendo en cuenta que no poseen planes de energización rural establecidos y que tienen disponibilidad de residuos agrícolas, para el caso del departamento del Meta el rastrojo de maíz presenta un potencial energético

aproximado de 176 TJ/año y con base en un análisis multivariante determino que este tipo de residuo puede ser aprovechados en procesos termoquímicos (Rodríguez, 2016).

Sin embargo, por su alto contenido de humedad, forma irregular, tamaño y una baja densidad aparente, la biomasa agrícola es muy difícil de manejar, transportar, almacenar y utilizar en su forma original. Una solución a este problema es la densificación en forma de pellets; lo que genera menos emisiones de partículas en comparación con su forma original; se pueden manejar fácilmente con el equipo de manipulación y de almacenamiento estándar, adaptándose en procesos de conversión (Kaliyan & Morey, 2009; Pradhan, Mahajani, & Arora, 2018).

Por lo anterior, el presente trabajo evaluó el proceso de combustión de biocombustibles a partir de biomasas de rastrojo de maíz y tamo de arroz provenientes del departamento del Meta, proponiendo una mejora en las características del proceso evaluando las emisiones y la ecoeficiencia a nivel experimental a partir de ajuste de parámetros como: tamaño de partícula, relación aire/combustible con el fin de plantear un modelo estadístico que ajuste los datos experimentales, a partir del mismo se realizó la simulación para encontrar los valores óptimos para el proceso.

2. Generalidades

2.1 Biomasa

La biomasa es una fuente de energía renovable y se puede definir como un material biológico de donde se generan biocombustibles para generar energía térmica y eléctrica por medio de procesos biológicos o termoquímicos, para esto se pueden utilizar los cultivos de alimentos, cubierta de hierba y plantas leñosas, residuos de explotaciones agrícolas o forestales, algas y el componente orgánico de los residuos municipales e industriales (Hossain, y otros, 2016) (Mohtasham, 2015).

En la actualidad, la biomasa es una de las materias primas de mayor interés como origen de la energía renovable pues ayuda a la mitigación de impactos medioambientales y al cambio climático (Saldarriaga Elorza, 2015). La biomasa se encuentra compuesta por grandes cantidades de carbono, oxígeno, nitrógeno, azufre, cloro e hidrógeno; en menor proporción elementos como potasio, sodio, magnesio, calcio, fósforo. Tiene componentes orgánicos de origen vegetal y animal; esta almacena la energía procedente del sol a través de la fotosíntesis (Atlas de potencial energetico de la biomasa residual en Colombia, 2006) (Domenete Vico, 2014) (Joey Villeneuve, 2012).

Existen varios tipos de biomasa como la biomasa natural, cultivos energéticos y biomasa residual (Alonso Aguado, 2014), esta última se divide en dos tipos que son: residual seca y residual húmeda. La biomasa residual seca se refiere a subproductos sólidos que no se usan

en actividades forestales, agrícolas y procesos de industrias agroalimentarias. En la residual húmeda se encuentran los desechos residuales urbanos como consecuencia de la actividad humana, desechos industriales y residuos agrícolas y ganaderos (Estrada Augusto Carlos, 2004) (Guerra Javier, 2005).

En Colombia se han desarrollado estudios acerca del aprovechamiento energético de la biomasa, donde el potencial energético de la misma juega un papel muy importante, por ejemplo, Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia, que estudió el uso de la biomasa como fuente alternativa de energía y las tecnologías para su aprovechamiento en el año 2006, donde se realizaron diferentes investigaciones sobre el potencial energético de la biomasa que consolidaron mediante mapas, evaluando el contenido energético de algunas especies representativas de los sectores agrícola, pecuario y de los residuos sólidos orgánicos (Escalante et al., 2011).

Un estudio realizado por Rodríguez (2016), concluye que los departamentos que presentan una mayor demanda energética en las ZNI de Colombia son Chocó (35,3 GWh), Putumayo (18,1 GWh), Caquetá (17,6 GWh) y Meta (13,8 GWh), teniendo en cuenta que no poseen planes de energización rural establecidos y que tienen disponibilidad de residuos agrícolas, para el caso del departamento del Meta el rastrojo de maíz presenta un potencial energético aproximado de 176 TJ/año y con base en un análisis multivariante determino que este tipo de residuo puede ser aprovechados en procesos termoquímicos (Rodriguez, 2016). Otro estudio realizado por la Universidad del Meta concluye que este departamento cuenta con residuos para reutilizarlos como fuente energética en la región de la Orinoquia, en procesos de

agroindustria, reutilización en procesos agrícolas o en uso energético en hogares rurales donde hay deficiencia de energía (Nuñez, 2012).

2.1.1 Ecoeficiencia de la combustión: El prefijo “eco”, hace referencia a los asuntos ambientales, en este caso se hace referencia a darle un uso más eficiente a los recursos naturales; es decir la ecoeficiencia mide la relación entre las entradas y salidas de un proceso (Montes, 2008). Lo que se busca con la ecoeficiencia es satisfacer necesidades humanas dando calidad de vida, al mismo tiempo que se reducen gradualmente los impactos ambientales y el uso de recursos naturales, tanto materias primas como insumos energéticos a lo largo de su ciclo de vida, a un nivel acorde con la capacidad de carga estimada de la Tierra (Inda & Vargas-Hernández, 2012; Leal, 2005).

2.1.2 Densificación de la biomasa: La densificación de la biomasa es el proceso por el cual se comprime o compacta la biomasa eliminando la mayor cantidad de aire indeseable entre partículas y dentro de las partículas; en este se cumplen dos subprocesos importantes la compactación volumétrica bajo presión del material disperso que aumenta su densidad y la aglomeración o aglutinación del material que permite que el mismo mantenga su compactación como producto; si estos productos tienen un diámetro inferior a 30 mm se consideran pellets y con diámetros mayores briquetas (Cabezas Arevalo, 2009).

Los factores importantes a tener en cuenta en la densificación de biomasa son la temperatura y la presión. Un estudio realizado por Yanqui, Ngadi y Kok (2016), muestra que para el caso de la cáscara de arroz, un contenido de aglutinante de 10% puede ser suficiente,

especialmente para la durabilidad de briquetas; la adición de agua hasta el 60% es beneficioso para la densificación de baja presión para mejorar la homogeneización del aglutinante a través de la biomasa y la inter-unión de partículas (Yank, Ngadi, & Kok, 2016).

Otro estudio realizado por Wongsiriamnuay y Tippayawong (2015), concluye que para el caso del maíz (mazorca, tallo, cáscara) se deben utilizar presiones medias y temperaturas bajas para aumentar la densidad y el índice de durabilidad para residuos de maíz y reducir el consumo de energía en el proceso de densificación, por ejemplo, para un valor del índice de durabilidad de más de 80% se puede lograr con la compactación en alrededor de 80 °C y 150 MPa (Wongsiriamnuay & Tippayawong, 2015).

2.2 Combustión de biomasa

La combustión se refiere a la reacción de oxidación completa de biomasa con aire eventualmente precalentado, inyectado en el horno (BUN-CA, 2002; Carrasco García, 2008); esta tiene tres requisitos (combustible, aire y calor), que deben estar disponibles en la proporción correcta, para que la combustión sea auto-sostenible, debido a que el combustible libera el exceso de calor para iniciar el proceso de quemado; las temperaturas del proceso son elevadas hasta 1000°C o más. El oxígeno necesario para la combustión se suministra como parte del aire de combustión suministrado para el proceso; las temperaturas de llama pueden exceder 2000°C, dependiendo del valor de calentamiento y el contenido de humedad del biocombustible que debe ser inferior al 15%, la cantidad de aire utilizado para quemar el biocombustible y el balance energético de la cámara de combustión, dependiendo del tipo de

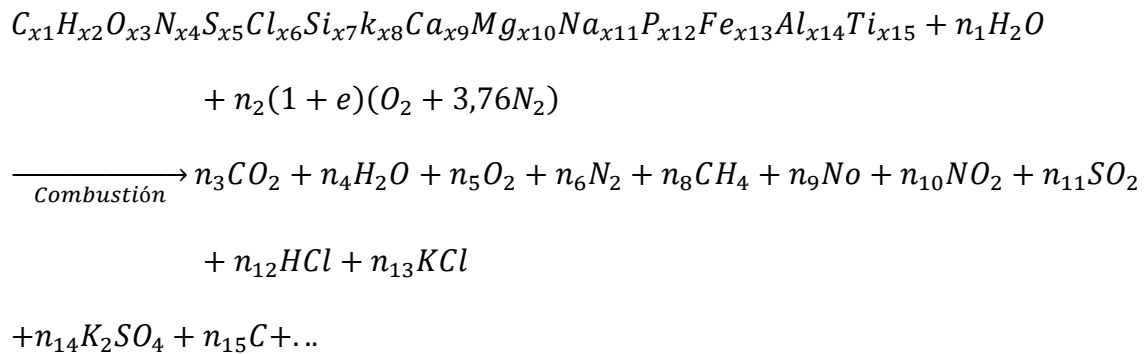
biocombustible, se produce una cierta cantidad de residuos (ceniza, escombros) (Nunes et al., 2016; Tipanluisa et al., 2015).

En función de la forma en que el biocombustible entra a la cámara de combustión el proceso puede clasificarse:

- Lecho fijo: este tipo de calderas presentan un lecho formado por una capa de partículas. El aire primario atraviesa el lecho desde la base y en algunos casos se introduce aire secundario por encima del lecho con el fin de favorecer la combustión de los volátiles desprendidos por el lecho. Este sistema puede quemar combustibles con un porcentaje relativamente alto de humedad y no necesariamente homogéneo, se aplica a distintas escalas de caldera, pudiéndose encontrar tanto en el ámbito doméstico como en calderas de tipo industrial generando energía en un rango de 30kW-30MW (Arce, 2013).
- Lecho fluido: en este los combustibles sólidos deben ser de tamaño milimétricos, estos son introducidos donde estarán en suspensión junto con partículas de arena, tienen una capacidad de producción de hasta 30 MWh y además se pueden utilizar diversos tipos de combustibles respecto a factores como humedad, bajas emisiones de óxidos nitrosos, buena eficiencia y transmisión de calor (Arenas, 2009; BUN-CA, 2002).
- Calderas de parrilla: los combustibles sólidos son ubicados en unas placas vibrantes o parrillas inclinadas, en los cuales estos van pasando hacia el colector de cenizas a medida que se está haciendo la combustión, bajo costo de proceso, infraestructura resistente a la escoria. Se puede llegar a producir una potencia de hasta 20–30MWh (Arenas, 2009; IDAE, 2007).

- Calderas ciclónicas: está formada por un quemador ciclónico, donde no se necesita pretratamiento de la biomasa debido al ingresar a la caldera con la corriente de aire genera tiempo de residencia mayores, lo cual genera mayor rendimiento en la combustión ((IDAE), 2009)

Sin embargo, la biomasa tiene una química y composición física muy complejas, su combustión tiene lugar en un entorno no controlado y el contenido de humedad, la densidad y la heterogeneidad de estos materiales tienen un efecto negativo en la eficiencia de la combustión, razones que complican el proceso de combustión de biomasa una forma de mitigar estos problemas es la densificación de estos materiales que contribuye a mejorar su comportamiento como combustible mediante el aumento de su homogeneidad y permite una gama más amplia de materiales lignocelulósicos para ser utilizado como combustible (Gil et al., 2010). La reacción química del proceso puede ser descrita por el siguiente esquema de reacción, donde la estructura química simplificada de la biomasa se presenta como un primer reactivo:



De donde se puede observar que el proceso de combustión de biomasa genera contaminantes primarios formados como materia particulada (PM), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x , principalmente NO y NO_2), y los óxidos de azufre (SO_x , principalmente como SO_2). Los gases ácidos, como el ácido clorhídrico (HCl), también se pueden emitir, como puede plomo y otros metales pesados. CO y HC, incluyendo compuestos orgánicos volátiles (Wielgosinski, Lechtanska, & Namiecinska, 2017).

Un factor a tener en el proceso de combustión es el tamaño de partícula del biocombustible y la distribución del tamaño de partícula, a menudo el diseño del horno determina los rangos óptimos de estos parámetros; dependiendo de estos el tiempo de residencia en la caldera cambia a la temperatura establecida (Arévalo, 2013), además de este factor de deben tener en cuenta como principales componentes para la optimización de la combustión la composición del combustible y el aire de combustión, el procedimiento de encendido y la temperatura de combustión, las características del quemador y diseño de la cámara de combustión, y la relación combustible/aire (21% a 40%); para alcanzar la combustión óptima se debe tener en cuenta que el volumen de exceso de aire y por tanto el de oxígeno es lo suficiente elevado para quemar completamente todo el CO, el volumen de exceso de aire está limitado para minimizar la pérdida de energía a través de la emisión de los gases de combustión calientes a la atmósfera (Jang et al., 2016; Knospe, Burkart, & Walleser, 2004; Velasco, 2015).

Los mecanismos de control de emisiones para el caso de NO_x son térmicos entre los que se encuentran la reducción de la temperatura de combustión, reducción del tiempo de

residencia, disminución de la presión parcial del oxígeno en la zona de la combustión, control en el aire de entrada como la adición de biocombustible; para el caso de los SO_x, se encuentran las emisiones de SO₂ que se deben al S presente en la biomasa, las tecnologías que se usan para la reducción de estos se encuentra la adicción de materias absorbentes de SO₂ (Fernández et al., 2015).

2.2.1 Residuos de combustión

- **Contenido de cenizas:**

El contenido de cenizas es factor importante a tener en cuenta pues este es negativo para el proceso de combustión, debido a que genera pérdidas de eficiencia de energía y gastos más altos de mantenimiento por resistencias térmicas en intercambiadores de calor, fenómenos de corrosión, el aumento de humos y emisiones de gases (R. García, Pizarro, Álvarez, Lavín, & Bueno, 2015). Por lo anterior, se deben estudiar los parámetros físico-químicos de la ceniza donde se incluyen la distribución de tamaño de partícula, la morfología de las partículas y la microestructura, densidad y porosidad, área superficial específica de las partículas, el pH, la lixiviación, composición química y la mineralogía (Tarelho et al., 2015).

Además, se debe tener en cuenta que, durante el proceso de combustión de la partícula, el balance de la fracción inorgánica que formará parte de la ceniza posteriormente sufre una serie de transformaciones tanto físicas como químicas simultáneamente, para formar partículas de ceniza resultado de procesos de segregación, vaporización, precipitación, nucleación y coalescencia, con un variado espectro en cuanto al tamaño, forma y composición de la ceniza.

Esto depende principalmente de la morfología y composición química del combustible, la temperatura de combustión y el tiempo de residencia (Melissari, 2012).

Diferentes estudios se han realizado sobre el contenido de cenizas en el proceso de combustión de biomasa, por ejemplo, la Universidad Tecnológica de Pereira realizó un análisis comparativo de las principales propiedades fisicoquímicas de la cascarilla de arroz con fines energéticos obtenida por investigaciones realizadas en las universidades de Canadá, California, RP China y de Ibagué Colombia, en donde concluyen que al quemar cascarilla de arroz se debe tener un control sobre la temperatura de fusión de la ceniza, para evitar el ensuciamiento de las paredes internas del horno y la corrosión. Los sistemas deben diseñarse para minimizar el arrastre de ceniza en la corriente de gases y la erosión de los componentes, a su paso a través de los tubos de la caldera y los intercambiadores de calor (Valverde, Sarria, & Monteagudo, 2007).

Un estudio realizado en la Universidad de Vigo analizó el comportamiento de tres combustibles en un reactor de lecho fijo en contra corriente; los resultados mostraron que la composición del combustible y la morfología, en términos de tamaño, son factores determinantes para llegar a la máxima velocidad de propagación del frente de ignición; además el punto que corresponde a la condición óptima varía en función del combustible analizado (Saavedra, Arce, Míguez, Granada, & Cacabelos, 2013).

- **Gases de combustión:** Otro factor importante a tener en cuenta son las emisiones de gases procedentes de la combustión de biomasa que varían considerablemente en función de

las propiedades tanto físicas como químicas del combustible quemado (Fournel et al., 2015) y de la tecnología del equipo de combustión, estas dos variables interactúan juntas y producen una amplia variedad de niveles de emisión y sustancias que se agrupan dependiendo del tipo combustión; en una combustión completa los componentes de la biomasa reaccionan con suficiente oxígeno del aire, produciendo CO_2 , NO_x , SO_x (SO y SO_2), HCl materia particulada y metales pesados (Villeneuve, Palacios, Savoie, & Godbout, 2012).

Diferentes estudios se han hecho con el fin de disminuir este tipo de emisiones; Carroll y Finnan (2013), realizaron un estudio con el objetivo de comparar las emisiones de pellets a partir de los seis tipos de biomasa de cultivos energéticos y biomasa agrícola, Los pellets quemados muestran un alto grado de variabilidad en términos tanto de sus emisiones de gases y partículas. Determinado para todas las biomásas CO, NO_x , SO_2 y TSP, encontraron que los pellets de madera dieron el nivel más bajo de emisiones, mientras que los residuos agrícolas mostraron los niveles más altos de emisiones en todas las categorías (Carroll & Finnan, 2013).

Hrdlička et al. (2016), estudiaron los factores de emisión de CO, NO_x y SO_2 procedentes de la combustión de madera y biocombustibles agrícolas en una caldera pequeña en condiciones reales, donde concluyen que las condiciones de operación de la caldera como la carga de potencia y la relación de aire en exceso, son determinantes para la eficiencia térmica de la caldera que afecta significativamente los factores de emisión (Hrdlička, Skopec, Dlouhý, & Hrdlička, 2016).

2.2.2 Estudios previos de Combustión de biomasa en Colombia: En Colombia, un estudio realizado por la Universidad de Ibagué junto a las Universidades de Canadá, California y RP China (2007), que estudiaron la combustión teórica de la cascarilla de arroz, donde concluyen que las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz en el departamento del Tolima está entre los rangos que se manejan a nivel mundial, que para el proceso de combustión se deben tener control sobre la temperatura de fusión de la ceniza y los sistemas deben diseñarse para minimizar el arrastre de ceniza en la corriente de gases y la erosión de los componentes, a su paso a través de los tubos de la caldera y los intercambiadores de calor (Valverde et al., 2007).

Moreno, Serrano y Palacios (2009), midieron el desempeño de la combustión de biomásas de cisco de café y cascarilla de arroz en un reactor de lecho fluidizado burbujeante, donde concluyen que para mantener la eficiencia de la combustión es importante que haya una alimentación constante, que permita tener una relación aire-combustible adecuada, y al analizar los datos de eficiencia de la combustión concluyen que para estas biomásas esta es alta y aceptable (Moreno, Serrano, & Palacios, 2009).

Tipanluisa, Moreno, Guasumba, Celi y Molina, realizaron un estudio experimental de la combustión de la cascarilla de arroz en una cámara de lecho fijo, donde concluyen que uno de los factores más críticos es determinar la velocidad de la alimentación de la cascarilla arroz a la cámara de combustión de lecho fijo, por lo que es necesario que exista un adecuado control y sincronización de la cantidad de biomasa que ingresa a la cámara, el ingreso de aire, el área de combustión y la evacuación de ceniza (Tipanluisa et al., 2015).

3 Hipótesis

Es posible obtener una combustión completa, mejorando la eficiencia y la calidad de las emisiones del proceso de combustión de biocombustibles de tamo de arroz y rastrojo de maíz, a partir de ajuste de parámetros como: tamaño de pellet, relación aire/combustible.

4 Objetivos

4.1 General

Evaluar la eco-eficiencia del proceso de combustión biomásas compactadas de tamo de arroz y rastrojo de maíz en función de parámetros como: tamaño de partícula, relación aire/combustible.

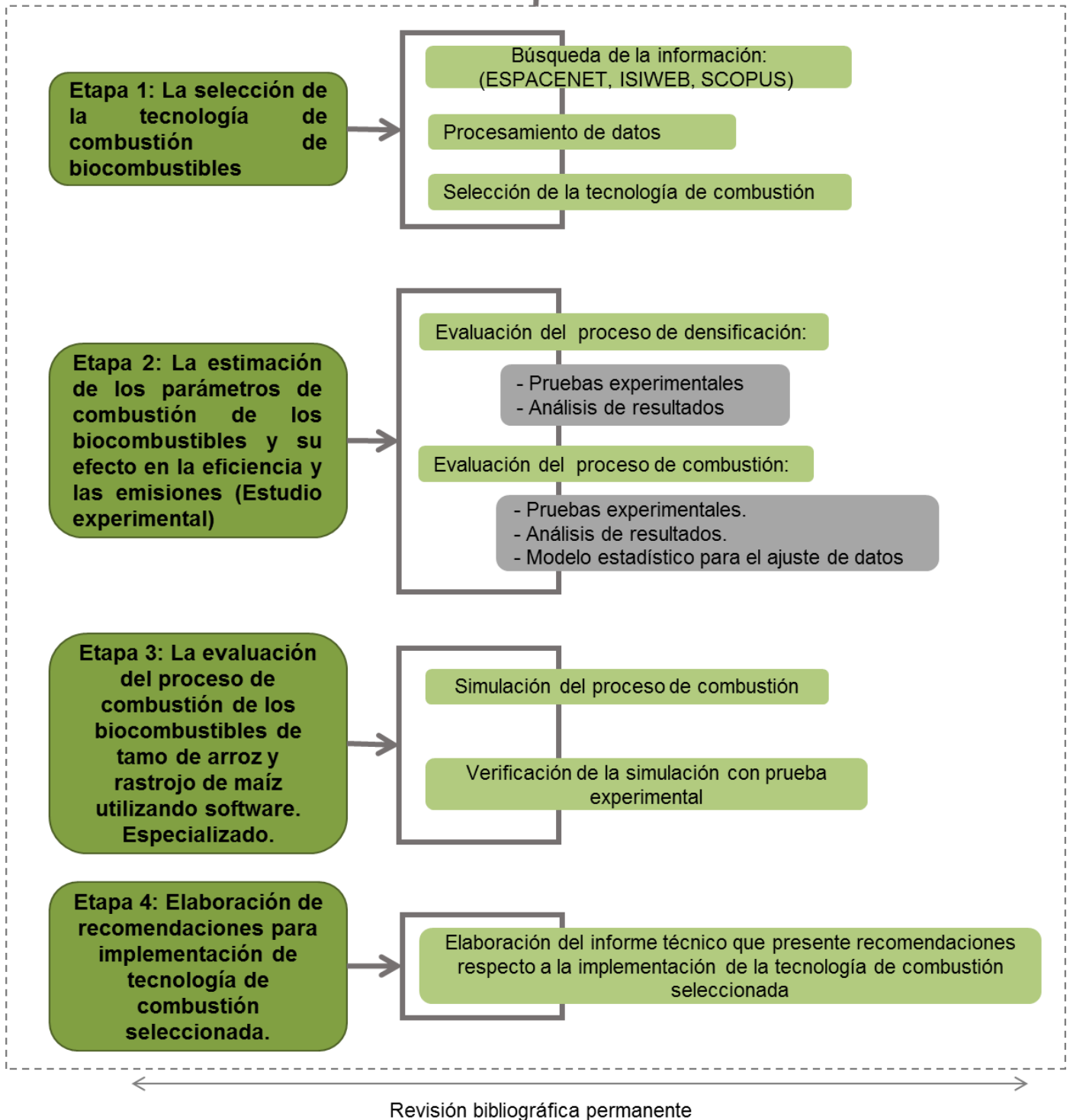
4.2 Específicos

- Seleccionar la tecnología de combustión adecuada para las biomásas compactadas de tamo de arroz y rastrojo de maíz con el fin de adquirirla aplicando la vigilancia tecnológica.
- Estimar los parámetros de combustión (tamaño de partícula, relación aire/combustible) de biocombustibles de tamo de arroz y rastrojo de maíz que inciden en la eco-eficiencia del proceso, mediante estudio experimental.

- Establecer los parámetros óptimos de combustión mediante simulación el proceso de combustión de las biomasas compactadas de tamo de arroz y rastrojo de maíz a partir de las condiciones más favorables identificadas a nivel experimental utilizando software especializado.
- Elaborar recomendaciones para implementación de tecnología de combustión seleccionada.

5 Metodología

Desarrollo metodológico



5.1 Etapa 1: selección de la tecnología de combustión de biomásas compactadas de tamo de arroz y rastrojo de maíz.

Esta etapa permitió dar cumplimiento al primer objetivo específico de la investigación, para ello se realizó un análisis de las tendencias tecnológicas en procesos de combustión de biomasa compactada mediante vigilancia tecnológica para su selección y adquisición, realizando las siguientes actividades:

5.1.1 Búsqueda de la información: Se hizo una revisión de tecnologías en patentes y literatura científica priorizando la información publicada en el periodo 2006-2016. La búsqueda de patentes se realizó en la base de datos ESPACENET de acuerdo al código europeo F23 (aparatos y procesos de combustión) (Díaz et al., 2014); finalmente se analizó la información de acuerdo a los siguientes criterios:

- Publicaciones científicas para los años comprendido entre 2005 y 2015.
- Patentes para el periodo comprendido entre 2007 y 2016.
- Mercados nacional e internacional de exportaciones e importación de calderas.

5.1.2 Selección de la tecnología de combustión: La selección de la tecnología se hizo teniendo en cuenta los siguientes parámetros del horno de combustión (Leyssens, Trouvé, Caplain, Schönnenbeck, & Cazier, 2014; Martinez, 1992; Toscano, 2009)

- Tamaño de partícula del biocombustible.
- Tasa de alimentación.

- Capacidad de potencia a generar.
- Temperatura de entrada.
- Temperaturas de humos.
- Presión.
- Estabilidad: que no se apague con las fluctuaciones normales en T, p, xi.
- Rendimiento del horno.

Como resultado se seleccionó y adquirió el equipo de combustión.

5.2 Etapa 2: estimación de los parámetros de combustión de biomásas compactadas de tamo de arroz y rastrojo de maíz y su efecto en la eco-eficiencia y las emisiones del proceso.

Aumentar la eficiencia y reducir las emisiones contaminantes del proceso de combustión es ideal para el aprovechamiento de los biocombustibles sólidos de tamo de arroz y el rastrojo de maíz, los cuales tienen potencial para ser usados en el proceso de combustión (Rodriguez, 2016); por consiguiente se realizó la estimación de los parámetros de combustión de los biocombustibles; permitiendo cumplir con el segundo objetivo específico de esta investigación, para lo cual se ejecutaron las siguientes actividades:

5.2.1 Evaluación del proceso de densificación de los dos tipos de biomasa agrícola: Se realizó la densificación de las biomásas con el fin de obtener los pellets que se utilizaron en el proceso de combustión, siguiendo estos pasos:

5.2.1.1 Pruebas experimentales de densificación: Para las pruebas de densificación de biomasa se llevó a cabo un diseño factorial 2^2 con una variable respuesta y dos factores experimentales con dos niveles alto y bajo (Toscano, 2009) este diseño se realizó con la ayuda del software STATGRAPHICS Centurion; y además se tuvo en cuenta los siguientes aspectos:

- **Descripción de las biomasas a utilizar**

Para el presente estudio se estudiaron dos tipos de biomasa residual agrícola el tambo de arroz y el rastrojo de maíz provenientes del departamento del Meta. Esta selección se realizó basándose en resultados de un estudio previo del grupo de investigación CIDES donde se concluye que estos tipos de biomasa tienen mayor grado de productividad en comparación con otras biomasas (Rodriguez, 2016). Además, se contó con la caracterización fisicoquímica de los mismos como se muestra a continuación:

- **Composición química**

Se determinó la composición química de la biomasa por medio del análisis mediante Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total (TXRF).

- **Lignina, celulosa y hemicelulosa**

La determinación de lignina, celulosa y hemicelulosa se llevaron a cabo siguiendo las normas TAPPI T222 om-15 para cada uno de estos. Los reactivos usados fueron grado analítico alta pureza, el sistema de pesado verificado, el papel filtro tipo cuantitativo y los análisis por triplicado.

A las muestras iniciales de la muestra MGFI se llevaron a sequedad y para realizar extracción Soxhlet en agua y en etanol/tolueno durante 24 horas respectivamente con el fin de dejar la fibra libre de extractos acuosos y orgánicos; luego de este tratamiento la fibra se llevó a sequedad en un horno Binder a $105 \pm 1^\circ\text{C}$, durante 12 horas y se volvió a pesar, este procedimiento se realizó hasta que la diferencia de peso no fue mayor al 1%.

Posteriormente se tomó este filtrado para realizar la determinación de lignina con una hidrólisis primaria con ácido sulfúrico durante 4 horas y una segunda hidrólisis en autoclave durante 2 horas a 120°C y finalmente posterior filtración para secar durante 2 días a 65°C .

Para cuantificación de holocelulosa se toma la muestra resultante de la deslignificación se atacó con ácido acético glacial y clorato de sodio durante 6 horas, se decantó el licor y se lavó con agua destilada hasta precipitado neutro, se depositó en horno y se dejó secar por 2 días a 65°C , luego se pesó el filtrado resultante. Este último análisis se realiza para poder hallar la hemicelulosa por diferencia entre la celulosa y la holocelulosa.

Para la cuantificación de la celulosa se toma una muestra de filtrado resultante del tratamiento para Holocelulosa y se realiza ataque con hidróxido de sodio y con ácido acético al 10% celulosa y hemicelulosa, durante 8 horas, posteriormente se filtra y se lava el filtrado hasta neutralidad y se deposita la muestra en el horno durante 2 días a 65°C . y se pesó el filtrado seco resultantes. La hemicelulosa se halló por diferencia entre la cantidad de Holocelulosa y Celulosa.

- **Humedad, volátiles, carbono fijo, contenido de cenizas**

El análisis TGA se realizó teniendo en cuenta la norma ASTM E1131-08, mediante analizadores termogravimétricos basados en las características del proceso de calentamiento progresivo de una muestra de biomasa. Para lo cual se tomó 13.868 mg de biomasa, con un flujo de nitrógeno se 50 mL/min se calentó la muestra de 30 °C a 107 °C durante 7 minutos, luego se calentó a 960 °C hasta encontrar el equilibrio a 750 °C.

- **Maquina peletizadora**

Se utilizó la peletizadora disponible en el Centro Integrado Para el Desarrollo de Equipos de Laboratorio y Asesoría Científica (CIDELAC) ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará, UIS, Piedecuesta, Santander. La peletizadora cuenta con un motor triásico y cuerpo en acero al carbón, boquilla de salida intercambiable para pellets de 7 mm y 10 mm de diámetro (ver *Figura 1*).

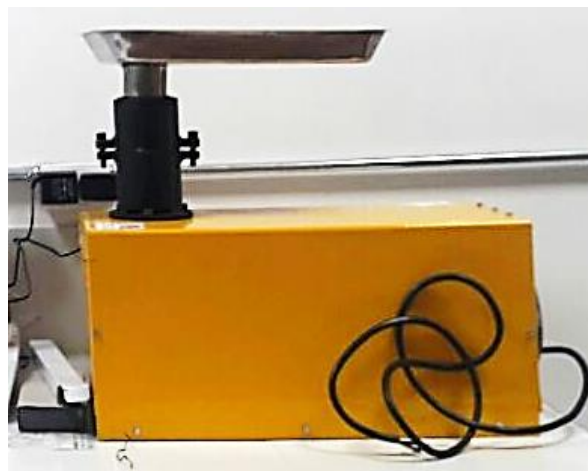


Figura 1. Peletizadora

- **Consideraciones para la peletización**

(1) La temperatura de peletización fue de aproximadamente 90 °C. Es decir, la temperatura de la chaqueta. (2) Se alimenta la recámara de peletización con 50 g de muestra y (3). Los pellets se dejan enfriar a temperatura ambiente.

- **Variables independientes**

Para este caso de estudio las variables independientes fueron el tamaño de partícula y la relación biomasa/aglomerante. Se utilizó almidón de maíz como aglomerante como se relaciona en la Tabla 1 (Torres, 2008); se utilizaron pellets de diámetros de 7 y 10 mm promedio aproximado entre los valores para el diámetro de pellets usados para biomasa que son de 6mm a 8 mm (OPRUREB y DANM, 2012):

Tabla 1.

Variables independientes proceso de densificación

Variable independiente	Valores
Tamaño de pellets	7 mm
	10 mm
Relación biomasa / aglomerante	80/20%
	70/30%.

Como variable respuesta se tendrá el poder calorífico del biocombustible obtenido como se relaciona en la Tabla 2.

Tabla 2.

Diseño de experimentos densificación de biomasa

Biomasa	Pruebas	Tamaño pellet (mm)	Tamaño partícula (mm)	de Relación biomasa/aglomerante (% P/P)
Tamo de arroz	T1	7	0,5	70/30
	T2	7	0,5	80/20
	T3	7	0,7	80/20
	T4	10	0,5	80/20
	T5	7	0,7	70/30
	T6	10	0,7	80/20
	T7	10	0,7	70/30
	T8	10	0,5	70/30
Rastrojo de maíz	M1	7	0,5	70/30
	M2	7	0,5	80/20
	M3	7	0,7	80/20
	M4	10	0,5	80/20
	M5	7	0,7	70/30
	M6	10	0,7	80/20
	M7	10	0,7	70/30
	M8	10	0,5	70/30

- **Variables dependientes**

Como variables dependientes se tuvo el poder calorífico, el análisis próximo y el análisis elemental.

- **Criterios cuantitativos**

Como criterios cuantitativos del proceso de densificación, se tuvo en cuenta la humedad, contenido de ceniza, compuestos volátiles y carbono fijo, para determinarlos se realizó un análisis TGA.

El análisis de los resultados se realizó mediante análisis estadístico ANOVA para cada resultado.

5.2.2 Pruebas experimentales de combustión: Para las pruebas de combustión de biomasa se tuvo en cuenta los siguientes aspectos:

- **Descripción de los biocombustibles a utilizar:** Se estudió la combustión de la biomasa peletizada, es decir, de biocombustibles sólidos a partir de dos tipos de biomasa residual agrícola, tamo de arroz y rastrojo de maíz.

- **Adecuación de la caldera:** Para el montaje experimental se llevó a cabo en la sede parque Tecnológico de Guatigará de la Universidad Industrial de Santander y tuvo en cuenta los criterios como forma de compactación (pellets), funcionamiento de la caldera, tomando como parámetros fijos:

- Tasa de alimentación (1 kg)
- Temperatura de entrada (Aprox. 500°C)
- Temperaturas de humos (Aprox. 150°C)
- Presión (Aprox. 30 PSI)

Para el desarrollo experimental, este contó con los siguientes componentes, partes y accesorios:

- Tablero Eléctrico (TE).
- Tanque de Depósito de Agua y Sistema de Bombeo.
- Cámara de Combustión (CCB).
- Cámara de Vapor (CV).
- Termocuplas para la medición de temperatura.
- Sensor de Nivel de Agua de la Cámara de Vapor (CV).
- Instrumentos de Medición y Control de Generación de Vapor.
- Válvulas, manómetro, presostato.
- Sistema de Extracción de Flujo de Humos y Gases.
- Sistema de extracción de humos y gases calientes
- Distribuidor de Vapor (DV).

• **Parámetros para evaluar la eficiencia y emisiones del proceso de combustión:** A partir de referencias bibliográficas relacionadas con procesos de combustión de biomasa compactada se seleccionaron como parámetros relación aire/combustible (%P/P) de 1 y 1.5 (Ha-Na Jang, 2016), tamaño de partícula que para el presente estudio son pellets por norma general con un diámetro entre 7 y 10 mm (Velasco, 2015) y tiempo del experimento en un rango de 1 hora para evaluar la eficiencia y las emisiones del proceso un analizador de gases de combustión y emisiones contaminantes que se midieron con una analizador de gases marca GMI Modelo PS 500 Configurado con Sensores (LEL, O₂, CO y H₂S).

- **Diseño experimental:** Para la experimentación se llevó a cabo un diseño cuadrático con 5 coeficientes con 2 factores experimentales con niveles alto y bajo (Tabla 3) y 3 variables respuesta (Tabla 4) (Toscano, 2009). El diseño seleccionado tuvo 8 ejecuciones para cada biocombustible incluyendo la réplica, con 1 una muestra para ser tomada en cada ejecución, este diseño se realizó con la ayuda del software STATGRAPHICS Centurion; según la siguiente descripción:

Tabla 3.

Factores experimentales

Nombre	Unidades	Bajo	Alto
Relación aire/combustible	% P/P	-1,0	1,0
Tamaño de partícula	mm	-1,0	1,0

Tabla 4.

Variables respuestas a medir

Respuestas	Unidades
CO	ppm
SO ₂	ppm

Este diseño de experimentos se realizó para cada uno de los tipos de biomasa anteriormente mencionados; para lo cual se utilizó 1 kg de cada combustible por corrida.

La medición del flujo de gases de combustión se realizó utilizando un analizador de gases de combustión y emisiones contaminantes. Para la interpretación de los resultados se realizó un análisis estadístico ANOVA para cada resultado.

5.2.3 Análisis de resultados de las pruebas experimentales del proceso de combustión:

Para el análisis de los resultados de las pruebas de combustión de biomasa se tuvo en cuenta:

- **Análisis de los biocombustibles quemados**

A partir de los ensayos de combustión descritos, se procederá a realizar el análisis de las cenizas de la combustión de las biomásas compactadas de tamo de arroz y rastrojo de maíz, tal como se relaciona a continuación:

- Se determinó la composición química de la ceniza por medio del análisis mediante Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total (TXRF).
- Se calculó el poder calorífico para cada una de las biomásas.
- Análisis TGA para calcular humedad, volátiles, carbono fijo, contenido de cenizas.

5.2.4 Análisis del proceso de combustión: se realizará el análisis del proceso de combustión de las biomásas compactadas para lo cual se consideró (Cardozo, Erlich, Alejo, & Fransson, 2014):

Indicadores de Combustión: a partir biomasa compactada total consumida, cenizas totales, carbono sin quemar en las cenizas, las emisiones de partículas, temperatura.

Análisis de exergético del proceso de combustión: Para el análisis exergético se definieron y calcularon las eficiencias exergéticas y demás parámetros para cada componente a partir de los datos termodinámicos necesarios; estos se obtienen de la simulación del proceso en Aspen Plus (Granados, Velásquez, & Chejne, 2014; Míguez, 2012). Para el caso del horno de combustión de lecho fijo se tuvo en cuenta que se alimenta por biomasa, las características del horno son: 50 cm de Altura, 40 cm de radio interior con 5.5 cm radio exterior y 4,50 cm de grosor de pared. En cuanto a sus dimensiones en la puerta de entrada al horno son: 21,60 cm de altura y 18 cm de ancho. El horno está diseñado para quemar hasta 3 Kg/h de biomasa. La temperatura de entrada del aire ambiente es de aprox. 30°C y la salida de la mezcla de aire más los gases de combustión alcanzan en promedio 160°C. Los productos entrantes (reactantes) como el aire y el combustible biomásico se encuentran a condiciones del ambiente y reaccionan formando una combustión a una temperatura T_c . Se considera un estado estacionario y el proceso que se desarrolla no involucra trabajo.

El ambiente de referencia estuvo definido por el siguiente estado físico:

- Temperatura en el interior del horno: $T_{a1} = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Temperatura en el exterior del horno: $T_{a2} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$
- La temperatura ambiente, $t_0 = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, para el reservorio de energía.
- La presión atmosférica, $P_0 = 101\text{ kPa}$, para el reservorio de volumen.
- Potenciales químicos μ_0 , y masas M para las n especies químicas del reservorio de masa.

El reservorio de energía intercambio energía de tipo térmico Q , el de volumen intercambió energía de tipo mecánico W_t , y el reservorio de masa intercambiará masa n_j .

Simplificaciones del sistema:

- Todos los componentes del sistema operan en estado estacionario.
- Todos los gases se consideran ideales
- Los efectos de la energía cinética y de la potencial de los flujos másicos de las corrientes que entran o salen del volumen de control se desprecian, ya que las variaciones en estas formas de energía resultan despreciables comparados con los cambios en la entalpía de los flujos másicos de las mismas corrientes.
- El proceso termodinámico es abierto a las interacciones con el entorno.
- Las pérdidas de calor por radiación y convección en las calderas industriales son del orden del 1.5% respecto de la energía de entrada del combustible debido a los inquemados en las cenizas son iguales o inferiores al 2% de la entrada de energía del combustible.
- Se supone que la eficiencia isoentrópica de la turbina es del 76%, mientras que cada bomba tiene una eficiencia isoentrópica del 88%.
- La eficiencia mecánica de una turbina en la literatura está en el rango de 95-99%. Se supone que el rendimiento mecánico de cada turbina de vapor es del 99% la eficiencia del generador según la literatura está en el rango del 98 al 99%. Se supone que el generador tiene una eficiencia del 98%.

Para la cámara de combustión los balances de energía y exergía se expresan como se muestran en la *Figura 2*:

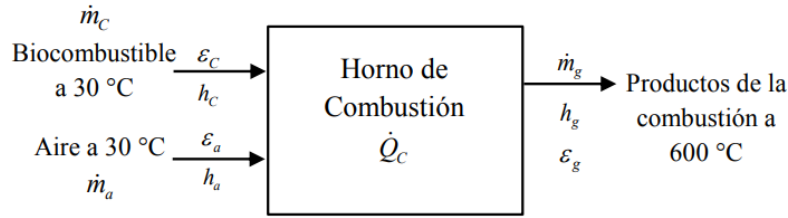


Figura 2. Balances de energía y exergía para la cámara de combustión.

Despreciando las energías cinética y potencial, la ecuación 1 de balance de energía se puede escribir como

$$\dot{m}_c(h_c - h_g) + \dot{m}_a(h_a - h_g) = Q_{Ca} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Transferencia de calor por convección en el exterior del horno se encuentra dada por la Ecuación 2:

$$Q_{conv.} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (\text{Ecuación 2})$$

A diferencia de lo que acontece en el balance entálpico donde la energía se conserva, en el balance exergético no hay conservación de la exergía sino destrucción o pérdida de esta debido a las irreversibilidades del proceso (ver Ecuación 3)

$$\dot{m}_c(ex_c - ex_g) + \dot{m}_a(ex_a - ex_c) - Ex_{Q_{Ca}} = I_{Ca} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Para definir y calcular las eficiencias exergéticas y demás parámetros para cada componente se tuvo en cuenta la ecuación 4, donde $ex_{Recuperada}$ es la exergía recuperada y ex_s es la exergía suministrada:

$$\varepsilon = \frac{ex_{Recuperada}}{ex_s} \quad (\text{Ecuación 4})$$

El combustible biomásico entra a la cámara de combustión a temperatura y presión ambiente, la exergía asociada con un flujo de masa es la suma de las exergías física y química, debido a la reacción química en la cámara de combustión.

La comparación de la relación de exceso de aire λ_1 y λ_2 : donde λ_1 es la relación aire en exceso estimada (ver Ecuación 5) y λ_2 es la relación aire en exceso calculada (ver Ecuación 6) y se calcularon mediante las siguientes ecuaciones estándar:

$$\lambda_1 = \frac{n_{N_2} * M_{aire}}{X_{N_2-aire} * F * AF_{est.}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

λ_1 : Relación aire en exceso estimada

n_{N_2} : Flujo molar N_2 (Kmol/h)

M_{aire} : Masa molecular de aire (Kg/kmol)

X_{N_2-aire} : Fracción volumen de N_2 en el aire

F : Masa de la biomasa compactada por hora

AF_{est} : Relación aire combustible estequiométrico

$$\lambda_2 = \frac{21}{21-[O_2]} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

λ_2 : Relación aire en exceso calculada

O_2 : Concentración en volumen medida en el gas de combustión

Eficiencia de combustión: Se calcularon teniendo en cuenta la temperatura que poseen los gases inmediatamente a la salida del quemador, mediante la ecuación 7 (Serrano & Carranza, 2005):

$$n_{com} = \frac{PCS - (H_{prod} - H_{react})}{PCS} * 100 \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

n_{com} es la eficiencia de combustión

PCS es el poder calorífico superior del combustible.

H_{prod} y H_{react} son las entalpías de los productos y la entalpia de los reactantes

Evaluación de los resultados ambientales de combustión: Para esto se tuvo en cuenta los límites de emisión permitidos por el ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial de Colombia que establece que para equipos de combustión que utilicen biomasa como combustible a condiciones de referencia, con oxígeno de referencia del 13% deben cumplir un límite de emisión admisible para 300 MP de 350 mg/m³ para NO_x y con oxígeno

de referencia del 13% y no aplica los estándares de emisión admisibles para SO₂ (Ministerio del Medio Ambiente, 2008).

5.2.5 Modelo estadístico para el ajuste de datos: Mediante el análisis estadístico ANOVA de los resultados se realizó un modelo estadístico con la ayuda del software STATGRAPICS centurión, para expresar las variables respuestas como una función lineal de los factores experimentales, interacciones entre los factores, y términos del error con el fin de realizar el ajuste de los datos (Toscano, 2009).

5.3 Etapa 4: evaluación del proceso de combustión biomasas compactadas de тамо de arroz y rastrojo de maíz utilizando software especializado.

A partir del modelo estadístico que ajuste los datos experimentales, se realizó la simulación de los parámetros determinados experimentalmente dentro de los rangos obtenidos del proceso de combustión de las biomasas compactadas, descritas en el numeral 5.2.2 para la tecnología seleccionada.

5.3.1 Simulación del proceso de combustión de los biocombustibles: Con el fin de obtener las condiciones óptimas para el proceso de combustión de cada una de las biomasas compactadas a las mismas condiciones que a nivel experimental, se realizará la simulación del proceso en el software Aspen Plus teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Las características de la caldera como datos de entrada: presión de ingreso, la tasa de alimentación, exceso de aire, las temperaturas de humos, tasa de alimentación, capacidad de potencia a generar, temperatura de entrada y rendimiento de la caldera.
- Variables de entrada aleatorias: tamaño de partícula del biocombustible, relación aire/biocombustible y tiempo de residencia.
- Datos de salida: las emisiones contaminantes y la eficiencia de la combustión.

A partir de los resultados obtenidos de la simulación se evaluaron las emisiones con base en los límites permitidos y se analizará un análisis de la eficiencia de la combustión teniendo en cuenta la ecuación 7.

5.3.2. Validación de la simulación: Según los resultados obtenidos en la simulación para las condiciones óptimas del proceso de combustión se realizó una prueba experimental de las mismas con el fin de verificar la simulación.

5.4 Etapa 5: elaboración de recomendaciones para implementación de tecnología de combustión seleccionada.

En esta etapa se presentarán las recomendaciones a tener en cuenta al momento de adoptar la tecnología de combustión seleccionada que dará cumplimiento al cuarto objetivo específico.

5.4.1 Elaboración del informe técnico que presente recomendaciones respecto a la implementación de la tecnología de combustión seleccionada: Con base en las

características fisicoquímicas de los biocombustibles a partir de biomasas de tamo de arroz y rastrojo de maíz provenientes del departamento del Meta, los parámetros óptimos de combustión seleccionados mediante la simulación del proceso a partir de las condiciones más favorables identificadas a nivel experimental; además de las características propias de funcionamiento del equipo de combustión se realizó un informe técnico con el fin de emitir algunas recomendaciones acerca de la implementación de la tecnología de combustión seleccionada.

6 Resultados

6.1 Etapa 1: selección de la tecnología de combustión de biomasas compactadas de tamo de arroz y rastrojo de maíz.

6.1.1 Análisis de la información:

- **Análisis de publicaciones científicas para el periodo entre 2005 y 2018.**

Para el análisis de las publicaciones científicas existentes del proceso de combustión de biomasa agrícola se analizaron los artículos del periodo comprendido entre 2005 y 2016; para esto se realizó una búsqueda en la base de datos Scopus utilizando la siguiente ecuación de búsqueda:

TITLE-ABS-KEY ("combustion" OR "cocombustion" OR "Direct combustion" OR "Cofiring" OR "Direct burning" OR "Direct firing") AND TITLE-ABS-KEY ("boiler") AND TITLE-ABS-KEY ("fixed bed" OR "fluidized bed" OR "pulverized fuel" OR "drag flow" OR "fixed grate" OR "inclined grate" OR "Horizontal grate" OR "vibrating grate" OR "moving

grate") AND TITLE-ABS-KEY (biomass) AND TITLE-ABS-KEY ("lignocellulosic biomass" OR "agricultural residue\$" OR "agricultural waste" OR "forest residue\$" OR briquett* OR pellet* OR "wood" OR "crop residue\$" OR "energy crop") AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2015) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2014) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2013) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2012) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2011) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2010) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2009) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2008) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2007) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2006) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2005)) AND (EXCLUDE(EXACTKEYWORD, "Sewage sludge") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD, "Ammonium compounds") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD, "Animals") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD, "Paper Industry") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD, "Paper and pulp industry") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD, "Zinc") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD, "Pyrolysis") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD, "Ash") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD, "Nitrogen oxides") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD, "Coal ash") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD, "Eurasia") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD, "Municipal Solid Waste")).

La Figura 3 muestra la dinámica de publicaciones realizadas para el periodo de tiempo evaluado, de donde Scopus evidencia un total de 133 artículos publicados, la tendencia de publicaciones es variante durante el periodo evaluado y es positiva para los últimos tres años.

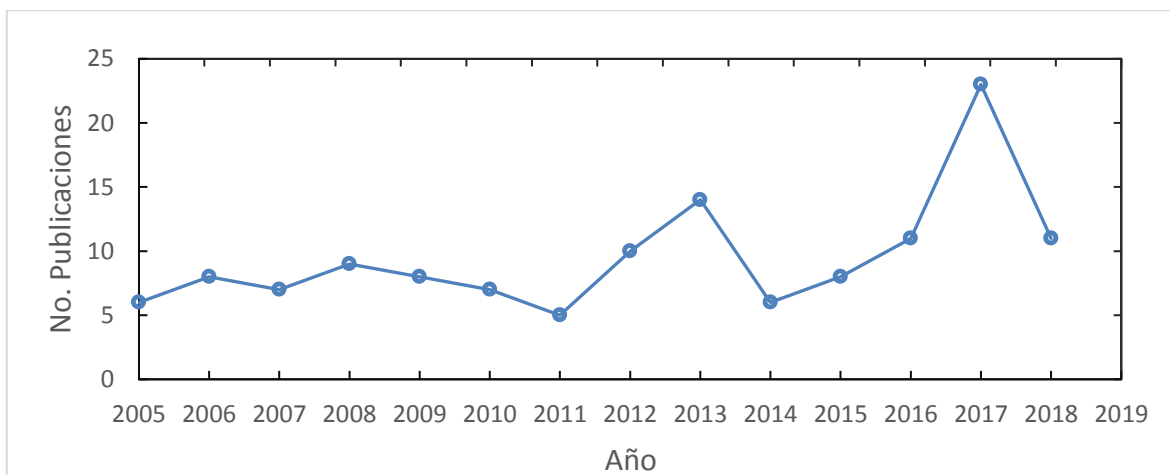


Figura 3. Dinámica de publicaciones en combustión de biomasa para el periodo comprendido entre 2005 y 2018.

Además, la Figura 4 muestra la dinámica de los 10 principales países con publicaciones científicas en combustión de biomasa donde se resalta la participación de Suecia, además es de aclarar que no se reportan artículos publicados en Colombia:

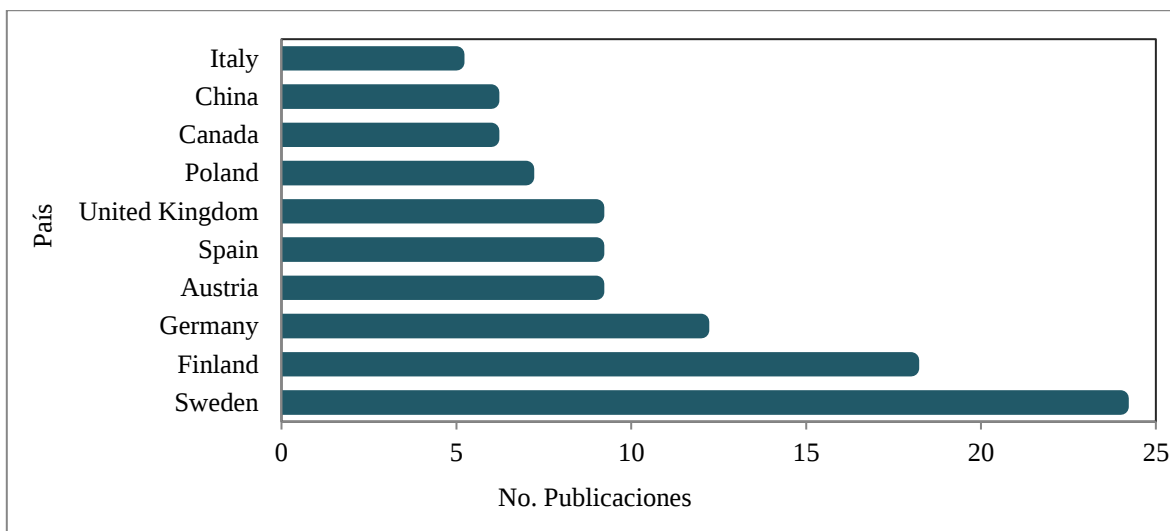


Figura 4. Dinámica de publicaciones en combustión de biomasa para el periodo comprendido entre 2005 y 2018.

Dentro de la búsqueda realizada se presenta una lista de instituciones y entidades con mayor participación en estas tecnologías, así como la lista de autores con mayor participación.

- Autores líderes en publicaciones científicas
 - Chen, Qun
 - Davidsson, K. O.
 - Kassman, Hakan
 - Li, Jun
 - M.J. Fernández Llorente
 - Sippula, Olli
 - Yang, Hairui

- Instituciones líderes en publicaciones científicas
 - Tsinghua University
 - Chalmers University of Technology
 - University of Eastern Finland
 - Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)
 - University of Glasgow

A partir de la plataforma científica Scopus se determinó los 10 artículos con más citaciones durante el periodo evaluado, los cuales se muestran en la Tabla 5. Por lo que se puede inferir que el proceso de combustión de biomasa es bastante estudiado y recibe mayor atención por parte de la comunidad científica.

Tabla 5.

Artículos científicos más referenciados en el periodo evaluado.

ARTICULO			No DE CITACIONES
AÑO	TITULO	AUTORES	
2009	Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies	A.A. Khan, W. de Jong, P.J. Jansens, H. Spliethoff	560
2008	Grate-firing of biomass for heat and power production	Chungen Yin, Lasse A. Rosendahl, Søren K. Kær	294
2016	Ash-related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures Ash-Related Issues in Fluidized-Bed	Niu, Y., Tan, H., Hui, S.	202
2011	Combustion of Biomasses: Recent Research Highlights	Mikko Hupa	123
2008	Countermeasures against alkali-related problems during combustion of biomass in a circulating fluidized bed boiler	K.O. Davidsson, L.-E. Åmand, B.-M. Steenari, A.-L. Elled, D. Eskilsson, B. Leckner	109
2008	Overview and some issues related to co-firing biomass and coal	Jianjun Dai, Shahab Sokhansanj, John R. Grace, Xiaotao Bi, C. Jim Lim, Staffan Melin	102
2006	The influence of biomass co-combustion on boiler fouling and efficiency	Pronobis, M.	98

ARTICULO			No DE CITACIONES
AÑO	TITULO	AUTORES	
2013	Two strategies to reduce gaseous KCl and chlorine in deposits during biomass combustion - Injection of ammonium sulphate and co-combustion with peat	Kassman, H., Pettersson, J., Steenari, B.-M., Åmand, L.-E.	85
2009	Comparison of the characteristics of bottom ash and fly ash from a medium-size (32 MW) municipal district heating plant incinerating forest residues and peat in a fluidized-bed boiler	Olli Dahl, Hannu Nurmesniemi, Risto Pöykiö, Gary Watkins	85
2010	NOx formation and selective non-catalytic reduction (SNCR) in a fluidized bed combustor of biomass	Shiva Mahmoudi, Jan Baeyens, Jonathan P.K. Seville	82

Además, se identificó los principales tipos de combustión de biomasa estudiados para el periodo entre 2005 y 2015 como se observa en la Figura 5.

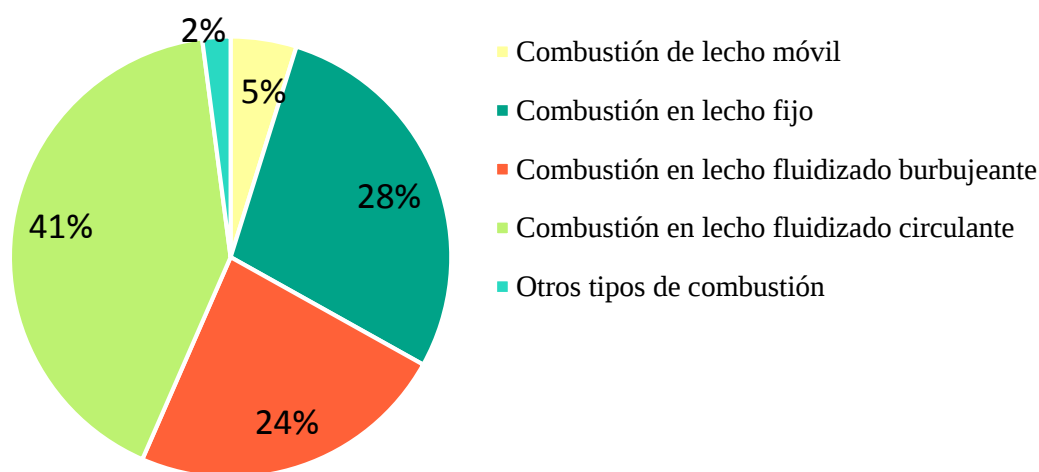


Figura 5. Principales tipos de combustión de biomasa estudiados.

En función de la forma en que la biomasa entra a la cámara de combustión se clasifica en los diferentes tipos de combustión; la *Figura 5* muestra los diferentes porcentajes de investigaciones relacionadas con estos tipos para el periodo 2005-2015; en donde se observa que la combustión en lecho fluidizado circulante es la más estudiada. Existen muchas publicaciones que presentan resultados sobre como optimizar el proceso de combustión de biomasa dependiendo del tipo de tecnología donde el área de ingeniería tiene mayor número de publicaciones trabajando en aspectos de diseño, mejora de eficiencia energética, emisiones al ambiente y estudios en general, con el fin de impulsar avances tecnológicos.

6.1.2 Análisis de patentes: Para el análisis de patentes del proceso de combustión de biomasa agrícola se delimitó para el periodo comprendido entre 2008 y 2018; para esto se realizó una búsqueda en la base de ESPACENET donde se filtró por los términos Boiler biomass combustion. A continuación, se muestra la *Figura 6* con Dinámica de patentes en calderas de combustión de biomasa:

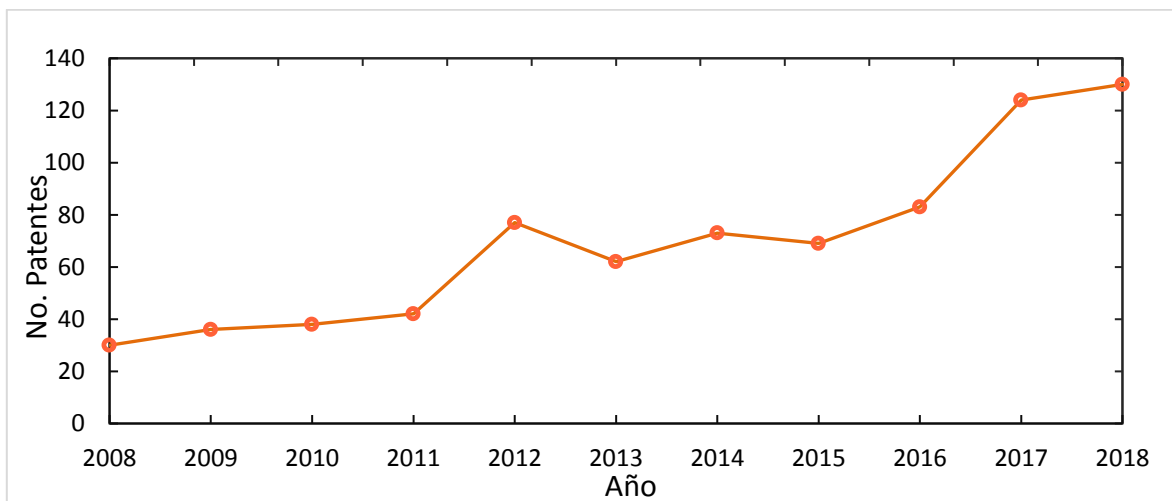


Figura 6. Dinámica general de patentes en calderas de combustión de biomasa.

Como se observa en la Figura 6 el año con mayor número con emisión de patentes fue 2018 con el 15,72%, además, se observa una tendencia positiva en la evolución, tomando en cuenta que los datos para el año 2018 aún son preliminares por la dinámica de actualización de la base de datos de ESPACENET.

Cabe destacar dentro del análisis de las patentes se tuvo en cuenta el fenómeno de la eficiencia en el diseño, que involucra el desarrollo o la búsqueda de nuevas aplicaciones utilizando como bases combustibles a partir de biomasa sólida, además de las mejoras en cuanto a sistemas de control y eficiencia energética.

Con cifras preliminares para el año 2018, las principales categorías de patentes involucradas en el desarrollo de inventos se relacionan con la aplicación de nuevos métodos, diseños, aplicaciones y aparatos relacionados con el aprovechamiento de los desechos como combustible, representado por la categoría F23G5. En la Tabla 6 se muestran las principales categorías de clasificación de patentes, y el significado de estas, de acuerdo al Modelo Europeo de Clasificación de patentes, disponible en la web de ESPACENET.

Tabla 6.

Principales categorías de patentes en el área de combustión de biomasa.

F23B10	Combustion apparatus characterised by the combination of two or more combustion chambers
--------	--

F23B30	Combustion apparatus with driven means for agitating the burning fuel; Combustion apparatus with driven means for advancing the burning fuel through the combustion chamber
F23B40	Combustion apparatus with driven means for feeding fuel into the combustion chamber
F23B50	Combustion apparatus in which the fuel is fed into or through the combustion zone by gravity, e.g. from a fuel storage situated above the combustion zone
F23B60	Combustion apparatus in which the fuel burns essentially without moving
F23B80	Combustion apparatus characterised by means creating a distinct flow path for flue gases or for non-combusted gases given off by the fuel
F23B90	Combustion methods not related to a particular type of apparatus
F23C10	Fluidised bed combustion apparatus
F23C5	Disposition of burners with respect to the combustion chamber or to one another; Mounting of burners in combustion apparatus (F23C1/00, F23C15/00 take precedence)
F23C7	Combustion apparatus characterised by arrangements for air supply (inlets for fluidisation air F23C10/20)
F23G5	Incineration of waste (of specific waste F23G7/00); Incinerator constructions; Details, accessories or control therefor
F23H11	Travelling-grates

F23J1	Removing ash, clinker, or slag from combustion chamber (arrangements for collecting bottom ash and flyash F23J3/06; removing flyash from flue gas F23J15/022)
F23J11	Devices for conducting smoke or fumes, e.g. flues (removing fumes other than combustion fumes from the area where they are produced, in general B08B15/00; heat insulation therefor E04B1/94; chimneys E04H12/28; removing cooking fumes from domestic stoves or ranges F24C15/20; fume conduits of furnaces, kilns, ovens, or retorts F27D17/002)
F23K3	Feeding or distributing of lump or pulverulent fuel to combustion apparatus (conveying in general B65G)
F23L9	Passages or apertures for delivering secondary air for completing combustion of fuel
F23M9	Baffles or deflectors for air or combustion products (structurally associated with burners F23D); Flame shields

Dentro del análisis de las principales categorías, el fenómeno de la eficiencia en el diseño, se involucra con el desarrollo o la búsqueda de nuevas aplicaciones utilizando como base, nuevos combustibles (F23G5) o Montaje de quemadores en aparatos de combustión (F23C5), eliminación de cenizas, clinker o escorias de la cámara de combustión (F23J1), aberturas para suministrar aire secundario para completar la combustión de combustible (F23L9) y deflectores para productos de aire o de combustión asociados estructuralmente con quemadores (F23M9),e con el objetivo de lograr menores impactos sobre el medio ambiente.

Se realizó el análisis de los principales autores con patentes relacionadas con combustión de biomasa mostrados en la Figura 7 permite apreciar un marcado liderazgo de países como Estados Unidos (Medoff Marshall con 40 patentes, Chen Yilong con 14 patentes, White Vincent con 11 patentes, Okaichi Atsuo con 9 patentes), Japón (Okazaki Hirofumi con 9 patentes, Kosuda Osamu con 9 patentes, Kido Osao con 9 patentes, Hikichi Takumi con 9 patentes, Taniguchi Koji con 8 patentes), China (Zhang Yanfeng con 19 patentes).

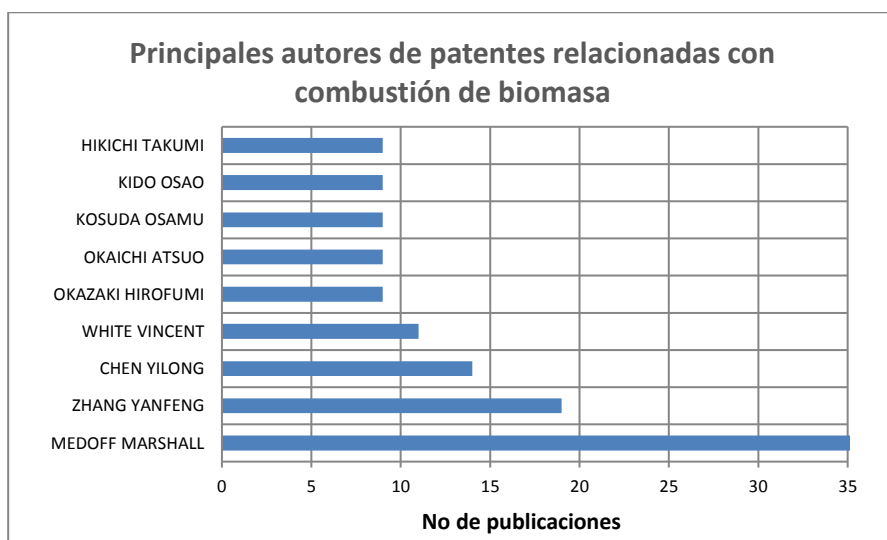


Figura 7. Principales categorías de patentes en el área de combustión de biomasa.

A demás, se determinó los 5 países con mayor cantidad de desarrollo de patentes relacionadas con eficiencia de calderas de biomasa datos suministrados por la superintendencia de Industria y Comercio de Colombia para el año 2016, siendo China el país con mayor número de patentes hasta el momento con un numero de 1664 patentes seguido de Japón con 330 patentes, como se muestra en la figura 8:

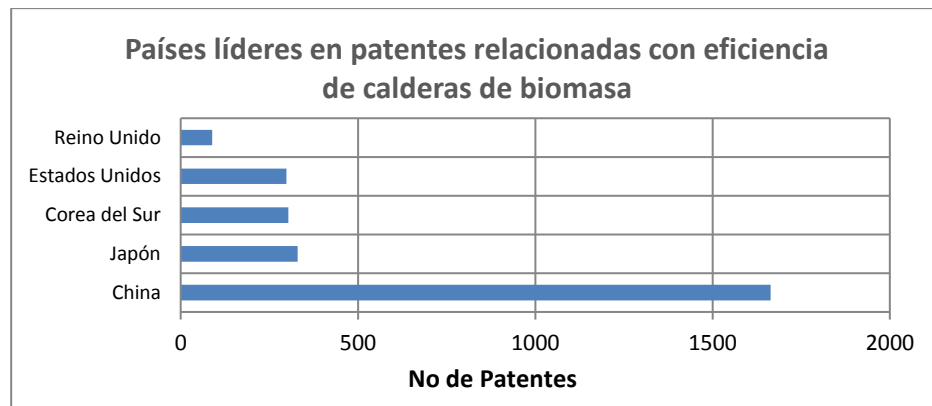


Figura 8. Países líderes en patentes relacionadas con eficiencia de calderas de biomasa.

Así mismo, a pesar de que, en cuanto a publicaciones científicas, se observó que la combustión de lecho fluidizado circulante es la más estudiada. Existen numerosas publicaciones que presentan resultados sobre cómo optimizar el proceso de combustión de biomasa dependiendo del tipo de tecnología donde el área de ingeniería tiene el mayor número de publicaciones trabajando en aspectos de diseño, mejora de la eficiencia energética, emisiones al medio ambiente y estudios en general. La combustión de lecho fijo presenta la gran variación de granulometría y tipo de combustible, opera con alto contenido de humedad y con altos excesos de oxígeno y requiere menor inversión comparadas con las de lecho fluidizado. Razón por la cual se escogió como objeto de estudio la tecnología de lecho fijo.

Por otro lado, a partir de la revisión bibliográfica realizada se planteó el escalamiento del proceso de combustión de lecho fijo a nivel de laboratorio como se observa en la *Figura 9*, A partir de este se fabricaron e implementaron los equipos.

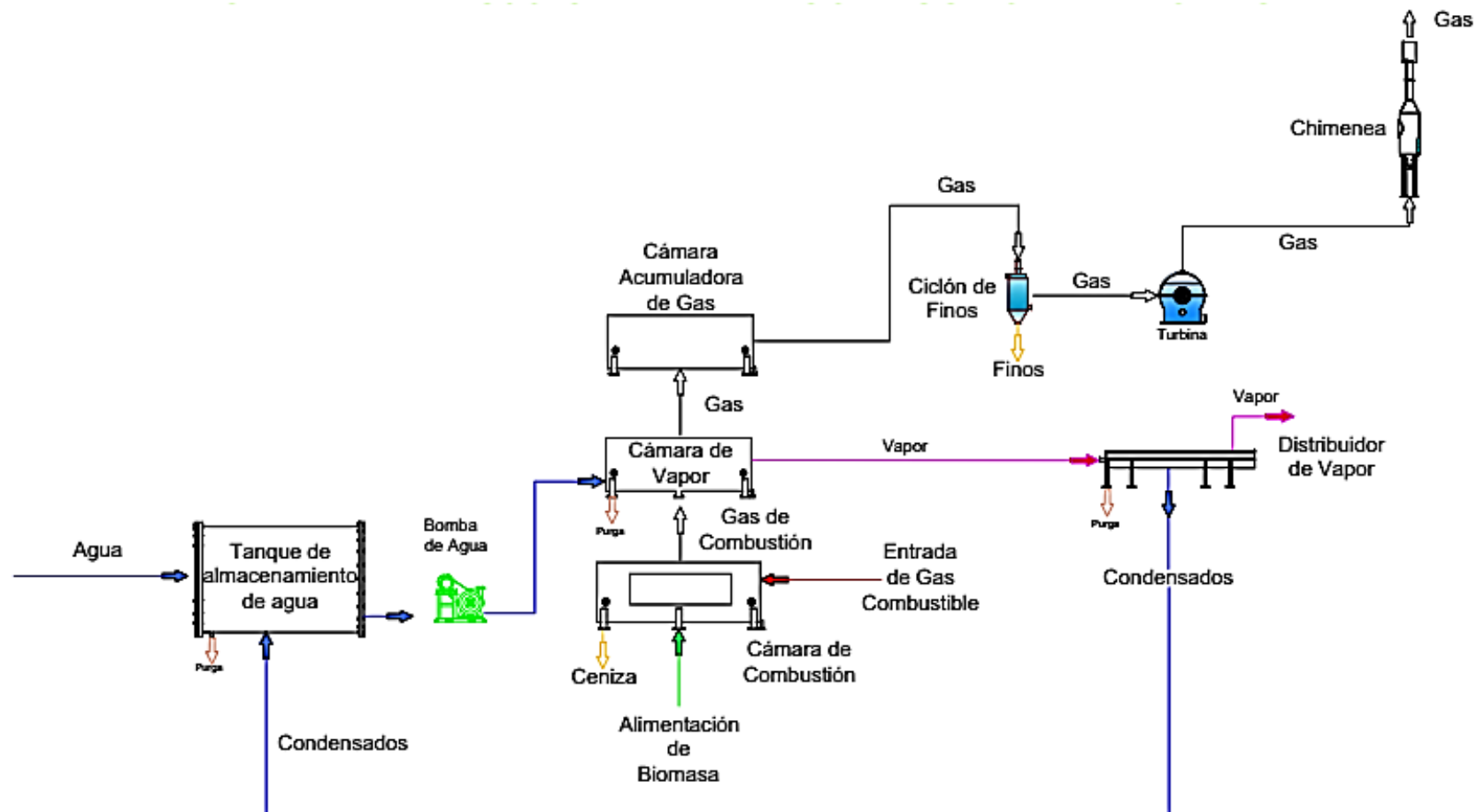


Figura 9. Diagrama de flujo cámara de combustión

6.2 Etapa 2: estimación de los parámetros de combustión biomásas compactadas de tamo de arroz y rastrojo de maíz y su efecto en la eco-eficiencia y las emisiones del proceso.

6.2.1 Evaluación del proceso de densificación de los dos tipos de biomasa agrícola: Se determinó la composición química de la biomasa por medio del análisis mediante Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total (TXRF) como se observa en la Tabla 7 para el tamo de arroz y en la Tabla 8 para el rastrojo de maíz:

Tabla 7.

Análisis mediante fluorescencia de rayos X por reflexión total del tamo de arroz.

Tamo de arroz			
Metal	mg/L	W (mg)	% P/P
S _i	3549	8,873	89,761
P	38	0,095	0,961
K	99	0,248	2,504
Ca	28,87	0,072	0,730
Ti	11,22	0,028	0,284
Mn	5,35	0,013	0,135
Fe	92,93	0,232	2,350
Cu	8,82	0,022	0,223
Zn	4,181	0,010	0,106
Ga (IS)	100	0,250	2,529
Bi	16,44	0,041	0,416
		9,885	100

Tabla 8.

Análisis mediante fluorescencia de rayos X por reflexión total del rastrojo de maíz.

Rastrojo de maíz			
Metal	mg/L	W (mg)	% P/P
Si	273	0,683	8,503
K	125,4	0,314	3,906
Fe	7,98	0,020	0,249
Cu	2,81	0,007	0,088
An	0,67	0,002	0,021
Ga (IS)	100	0,250	3,115
Kr	0,45	0,001	0,014
Mo	2660	6,650	82,850
Sn	40,3	0,101	1,255
		8,027	100

Además, se calculó el poder calorífico para cada una de las biomásas como se relaciona en la Tabla 9.

Tabla 9.

Poder calorífico de las biomásas

Biomasa	PCI (kJ/Kg)
Tamo de arroz	14943,089
Rastrojo de maíz	16064,14

Los resultados de hemicelulosa, lignina Klason y celulosa se muestran en la Tabla 10 para el tamo de arroz y en la Tabla 11 para el rastrojo de maíz.

Tabla 10.

Porcentaje de lignina, celulosa y hemicelulosa para el tamo de arroz

Análisis	% P/P	
Extracto acuoso	5.4	± 0.5
Extracto orgánico	1.62	± 0.07
Ceniza	21.44	± 0.2
Lignina Klason	22.9	± 0.4
Celulosa	40.9	± 0.8
Hemicelulosa	17.6	± 0.5

Tabla 11.

Porcentaje de lignina, celulosa y hemicelulosa para el rastrojo de maíz

Análisis	% P/P	
Extracto acuoso	14.1	± 0.8
Extracto orgánico	3.2	± 0.4
Ceniza	5.23	± 0.2
Lignina Klason	23.8	± 0.3
Celulosa	46.9	± 0.8
Hemicelulosa	31.1	± 0.5

Se realizó un análisis TGA, de donde se obtuvieron los resultados de humedad, volátiles, carbono fijo, contenido de cenizas, mostrados en la Tabla 12 y la Tabla 13:

Tabla 12.

Humedad, volátiles, carbono fijo, contenido de cenizas para el tamo de arroz

Característica	% P/P
humedad	7,1
volátiles	90,78
Carbono fijo	32,45
Cenizas	21,51

Tabla 13.

Humedad, volátiles, carbono fijo, contenido de cenizas para el rastrojo de maíz

Característica	% P/P
humedad	8,96
volátiles	26,7
Carbono fijo	8,30
Cenizas	2,16

De las pruebas experimentales del proceso de combustión se evaluó el poder calorífico de cada uno de los pellets como se observan en la *Figura 10* para el tamo de arroz y en la *Figura 11* para el rastrojo de maíz.

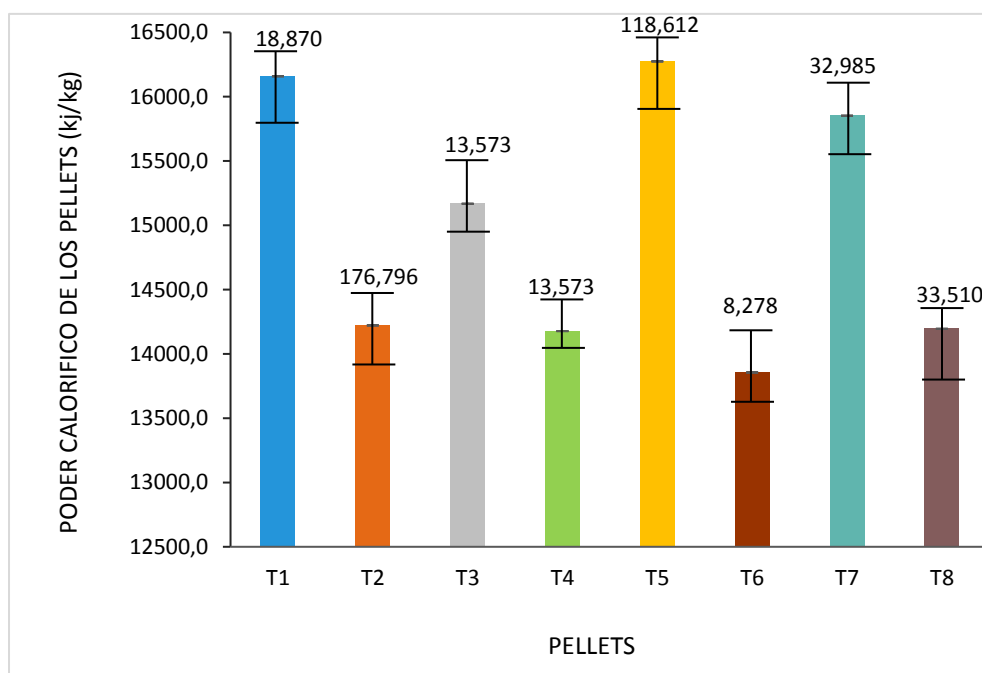


Figura 10. Poder calorífico de los pellets de tamo de arroz

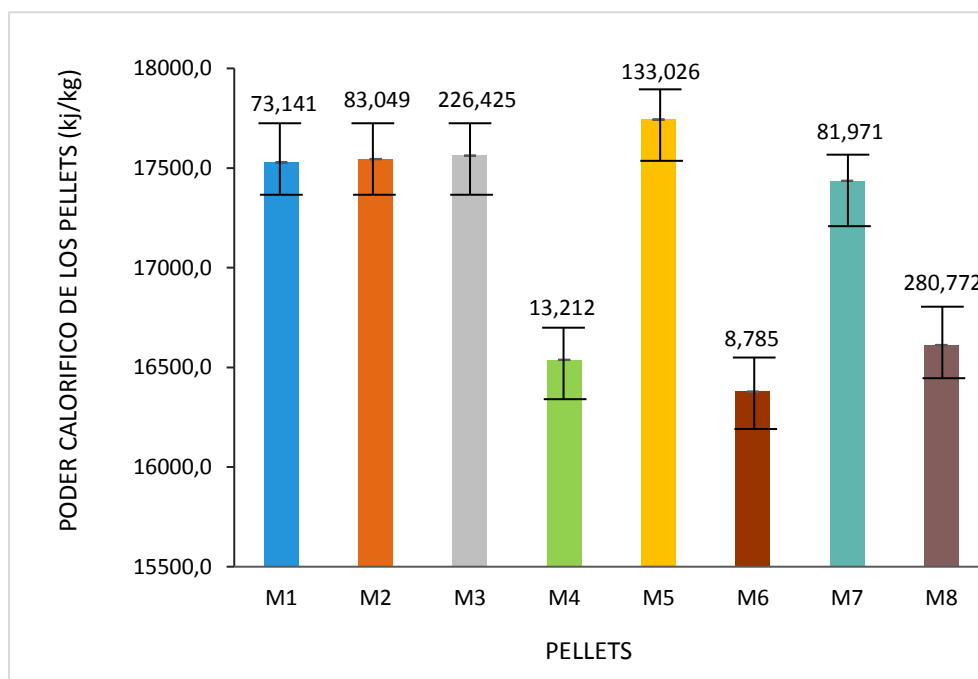


Figura 11. Poder calorífico de los pellets de rastrojo de maíz

De acuerdo con los resultados experimentales, se encontró que el mayor poder calorífico obtenido para los pellets de tamo de arroz como se observa en la Figura 10 fue de 16274,638 kJ/kg y para el rastrojo de maíz fue de 17743,138 kJ/kg como se observa en la Figura 11; con almidón de maíz como aglomerante. Es importante destacar que los pellets que obtuvieron el mayor valor de poder calorífico superior fueron para un tamaño de pellet de 10 mm y elaborados con un tamaño de partícula de 0,5 mm y una relación 80% biomasa y 20% aglomerante. Además, al Obtener un poder calorífico elevado representa una mayor obtención de energía con menos cantidad de pellets (densidad energética), que es una de las mayores ventajas de la peletización (Lazo, 2018).

Para comparar el poder calorífico medido de cada una de las muestras de pellets de tamo de arroz y rastrojo de maíz. Se revisó los resultados obtenidos, comparado con el poder calorífico inicial de cada una de las biomásas, se tuvo que algunas muestras variaron su valor de poder calorífico después de ser peletizadas, teniendo en cuenta la variación de parámetros como el contenido de humedad, la variación de % biomasa/aglomerante, por consiguiente, el poder calorífico de las muestras aumento.

Se realizó en análisis de varianza ANOVA, determinando si entre las medias existen diferencias significativas. Como se observa en la Tabla 14 ANOVA para el tamo de arroz particiona la variabilidad de LOG(Poder calorífico) tomando las variables por separado para cada uno de los efectos. Calculando el cuadrado medio de la significancia estadística de cada efecto para ser comparado contra un estimado del error experimental. De donde se encontró que uno de los efectos tiene un valor-P menor que 0,05, lo que indica que son significativamente diferentes de cero por lo que el nivel de confianza es del 95,0%.

Tabla 14.

Análisis de Varianza para Poder Calorífico de tamo de arroz

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A: Tamaño de partícula	0,00170861	1	0,00170861	8,50	0,0617
B: Relación b/ae	0,00042214	1	0,00042214	2,10	0,2431
AB	0,000723273	1	0,000723273	3,60	0,1541
bloques	0,027212	1	0,027212	135,41	0,0014
Error total	0,0006029	3	0,000200967		
Total (corr.)	0,030669	7			

A partir del estadístico R-Cuadrado se determinó que el modelo ajustado, explica 98,0342% de la variabilidad en LOG (Poder calorífico). Además, para comparar modelos con diferente número de variables independientes es el estadístico R-cuadrado ajustado con un 95,4131%. Por otra parte, el error estándar estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 0,0141763. Habría que mencionar también que el error medio absoluto (MAE) de 0,0077738 es el valor promedio de los residuos y que el estadístico de Durbin-Watson (DW) permitió determinar si en los residuos hay alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Finalmente, puesto que el valor-P es mayor que 0,05 no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.

A su vez, se hizo una prueba de significancia estadística de cada factor acorde a como fue introducido al modelo, como se puede ver en la Tabla 15 el valor-P más alto es 0,8309, que corresponde a la relación biomasa/aglomerante. Dado que el valor-P es mayor o igual que 0,05, se concluye que ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%.

Tabla 15.

Suma de Cuadrados de los factores experimentales.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	497088,	2	248544,	0,19	0,8309
Residuo	6,46412E6	5	1,29282E6		
Total (Corr.)	6,9612E6	7			

Así mismo, como se observa en la Tabla 16 ANOVA para el rastrojo de maíz particiona la variabilidad de LOG (Poder calorífico) tomando las variables por separado para cada uno de los efectos. Calculando el cuadrado medio de la significancia estadística de cada efecto para ser comparado contra un estimado del error experimental. De donde se encontró que uno de los efectos tiene un valor-P menor que 0,05, lo que indica que son significativamente diferentes de cero por lo que el nivel de confianza es del 95,0%.

La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{Poder calorífico} = 14988,0 - (224,643 * T. \text{ de partícula}) - \left(108,035 * \text{Relación} \frac{B}{A}\right)$$

(Ecuación 8)

De la ecuación 8 se puede inferir que para el caso del tamo de arroz el poder calorífico disminuye si se aumenta el tamaño de partícula y la relación biomasa aglomerante, siendo la relación biomasa/aglomerante la que menos influyente. Mientras que para el caso del tamaño de partícula si este es menor mejor será la densidad y la resistencia del pellet (González, Rincón, Camargo, Dévora, & Fabio Sierra, 2014).

A partir del estadístico R-Cuadrado se determinó que el modelo ajustado, explica 33,1697% de la variabilidad en LOG (Poder calorífico). Por otra parte, el error estándar estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 0,0407212. Habría que mencionar también que el error medio absoluto (MAE) de 0,0206435 es el valor promedio de los residuos y que el estadístico de Durbin-Watson (DW) permitió determinar si en los residuos hay alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos

en el archivo. Finalmente, puesto que el valor-P es mayor que 5,0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.

Tabla 16.

Análisis de Varianza para Poder Calorífico del rastrojo de maíz.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A: Tamaño de partícula	0,00170861	1	0,00170861	8,50	0,0617
B: Relación b/a	0,00042214	1	0,00042214	2,10	0,2431
AB	0,000723273	1	0,000723273	3,60	0,1541
bloques	0,027212	1	0,027212	135,41	0,0014
Error total	0,0006029	3	0,000200967		
Total (corr.)	0,030669	7			

A su vez, se hizo una prueba de significancia estadística de cada factor acorde a como fue introducido al modelo, como se puede ver en la Tabla 17 el valor-P más alto es 0,5578, que corresponde a la relación biomasa/aglomerante. Dado que el valor-P es mayor o igual que 0,05, se concluye que ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%.

Tabla 17

Suma de Cuadrados de los factores experimentales.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	449874,	2	224937,	0,66	0,5578
Residuo	1,71031E6	5	342062,		
Total (Corr.)	2,16018E6	7			

La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{Poder calorífico} = 0,5578 - (130,78 * T.de\ partícula) - \left(197,815 * Relación \frac{B}{A}\right)$$

(Ecuación 9)

De manera similar se observa el comportamiento de los datos ajustados en la ecuación 9 con los presentados en la ecuación 8, de donde observa que para el caso del rastrojo de maíz el poder calorífico disminuye si se aumenta el tamaño de partícula y la relación biomasa aglomerante, siendo la relación biomasa/aglomerante la que menos influyente.

Finalmente, para el análisis ANOVA de las dos biomosas, los intervalos de confianza muestran la precisión con que se pueden estimar los coeficientes dados, la cantidad de datos disponibles y el ruido que está presente. Incluyendo los factores de inflación de varianza, que pueden usarse para medir la extensión con la que están correlacionadas las variables predictoras entre ellas mismas.

Por otro lado, del análisis TGA se determinó humedad, contenido de ceniza, compuestos volátiles, carbono fijo como se relaciona en la Tabla 18. donde se evidencia que el porcentaje de carbono fijo aumento con respecto a los porcentajes presentados en las biomosas, lo que es beneficioso para el proceso de combustión, los porcentajes de humedad se encuentran dentro de los valores permitidos para la elaboración de pellets de biomasa (Forero, Guerrero, & Sierra, 2012; Rincón & González, 2014).

Tabla 18.

Contenido de humedad, contenido de ceniza, compuestos volátiles, carbono fijo de los biocombustibles.

BIOMASA	PRUEBA	DIAMETRO (mm)	HUMEDAD (% P/P)	VOLÁTILES mg/L	CARBONO FIJO (mg)	CENIZAS (% P/P)
Tamo de arroz	T1	7	6,09	27,52	25,6	11,26
	T2	7	7,9	24,6	24,64	13,93
	T3	7	6,98	26,75	24,99	13,14
	T4	10	6,05	28,9	25,33	12,35
	T5	7	6,68	24,94	24,91	12,94
	T6	10	6,51	28,21	25,16	12,75
	T7	10	6,36	25,98	25,27	12,15
	T8	10	6,21	23,76	25,39	11,56
Rastrojo de maíz	M1	7	7,08	24,25	16,83	2,69
	M2	7	5,67	29,85	15,63	2,53
	M3	7	6,08	27,02	15,15	2,25
	M4	10	6,55	29,2	15,84	2,72
	M5	7	6,44	29,19	15,08	2,42
	M6	10	6,77	26,71	15,15	2,25
	M7	10	5,95	28,9	16,45	2,9
	M8	10	5,96	29,67	16,538	2,34

Aunque los valores de carbono fijo son similares se determinó trabajar con pellets de 0,5 mm y una relación biomasa/aglomerante de 30/70 %P/P y 20/80%P/P, con diámetros de 7 y 10 mm, para el proceso de combustión.

6.2.2 Análisis de resultados de las pruebas experimentales del proceso de combustión:

Para realizar las pruebas experimentales se utilizó una cámara de combustión ubicada en el Parque Tecnológico Guatiguará, en el laboratorio Cidelac teniendo en cuenta el diseño presentado en la Tabla 19. A continuación, se muestra los resultados obtenidos de la experimentación:

Tabla 19.

Diseño experimentos combustión de pellets de biomasa.

BIOMASA	PRUEBA	DIAMETRO (mm)	RELACIÓN A/C (% P/P)
Tamo de arroz	TC1	7	1,5
	TC2	7	1
	TC3	10	1,5
	TC4	10	1
	TC5	7	1,5
	TC6	7	1
	TC7	10	1,5
	TC8	10	1
Rastrojo de maíz	MC1	7	1,5
	MC2	7	1
	MC3	10	1,5
	MC4	10	1
	MC5	7	1,5
	MC6	7	1
	MC7	10	1,5
	MC8	10	1

- **Resultados pruebas experimentales de la combustión de pellets de tamo de arroz**

Los resultados de las emisiones obtenidas de las pruebas experimentales de la combustión de pellets de tamo de arroz se muestran en la *Figura 12* para SO_2 y la *Figura 13* para CO.

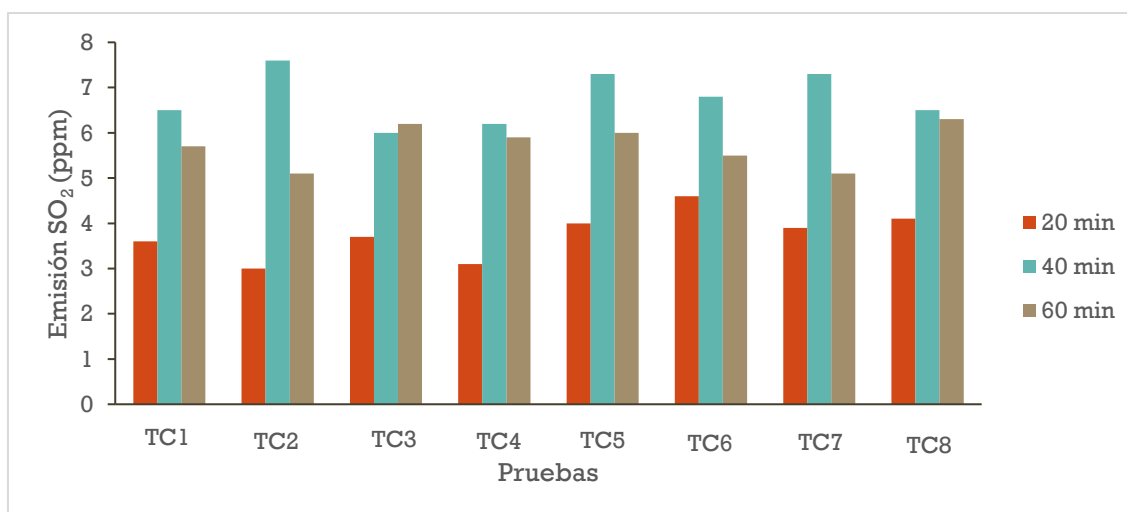


Figura 12. Resultados obtenidos de las emisiones de SO_2 de las pruebas experimentales de la combustión de pellets de tamo de arroz

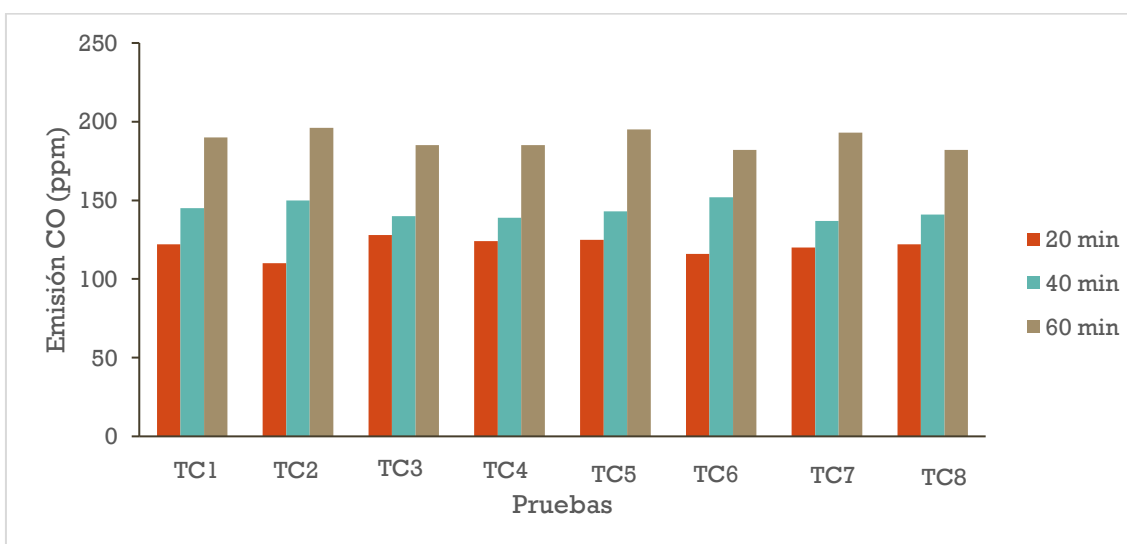


Figura 13. Resultados obtenidos de las emisiones de CO de las pruebas experimentales de la combustión de pellets de tamo de arroz

Se realizó el análisis estadístico ANOVA para el análisis de las emisiones de SO₂ y CO:

Emisiones de SO₂: La Tabla 20 ANOVA combustión de pellets de tamo arroz particiona la variabilidad de SO₂ tomando las variables por separado para cada uno de los efectos. Calculando el cuadrado medio de la significancia estadística de cada efecto para ser comparado contra un estimado del error experimental. De donde se encontró que uno de los efectos tiene un valor-P menor que 0,05, lo que indica que son significativamente diferentes de cero por lo que el nivel de confianza es del 95,0%.

Tabla 20.

Análisis de Varianza para emisiones de SO₂ de combustión de tamo de arroz

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A: tamaño de pellet	0,005	1	0,005	0,02	0,9004
B: relación aire/combustible	0,5	1	0,5	1,85	0,2668
AB	0,18	1	0,18	0,67	0,4740
bloques	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
Error total	0,81	3	0,27		
Total (corr.)	1,495	7			

El estadístico R-Cuadrado se determinó que el modelo ajustado, explica 45,8194% de la variabilidad en SO₂. Por otra parte, el error estándar estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 0,519615. Habría que mencionar también que el error medio absoluto (MAE) de 0,275 es el valor promedio de los residuos y que el estadístico de Durbin-Watson (DW) permitió determinar si en los residuos hay alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Finalmente, puesto que el

valor-P que establece que el principal efecto de cada factor y si los efectos de interacción son estadísticamente significativos cuando $P < 0,05$ en este caso es mayor por consiguiente no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.

Emisiones de CO: La Tabla 21 ANOVA combustión de pellets de tame arroz particiona la variabilidad de CO tomando las variables por separado para cada uno de los efectos. Calculando el cuadrado medio de la significancia estadística de cada efecto para ser comparado contra un estimado del error experimental. De donde se encontró que uno de los efectos tiene un valor-P menor que 0,05, lo que indica que son significativamente diferentes de cero por lo que el nivel de confianza es del 95,0%.

Tabla 21.

Análisis de Varianza para emisiones de CO de combustión de tame de arroz

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A: Tamaño de pellet	0,0011661	1	0,0011661	0,86	0,4213
B: Relación aire/combustible	0,0000539824	1	0,0000539824	0,04	0,8543
AB	0,00112187	1	0,00112187	0,83	0,4293
bloques	0,0000613126	1	0,0000613126	0,05	0,8449
Error total	0,00405179	3	0,0013506		
Total (corr.)	0,00645506	7			

El estadístico R-Cuadrado se determinó que el modelo ajustado, explica 37,2308% de la variabilidad en CO. Por otra parte, el error estándar estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 0,0367505. Habría que mencionar también que el error medio absoluto (MAE) de 0,0198459 es el valor promedio de los residuos y que el estadístico de Durbin-Watson (DW) permitió determinar si en los residuos hay alguna correlación significativa

basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Finalmente, puesto que el valor-P es mayor que 5,0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.

- **Resultados pruebas experimentales de la combustión de pellets de rastrojo de maíz**

Los resultados de las emisiones obtenidas de las pruebas experimentales de la combustión de pellets de rastrojo de maíz se muestran en la *Figura 14* para SO_2 y la *Figura 15* para CO.

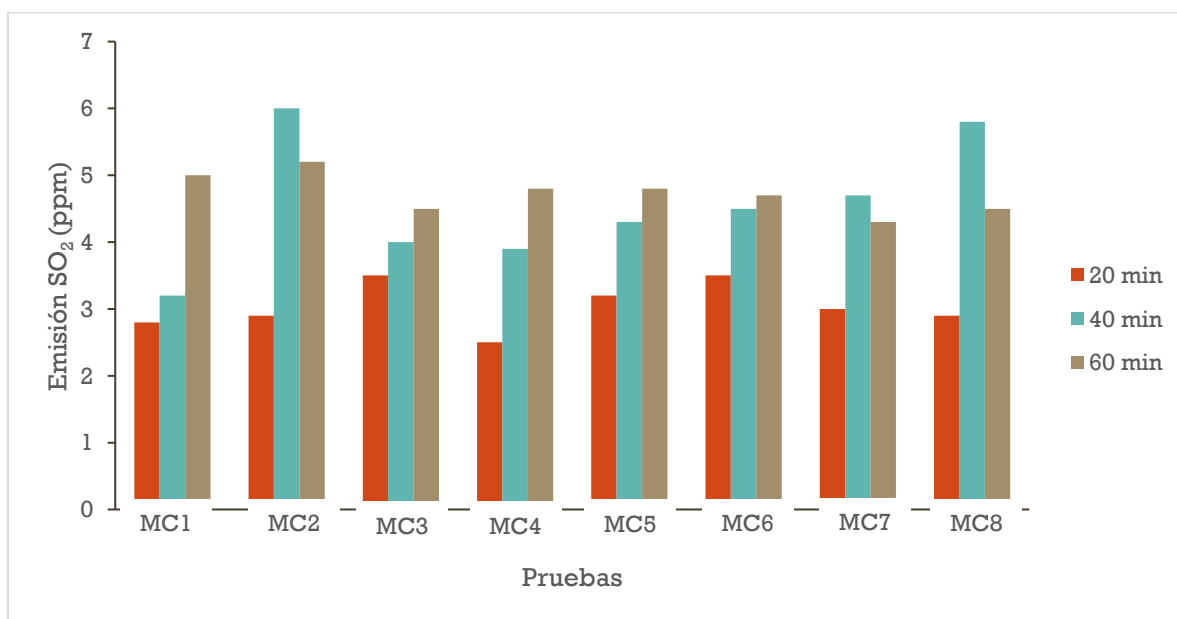


Figura 14. Resultados obtenidos de las emisiones de SO_2 de las pruebas experimentales de la combustión de pellets de rastrojo de maíz.

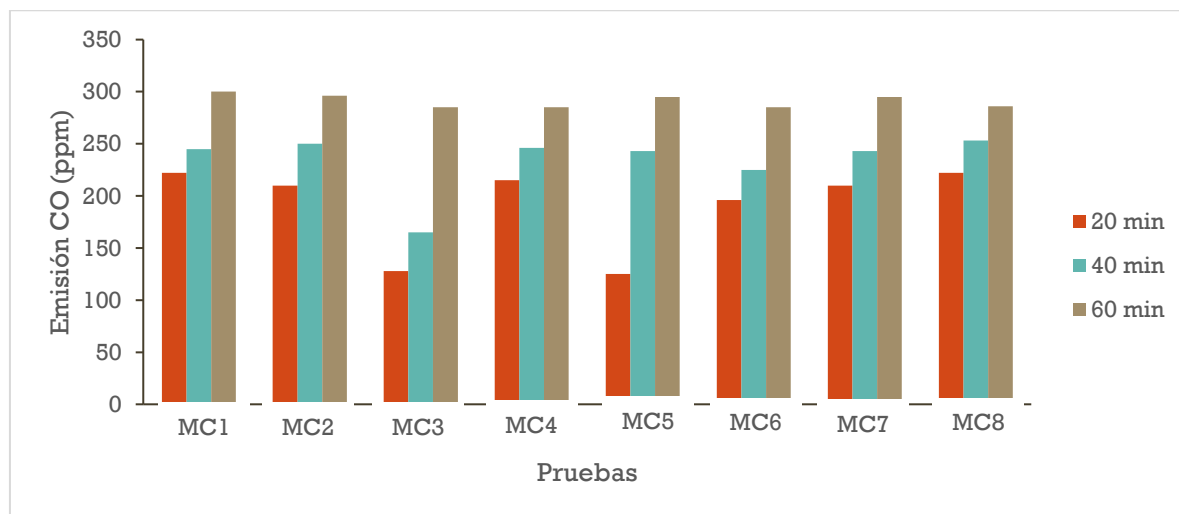


Figura 15. Resultados obtenidos de las emisiones de CO de las pruebas experimentales de la combustión de pellets de tamo de arroz

Se realizó el análisis estadístico ANOVA para el análisis de las emisiones de SO_2 y CO:

Emisiones de SO_2 : La Tabla 22 ANOVA combustión de pellets de rastrojo de maíz particiona la variabilidad de SO_2 tomando las variables por separado para cada uno de los efectos. Calculando el cuadrado medio de la significancia estadística de cada efecto para ser comparado contra un estimado del error experimental. De donde se encontró que uno de los efectos tiene un valor-P menor que 0,05, lo que indica que son significativamente diferentes de cero por lo que el nivel de confianza es del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrado se determinó que el modelo ajustado, explica 94,958% de la variabilidad en SO_2 . Además, para comparar modelos con diferente número de variables independientes es el estadístico R-cuadrado ajustado con un 88,2353%. Por otra parte, el error estándar estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 0,1. Habría que

mencionar también que el error medio absoluto (MAE) de 0,05 es el valor promedio de los residuos y que el estadístico de Durbin-Watson (DW) permitió determinar si en los residuos hay alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Finalmente, puesto que el valor-P es mayor que 5,0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.

Tabla 22.

Análisis de Varianza para emisiones de SO₂ de combustión de rastrojo de maíz

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A: tamaño de pellet	0,045	1	0,045	4,50	0,1240
B: relación aire/combustible	0,02	1	0,02	2,00	0,2522
AB	0,32	1	0,32	32,00	0,0109
bloques	0,18	1	0,18	18,00	0,0240
Error total	0,03	3	0,01		
Total (corr.)	0,595	7			

Emisiones de CO: La Tabla 23 ANOVA combustión de pellets de rastrojo de maíz particiona la variabilidad de CO tomando las variables por separado para cada uno de los efectos. Calculando el cuadrado medio de la significancia estadística de cada efecto para ser comparado contra un estimado del error experimental. De donde se encontró que uno de los efectos tiene un valor-P menor que 0,05, lo que indica que son significativamente diferentes de cero por lo que el nivel de confianza es del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 55,3535% de la variabilidad en CO. Además, para comparar modelos con diferente número de variables

independientes es el estadístico R-cuadrado ajustado con un 0,0%. Por otra parte, el error estándar estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 0,021789.

Tabla 23.

Análisis de Varianza para emisiones de CO de combustión de tamo de arroz

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A: tamaño de pellet	0,000778008	1	0,000778008	1,64	0,2905
B: relación aire/combustible	0,0000358097	1	0,0000358097	0,08	0,8014
AB	0,000917225	1	0,000917225	1,93	0,2587
bloques	0,0000348136	1	0,0000348136	0,07	0,8041
Error total	0,00142429	3	0,000474762		
Total (corr.)	0,00319014	7			

Habría que mencionar también que el error medio absoluto (MAE) de 0,0115833 es el valor promedio de los residuos y que el estadístico de Durbin-Watson (DW) permitió determinar si en los residuos hay alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Finalmente, puesto que el valor-P es mayor que 5,0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.

- **Análisis de los biocombustibles quemados**

Se determinó la composición química de la ceniza de los biocombustibles mediante el análisis fluorescencia de rayos X por reflexión total (TXRF), Como se observa en la Tabla 24 para el tamo de arroz y en la

Del análisis TXRF de la ceniza de tamo de arroz se observa que tiene un alto contenido de óxidos de sílice $\text{SiO}_2 = 89,303 \text{ \%P/P}$ (ver Tabla 24), por tanto, no provoca problemas de escorificación debido a que el punto de fusión de la ceniza de tamo de arroz para esta cantidad

es de alrededor de los 1500 °C, para el caso del rastrojo de maíz tiene un contenido de SiO₂ fue 30,2880 %P/P (ver **Tabla 25.**).

Tabla 25 para el rastrojo de maíz; Es importante resaltar que la composición de la ceniza depende de factores como composición química del combustible, la temperatura de combustión y el tiempo de residencia.

Tabla 24.

Análisis mediante fluorescencia de rayos X por reflexión total para el tamo de arroz.

Ceniza tamo de arroz			
Compuesto	ppm	W (mg)	% P/P
SiO ₂	8030	20,075	89,303
K ₂ O	436,1	1,0902	4,850
CaO	79,33	0,1983	0,882
TiO	9,39	0,0235	0,104
CrO	2,58	0,0064	0,029
MnO	36,26	0,0906	0,403
Fe ₂ O ₃	257,55	0,6439	2,864
NiO	1,024	0,0026	0,011
Cu ₂ O	0,5	0,0013	0,006
ZnO	11,64	0,0291	0,129
Ga (ISTD)	100	0,25	1,112
Ag ₂ O	5,7	0,0143	0,063
Au ₂ O	1,84	0,0046	0,020
PbO	19,96	0,050	0,222
		22,480	100

Del análisis TXRF de la ceniza de tamo de arroz se observa que tiene un alto contenido de óxidos de sílice SiO₂ = 89,303 %P/P (ver Tabla 24), por tanto, no provoca problemas de escorificación debido a que el punto de fusión de la ceniza de tamo de arroz para esta cantidad

es de alrededor de los 1500 °C, para el caso del rastrojo de maíz tiene un contenido de SiO₂ fue 30,2880 %P/P (ver Tabla 25.).

Tabla 25.

Análisis mediante fluorescencia de rayos X por reflexión total para el rastrojo de maíz.

Ceniza de rastrojo de maíz			
Compuesto	ppm	W (mg)	% P/P
SiO ₂	1029	2,5725	30,2880
P ₂ O ₅	216,5	0,5413	6,3726
SO ₂	38,5	0,0963	1,1332
K ₂ O	1368,5	3,4213	40,2810
CaO	156,72	0,3918	4,6130
TiO	17,28	0,0432	0,5086
CrO	7,723	0,0193	0,2273
MnO	9,829	0,0246	0,2893
Fe ₂ O ₃	393,48	0,9837	11,5819
NiO	3,065	0,0077	0,0902
Cu ₂ O	0,867	0,0022	0,0255
ZnO	52,71	0,1318	1,5515
Ga (ISTD)	100	0,2500	2,9434
As ₄ O ₆	0,869	0,0022	0,0256
Rb ₂ O	2,338	0,0058	0,0688
	3397,381	8,4935	100

Por otro lado, el contenido de óxido de potasio $K_2O = 4,850\%P/P$ para el tamo de arroz y $K_2O = 40,2810\%P/P$ podría ser consecuencia del uso de fertilizantes en los cultivos de arroz (Huaripoma, 2015; Quintana & Salazar, 2017; Valverde et al., 2007).

Análisis de exergético del proceso de combustión: Como resultados el análisis exergético ayudo a determinar el valor promedio de las eficiencias de los flujos de entrada y salida de la cámara de combustión donde la eficiencia exergética de la cámara de combustión obtuvo un valor de 20%. Además, indicó que para minimizar la exergía destruida es fundamental que se minimice el exceso de aire de combustión y se recomienda que la relación aire/biocombustible debe ser de 1.5.

La comparación de la relación de exceso de aire λ_1 y λ_2 : La Tabla 26 muestra los resultados de la relación de exceso de aire y eficiencia de la combustión:

Tabla 26.

Resultados de relación exceso de aire y eficiencia de la combustión

Biomasa	λ_1	λ_2	n_{com}
Cascarilla arroz	1.8	1.6	88.67
Rastrojo Maíz	1.3	1.5	89.16

Además, con la ayuda del software Simapro, teniendo en cuenta la base de datos “The Life Cycle Inventory Data” que es una de las bases de datos más completas para realizar análisis de ciclo de vida, y a partir de los datos anteriormente descritos, se calculó el impacto ambiental

asociado con las emisiones y usos de las fuentes naturales a través del análisis de la huella de carbono. Para esto se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones

- No se tuvo en cuenta la fase de construcción o el mantenimiento de la infraestructura de la planta, no se incluyeron los factores económicos, los factores sociales y los fenómenos naturales catastróficos.

- Algunos impactos ambientales no fueron cubiertos en su totalidad, debido a la dificultad de reunir datos para las condiciones locales (tipo de fertilizantes usados durante de la siembra, transporte de la biomasa, entre otras)

- En cuanto a las normas de asignación, se siguió la jerarquía propuesta por la norma ISO 14040.

La *Figura 16* muestra los porcentajes de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y NO_2 , medidos en unidades de dióxido de carbono equivalente. Como se puede observar el proceso de combustión presenta mayores emisiones con respecto a los demás procesos. Se debe aclarar que para este análisis los datos de inventario se han obtenido de la base de datos Ecoinvent se han modificado para adecuarlos a las características del proceso analizado.

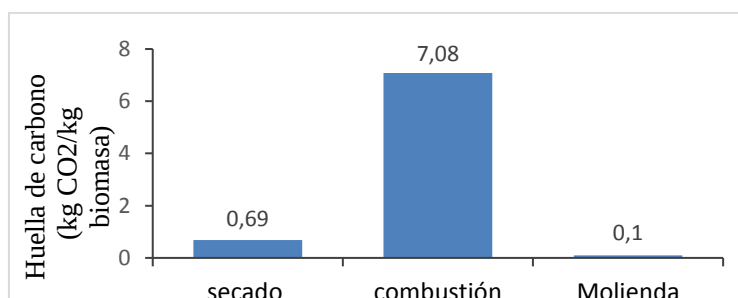


Figura 16. Impacto ambiental asociado con las emisiones y usos de las fuentes naturales a través del análisis de la huella de carbono.

Como se puede observar en *Figura 16* la etapa que más contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero para el sistema seleccionado es el proceso de combustión, esto debido a altas temperaturas para su funcionamiento y que genera mayores emisiones en especial de NO₂ comparadas con los otros procesos que hacen parte del sistema de estudio, además de la generación y eliminación de las cenizas.

6.2.3. Modelo estadístico para el ajuste de datos: Se determinaron modelos estadísticos que para el ajuste de datos de la combustión de pellets de tamo de arroz y rastrojo de maíz como se relaciona a continuación:

- **Modelos estadísticos que para el ajuste de datos de la combustión de pellets de tamo de arroz**

Modelo estadístico para emisiones de SO₂: evaluaron varios modelos de regresión múltiple en software STATGRAPHICS para describir la relación entre SO₂ y 2 variables predictoras (tamaño de partícula y relación aire/combustible). Los modelos se han ajustado conteniendo todas las combinaciones desde 0 hasta 2 variables, teniendo en cuenta el cuadrado medio del error (CME), los valores de R-Cuadrada ajustada y sin ajustar, y el estadístico Cp de Mallows. Se escogió un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre SO₂ y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$SO_2 = 5.725 - \left(0.25 * relación \frac{A}{C}\right) - (0.025 * tamaño de pellet) \quad (\text{Ecuación 10})$$

De la ecuación 10 se puede inferir que para el caso del tamo de arroz las emisiones de SO_2 disminuyen si se aumenta el tamaño de partícula y la relación aire/combustible, siendo el tamaño de pellet el menos influyente. Lo que es coherente porque si se aumenta la relación aire/combustible la combustión se dará en menor tiempo, regula la cantidad de ceniza y las emisiones de CO y CO_2 , pero esta relación se debe ajustar estequiométricamente.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 33,7793% de la variabilidad en SO_2 . El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 7,29097%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,444972. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 0,275 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examinó los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0,05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0%. Finalmente, el modelo indica que el tamaño de partícula no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0% ó mayor. Por tal motivo no influye en el proceso de combustión de pellets de tamo de arroz.

Modelos estadísticos para emisiones de CO: evaluaron varios modelos de regresión múltiple en software STATGRAPHICS para describir la relación entre CO y 2 variables predictoras (tamaño de partícula y relación aire/combustible). Los modelos se han ajustado

conteniendo todas las combinaciones desde 0 hasta 2 variables, teniendo en cuenta el cuadrado medio del error (CME), los valores de R-Cuadrada ajustada y sin ajustar, y el estadístico Cp de Mallows. Se escogió un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre CO y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$CO = 188.5 - (2,25 * \text{tamaño de pellet}) + \left(0.5 * \text{relación } \frac{A}{C}\right) \text{ (Ecuación 11)}$$

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 18,4783% de la variabilidad en CO. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 0,0%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 6,12372. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 3,9375 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examinó los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0,05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0%. Finalmente, el modelo indica que la *relación* $\frac{A}{C}$ no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0% ó mayor. Por tal motivo no influye en el proceso de combustión de pellets de tamo de arroz.

- **Modelos estadísticos que para el ajuste de datos de la combustión de pellets de rastrojo de maíz**

Modelo estadístico para emisiones de SO₂: se evaluaron varios modelos de regresión múltiple en software STATGRAPHICS para describir la relación entre SO₂ y 2 variables predictoras (tamaño de partícula y relación aire/combustible). Los modelos se han ajustado conteniendo todas las combinaciones desde 0 hasta 2 variables, teniendo en cuenta el cuadrado medio del error (CME), los valores de R-Cuadrada ajustada y sin ajustar, y el estadístico Cp de Mallows. Se escogió un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre SO₂ y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es:

$$SO_2 = 4,725 - \left(0.05 * relación \frac{A}{C}\right) - (0.075 * tamaño de pellet) \text{ (Ecuación 12)}$$

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 10,9244% de la variabilidad en SO₂. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 0,0%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,325576. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 0,2125 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0,05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0%. Finalmente, el modelo indica que el tamaño de partícula no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del

95,0% ó mayor. Por tal motivo no influye en el proceso de combustión de pellets de rastrojo de maíz.

Modelos estadísticos para emisiones de CO: evaluaron varios modelos de regresión múltiple en software STATGRAPHICS para describir la relación entre CO y 2 variables predictoras (tamaño de partícula y relación aire/combustible). Los modelos se han ajustado conteniendo todas las combinaciones desde 0 hasta 2 variables, teniendo en cuenta el cuadrado medio del error (CME), los valores de R-Cuadrada ajustada y sin ajustar, y el estadístico Cp de Mallows. Se escogió un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre CO y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$CO = 290,875 - (2,875 * \text{tamaño de pellet}) + \left(0.625 * \text{relación} \frac{A}{C}\right) \quad (\text{Ecuación 13})$$

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 25,5653% de la variabilidad en CO. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 0,0%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 6,3502. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 4,1875 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0,05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0%. Finalmente, el modelo indica que

la relación $\frac{A}{C}$ no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0% ó mayor. Por tal motivo no influye en el proceso de combustión de pellets de tamo de arroz.

6.3 Etapa 4: evaluación del proceso de combustión biomásas compactadas de tamo de arroz y rastrojo de maíz utilizando software especializado.

6.3.1 Bases de la simulación: Para llevar a cabo la simulación del proceso de combustión de los pellets de biomasa, se definieron las corrientes de entrada al sistema en fracciones de celulosa, hemicelulosa y lignina (ver Figura 17), a partir de los modelos estadísticos se consideró una relación aire/combustible de 1.5 para asegurar una combustión completa; con un porcentaje de aire estándar compuesta por 21% de O_2 y 79% de N_2 . Las reacciones de combustión que se tuvieron en cuenta son las siguientes:

- $Celulosa + 6O_2 \rightarrow 5 H_2O + 6CO_2$
- $Hemicelulosa + 5O_2 \rightarrow 4 H_2O + 5CO_2$
- $Lignina + 10,125 O_2 \rightarrow 6,95 H_2O + 7,3 CO_2$
- $S + O_2 \rightarrow SO_2$
- $C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow SO_2$

Para la simulación se utilizó un modelo de reactor ideal, estequiométrica razón la cual se especificaron las reacciones de combustión para cada uno de los biocombustibles. A la salida del reactor la corriente de proceso denominada GAS4 está conformada por los productos de combustión: CO , SO_2 y H_2O .

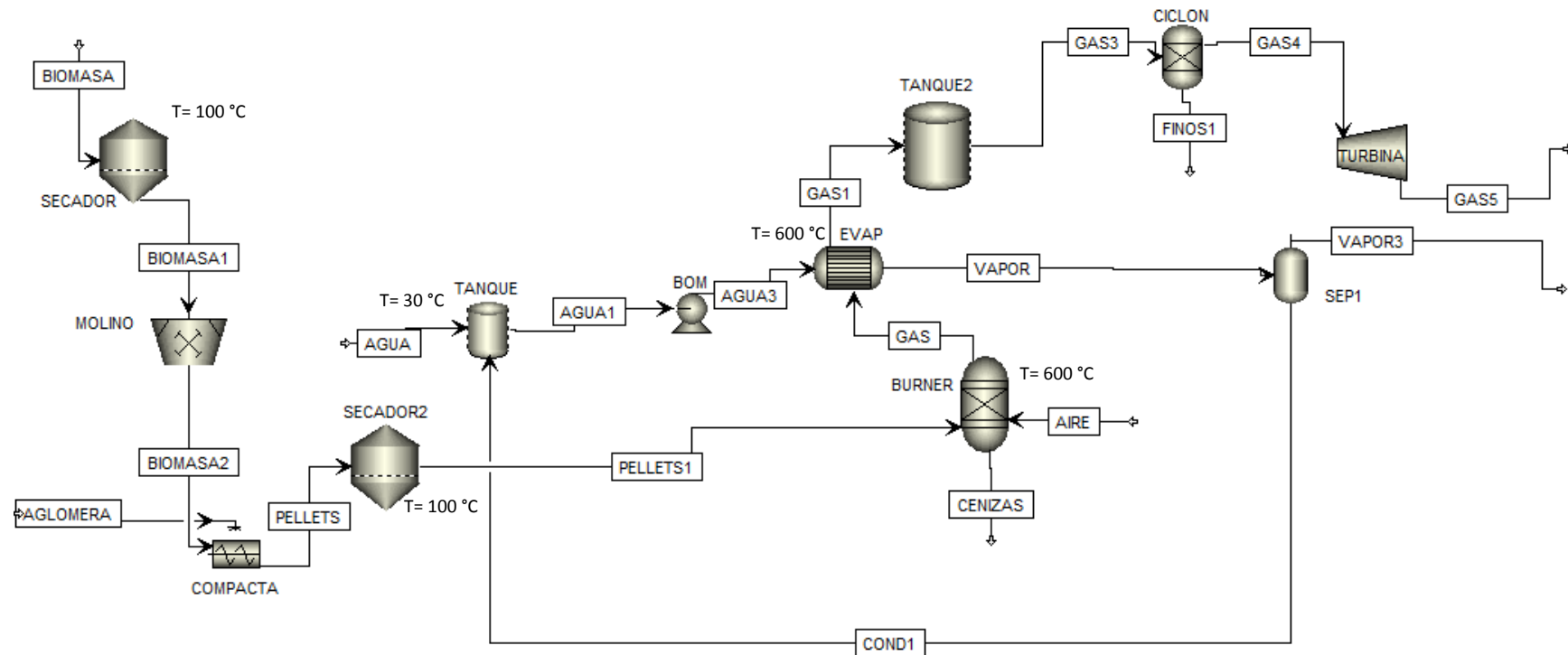


Figura 17. Diagrama del proceso de combustión

- **Descripción de proceso**

Alimentación: Se ingresó el análisis elemental de la biomasa para alimentar el secador y el del aglomerante como flujo de entrada en el compactador declarándolos como componentes en fracciones de celulosa, hemicelulosa y lignina. La corriente de biomasa es de 3 kg/h, además, se definió como biocombustible seco y se especificó la entrada de agua que representa la humedad presente en los mismos. En la Tabla 27 se puede ver las condiciones de operación del proceso.

Tabla 27.

Condiciones de operación en el proceso.

Tanque 1 Agua	Temperatura: 30 °C
	Presión: 1 atm
	Flujo: 1 L/h
Corriente de aire	Temperatura: 30°C
	Presión: 1 atm
Burner (reactor de combustión)	Temperatura: 600 °C
	Presión: 30 psi
	Coeficiente de exceso aire: 1,5

Los resultados de la simulación muestran, que el tamo de arroz y el rastrojo de maíz presentan porcentajes de emisiones de CO y SO₂ muy cercanos y se encuentran dentro de los límites permitidos por el por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de

Colombia, como se puede observar en las Tabla 28 y Tabla 29. Cabe resaltar que se operó todo a las mismas condiciones, siendo el coeficiente de exceso de aire un factor importante para que el proceso de combustión sea casi completo.

Tabla 28.

Resultados simulación tamo de arroz

GAS	ppm
CO	197,0385
SO ₂	5,0942

Tabla 29.

Resultados simulación rastrojo de maíz.

GAS	ppm
CO	193,9583
SO ₂	4,9253

Además, se pudo notar que los biocombustibles con menor porcentaje de humedad generaron mejores resultados en el proceso de combustión, logrando emisiones bajas con respecto a los otros biocombustibles.

6.3.2. Verificación de la simulación: A partir de los resultados de la simulación, se realizó una prueba experimental de las mismas con el fin de verificar la simulación como se observa en la Tabla 30.

Tabla 30.

Pruebas experimentales a partir de datos de la simulación

Biomasa	Prueba	TP (mm)	Exceso de aire (%)	Datos obtenidos mediante analizador de gases					
				Emisión ppm	(min)				
Tamo de arroz	TC3	10	21	CO	0	122	137	192	
				SO ₂	0	3,4	5.8	5,2	
Rastrojo de maíz	MC3	10	21	CO	0	128	138	197	
				SO ₂	0	3,7	6	4.6	

A continuación, la Tabla 31 muestra un cuadro comparativo con los datos obtenidos de la simulación y de la parte experimental a los 60 min.

Tabla 31.

Pruebas experimentales a partir de datos de la simulación

Biomasa	TP (mm)	Exceso de aire (%)	Emisión	Datos	Datos	Desviación estándar (σ)
			ppm	Simulación	experimentales	
Tamo de arroz	10	21	CO	197,0385	192	2.5192
			SO ₂	5,0942	5,2	0.0529
Rastrojo de maíz	10	21	CO	193,9583	197	1.5208
			SO ₂	4,9253	4,6	0.1626

Como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**⁷ los datos de las emisiones en la simulación de la combustión de los dos tipos de biocombustibles son cercanos a los datos de las emisiones encontrados en la experimentación.

6.4 Etapa 4: elaboración de recomendaciones para implementación de tecnología de combustión seleccionada.

6.4.1 Elaboración del informe técnico que presente recomendaciones respecto a la implementación de la tecnología de combustión seleccionada: La presente investigación presenta mediante pruebas experimentales y de simulación la información necesaria para una implementación de la tecnología de lecho fijo, es importante aclarar que estas recomendaciones son propias de la investigación y que su implementación depende del tipo de biomasa:

1. Se debe realizar un análisis químico de cada biomasa individual ya que la composición química depende mucho de los fertilizantes utilizados en la agricultura, calidad de la tierra de cultivo y tiempo de exposición a la luz solar y éstos son variables alrededor del planeta.
2. Se deben fabricar pellets de la biomasa, ya que al ser sometidas a este proceso aumenta su poder calorífico, además, se tiene mayor obtención de energía con menos volumen de pellets (densidad energética), que es una de las mayores ventajas de la peletización.

3. El tamaño de partícula de la biomasa para la fabricación de pellets debe ser alrededor 0.5 mm y una relación 70% biomasa y 30% aglomerante.

4. Se debe hacer una revisión de las necesidades energéticas de la zona donde se va a implementar, realizando el escalamiento a nivel industrial teniendo en cuenta aspectos como el diseño, mejora de la eficiencia energética y las emisiones al medio ambiente.

5. Se debe mantener una relación estequiométrica aire-combustible de alrededor de 1.5.

7 Conclusiones

El diseño experimental y la simulación del proceso de combustión realizados en este estudio permitió concluir que:

Se seleccionó la tecnología de lecho fijo, debido a que esta presenta gran variación de granulometría y tipo de combustible, opera con alto contenido de humedad y con altos excesos de oxígeno y requiere menor inversión.

De acuerdo con los resultados experimentales, los pellets que obtuvieron el mayor valor de poder calorífico superior fueron los elaborados con un tamaño de partícula de 0,5 mm y una relación 80% biomasa y 20% aglomerante.

Del análisis de varianza ANOVA realizado en el software STATGRAPHICS centurión, se concluye que para el proceso de densificación la relación biomasa/aglomerante no es un parámetro influyente en el proceso de combustión para los pellets de tamo de arroz y rastrojo de maíz, mientras que el tamaño de partícula si influye en este proceso.

Los resultados experimentales del proceso de combustión muestran que emisiones generadas durante las diferentes pruebas de combustión se encuentran alrededor de 190 ppm para CO mientras que para el caso de SO₂ se encuentran alrededor de 5 ppm. Se puede inferir que las emisiones de SO₂ son mínimas, aunque no se pueden comparar porque el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia no aplica los estándares de emisión admisibles para SO₂.

Del modelo de regresión lineal múltiple y por medio del estadístico de Durbin-Watson (DW) se concluyó que el modelo indica que el tamaño de pellet no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0% para las emisiones de SO₂, en cambio para las emisiones de CO se evidenció que la relación aire/combustible no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0% , por tal motivo este parámetro influye en menor proporción en el proceso de combustión de pellets de tamo de arroz y rastrojo de maíz con respecto al tamaño de pellet debido a que las emisiones de CO son mayores.

Los resultados de la simulación muestran que el tamo de arroz y el rastrojo de maíz presentan porcentajes de emisiones de CO y SO₂ se concluye que el coeficiente de exceso de aire es un factor importante para que el proceso de combustión sea casi completo.

Peletizar la biomasa permite que esta tenga una mayor vida útil, sea más fácil de almacenar, de transportar; pero, aunque los pellets cumplan con los requisitos de calidad, su comportamiento varía dependiendo de las propiedades fisicoquímicas del mismo.

No es posible obtener una combustión completa, mejorar la eficiencia y disminuir las emisiones del proceso de combustión de biocombustibles de tamo de arroz y rastrojo de maíz, ajustando parámetros como tamaño de partícula, relación aire/combustible.

8 Divulgación de resultados

8.1 Artículo publicado

- "Methodology for the life cycle assessment (lca) in combustion processes where the fuel is pelleted agricultural biomass". Revista: Chemical Engineering Transactions. ISBN 978-88-95608- 56-3; ISSN 2283-9216, ed: V.68, Mayo 2018.

8.2 Capítulo de libro

- Capítulo de libro. PROSPECTIVA ENERGÉTICA COLOMBIA 2050. Ediciones UIS, ISBN: 978-958-8956-38-1 (WEB). p. 187-206. 2019

8.3 Participación en eventos científicos

- Análisis de los factores y variables significativas en el comportamiento de la biomasa sólida en la canasta energética en Colombia hasta el 2050. Ponencia en V CIUREE Congreso Internacional de eficiencia y gestión energética, febrero de 2016.
- Vigilancia de tecnologías en combustión de biomasa en Colombia. Póster en Conferencia Internacional de Energía Sostenible y workshop materiales para nuevas tecnologías de Energía, octubre de 2017.
- Combustión de biomásas de rastrojo de maíz y tamo arroz. Ponencia en VI CIUREE Congreso Internacional de eficiencia y gestión energética, febrero de 2018.

Referencias bibliográficas

- Araujo, M. (2013). Colombia, plataforma para el comercio mundial. *Larepublica*. Retrieved from <https://www.larepublica.co/archivo/colombia-plataforma-para-el-comercio-mundial-2038520>
- Arce, M. E. (2013). *Optimización mediante técnicas de teoría gris de la combustión de biomasa en un drop furnace*. Universidad de Vigo.
- Arenas, D. (2009). *Propuesta de diseño de un proceso para la generación de energía eléctrica a partir de los residuos de la producción de café*.
- Arévalo, M. (2013). *Diseño de una caldera experimental para biomasa sólida*. Universidad Autónoma de Nicaragua, León.
- BUN-CA. (2002). *Manuales sobre energía renovable BIOMASA*.
- Cardozo, E., Erlich, C., Alejo, L., & Fransson, T. H. (2014). Combustion of agricultural residues: An experimental study for small-scale applications. *Fuel*, 115, 778–787. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.054>.
- Carrasco García, J. E. (2008). *Combustión directa de la biomasa a*.
- Carroll, J., & Finnan, J. (2013). Emissions and efficiencies from the combustion of agricultural feedstock pellets using a small scale tilting grate boiler. *Biosystems Engineering*, 115(1), 50–55. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.01.009>

- Comision Nacional de Energia (CNE). (2007). *Proyectos de Biomasa - Guia para Evaluacion Ambiental Energias Renovables No Convencionales*. Retrieved from http://antiguo.cne.cl/cnewww/export/sites/default/05_Public_Estudios/descargas/GuiaBiomasaEIA.pdf
- Díaz, M., Giráldez, R., Armas, D., Rodríguez, R., Villaseñor, E., & Carrillo, H. (2014). Tecnologías constituidas , innovaciones en proceso y tecnologías introducidas en el mercado internacional : caso de estudio 1. *Transinformação*, 26(3), 349–360.
- Escalante, H. ., Orduz Prada, J., Lesmes, Zapata, H., Cardona Ruiz, M. ., & Duarte Ortega, M. (2011). *Atlas del potencial energetico de la biomasa residual en colombia*.
- Fernández, J., Gutierrez, F., González, P. D. R., San Miguel, G., Bahillo, A., Sanchez, J. M., ... Aracil, J. (2015). *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética* (3ra ed.). Madrid. Retrieved from https://books.google.es/books?id=k9ISCgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Forero, C., Guerrero, C., & Sierra, F. (2012). Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica : una revisión a los modelos del proceso de gasificación. *ITECKNE*, 9(1), 21–30.
- Fournel, S., Marcos, B., Godbout, S., & Heitz, M. (2015). Predicting gaseous emissions from small-scale combustion of agricultural biomass fuels. *Bioresource Technology*, 179, 165–172. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.100>
- García, H., Corredor, A., Calderón, L., & Gómez, M. (2013). *Análisis costo beneficio de*

- energías renovables no convencionales en Colombia*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/11445/331>
- García, R., Pizarro, C., Álvarez, A., Lavín, A. G., & Bueno, J. L. (2015). Study of biomass combustion wastes, *148*, 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.01.079>
- Gil, M. V., Oulego, P., Casal, M. D., Pevida, C., Pis, J. J., & Rubiera, F. (2010). Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends. *Bioresource Technology*, *101*(22), 8859-8867,. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.062>
- González, Y., Rincón, S., Camargo, G. de J., Dévora, G., & Fabio Sierra. (2014). Caracterización de Materiales lignocelulósicos residuales de palma de aceite y palma de coco para la fabricación de pellets Characterization of residuals lignocellulosic materials from oil palm and coconut palm for pellets manufacturing. *AVANCES Investigación En Ingeniería*, *11*(1), 83–91. Retrieved from file:///C:/Users/Paola/Downloads/Dialnet- CaracterizacionDeMaterialesLignocelulosicosResidua-6684757.pdf
- Granados, D. A., Velásquez, H. I., & Chejne, F. (2014). Energetic and exergetic evaluation of residual biomass in a torrefaction process. *Energy*, *74*, 181–189. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.046>.
- Hrdlička, J., Skopec, P., Dlouhý, T., & Hrdlička, F. (2016). Emission factors of gaseous pollutants from small scale combustion of biofuels. *FUEL*, *165*, 68–74. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.fuel.2015.09.087>.
- Huaripoma, D. (2015). *DISEÑO DE UN GASIFICADOR DOWNDRAFT INVERTIDO DE*

2600 kcal/h que emplea cascarilla de arroz como combustible. Pontificia universidad católica del Perú.

IDAE. (2007). *Biomasa: Edificios*. Madrid.

Inda, C., & Vargas-Hernández, J. (2012). Ecoeficiencia y competitividad: tendencias y estrategias con metas comunes. *Ingeniería de Recursos Naturales y Del Ambiente*, (11), 33–40. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/2311/231125817004.pdf>

Jang, H., Kim, J., Back, S., Sung, J., Yoo, H., Seok, H., & Seo, Y. (2016). Combustion characteristics of waste sludge at air and oxy-fuel combustion conditions in a circulating fluidized bed reactor. *FUEL*, 170, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.12.033>

Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337–359. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>

Knospe, Burkart, & Walleser. (2004). *Análisis de gases de combustión en la Industria*. (Testo, Ed.) (2da ed.).

Lazo, A. (2018). *Estudio de la producción de pellets a partir de borra de café*. Universidad Nacional de Colombia.

Leal, J. (2005). *Ecoeficiencia: marco de análisis, indicadores y experiencias*. Santiago de Chile. Retrieved from https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/5644/S057520_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Leyssens, G., Trouvé, G., Caplain, I., Schönnenbeck, C., & Cazier, F. (2014). Energetic performances and environmental impact of the combustion of cardboard/sawdust in a domestic boiler. *Fuel*, 122, 21–27. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.fuel.2014.01.034>.
- Martinez, I. (1992). *Termodinámica: Básica y Aplicada*.
- Melissari, B. (2012). Comportamiento de Cenizas y su Impacto en Sistemas de Combustión de Biomasa. In *Biomass Ash Behaviour and its Impact on Combustion Systems* (Vol. 10, pp. 69–82).
- Míguez, C. (2012). *La eficiencia energética en el uso de la biomasa para la generación de energía eléctrica*. Universidad Complutense de Madrid. Retrieved from <http://eprints.ucm.es/17794/1/T34108.pdf>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2008). *DECRETO 948 DE 1995: reglamento de proteccion y control de la calidad del aire*. Retrieved from https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/decretos/54-dec_0948_1995.pdf
- Montes, J. (2008). *Ecoeficiencia: una propuesta de responsabilidad ambiental empresarial para el sector financiero colombiano*. Universidad Nacional de Colombia.
- Moreno, G., Serrano, J. C., & Palacios, J. (2009). Desempeño de la combustión de desechos industriales en un reactor de lecho. *Ingeniería y Universidad*, 13(2), 251–266.
- Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O., & Catalão, J. P. S. (2016). Biomass combustion systems: A review on the physical and chemical properties of the ashes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.053>

- Núñez, D. (2012). Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del meta. *Tecnura*, 16(34), 142–156.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2012.4.a10>
- Pradhan, P., Mahajani, S. M., & Arora, A. (2018). Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology*, 181(August), 215–232.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.021>
- Quintana, S., & Salazar, J. (2017). *Diseño de una minicentral termoeléctrica de 5kw , utilizando la cascarilla de arroz como combustible en el caserío miraflores*. Universidad Señor de Sipán.
- Reyes Montiel, J. L., Perez Bermúdez, R., & Betancourt Mena, J. (2003). La biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética y la reducción de la contaminación ambiental. *Centro Azúcar Academic OneFile*, 2(30).
- Rincón, S., & González, Y. (2014). *Estudio de factibilidad para la fabricación de pellets a partir de material lignocelulósico proveniente de palma de aceite*. Universidad Libre.
- Rodríguez, L. (2016). *Evaluación de la disponibilidad de biomasa residual agrícola y su potencial energético en ZNI de Colombia: caso de estudio*. Universidad Industrial de Santander.
- Saavedra, Á., Arce, M. E., Míguez, J. L., Granada, E., & Cacabelos, A. (2013). Biomass Fuel and Combustion Conditions Selection in a Fixed Bed Combustor. *Energies*, 6, 5973–5989. <https://doi.org/10.3390/en6115973>
- Serrano, J. C., & Carranza, Y. (2005). Análisis teórico de la combustión en quemadores de

- gas natural. *Scientia et Technica Año XI*, (29), 139–143.
- Tarelho, L. A. C., Teixeira, E. R., Silva, D. F. R., Modolo, R. C. E., Labrincha, J. A., & Rocha, F. (2015). Characteristics of distinct ash flows in a biomass thermal power plant with bubbling fluidised bed combustor. *Energy*, 90, 387–402. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.036>.
- Tipanluisa, L., Moreno, G., Guasumba, J., Celi, S., Molina, J., Sek, U. I., & Sek, U. I. (2015). Estudio experimental de la combustión de la cascarilla de arroz en una cámara de lecho fijo, 37–43.
- Toscano, L. (2009). *Análisis de los parámetros y Selección de hornos para la combustión de Biomasa*. Escuela superior politecnica del Litoral.
- Valverde, A., Sarria, B., & Monteagudo, J. (2007). Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz. *Scientia et Technica Año XIII*, (37).
- Velasco, J. (2015). *Caracterización y simulación del lecho de una caldera de biomasa en contracorriente*. Universidad de Valladolid.
- Villeneuve, J., Palacios, J. H., Savoie, P., & Godbout, S. (2012). A critical review of emission standards and regulations regarding biomass combustion in small scale units (<3MW),. *Bioresource Technology*, 111, 1–11. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.061>.
- Wielgosinski, G., Lechtanska, P., & Namiecinska, O. (2017). Emission of some pollutants from biomass combustion in comparison to hard coal combustion. *Journal of the Energy Institute*, 90(5), 787–796. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.06.005>

- Wongsiriamnuay, T., & Tippayawong, N. (2015). ScienceDirect Effect of densification parameters on the properties of maize residue pellets. *Biosystems Engineering*, 139, 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.08.009>
- Yank, A., Ngadi, M., & Kok, R. (2016). Biomass and Bioenergy Physical properties of rice husk and bran briquettes under low pressure densification for rural applications. *Biomass and Bioenergy*, 84, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.09.015>
- Zhang, Z., He, F., Zhang, Y., Li, X., & Gao, Z. (2018). Simulation of combustion process of a single biomass pellet based on heterogeneous-dimension discretization. *Journal of the Energy Institute*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.03.009>

Apéndices

Apéndice A: Poder calorífico de los biocombustibles de tamo de arroz y rastrojo de maíz.

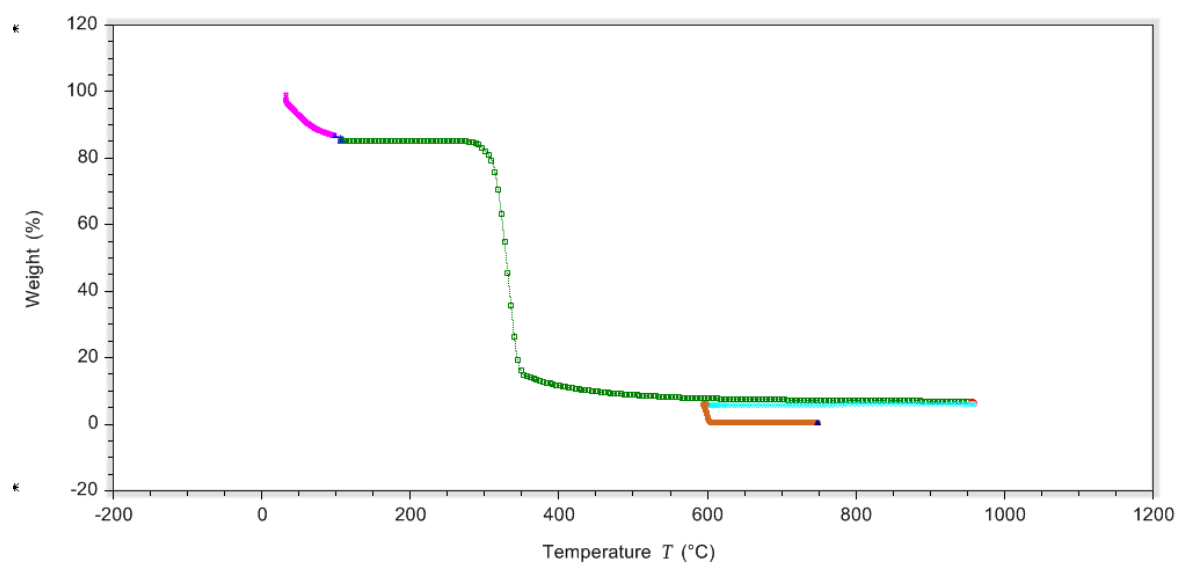
Tabla 32.

Poder calorífico de los biocombustibles de tamo de arroz y rastrojo de maíz.

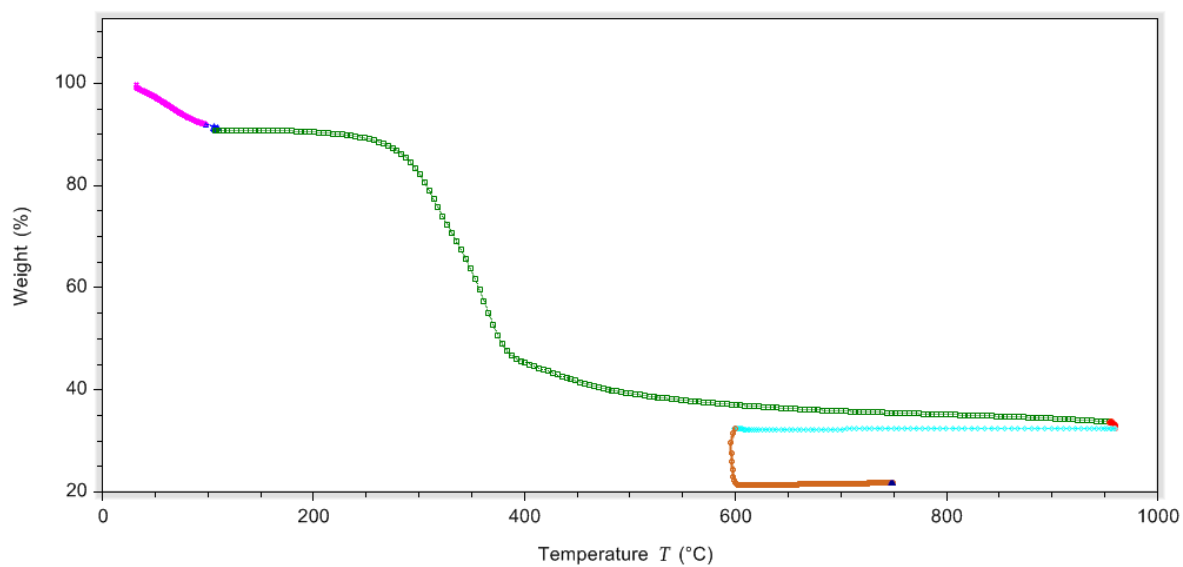
BIOMASA	Pruebas	PODER CALORIFICO DE LOS PELLETS (kJ/kg)			VALOR PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTANDAR
		PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3		
Tamo de arroz	T1	16140,280	16177,998	16158,001	16158,760	18,870
	T2	14398,118	14044,527	14222,002	14221,549	176,796
	T3	15154,612	15181,748	15167,551	15167,970	13,573
	T4	16409,642	16140,280	16273,991	16274,638	134,682
	T5	14168,943	14185,499	14177,101	14177,181	8,278
	T6	13736,992	13974,217	13855,605	13855,605	118,612
	T7	15870,343	15814,517	15872,870	15852,577	32,985
	T8	14229,021	14162,001	14195,564	14195,528	33,510
Rastrojo de maíz	M1	17571,743	17443,536	17568,639	17527,973	73,141
	M2	17571,743	17443,536	17568,639	17527,973	73,141
	M3	17335,800	17788,650	17562,225	17562,225	226,425
	M4	17610,447	17876,497	17742,472	17743,138	133,026
	M5	16551,098	16524,674	16537,886	16537,886	13,212
	M6	16386,784	16369,213	16378,008	16378,002	8,785
	M7	17517,924	17353,983	17436,005	17435,971	81,971
	M8	16331,121	16892,665	16611,893	16611,893	280,772

Apéndice B: Análisis termogravimétrico (TGA)

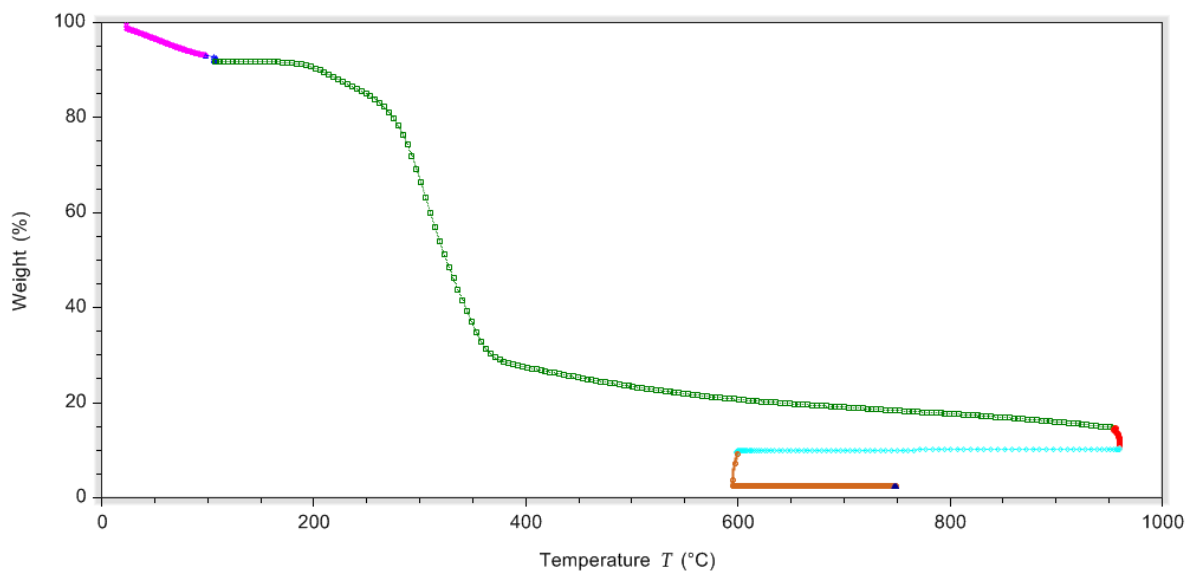
- Análisis termogravimétrico (TGA) del aglutinante



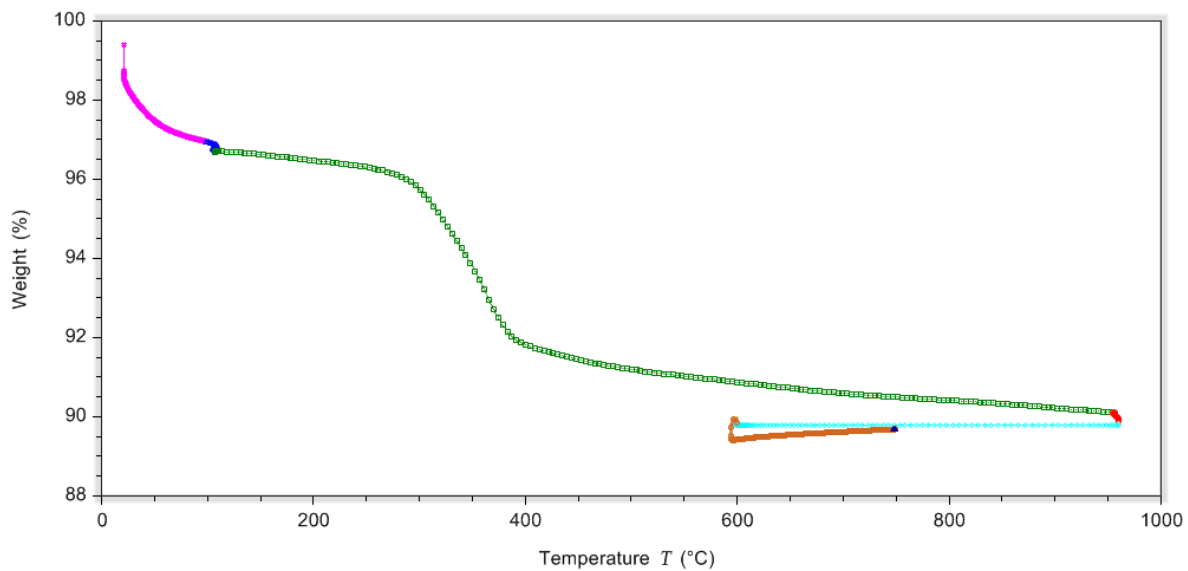
- Análisis termogravimétrico (TGA) del tamo de arroz



- Análisis termogravimétrico (TGA) del rastrojo de maíz



- Análisis termogravimétrico (TGA) de la ceniza



Apéndice C: Características propias de funcionamiento del equipo de combustión

A continuación, se presentan las recomendaciones que se deben tener en cuenta al momento de manipular la cámara de combustión:

1. Revise el nivel del tanque de alimentación/depósito de la caldera (manguera de color celeste, (ver Figura 18), el visor debe estar ligeramente lleno o como mínimo hasta el 50%. En caso de requerir drenar el depósito, abra la válvula inferior de purga de agua.

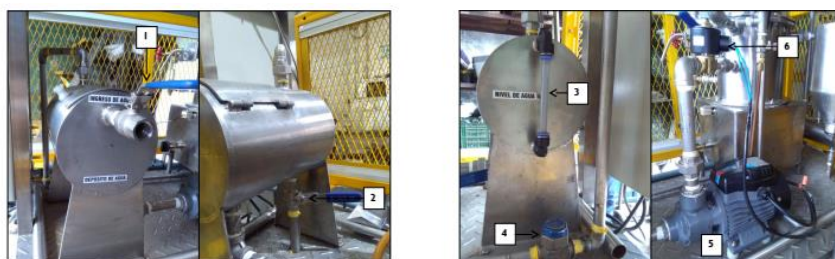


Figura 18. Componentes del Tanque de almacenamiento de agua (TQA)

2. Asegúrese de tener disponibilidad de energía eléctrica, aproximadamente 5 Amp, a 110 V.

3. Si no se alcanza el nivel mínimo de agua dentro de la caldera, la caldera no arrancará y mantendrá encendido el bombillo azul del tablero indicando bajo nivel de agua.

4. Verifique que los medidores de presión estén a 0 psi, caso contrario abra las válvulas de purga y/o de salida de vapor de las unidades. Hágalo de forma lenta y controlada.

5. Antes de comenzar a alimentar el agua a la cámara de vapor, asegúrese que las válvulas del visor de nivel manual estén abiertas (Válvulas de color rojo, **ver** Figura 19).

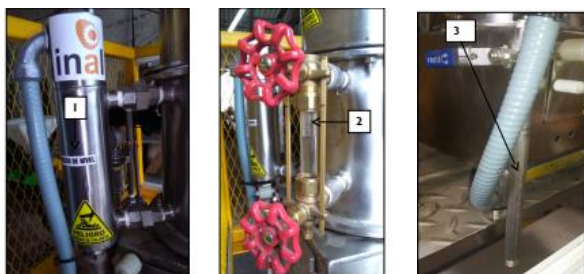


Figura 19. (1) Sensor eléctrico, (2) Visor manual de nivel de agua dentro de la cámara de vapor de agua y (3) Salida de purga de agua del sensor de nivel eléctrico.

6. Coloque en posición automático los switches tanto de la bomba de alimentación de agua como el del ventilador/succionador de la turbina que están en el tablero de control eléctrico, ver Figura 20.



Figura 20. TE con: (1) Accionamiento manual o automático de la motobomba y la turbina, (2) Indicadores y control de Temperatura de llama y Temperatura de vapor de agua.

7. El piloto del ventilador, de color naranja, se apaga al alcanzar la presión de vapor indicada en el presostato o al alcanzar la temperatura límite del vapor determinada como “set point” en el indicador digital para la cámara de vapor del tablero eléctrico.