

VALORACIÓN ENERGÉTICA DE BIO-ACEITE (BIO-OIL) PRODUCTO DE LA
GASIFICACIÓN DE TUSA DE MAÍZ RECUPERADO POR VÍA HÚMEDA

JULIO DANIEL CHAVERRA HERRERA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL MONTERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA - CÓRDOBA

2020

VALORACIÓN ENERGÉTICA DE BIO-ACEITE (BIO-OIL) PRODUCTO DE LA
GASIFICACIÓN DE TUSA DE MAÍZ RECUPERADO POR VÍA HÚMEDA

JULIO DANIEL CHAVERRA HERRERA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

ASESOR

PHD. DIEGO ALEJANDRO CAMARGO TRILLOS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL MONTERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA - CÓRDOBA

2020

21 de junio de 2021

Julio Daniel Chaverra Herrera

“Declaro que este trabajo de grado no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o en cualquiera otra universidad”.
Art. 92, párrafo, Régimen Estudiantil de Formación Avanzada.

Firma del autor (es)

Julio Chaverra

Dedicatorias

El presente trabajo de investigación se lo dedico principalmente a Dios por permitir que llegara hasta este punto, por darme fuerzas y anhelos de cumplir un sueño más y hasta ahora el más importante.

A Dina Herrera Tordecilla, mi madre, por todo el amor, cuidado y sacrificio por mí y mis hermanos, gracias a ella he logrado llegar hasta donde estoy y soy lo que soy. A mi padre Eliecer Chaverra que me acompaña y me mira desde el cielo, sin duda alguna Dios me dio a los mejores padres y es un orgullo poder resaltar eso.

A mis hermanos Eliecer y Diana Chaverra por siempre brindarme su apoyo y cariño en cada etapa de mi vida y a todas las personas que en algún momento contribuyeron para llegar hasta donde estoy hoy.

JULIO DANIEL CHAVERRA HERRERA

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a Dios por tantas bendiciones y por guiar cada paso tomado. A la facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería por brindar todos los implementos para poder realizar este trabajo y al área de bienestar universitario por la atención prestada en la estancia en la universidad.

A PhD. Diego Alejandro Camargo Trillos por creer en mí, por su ayuda y dirección este trabajo concluyó de manera satisfactoria, a los ingenieros MSc. Rafael David Gómez Vásquez, MSc. Javier Ricardo Sánchez Castillo, David Mauricio Sáenz, David de Jesús Restán, a mis compañeros Germán Acosta, Neider Atencia, Juan Sebastián Pianeta, Ezequiel Llanos y a todos los amigos que contribuyeron en este trabajo les agradezco el grano de arena que colocaron en este trayecto.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	14
2.	MARCO CONCEPTUAL	16
3.	ESTADO DEL ARTE	17
3.1.	Separación de productos líquidos	17
3.2.	Purificación del bio-aceite	17
3.3.	Bio-aceite con etanol	17
3.4.	Combustión de bio-aceite	18
3.5.	Funcionamiento básico del microgasificador	18
4.	OBJETIVOS	20
4.1.	General.....	20
4.2.	Específicos.....	20
5.	METODOLOGÍA	21
5.1.	Origen del bio-aceite	21
5.2.	Sistemas de recuperación de bio-aceite	22
5.3.	Caracterización teórica del bio-aceite.....	24
5.4.	Caracterización experimental del bio-aceite.....	26
5.4.2.	Análisis de Densidad.....	28
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
6.1.	Recuperación del bio-aceite vía húmeda	29
6.2.	Caracterización teórica del bio-aceite.....	30
6.3.	Caracterización experimental del bio-aceite.....	38
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	41

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. PORCENTAJES DE LOS PRODUCTOS DE LA TRANSFORMACIÓN TERMOQUÍMICA DE LA BIOMASA TUSA DE MAÍZ.	15
FIGURA 2. MICROGASIFICADOR DE LECHO FIJO TIPO DOWNDRAFT.	19
FIGURA 3. REACTOR DE GASIFICACIÓN TIPO DOWNDRAFT.....	21
FIGURA 4. MICROGASIFICADOR TIPO DOWNDRAFT.....	21
FIGURA 5. DECANTADORES.....	23
FIGURA 6. SISTEMA DE RECUPERACIÓN VÍA HÚMEDA.....	23
FIGURA 8. ABASTECIMIENTO DE NITRÓGENO LÍQUIDO.....	27
FIGURA 9. BALANZA DE PRECISIÓN.....	28
FIGURA 10. DECANTADORES.....	29
FIGURA 11. GASIFICADOR TIPO DOWNDRAFT (A) Y SISTEMA DE RECUPERACIÓN VÍA HÚMEDA (B).	30
FIGURA 12. GRÁFICO COMPARATIVO DEL HHV DEL BIO-ACEITE POR CONDENSACIÓN DIRECTA.	34
FIGURA 13. GRÁFICO COMPARATIVO DEL HHV DEL BIO-ACEITE POR DECANTADO DEL SISTEMA DE LAVADO.	38
FIGURA 14. MONTAJE PARA SEPARACIÓN.....	39
FIGURA 15. MUESTRAS DE BIO-ACEITE SEPARADO.....	40

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. CONDICIONES OPERACIONALES DEL MICROGASIFICADOR.	22
TABLA 2. COMPUESTOS DEL BIO-ACEITE.	24
TABLA 3. DATOS DE FÓRMULA, PESO MOLECULAR Y FRACCIÓN MOLAR.	30
TABLA 4. CÁLCULOS DE TEMPERATURA DE EBULLICIÓN, CAMBIO DE ENTALPIA DE VAPORIZACIÓN DEL BIO-ACEITE POR CONDENSACIÓN DIRECTA Y CARGA TÉRMICA DEL BIO-ACEITE POR CONDENSACIÓN DIRECTA.....	31
TABLA 5. CÁLCULOS DE COMPOSICIÓN PONDERADA DEL BIO-ACEITE POR CONDENSACIÓN DIRECTA.	32
TABLA 6. CÁLCULOS DE FRACCIÓN MOLAR Y FRACCIÓN MÁSCICA DEL BIO- ACEITE POR CONDENSACIÓN DIRECTA	33
TABLA 7. DATOS DE FÓRMULA, PESO MOLECULAR Y FRACCIÓN MOLAR.	34
TABLA 8. CÁLCULOS DE TEMPERATURA DE EBULLICIÓN, CAMBIO DE ENTALPIA DE VAPORIZACIÓN DEL BIO-ACEITE POR CONDENSACIÓN DIRECTA Y CARGA TÉRMICA DEL BIO-ACEITE POR DECANTADO DEL SISTEMA DE LAVADO.....	35
TABLA 9. CÁLCULOS DE COMPOSICIÓN PONDERADA DEL BIO-ACEITE POR DECANTADO DEL SISTEMA DE LAVADO.	37
TABLA 10. CÁLCULOS DE FRACCIÓN MOLAR Y FRACCIÓN MÁSCICA DEL BIO- ACEITE POR DECANTADO DEL SISTEMA DE LAVADO	37

TABLA 11. FRACCIÓN PESO A PESO DE LAS FRACCIONES DE BIO-ACEITE SEPARADO POR DESTILACIÓN.....	39
TABLA 12. DATOS PARA HALLAR LA DENSIDAD.....	40
TABLA 13. DATOS DE DENSIDAD.....	40

LISTA DE FORMULAS

- (1) $PM = C * 12.0107 + H * 1.00784 + O * 15.999 + N * 14.0067 + S * 32.065 \dots 25$
- (2) $Moles = \frac{\left(\frac{1 * \%peso}{100}\right)}{PM} \dots 25$
- (3) $Fraccion\ molar = \frac{Moles}{\sum Moles} \dots 25$
- (4) $Carga\ termica = \frac{\%peso * \Delta h\ vap}{100} \dots 25$
- (5) $Correccion\ composicion = \#atomos * fraccion\ molar \dots 25$
- (6) $Masa = (\sum\ correccion\ composicion) * masa\ atomica \dots 26$
- (7) $Fraccion\ msica\ (i) = \frac{Masa}{\sum Masa} \dots 26$
- (8) $HHV = (0.349C_i + 1.1783H_i - 0.1034O_i - 0.0151N_i) * 100 \dots 26$

Resumen

En este trabajo se evaluó la recuperación y valoración energética del bio-aceite producto de la gasificación de tusa de maíz en un reactor tipo downdraft de lecho fijo, obtenido por sistemas de lavado con agua (vía húmeda) en el laboratorio de energías renovables de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería. A este subproducto se le caracterizó las propiedades físicas y químicas a partir de una composición química teórica, se correlacionan propiedades como composición química elemental, poder calorífico superior y las fracciones que tiene este bio-aceite para su valoración energética. Primero se llevó a cabo el diseño del sistema de recuperación del bio-aceite mediante decantadores y un sistema de destilación para separarlo. Se valoró la distribución de compuestos orgánicos del bio-aceite en función de ligero, medio y pesado, para temperaturas de destilación 115°C y 215°C. El cálculo de la composición química elemental CHON y el poder calorífico se realizó para dos puntos de operación: Por decantado del sistema de lavado y condensación directa, obteniendo C41.0540%, H5.8588%, O35.6199%; N0%, con HHV de 21.2621 MJ/kg y C76.0071%, H 8.4019%, O47.6356%, N0% con HHV 23.8563 MJ/kg respectivamente.

Abstrac

In this work was evaluated the recovery and energetic valuation of the bio-oil product of the gasification of corncob in a fixed-bed downdraft reactor, obtained by washing systems with water (wet route) in the renewable energy laboratory of the Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería. The physical and chemical properties of this by-product were characterized from a theoretical chemical composition, properties such as elemental chemical composition, higher calorific value, and the fractions that this bio-oil has for its energy evaluation are correlated. First, the design of the bio-oil recovery system was carried out using decanters and a distillation system to separate it. The distribution of organic compounds of the bio-oil was evaluated as light, medium and heavy for distilled temperature of 115°C y 215°C. The calculation of the elemental chemical composition CHON and the calorific power was carried out for two operating points: By decanting the washing system and direct condensation, obtaining C41.0540%, H5.8588%, O35.6199%; N0%, with HHV of 21.2621 MJ/kg and C76.0071%, H 8.4019%, O47.6356%, N0% with HHV 23.8563 MJ/kg respectively.

1. Introducción

La biomasa en Colombia es un campo relativamente nuevo, no fue hasta el 2012 cuando se empezó a ver un ligero aumento, cerca del 8%, en la generación de energía a partir de biomasa, esto gracias a pequeñas plantas usadas generalmente en zonas rurales donde hay difícil acceso al fluido eléctrico (Semana S, 2017). Para el 2016 se generaron aproximadamente 65900 GWh de energía eléctrica donde aproximadamente 590 GWh fueron producidos a partir de la biomasa, lo cual equivale solo al 0.9% del total de la energía eléctrica producida nacionalmente (Cleanenergybrief, 2018).

Cerca de 2.261.839 de toneladas al año de biomasa residual son producidas en el departamento de Córdoba (Ministerio de agricultura & FNCE, 2010), la gran mayoría de estos desechos simplemente son descartados, por lo cual el departamento tiene un gran potencial energético en cuanto a biomasa se refiere, teniendo en cuenta todos los datos anteriores se tiene que en el laboratorio de energías renovables de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería se vienen desarrollando investigaciones referentes a la optimización y producción de energía a partir de la biomasa.

La biomasa con el gran auge de fuentes de energía renovables ha venido tomando un gran papel a partir de su procesamiento para la generación de energía (Semana S, 2017), en Colombia según el Ministerio de Minas y Energía se producen aproximadamente 71.943.162 de toneladas al año de biomasa residual donde 492.738 toneladas son de cascarilla de arroz y 369.505 toneladas son de tusa de maíz (Ministerio de agricultura & FNCE, 2010), la biomasa mediante procesos termoquímicos se transforma en biocombustibles, entre estos procesos están la gasificación y la pirólisis de biomasa donde principalmente se producen tres grandes elementos como son gases (syngas), líquidos (bio-oil) y carbón (biochar) el rendimiento obtenido por cada uno de éstos son aproximadamente en la pirólisis de 47.3% bio-oil, 28.7% syngas, 24% bio-char en y en la gasificación 20% bio-oil, 70% syngas, 10% bio-char (Bridgwater, 2003) estos porcentajes se muestran en la Figura 1.

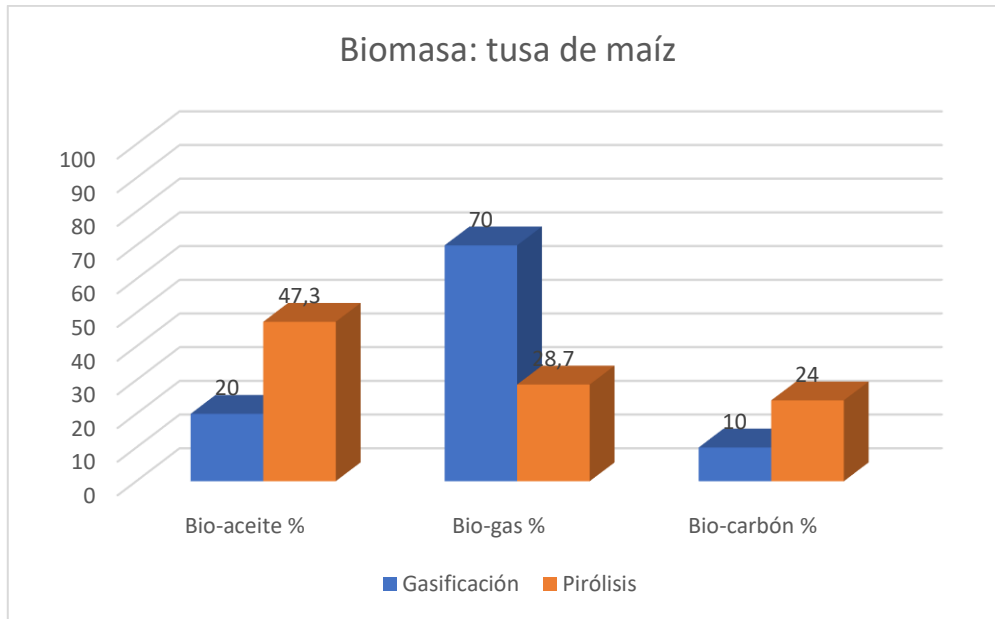


Figura 1. Porcentajes de los productos de la transformación termoquímica de la biomasa tusa de maíz.

Fuente: (Bridgwater, 2003).

El bio-aceite resultante de biomasa lignocelulósica como la tusa de maíz a partir de procesos termoquímicos como la gasificación y la pirólisis tiene propiedades de combustible líquido y abre una gran oportunidad de almacenarlo y usarlo para generación de energía y ser un sustituto potencial del combustible fósil siempre y cuando el sector de la energía pueda adaptarse a las propiedades especiales que tiene este bio-aceite (Buffi, Cappelletti, Rizzo, Martelli, & Chiaramonti, 2018), ofrece un HHV de hasta 24MJ/kg (Channiwala & Parikh, 2002). Permitiendo su implementación para la generación de energía térmica en procesos industriales, sustituyendo a los combustibles tradicionales.

Actualmente el laboratorio cuenta con una de las mejores infraestructuras en cuanto a energías renovables del departamento de Córdoba (Optimización de Procesos y Uso Racional de la Energía y Biomasa 2009), donde se aprovecha y produce energía a partir de la biomasa y energía solar, con el acompañamiento y supervisión de ingenieros altamente capacitados que lideran distintos proyectos en este laboratorio acompañados del grupo OPUREB, se brinda un espacio perfecto para impulsar el desarrollo del sector de las energías renovables.

El objetivo principal en este trabajo es evaluar el proceso de recuperación de bio-aceite producto de la gasificación y pirolisis de tusa de maíz, condensado vía húmeda por lavado del gas en scrubber, para su posterior caracterización de la composición CHONS y valoración energética HHV.

2. Marco conceptual

Procesos termoquímicos para la transformación de biomasa: son aquellos procesos que con ayuda del calor para romper enlaces covalentes presentes en las moléculas de la biomasa y se tienen algunos procesos como la combustión, la pirolisis y la gasificación. (Endesa Fundación, 2013).

Combustión: se da cuando se lleva la biomasa a una temperatura entre 600 y 1300°C alimentada con mucho aire, como resultado se tiene la forma más básica de liberar energía de la biomasa. (Endesa Fundación, 2013).

Pirolisis: no es más que la descomposición de la biomasa a una temperatura aproximada de 500°C sin la presencia de oxígeno, como resultado se obtienen combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. (Endesa Fundación, 2013).

Gasificación: es un proceso termoquímico que se da cuando hay combustión y se producen CO, CO₂, H₂ y CH₄, las temperaturas oscilan entre 700 y 1500°C y la calidad de este proceso dependerá del lujo de aire (oxígeno). (Endesa Fundación, 2013).

Poder calorífico: se refiere a la cantidad de energía máxima generada por unidad de masa después de una reacción de combustión. (AIE, 2013)

Poder calorífico inferior: se refiere a la energía medida por unidad de masa resultante de la combustión que desaprovecha el calor derivado de la condensación de agua. (AIE, 2013)

Poder calorífico superior: Es la energía medida por unidad de masa resultante de la combustión que aprovecha el calor derivado de la condensación del agua. (AIE, 2013)

3. Estado del arte

3.1. Separación de productos líquidos

Para la separación de productos líquidos se tiene que, el líquido condensado producido a partir de la pirólisis del aceite de colza está constituido por varias capas. En la capa superior está un líquido de densidad más baja que se denomina OLP (organic liquid product), en la capa más densa esta un líquido acuoso. Estas capas fueron separados por el método de decantación durante un lapso de 24h. También el OLP se separó por medio de destilación dependiendo su punto de ebullición. El producto de la destilación por debajo de aproximadamente 215°C se considera LBO (light bio-oil), mientras que el producto restante es considerado HBO (heavy bio-oil). Estos productos se disolvieron en diclorometano y se sometieron a análisis GC-MS. (Omar & Robinson, 2014)

3.2. Purificación del bio-aceite

Para la purificación del bio-aceite, el autor (Stamatov, Honnery, & Soria, 2006) sometió el bio-aceite a un proceso de filtrado, para ello se empleó un filtro de vidrio sinterizado, con una porosidad número 3, para una buena purificación. Esto se hace con el fin de eliminar el exceso de humedad, que se conoce como licor pirolígnico. Para eliminar el exceso de humedad se procedió a calentar el bio-aceite con un baño en este caso de agua a 70-80°C en vacío. Con un baño a una temperatura más alta se obtiene un bio-aceite con menos contenido de agua y purificado. Este estudio recomienda tener en cuenta que las propiedades físicas y la composición química cambia ligeramente. En esta investigación reportaron que otros autores encontraron que su bio-aceite cambió debido a este tratamiento pasando su viscosidad a aumentar 26.7% debido a este tratamiento. Luego de purificar el bio-aceite se tomaron las muestras y se diluyeron en etanol. (Stamatov, Honnery, & Soria, 2006)

3.3. Bio-aceite con etanol

Bio-aceite/etanol en la atomización, cierto tipo de boquillas de la serie SU dan una excelente atomización en forma de cono para una mezcla 40:60 de etanol y bio-aceite. Luego sigue la formación de una corriente de líquido bastante fina a la salida de la boquilla, el combustible líquido sale a través de un pequeño orificio ubicado en la mitad de la punta de la boquilla. El aire para la atomización sale de la boquilla de forma

concéntrica al líquido para ser totalmente mezclado, envolviendo al líquido. El cizallamiento de la corriente líquida por aire de atomización da como resultado la formación de láminas líquidas que se desintegran capas y luego en gotas diminutas. (Lujaji, Boateng, Schaffer, Mtui, & Mkilaha, 2016)

3.4. Combustión de bio-aceite

Más información sobre la combustión del bio-aceite, el bio-aceite que se produce a partir de la pirólisis y la licuefacción hidrotermal (HTL) no se puede usar como combustible para transportar ya que presenta mayor contenido de: humedad, oxígeno y viscosidad, además tiene un menor contenido de carbono y un bajo poder calorífico. A pesar de esto se puede emplear como producto principal en la elaboración de productos (combustibles) fósiles. El bio-aceite tiene un porcentaje de agua que está entre 15 y 30% en peso que en su mayoría proviene de la biomasa original, también de un proceso de deshidratación que sucede en la licuefacción hidrotermal y por su almacenamiento. El contenido de agua reduce considerablemente la calidad de la combustión y el poder calorífico. A su vez, disminuye la viscosidad del bio-aceite, esto es bueno en el proceso de atomización y combustión del bio-aceite en el motor. (Baloch et al., 2018).

3.5. Funcionamiento básico del microgasificador

Este equipo tiene un reactor que no es más que una cámara de combustión, dónde se introduce la biomasa y cuenta con 6 tubos para alimentar de aire al reactor, en la parte inferior hay una malla con su respectiva granulometría para el paso del biochar, el gas producido viaja por las tuberías hasta el intercambiador dónde se enfría el syngas y se condensa el bio-aceite gracias al agua que es movida por la electrobomba, a su vez esta hace que el syngas viaje al tanque debido a una caída de presión, dónde se sigue enfriando y se termina de condensar el bio-aceite. Finalmente, el gas se lleva desde la parte superior del tanque por tuberías para hacer pruebas cromatográficas (Restán. D, 2019) véase en la Figura 2.

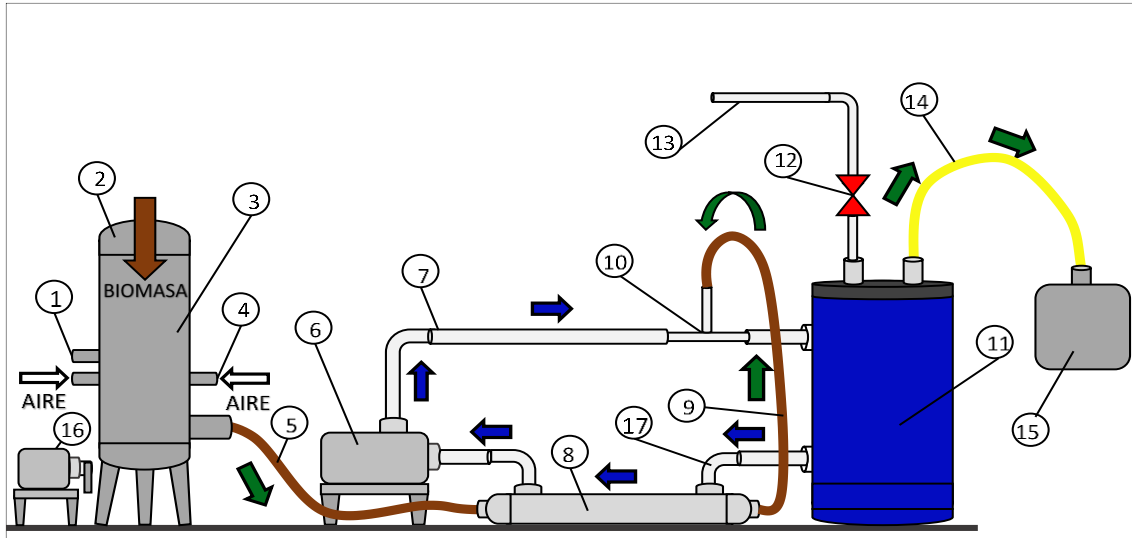


Figura 2. Microgasificador de lecho fijo tipo downdraft.

Fuente: (Restán. D, 2019). (1) orificio para termocupla; (2) tapa reactor; (3) reactor; (4) entradas de aire; (5) y (9) tubería de transporte de syngas; (6) electrobomba; (7) y (17) tubería transporte de agua; (8) intercambiador de calor; (10) tubo venturi(11); depósito de agua; (12) flujómetro; (13) salida del syngas; (14) tubería de gas; (15) cromatógrafo; (16) motor agitador.

4. Objetivos

4.1. General

- Valorar la energía disponible del bio-aceite producto de la gasificación de tusa de maíz recuperado vía húmeda.

4.2. Específicos

- Construir un sistema de recuperación de bio-aceite vía decantación.
- Caracterizar física y químicamente el bio-aceite recuperado de sistemas de lavado de syngas (porcentaje de agua, fracción de bio-aceite, composición elemental y densidad).

5. Metodología

5.1. Origen del bio-aceite

Esta investigación inicia con la obtención de un bio-aceite bruto que tiene una parte soluble y que está inmerso en agua, este bio-aceite proviene de un proceso de transformación termoquímica en este caso la gasificación en un gasificador de biomasa tipo downdraft como lo muestra la Figura 3.

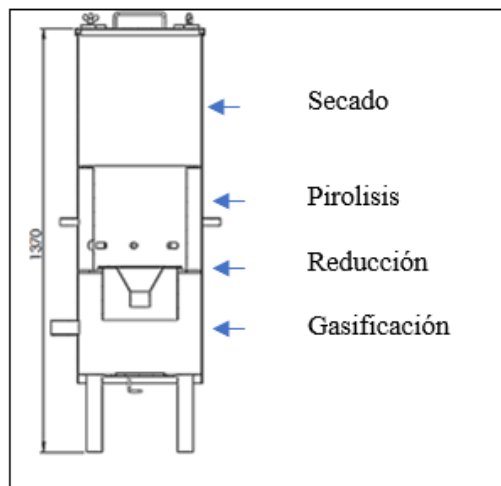


Figura 3. Reactor de gasificación tipo downdraft.

Fuente: elaboración propia.

la biomasa utilizada fue la tusa de maíz, que es un residuo de la agricultura del departamento de Córdoba, esta biomasa es previamente secada para luego ser usada en el gasificador que se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Microgasificador tipo downdraft.

Fuente: elaboración propia.

Para el proceso de gasificación el equipo debe trabajar a unas condiciones operacionales específicas las cuales se muestran en la Tabla 1 y fueron tomados mediante pruebas experimentales en laboratorio con el equipo.

Tabla 1. Condiciones operacionales del microgasificador.

Variables/Prueba	Base
Flujo Aire (Kg/h)	3,85
Flujo de Syngas (Kg/h)	4,77
Flujo Biomasa (Kg/h)	1,24
ER	0,62

Fuente: (Restán. D, 2019).

5.2. Sistemas de recuperación de bio-aceite

Se empleó un sistema sencillo de decantación usado para una separación macro, que por la acción de la gravedad sobre los líquidos de diferentes densidades envía a los de mayor densidad abajo en este caso el agua (Raffino, 2018). Se usaron dos decantadores el primero fabricado en PVC y el segundo una “jirafa” comúnmente usada para el dispendio de cerveza como se ve en la Figura 5.

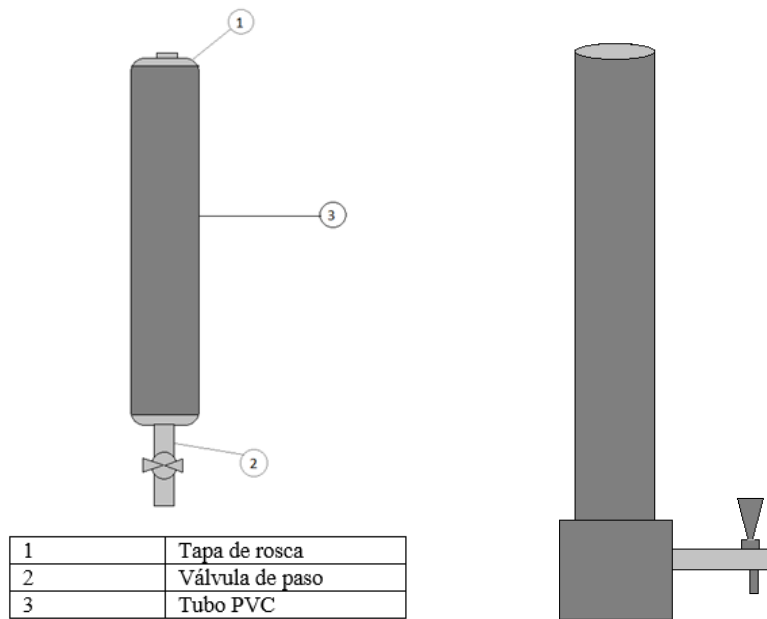


Figura 5. Decantadores.

Fuente: elaboración propia.

En la recuperación de bio-aceite se tiene que en nuestro sistema (Figura 6) el aceite siempre quedará en la parte superior tanto del depósito como del decantador, dónde se acciona una pequeña llave y se hace bajar el nivel de agua permitiendo acumular una columna de aceite.

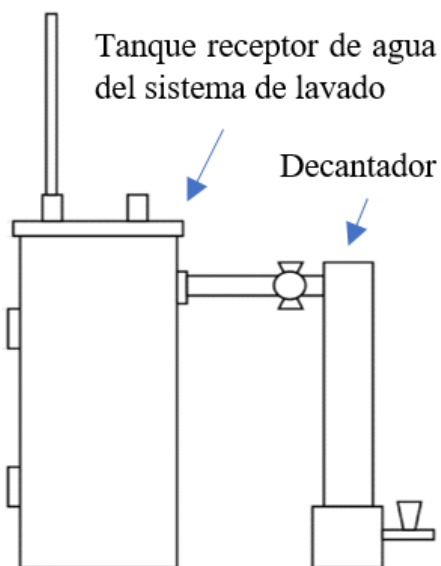


Figura 6. Sistema de recuperación vía húmeda.

Fuente: elaboración propia.

5.3. Caracterización teórica del bio-aceite

Para esta caracterización se parte de una lista de compuestos plenamente identificados y caracterizados de bio-aceite de tusa de maíz provenientes del artículo “Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis” (Mullen et al., 2010) que se muestran en la Tabla 2.

Esta tabla cuenta con condiciones similares a la del bio-aceite obtenido en el equipo de gasificación, como lo son la biomasa utilizada que es la tusa de maíz, y el proceso de transformación termoquímica en este caso la pirolisis rápida.

Tabla 2. Compuestos del bio-aceite.

	Método	Componente	(wt% de bio-aceite)
Componentes derivados Celulosa/Hemicelulosa			
1	HPLC	Levoglucosan (1)	5.31
2	HPLC	Hydroxyacetaldehyde (2)	1.44
3	HPLC	Acetic acid (3)	6.43
4	HPLC	Acetol (4)	10.14
5	GC	Furfural (5)	1.2
6	GC	Furfuryl alcohol (6)	0.3
7	GC	3-Methyl-2-cyclopenten-1-one (7)	0.38
8	GC	4-Hydroxy-4-methyl-2-pentanone (8)	0.12
Componentes derivados Lignina			
9	GC	Phenol (9)	0.79
10	GC	o-Cresol (10)	0.17
11	GC	p-Cresol (11)	0.19
12	GC	m-Cresol (12)	0.17
13	GC	2,4-Dimethyl phenol (13)	0.05
14	GC	3,5-Dimethylphenol (14)	0.02

15	GC	4-Ethyl phenol (15)	0.54
16	GC	3-Ethylphenol (16)	0.02
17	GC	2-Ethylphenol (17)	0.01
18	GC	Guaiacol (18)	0.61
19	GC	2-Methoxy-4-methyl phenol (19)	0.31
20	GC	Isoeugenol (20)	0.28
21	GC	2,6-Dimethoxyphenol (21)	0.63

Fuente: (Mullen et al., 2010).

Para estos compuestos se hallaron la fórmula química, la temperatura de ebullición (K) y el cambio de entalpia de vaporización (kJ/mol) (NIST Office of Data and Informatics). Lo siguiente fue calcular, primeramente, la composición de cada compuesto (CHONS en función del número de átomos) clasificándolos por elemento, el peso molecular de cada compuesto, la fracción molar y la carga térmica (kJ/kg) de condensación con las fórmulas (1), (2), (3) y (4).

$$PM = C * 12.0107 + H * 1.00784 + O * 15.999 + N * 14.0067 + S * 32.065 \quad (1)$$

$$Moles = \frac{\left(\frac{1 * \%peso}{100}\right)}{PM} \quad (2)$$

$$Fracción\ molar = \frac{Moles}{\sum Moles} \quad (3)$$

$$Carga\ térmica = \frac{\%peso * \Delta h\ vap}{100} \quad (4)$$

Con los cálculos anteriores se pasa a hacer una corrección a la composición CHONS multiplicando la composición inicial por su fracción molar y se hace una sumatoria por cada elemento para obtener el porcentaje de elemental (CHONS) pasado a masa y luego se calcula la fracción másica con las fórmulas (5), (6) y (7).

$$Corrección\ composición = \#átomos * fracción\ molar \quad (5)$$

$$Masa = \left(\sum \text{corrección composición} \right) * \text{masa atómica} \quad (6)$$

$$\text{Fracción másica } (i) = \frac{Masa}{\sum Masa} \quad (7)$$

5.3.1. Bio-aceite por condensación directa

Se realizaron los cálculos para dos puntos de operación: Por decantado del sistema de lavado y condensación directa maneras, la primera simulando un bio-aceite directamente del condensador por lo cual se tomaron todos los componentes como en “Caracterización teórica del bio-aceite”. Para el poder calorífico se usó una correlación (8) de (Channiwala & Parikh, 2002) que es específicamente para biomasa.

$$HHV = (0.349C_i + 1.1783H_i - 0.1034O_i - 0.0151N_i) * 100 \quad (8)$$

5.3.2. Bio-aceite por decantado del sistema de lavado

Para este caso no se consideran los compuestos solubles en agua de la “Caracterización teórica del bio-aceite”, puesto que en la decantación se realiza una separación por afinidad con agua, y se recuperan los compuestos no solubles principalmente.

Para el poder calorífico del bio-aceite se usó la correlación propuesta por (Channiwala & Parikh, 2002) que permite la valoración de esta propiedad en función de la composición química elemental de cada compuesto orgánico ver Ec. (8).

5.4. Caracterización experimental del bio-aceite

5.4.1. Separación del bio-aceite

El bio-aceite tiene muchas fracciones o productos entre las principales está el TAR el cual es una fracción alquitranosa, luego hay una parte menos viscosa que se puede separar en ligero, medio o pesado, estos productos se obtienen mediante un sistema de destilación donde se separan los productos a diferentes temperaturas debido a sus puntos de ebullición, la temperatura a la que se destila el bio-aceite ligero es 115°C y la fracción media a 215° según la documentación realizada (Omar & Robinson, 2014) el producto remanente sería el bio-aceite pesado, en este caso se lleva a cabo un montaje el cual

permite calentar y burbujear nitrógeno (gas) como se muestra en la Figura 7. Se comienza tomando datos de pesos de las muestras de bio-aceite a separar y se pone en un tubo de ensayo para luego calentar el bio-aceite mediante una malla calentadora, aumentando de dos grados por minuto, al alcanzar la 115° se dejó allí 15min y luego lo mismo en 215° .

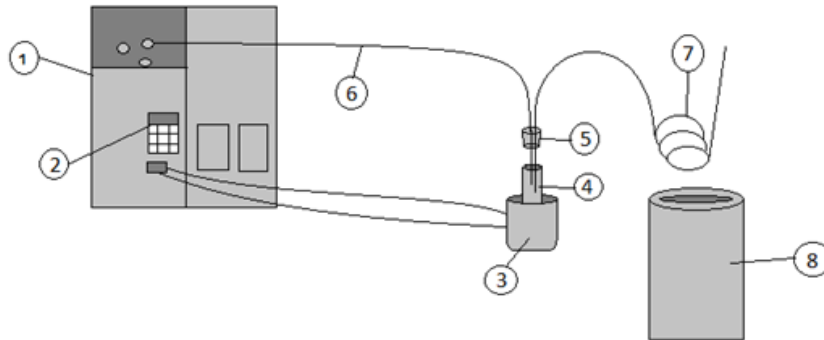


Figura 7. Montaje para separación de productos. (1) Fuente de calor y de N2; (2) control de temperatura; (3) malla calentadora; (4) tubo de ensayo; (5) tapón; (6) línea de nitrógeno (N2 gas); (7) serpentín de cobre; (8) vaso Dewar.

Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, se montó una vía de escape de los gases hacia un serpentín de cobre que se encuentra inmerso en un vaso Dewar lleno de nitrógeno líquido como se muestra en la Figura 8 que se iba llenando a medida que bajaba el nivel.



Figura 8. Abastecimiento de nitrógeno líquido.

Fuente: elaboración propia.

En el serpentín se condensan y recuperan los productos, es decir, este montaje cuenta con una fase de evaporación y otra de condensación de bio-aceite. Los productos en dicho serpentín condensan debido a la baja temperatura del nitrógeno líquido y a la conductividad térmica del cobre que es el material de fabricación.

5.4.2. Análisis de Densidad

Este análisis se puede realizar de forma muy sencilla con un picnómetro debido a la fórmula de la densidad que dice que es igual a la masa sobre el volumen por tal la técnica del picnómetro permite conocer la densidad de cualquier líquido ya que el volumen del picnómetro es conocido y la masa de la muestra a medir se calcula fácilmente con una balanza, se debe tener en cuenta que el picnómetro debe ser llenado en su totalidad, no debe haber una sola burbuja de aire en su interior. (Quercusblog, 2015).

Se utilizó un picnómetro de 5cm³ para el cálculo de la densidad, se calculó la masa en gramos en una balanza de precisión mostrada en la Figura 9 y el volumen lo daba el picnómetro. Por último, se calculó la densidad.

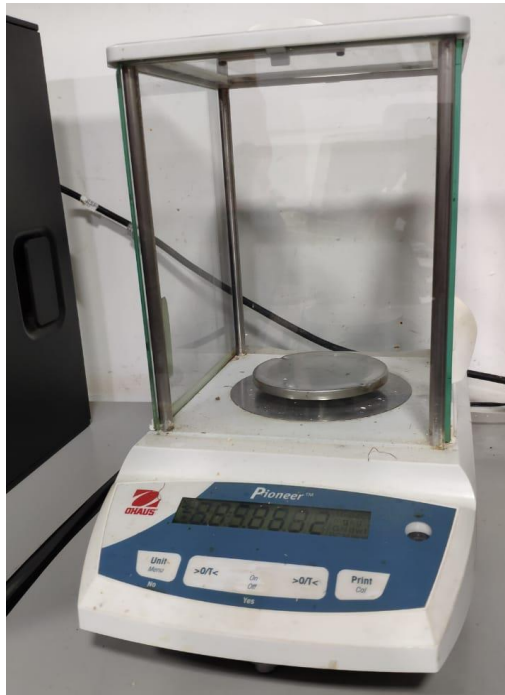


Figura 9. Balanza de precisión.

Fuente: elaboración propia.

6. Resultados y discusión

6.1. Recuperación del bio-aceite vía húmeda

Los sistemas de decantación adaptados e implementados en su forma final se muestran en la Figura 10.



Figura 10. Decantadores.

Fuente: elaboración propia.

Además, con la metodología de recuperación, se logró semi-automatizar el proceso de recuperación de bio-aceite por decantación vía húmeda (Figura 6). El bio-aceite yace en la parte superior del tanque y mediante la válvula de paso se logró que pase solo la fracción superior del contenido del tanque, reduciendo la cantidad de agua considerablemente y haciendo más eficiente el proceso de recuperación como se observa en la sección B de la Figura 11.

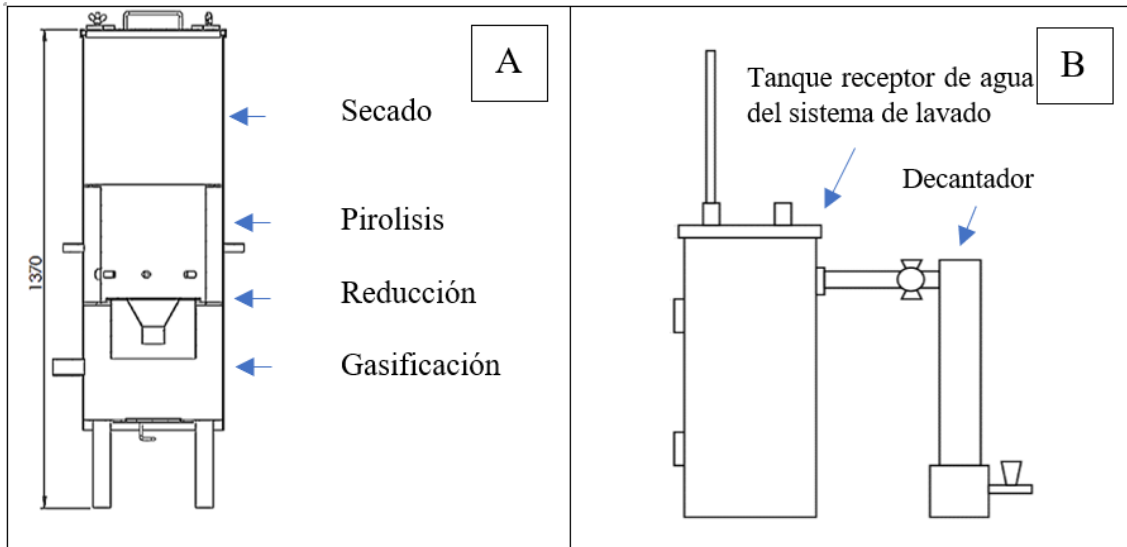


Figura 11. Gasificador tipo downdraft (A) y sistema de recuperación vía húmeda (B).

Fuente: elaboración propia.

6.2. Caracterización teórica del bio-aceite

6.2.1. Bio-aceite por condensación directa

Realizando todos los cálculos correspondientes a las fórmulas 1-8 se obtuvieron los siguientes resultados plasmados en las tablas: Tabla 3; Tabla 4; Tabla 5; Tabla 6.

Tabla 3. Datos de fórmula, peso molecular y fracción molar.

<u>Xi</u>					
	Fórmula	Porcentaje de peso	PM	Kmol-1kg	Fracción molar
1	C ₆ H ₁₀ O ₅	5.31	162.1376	0.0003275	0.092852946
2	C ₂ H ₄ O ₂	1.44	60.05076	0.0002398	0.067987472
3	C ₂ H ₄ O ₂	6.43	60.05076	0.00107076	0.303582946
4	C ₃ H ₆ O ₂	10.14	74.07714	0.00136884	0.388095542
5	C ₅ H ₄ O ₂	1.2	96.08286	0.00012489	0.035409536
6	C ₅ H ₆ O ₂	0.3	98.09854	3.0581E-05	0.00867049
7	C ₆ H ₈ O	0.38	96.12592	3.9531E-05	0.011207997

8	C6H12O2	0.12	116.15628	1.0331E-05	0.002929028
9	C6H6O	0.79	94.11024	8.3944E-05	0.023799899
10	C7H8O	0.17	108.13662	1.5721E-05	0.004457189
11	C7H8O	0.19	108.13662	1.757E-05	0.004981564
12	C7H8O	0.17	108.13662	1.5721E-05	0.004457189
13	C8H10O	0.05	122.163	4.0929E-06	0.00116042
14	C8H10O	0.02	122.163	1.6372E-06	0.000464168
15	C8H10O	0.54	122.163	4.4203E-05	0.012532536
16	C8H10O	0.02	122.163	1.6372E-06	0.000464168
17	C8H10O	0.01	122.163	8.1858E-07	0.000232084
18	C7H8O2	0.61	124.13562	4.914E-05	0.013932156
19	C8H10O2	0.31	138.162	2.2437E-05	0.006361477
20	C10H12O2	0.28	164.19908	1.7052E-05	0.00483473
21	C8H10O3	0.63	154.161	4.0866E-05	0.011586465

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Cálculos de temperatura de ebullición, cambio de entalpia de vaporización del bio-aceite por condensación directa y carga térmica del bio-aceite por condensación directa.

Xi				
	Porcentaje de peso	Temp. ebullición (K)	de Δh vap	Carga Térmica (kJ/kg)
1	5.31	657	92.2	4.89582
2	1.44	404.4	70.5	1.0152
3	6.43	391.2	23.7	1.52391
4	10.14	418	42	4.2588
5	1.2	236.5	149.6	1.7952
6	0.3	443	53.6	0.1608
7	0.38	430.65	39.42	0.149796
8	0.12	441.05	52.13	0.062556

9	0.79	633.15	58.8	0.46452
10	0.17	464.15	44.89	0.076313
11	0.19	474.9	46.61	0.088559
12	0.17	475.92	60.6	0.10302
13	0.05	485.37	51.8	0.0259
14	0.02	492.65	55.3	0.01106
15	0.54	491.05	53.2	0.28728
16	0.02	491.55	68.1	0.01362
17	0.01	477.67	64.5	0.00645
18	0.61	478.15	62.6	0.38186
19	0.31	494.15	70.9	0.21979
20	0.28	539.15	56.17	0.157276
21	0.63	534.15	54.17	0.341271
				16.039001

Fuente: elaboración propia.

La carga térmica de condensación mayor la aportan los primeros 5 compuestos orgánicos de la lista que son “Levoglucosan, Hydroxyacetaldehyde, Acetic acid, Acetol y Furfural” debido a que son los que más aportan a la composición de este bio-aceite específico, siendo el Levoglucosan uno de los más importantes por su alta entalpia de vaporización y alta temperatura de ebullición. La carga térmica de condensación total fue de 16.0390 kJ/kg con la cual se puede predecir comportamientos de intercambiadores de calor.

Tabla 5. Cálculos de composición ponderada del bio-aceite por condensación directa.

Corrección composición					
	C	H	O	N	S
1	0.55711768	0.92852946	0.46426473	0	0
2	0.13597494	0.27194989	0.13597494	0	0
3	0.60716589	1.21433178	0.60716589	0	0
4	1.16428663	2.32857325	0.77619108	0	0

5	0.17704768	0.14163814	0.07081907	0	0
6	0.04335245	0.05202294	0.01734098	0	0
7	0.06724798	0.08966397	0.011208	0	0
8	0.01757417	0.03514833	0.00585806	0	0
9	0.14279939	0.14279939	0.0237999	0	0
10	0.03120032	0.03565751	0.00445719	0	0
11	0.03487095	0.03985251	0.00498156	0	0
12	0.03120032	0.03565751	0.00445719	0	0
13	0.00928336	0.0116042	0.00116042	0	0
14	0.00371334	0.00464168	0.00046417	0	0
15	0.10026029	0.12532536	0.01253254	0	0
16	0.00371334	0.00464168	0.00046417	0	0
17	0.00185667	0.00232084	0.00023208	0	0
18	0.09752509	0.11145725	0.02786431	0	0
19	0.05089182	0.06361477	0.01272295	0	0
20	0.0483473	0.05801676	0.00966946	0	0
21	0.09269172	0.11586465	0.03475939	0	0

Fuente: elaboración propia.

La composición elemental teórica del bio-aceite producto de transformación termoquímica de la biomasa, obtenida por ponderación de la composición de este, demuestra que para el poder calorífico superior el carbono e hidrogeno aportan la mayor cantidad de energía disponible, mientras que el oxígeno le resta como se observa en la correlación y su fracción molar es 2.22638 como se observa en la Tabla 6 en la sección de fracción molar.

$$HHV = (0.349C_i + 1.1783H_i - 0.1034O_i - 0.0151N_i) * 100$$

Tabla 6. Cálculos de fracción molar y fracción másica del bio-aceite por condensación directa

Fracción molar				
3.41812133	5.81331189	2.22638809	0	0
Fracción másica				
0.49742623	0.07098852	0.43158525	0	0

Fuente: elaboración propia.

6.2.1.1. Poder calorífico superior del bio-aceite por condensación directa

Usando la correlación planteada en la ecuación (8) se obtuvo un HHV de 21.2621609 MJ/kg, comparándolo con el valor de real de referencia se tiene lo mostrado en la Figura 12. Además, como referencia se tiene el valor de referencia un aceite pirolítico con un poder calorífico superior de 24.7 MJ/kg por (Channiwala & Parikh, 2002).

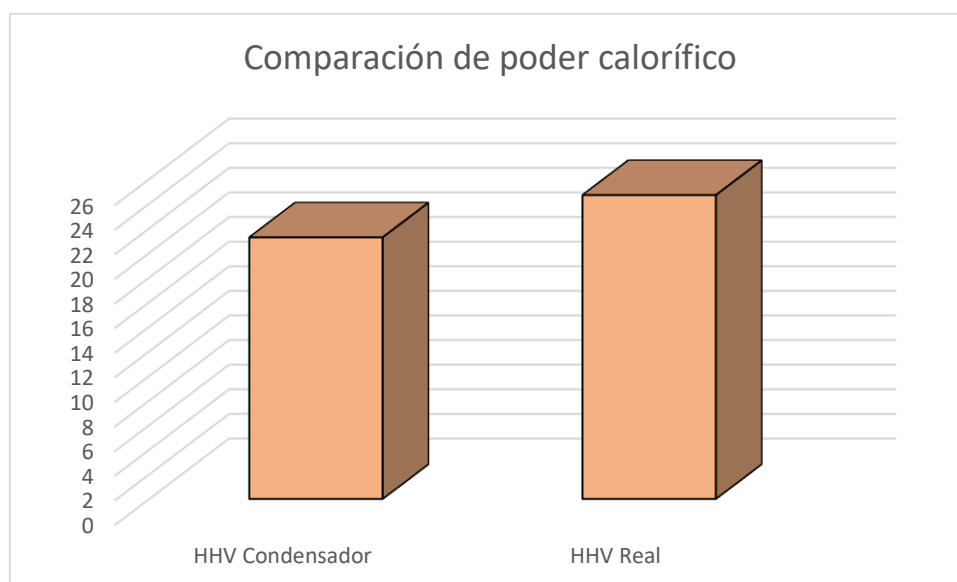


Figura 12. Gráfico comparativo del HHV del bio-aceite por condensación directa.

Fuente: elaboración propia.

6.2.2. Bio-aceite por decantado del sistema de lavado

Siguiendo los mismos cálculos que se realizaron para el bio-aceite por condensación directa se tienen los datos y cálculos en las tablas: Tabla 7; Tabla 8;

Tabla 9; Tabla 10.

Tabla 7. Datos de fórmula, peso molecular y fracción molar.

Xi					
	Fórmula	Porcentaje de peso	de PM	Kmol-1kg	Fracción molar
1	C6H10O5	5.31	162	0.00033	0.400809
5	C5H4O2	1.2	96	0.00012	0.152849
7	C6H8O	0.38	96	4E-05	0.04838
8	C6H12O2	0.12	116	1E-05	0.012643
9	C6H6O	0.79	94	8.4E-05	0.102735
10	C7H8O	0.17	108	1.6E-05	0.01924
11	C7H8O	0.19	108	1.8E-05	0.021503
12	C7H8O	0.17	108	1.6E-05	0.01924
13	C8H10O	0.05	122	4.1E-06	0.005009
14	C8H10O	0.02	122	1.6E-06	0.002004
15	C8H10O	0.54	122	4.4E-05	0.054098
16	C8H10O	0.02	122	1.6E-06	0.002004
17	C8H10O	0.01	122	8.2E-07	0.001002
18	C7H8O2	0.61	124	4.9E-05	0.06014
19	C8H10O2	0.31	138	2.2E-05	0.02746
20	C10H12O2	0.28	164	1.7E-05	0.02087
21	C8H10O3	0.63	154	4.1E-05	0.050014

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Cálculos de temperatura de ebullición, cambio de entalpia de vaporización del bio-aceite por condensación directa y carga térmica del bio-aceite por decantado del sistema de lavado.

Xi				
	Porcentaje de peso	Temp. ebullición (K)	de Δh_{vap}	Carga Térmica (kJ/kg)

1	5.31	657	92.2	4.89582
5	1.2	236.5	149.6	1.7952
7	0.38	430.65	39.42	0.149796
8	0.12	441.05	52.13	0.062556
9	0.79	633.15	58.8	0.46452
10	0.17	464.15	44.89	0.076313
11	0.19	474.9	46.61	0.088559
12	0.17	475.92	60.6	0.10302
13	0.05	485.37	51.8	0.0259
14	0.02	492.65	55.3	0.01106
15	0.54	491.05	53.2	0.28728
16	0.02	491.55	68.1	0.01362
17	0.01	477.67	64.5	0.00645
18	0.61	478.15	62.6	0.38186
19	0.31	494.15	70.9	0.21979
20	0.28	539.15	56.17	0.157276
21	0.63	534.15	54.17	0.341271
				9.080291

Fuente: elaboración propia.

Tabla 9. Cálculos de composición ponderada del bio-aceite por decantado del sistema de lavado.

Corrección composición					
	C	H	O	N	S
1	2.40485684	4.00809474	2.00404737	0	0
5	0.76424486	0.61139589	0.30569794	0	0
7	0.29028295	0.38704394	0.04838049	0	0
8	0.07586073	0.15172145	0.02528691	0	0
9	0.61640856	0.61640856	0.10273476	0	0
10	0.13467946	0.15391938	0.01923992	0	0
11	0.1505241	0.17202755	0.02150344	0	0
12	0.13467946	0.15391938	0.01923992	0	0
13	0.0400726	0.05009075	0.00500907	0	0
14	0.01602904	0.0200363	0.00200363	0	0
15	0.43278406	0.54098007	0.05409801	0	0
16	0.01602904	0.0200363	0.00200363	0	0
17	0.00801452	0.01001815	0.00100181	0	0
18	0.42097728	0.48111689	0.12027922	0	0
19	0.21967987	0.27459984	0.05491997	0	0
20	0.20869618	0.25043542	0.04173924	0	0
21	0.40011351	0.50014189	0.15004257	0	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla 10. Cálculos de fracción molar y fracción másica del bio-aceite por decantado del sistema de lavado

Fracción molar				
6.33393306	8.40198649	2.97722791	0	0
Fracción másica				

0.57561661	0.0636298	0.36075359	0	0
------------	-----------	------------	---	---

Fuente: elaboración propia.

6.2.2.1. Poder calorífico superior del bio-aceite por decantado del sistema de lavado

Usando la correlación planteada en la ecuación (8) como para el bio-aceite por condensación directa se obtuvo un HHV de 23.8563271 MJ/kg, comparándolo con el valor de real de referencia se tiene lo mostrado en la Figura 13.

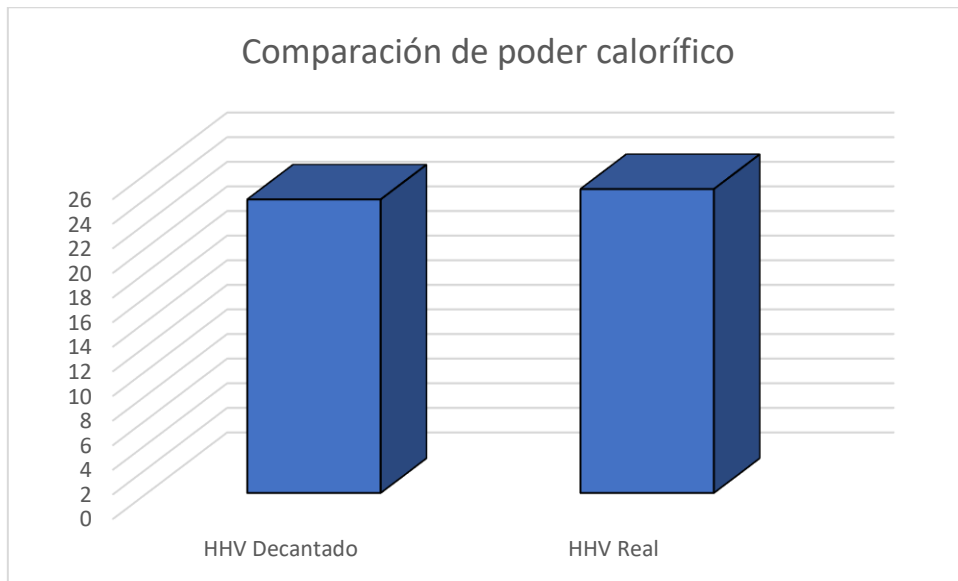


Figura 13. Gráfico comparativo del HHV del bio-aceite por decantado del sistema de lavado.

Fuente: elaboración propia.

6.3. Caracterización experimental del bio-aceite

6.3.1. Montaje para separación

Este fue el montaje final para la separación de productos del bio-aceite donde la línea azul alimenta de N₂ al montaje como se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Montaje para separación.

Fuente: elaboración propia.

6.3.2. Separación de productos

Tabla 11. Fracción peso a peso de las fracciones de bio-aceite separado por destilación.

Fracción	P1	P2	P3
%w/w F1	2%	15%	17%
%w/w F2	24%	22%	25%
%w/w F3	74%	63%	58%

Fuente: elaboración propia.

En la separación para la caracterización del bio-aceite se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla, en donde P1 corresponde a la primera prueba de separación realizada P2 a la segunda y P3 a la tercera prueba respectivamente y las fracciones se refieren en el caso de F1 a la fracción separada a los 115°C, F2 a la fracción separada a los 215°C y por último F3 correspondiente a la fracción remanente del proceso. Según la teoría esta última fracción (F3) corresponde a la fracción de bio-aceite pesado, se encontró un patrón no esperado, ya que visualmente se observaba la muestra completa como bio-aceite ligero. Las fracciones medias del bio-aceite son $6\% \pm 0.4$ de compuestos ligeros, $23\% \pm 0.5$ compuestos medianos y $65\% \pm 5.2$ compuestos pesados ver Figura 15.

Visualmente las muestras separadas permiten analizar muy poco, aunque es visible levemente un color más claro en las fracciones F1 de cada prueba, cabe mencionar que F0 son muestras del bio-aceite original o sin separar.

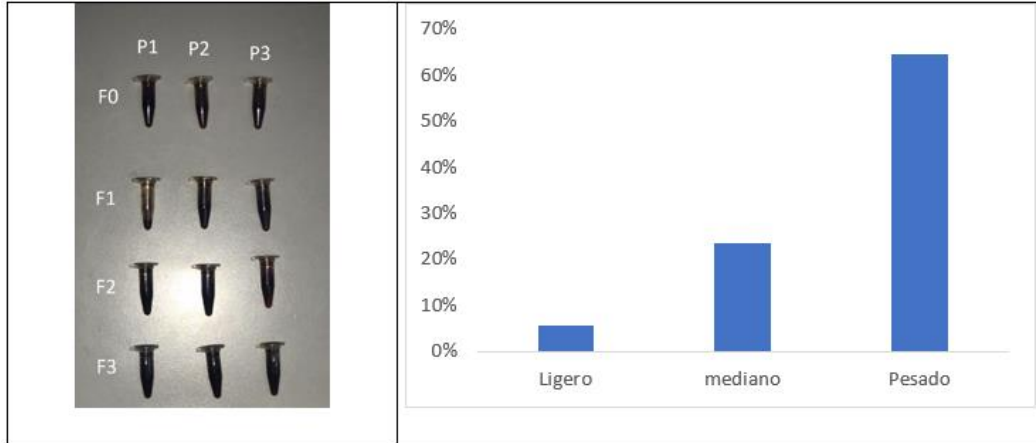


Figura 15. Muestras de bio-aceite separado.

Fuente: elaboración propia.

6.3.3. Análisis de densidad

Tabla 12. Datos para hallar la densidad

Picnómetro (g)	Picnómetro con aceite original (g).	Picnómetro con aceite remanente (g).	Volumen (cm ³)
7.6558	12.3116	12.3086	5

Fuente: elaboración propia.

Tabla 13. Datos de densidad

	Aceite original (g).	Aceite remanente (g).
Masa (g)	4.6558	4.6528
Volumen (cm ³)	5	5
Densidad (g/ cm ³)	0.93116	0.93056

Fuente: elaboración propia.

7. Conclusiones y recomendaciones

Se validó la facilidad de recuperación de bio-aceite producto de gasificación y pirolisis de tusa de maíz condensado vía húmeda, con la implementación de sistemas simples tipo decantadores, que permiten la recuperación de subproducto con un bajo costo de inversión.

El bio-aceite recuperado de la transformación termoquímica de la biomasa en microgasificador de lecho fijo descendente se caracterizó por una fuerte participación de compuestos orgánicos pesados (Temperatura ebullición $> 215^{\circ}\text{C}$) que representan un 65% de los compuestos orgánicos del bio-aceite.

Una comparación del poder calorífico superior HHV del bio-aceite obtenido de la decantación (obtenido vía húmeda) y directa condensación con valores de 21.26216087 (MJ/kg) y 23.85632707 (MJ/kg) respectivamente, muestra una reducción del potencial energético disponible del bio-aceite el cual no supera el 12.20% cuando se implementan sistemas de lavado con agua.

Bibliografía

- Según lo Semana, S. (2017, septiembre 26). Los secretos ocultos de la biomasa. Recuperado de <https://sostenibilidad.semana.com/negocios-verdes/articulo/la-biomasa-genera-energia-para-llevar-electricidad-a-zonas-apartadas/38697>
- Ministerio de agricultura & Fuentes No Convencionales de Energía FNCE. (2010). Potencial energético de la biomasa residual del sector agrícola en Colombia. Recuperado de <http://www.si3ea.gov.co/Home/Biomasa/tabid/76/language/es-ES/Default.aspx>
- Bridgwater, A. V. (2003). Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. *Chemical Engineering Journal*, 91(2–3), 87–102. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00142-0](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00142-0)
- Cleanenergybrief, E. (2018, November 21). BIOMASA: Caña de azúcar y energía biomasa en Colombia. Recuperado de <https://energialimpiaparatodos.com/2017/04/28/cana-de-azucar-y-energia-biomasa-en-colombia/comment-page-1/>
- Omar, R., & Robinson, J. P. (2014). Conventional and microwave-assisted pyrolysis of rapeseed oil for bio-fuel production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 105, 131–142. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.10.012>
- Stamatov, V., Honnery, D., & Soria, J. (2006). Combustion properties of slow pyrolysis bio-oil produced from indigenous Australian species. *Renewable Energy*, 31(13), 2108–2121. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.10.004>
- Shamsul, N. S., Kamarudin, S. K., & Rahman, N. A. (2017). Conversion of bio-oil to bio gasoline via pyrolysis and hydrothermal: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80(February 2017), 538–549. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.245>

- Lujaji, F. C., Boateng, A. A., Schaffer, M., Mtui, P. L., & Mkilaha, I. S. N. (2016). Spray atomization of bio-oil/ethanol blends with externally mixed nozzles. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 71, 146–153. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.10.020>
- Baloch, H. A., Nizamuddin, S., Siddiqui, M. T. H., Riaz, S., Jatoi, A. S., Dumbre, D. K., ... Griffin, G. J. (2018). Recent advances in production and upgrading of bio-oil from biomass: A critical overview. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 5101–5118. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.07.050>
- Raffino, M. E. (2018, December 18). Concepto de Decantación. Recuperado de <https://concepto.de/decantacion/>
- Zheng, J. L., & Kong, Y. P. (2010). Spray combustion properties of fast pyrolysis bio-oil produced from rice husk. *Energy Conversion and Management*, 51(1), 182–188. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.09.010>
- Solar, D. A. (2010). Gasificación de Biomasa. 21–23.
- Restán D. (2019). Estudio de Sensibilidad del Syngas Producto de la Gasificación de Tusa de Maíz con la Modificación del Campo CO₂ Durante la Gasificación.
- Investigación, S. T., & Universidad, de A. (2019). ANÁLISIS ELEMENTAL Servicios Técnicos de Investigación. Recuperado de <https://sstti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/analisis-elemental.html>.
- Viscosimetría. (2018). Recuperado de <http://virtual.ffyb.uba.ar/mod/book/view.php?id=88115&chapterid=1946>.
- Optimización de Procesos y Uso Racional de la Energía y Biomasa. (n.d.). <https://scienti.colciencias.gov.co/gruplac/jsp/visualiza/visualizagr.jsp?nro=0000000007020>.

- Quercusblog. (2015, June 24). Método del picnómetro para calcular densidades. Recuperado de <https://quercuslab.es/blog/metodo-del-picnometro-para-determinar-densidades/>.
- Quesada, J. G. (2008). Técnicas reométricas. Recuperado de <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/3626/1/tema5RUA.pdf>.
- Channiwala, S. A., & Parikh, P. P. (2002). A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. *Fuel*, 81(8), 1051–1063. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00131-4)
- Mullen, C. A., Boateng, A. A., Goldberg, N. M., Lima, I. M., Laird, D. A., & Hicks, K. B. (2010). Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis. *Biomass and Bioenergy*, 34(1), 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.09.012>
- NIST, National Institute of Standards and Technology. “NIST Chemistry WebBook, SRD 69.” Chemistry WebBook, 2018, webbook.nist.gov/chemistry/.
- AIE. (2013). - Tablas de Poder Calorífico -. Retrieved November 09, 2020, from https://ingemecanica.com/tutoriales/poder_calorifico.html.
- Endesa Fundación. (2013). ¿Qué es la biomasa? Centrales de energía de la biomasa. Retrieved November 09, 2020, from <https://www.fundacionendesa.org/es/centrales-renovables/a201908-central-de-biomasa>.