



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Evaluación de la pirólisis rápida en reactor tipo Auger (doble tornillo sinfín) para el aprovechamiento de biomasas residuales de origen agroindustrial en el departamento Norte de Santander.

Belky Paola Chávez Tarazona

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de procesos y energía

Medellín, Colombia

2023

Evaluación de la pirólisis rápida en reactor tipo Auger (doble tornillo sinfín) para el aprovechamiento de biommasas residuales de origen agroindustrial en el departamento Norte de Santander.

Belky Paola Chávez Tarazona

Tesis o trabajo de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Química

Director:

Ph.D. Farid Chejne Janna.

Codirector:

Dr. Faustino Moreno Gamboa.

Línea de Investigación:

Procesos Termoquímicos.

Grupo de Investigación:

Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas (TAYEA)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Procesos y Energía

Medellín, Colombia

2023

*La riqueza consiste mucho más en el disfrute
que en la posesión.*

Aristóteles

Declaración de obra original.

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Belky Paola Chávez Tarazona

Nombre

bchavez@unal.edu.co

30/enero/2023

Fecha

Agradecimientos

A la Universidad Francisco de Paula Santander y al grupo Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas (TAYEA), profesores Jorge Sánchez, Farid Chejne Janna, Faustino Moreno y Raíza Manrique. Gracias por sus enseñanzas, apoyo y orientación durante el desarrollo del presente trabajo, especialmente a los compañeros de laboratorio, Estefanía Orrego y Fernando Ceballos a quienes le agradezco por sus enseñanzas y colaboración incondicional durante el proceso de la investigación.

A todos quienes aportaron para que este proyecto fuera posible, muchas gracias.

Resumen

El presente trabajo consiste en el diseño y puesta en marcha de un reactor tipo Auger, a escala de laboratorio para el procesamiento de 2 kg/h con el fin de llevar el proceso de piólisis rápida de diferentes tipos de biomásas como la cascarilla arroz, cisco café y cuesco de palma de aceite. Para lo cual se llevó a cabo una metodología para diseño de tornillos sinfín con los pasos para los cálculos de diámetros, áreas de relleno, expansión térmica, rpm y potencia. Además, se realizó un diseño experimental que permitió evaluar la pirólisis rápida a la temperatura de 550°C y 650°C en las tres diferentes biomásas con características fisicoquímicas de alto potencial de aprovechamiento en procesos termoquímicos.

La investigación fue llevada a cabo en tres etapas. La primera etapa consiste en el diseño y construcción en acero inoxidable del reactor de doble tornillo sinfín a escala de laboratorio que permita operara hasta 700°C, una vez disponible el equipo se procedió hacer la calibración de flujo de los tornillos dosificadores y el reactor en determinado tiempo. En la segunda etapa comprende el diseño de experimento factorial, que consistió en tomar cada biomasa y someterla a nueve ensayos con diferentes velocidades de reacción (20 rpm, 30 rpm, 40 rpm) y diferente relación de portacalor (1:12, 1:15, 1:18), con 2mm de tamaño de partícula, con una temperatura de operación de 550°C, y 650°C. Para las muestras obtenidas a 650°C las biomásas tienen un tamaño de partícula de 2mm, la relación de portacalor es de 1:30, con una velocidad de reacción de 30 rpm.

Finalmente, en la tercera etapa se realizó la caracterización de las biomásas y productos obtenidos a las diferentes temperaturas de operación para evaluar el efecto, rendimiento y composición de estos. La biomasa como los productos de pirólisis, como el biochar, bioaceite tuvieron caracterización de FT-IR, TGA, contenido de agua, fluorescencia,

análisis próximo, último. Observándose que para la temperatura de 550°C el cuesco de palma obtuvo un rendimiento mayor a los 40 rpm con una relación de portacalor de 1:18 con 52,04% en bioaceite y para el cuesco de café el 62% de bioaceite con una relación de portacalor de 1:18. Para la temperatura de 650°C que tuvo una relación de portacalor 1:30, los rendimientos de bioaceite para el cuesco de café fue de 71%, cuesco de palma de aceite con 68%, y la cascarilla de arroz con el 12%. Los gases no condensados de la pirólisis se encontró H_2 , CO , CO_2 y C_2H_6 . A partir de los resultados obtenidos se pudo concluir que, la temperatura y la transferencia de calor tuvo impacto importante en el proceso de pirólisis rápida en un reactor tipo auger.

Palabras clave: Diseño, reactor auger, pirólisis rápida, biomasa cisco de café, cuesco palma, cascarilla de arroz.

Abstract.

Evaluation of fast pyrolysis in an Auger type reactor (double auger) for the use of residual biomass of agro-industrial origin in the department of Norte de Santander

The present work consists of the design and start-up of an Auger type reactor, at laboratory scale for the processing of 2 kg/h in order to carry out the fast pyrolysis process of different types of biomasses such as rice husks, coffee husks and oil palm hulls. For this purpose, a methodology for the design of augers was carried out with the steps for the calculation of diameters, filling areas, thermal expansion, rpm and power. In addition, an experimental design was carried out to evaluate fast pyrolysis at 550°C and 650°C in the three different biomasses with physicochemical characteristics of high potential for use in thermochemical processes.

The research was carried out in three stages. The first stage consisted of the design and construction of a stainless steel double screw reactor at laboratory scale that would allow operation up to 700°C. Once the equipment was available, the flow calibration of the dosing screws and the reactor was carried out at a certain time. The second stage comprises the factorial experiment design, which consisted of taking each biomass and subjecting it to nine trials with different reaction speeds (20 rpm, 30 rpm, 40 rpm) and different heat carrier ratio (1:12, 1:15, 1:18), with 2 mm particle size, with an operating temperature of 550°C, and 650°C. For the samples obtained at 650°C the biomasses have a particle size of 2mm, the heat carrier ratio is 1:30, with a reaction speed of 30 rpm.

Finally, in the third stage, the characterization of the biomasses and products obtained at different operating temperatures was carried out to evaluate their effect, yield and composition. The biomass and pyrolysis products, such as biochar and bio-oil, were characterized by FT-IR, TGA, water content, fluorescence, proximate and ultimate

analysis. It was observed that for the 550°C temperature, the palm kernel obtained a higher yield at 40 rpm with a heat carrier ratio of 1:18 with 52.04% in bio-oil and for the coffee kernel 62% of bio-oil with a heat carrier ratio of 1:18. For the 650°C temperature which had a 1:30 heat carrier ratio, the bio-oil yields for coffee hulls were 71%, oil palm hulls with 68%, and rice husks with 12%. The non-condensing gases from pyrolysis were found H_2 , CO , CO_2 and C_2H_6 . From the results obtained, it could be concluded that the temperature and heat transfer had an important impact on the fast pyrolysis process in an auger reactor.

Key words: Design, auger reactor, fast pyrolysis, coffee husk biomass, palm kernel, rice husk.

Contenido

| Pág. | |
|------|--|
| | Resumen 9 |
| | Abstract..... 11 |
| | Lista de figuras..... 15 |
| | Lista de tablas. 17 |
| | Lista de Símbolos y abreviaturas..... 18 |
| | Introducción. 21 |
| | Pirólisis rápida de biomasa. 23 |
| | 1.1 Biomasa. 24 |
| | 1.2 Aprovechamiento de las biomásas generadas en el departamento Norte de Santander..... 25 |
| | 1.3 Tecnologías disponibles en pirólisis rápida para la obtención de bioaceites y biochar a partir de biomasa lignocelulósica agroindustrial..... 27 |
| | 1.3.1 Reactores de tornillo o de barrena..... 27 |
| | 1.3.2 Reactores de lecho fluidizados burbujeantes..... 28 |
| | 1.3.3 Reactor de lecho fluidizados circulantes y lechos transportados. 29 |
| | 1.3.4 Reactor de cono rotatorio. 30 |
| | 1.3.5 Reactor ablativo..... 30 |
| | 1.3.6 Reactor de lecho fijo..... 31 |
| | Metodología para el diseño y construcción del reactor de doble tornillo sinfín para la pirólisis rápida de biomasa lignocelulósica agroindustrial..... 34 |
| | 2.1 Metodología de diseño para reactor. 35 |
| | 2.1.1 Cálculos geométricos del tornillo sinfín del reactor. 37 |
| | 2.1.3 Tiempo de residencia de la mezcla..... 40 |

| | |
|---|-----------|
| 2.1.4 Cálculo del flujo masico total. | 41 |
| 2.2 Pruebas de calibración de flujos de biomasa y portacalor en los tornillos dosificadores. | 45 |
| 2.3 Diseño de tolva de almacenamiento de biomásas. | 48 |
| Rendimientos y caracterización del bioaceite y biochar generado en la planta piloto a diferentes condiciones de operación y tipos de biomasa | 52 |
| 3.1 Procedimiento..... | 54 |
| 3.2 Rendimiento de los productos de pirólisis rápida. | 54 |
| 3.3 Caracterización de los productos de pirolisis rápida a 550° y 650°C..... | 58 |
| 3.4 Caracterización de biochar a 550°C y 650°C de biomásas del departamento Norte de Santander..... | 62 |
| 3.5 Caracterización de bioaceite a 550°C y 650° de biomásas del departamento Norte de Santander..... | 66 |
| 3.6 Caracterización de los gases de pirólisis rápida de biomásas a 550°C y 650°C | 71 |
| 4.Conclusiones y recomendaciones. | 73 |
| 4.1 Conclusiones..... | 73 |
| 4.2 Recomendaciones..... | 75 |
| Anexo A..... | 77 |
| Bibliografía..... | 88 |

Lista de figuras.

| | |
|---|----|
| Figura 1.1. Ubicación de departamento de Norte de Santander. | 27 |
| Figura 1.2. Biomosas de mayor producción en el Norte de Santander. | 28 |
| Figura 1.3. Biomosas seleccionadas para el proceso de pirólisis rápida en el reactor Auger. | 28 |
| Figura 1.4. Esquema simple de reactor Auger. | 29 |
| Figura 1.5. Esquema simple de reactor de lecho burbujeante. | 30 |
| Figura 1.6. Esquema de reactor lecho circulante. | 31 |
| Figura 1.7. Esquema del reactor de cono giratorio. | 32 |
| Figura 1.8. Esquema simple del reactor ablativo. | 33 |
| Figura 1.9. Esquema de reactor de lecho fijo. | 33 |
| Figura 2.1. Reactor Auger de doble tornillo sinfín. | 37 |
| Figura 2.2. Calibración del portacalor a diferentes velocidades. | 48 |
| Figura 2.3. calibración de la cascarilla de arroz. | 48 |
| Figura 2.4. Calibración del cisco de café. | 49 |
| Figura 2.5. Calibración del cuesco de palma. | 49 |
| Figura 2.6. Prueba de embudo para las biomosas. | 50 |
| Figura 2.7. Tolva de pirámide truncada con salida simétrica. | 51 |
| Figura 2.8. Laboratorio de pirólisis de biomasa en CIMAC-UFPS. | 52 |
| Figura 3.1. Almacenamiento de productos de la pirolisis rápida. | 56 |
| Figura 3.2. Rendimiento del bioaceite de cuesco de palma a 550°C | 58 |
| Figura 3.3. Rendimiento del bioaceite de cisco de café a 550°C. | 59 |
| Figura 3.4. Rendimiento en bioaceite a 650°C. | 60 |
| Figura 3.5. TG de las biomosas de Norte de Santander. | 61 |
| Figura 3.6. FT-IR de las biomosas de Norte de Santander. | 63 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.7. TG de biochar obtenidos a 550°C. | 64 |
| Figura 3.8. TGA de biochar obtenidos a 650°C. | 65 |
| Figura 3.9. FTIR de biochar de pirólisis rápida a 550°C y 650°C de las biomásas de Norte de Santander. | 67 |
| Figura 3.10. FTIR a bioaceite de cuesco de Palma a 550°C. | 69 |
| Figura 3.11. FTIR a bioaceite de cisco de café a 550°C. | 70 |
| Figura 3.12. FTIR a bioaceite de pirólisis rápida a 650°C. | 71 |
| Figura 3.13. Análisis de fluorescencia a bioaceite a 550°C y 650°C. | 72 |

Lista de tablas.

| | |
|--|----|
| Tabla 1.1 Características generales de los reactores de pirólisis rápida..... | 34 |
| Tabla 2.1. Identificación de las biomásas según CEMA. | 38 |
| Tabla 2.2. Dimensiones de los tornillos sinfín. | 40 |
| Tabla 2.3. Caudales volumétricos totales. | 41 |
| Tabla 2.4. Resultados de Velocidad lineal, tiempo de residencia, flujo masico..... | 44 |
| Tabla 2.5. Ángulo de rozamiento interno calculado mediante la prueba de embudo | 50 |
| Tabla 3.1. Parámetros de operación para pirolisis a 550°C..... | 54 |
| Tabla 3.2. Diseño factorial para pirolisis rápida de 550°C para cada tipo de biomasa. ... | 55 |
| Tabla 3.3. Parámetros de operación para pirolisis a 650°C..... | 55 |
| Tabla 3.4. Rendimientos de pirolisis rápida para el cuesco de palma a 550°C..... | 57 |
| Tabla 3.5. Rendimiento de pirolisis rápida para el cisco de café a 550°C..... | 58 |
| Tabla 3.6. Rendimiento de pirolisis rápida para el cisco de café a 650°C. | 59 |
| Tabla 3.7. Análisis próximo y ultimo a biomásas del departamento Norte de Santander.62 | |
| Tabla 3.8. Análisis próximo a biochar de biomásas del departamento Norte de Santander. | 66 |
| Tabla 3.9. Análisis de Karl Fischer para bioaceite obtenidos a 550°C y 650°C | 68 |
| Tabla 3.10. Caracterización de gases de pirólisis rápida a 550°C y 650°C. | 73 |

Lista de Símbolos y abreviaturas.

Símbolos con letras latinas

| Símbolo | Término | Unidad SI | Definición |
|--------------------|---|-------------------------|----------------|
| Ad | Capacidad de relleno | m^2 | Ec. 10 |
| $A_{relleno}$ | Área de relleno | m^2 | Ec. 8 |
| C_{eq} | Capacidad equivalente | ft^3/h | Ec.1 |
| CF_1, CF_2, CF_3 | Factores de capacidad | | Ec. 1 |
| C_{req} | Capacidad requerida | ft^3/h | Ec. 1 |
| Cp_{HC} | Calor específico | $J/kg.K$ | Ec. 4 |
| D_{ext} | Diámetro externo del tornillo | mm | Ec 10 |
| D_{int} | Diámetro interno del tornillo | mm | Ec. 2 |
| g | Gravedad | m/s^2 | Ec. 14 |
| HC | Portacalor | kg | Bolas de acero |
| h_{aire} | Coefficiente de convección del aire | $10 \text{ Watt}/m^2.K$ | Ec. 18 |
| K_{dis} | coeficiente de disminución por el ángulo de inclinación | 1 | Ec. 8 |
| K_{acero} | Coefficiente conductividad térmica del acero a 25°C | $\text{Watt}/m^2.k$ | Ec18 |
| L | Longitud del tornillo | mm | Ec. 6 |
| \dot{m}_b | Flujo masico de biomasa | Kg/h | Ec. 4 |
| \dot{m}_{HC} | Flujo masico de portacalor | Kg/h | Ec. 4 |
| N | Velocidad del tornillo | rpm | Ec. 5 |

| Símbolo | Término | Unidad SI | Definición |
|----------------|--|------------------|-------------------|
| P_{paso} | Paso del tornillo | mm | Ec. 3 |
| P_{total} | Potencia total | kWatt | Ec. 13 |
| P_{min} | Potencia mínima para calentar el interior del dosificador. | Watt | Ec. 18 |
| P_{motor} | Potencia del motor | HP | Ec. 17 |
| P_{trans} | Potencia transmitida | HP | Ec. 17 |
| $r_{carcasa}$ | Radio de carcasa | mm | Ec. 12 |
| $r_{tornillo}$ | Radio de tornillo | mm | Ec. 12 |
| Q_m | Flujo masico (biomasa + portacalor) | Ton/h | Ec. 14 |
| Q_p | Calor requerido para pirólisis | 1,61 MJ/kg | Ec. 4 |
| Q_{total} | Flujo masico total procesado | Kg/s | Ec. 8 |
| T_{HC} | Temperatura de portacalor | °C | Ec 18 |
| T_b | Temperatura de la biomasa | °C | Ec 18 |
| T_{int} | Temperatura interna | °C | Ec 18 |
| T_{amb} | Temperatura ambiente | °C | Ec 18 |
| V_{lineal} | Velocidad lineal | m/s | Ec.7 |

Símbolos con letras griegas

| Símbolo | Término | Unidad SI | Definición |
|-----------------------|---|-------------------------------|-------------------|
| $\rho_{biomasa}$ | Densidad de la biomasa | kg/m^3 | Ec 8 |
| λ | Coeficiente de relleno | 0,125 | Ec. 8 |
| α | Coeficiente de dilatación térmica acero | $9,6 \cdot 10^{-6}/^{\circ}F$ | Ec. 11 |
| ε_{motor} | Eficiencia del motor | % | Ec. 17 |
| ε_{trans} | Eficiencia de transmisión | % | Ec. 17 |
| δ | expansión térmica radial | mm | Ec. 12 |
| λ | Coeficiente fricción del material | 0,4 | Ec. 14 |
| ΔL | Expansión térmica lineal | mm | Ec. 11 |

Introducción.

El departamento de Norte de Santander está ubicado en la región nororiental de Colombia, limita con los departamentos del Cesar y Santander y por el norte limita con Venezuela, por lo que lo hace un eje económico del país[1]. Así también como un gran productor agrícola según el DANE en el reportó una producción de biomasa lignocelulósica de 1.346.876,8 tonelada/año. La biomasa lignocelulósica es considerada un recurso natural abundante geográficamente y diverso. Está incluye: residuos sólidos municipales, cultivos agrícolas, residuos de madera, cultivos energéticos herbáceos y los de rotación corta[2]. La biomasa según investigaciones puede considerarse una forma indirecta de energía solar y una fuente renovable de carbono a través de la fotosíntesis, dado a que las plantas convierten la luz solar y el CO₂ en energía química almacenada, está a su vez puede convertir a través de procesos termoquímicos en productos de base biológica, bioenergía (calor y electricidad), biocombustibles líquidos, productos químicos y otros. Su utilización o remplazo en los combustibles fósiles puede contribuir a una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, generando una disminución del impacto global y el cambio climático, y tal vez la reducción de las importaciones de energía al extranjero [3], [4].

Existen muchas rutas de conversión de biomasa en varias etapas de desarrollo, y se agrupan comúnmente en dos tecnológicas principales: bioquímica (fermentación) y termoquímico que utilizan calor para descomponer la biomasa e incluyen cuatro principales procesos: licuefacción directa, pirólisis, gasificación y combustión. Para este tipo de procesos termoquímicos requiere una conversión de energía, por lo que requiere una aplicación de los principios de ingeniería de la termodinámica, mecánica de fluidos y transferencia de calor, así como diseño de máquinas y mecánica de materiales. Para el proceso de pirólisis rápida de biomasa, se requiere determinar sus condiciones óptimas

de operación y relacionar los rendimientos y composición del producto a estas condiciones, por lo tanto, el diseño del tipo de reactor debe ser evaluados y comparados con los datos publicados existentes[5],[6].

El objetivo de este estudio de investigación es evaluar el diseño del reactor tipo Auger de doble tornillo sinfín a escala de laboratorio para el procesamiento de 2 kg/h de biomasa. Este tipo de reactor cuenta con un potencial de procesamiento y versatilidad en la transformación de una amplia gama de materias prima. como la cascarilla de arroz, cisco de café y el cuesco de palma de aceite, con la finalidad de evaluar la producción de bioaceite y biochar a partir del proceso de pirólisis rápida con diferentes variables de operación, a través de una serie de ensayo como Karl Fischer, TGA, análisis próximo, FT-IR, fluorescencia a los productos con el fin de analizar y comparar con datos de pirólisis rápida de otras investigaciones, con el fin de constatar que ocurra el proceso de pirolisis rápida.

Este documento presenta una revisión de las principales tecnologías empleadas para pirólisis rápida, las ventajas y desventajas de cada una de ellas. También se proporciona una metodología de diseño para reactores Auger y para su efecto el funcionamiento bajo diferentes condiciones de operación a las temperaturas de 550°C y 650°C con sus respectivos rendimientos en los productos de pirólisis, además una caracterización fisicoquímica de estos. Las biomásas empleadas en esta investigación es la cascarilla de arroz, cisco de café y cuesco de palma originales del departamento Norte de Santander, la selección de estas biomásas se debe a que tienen el mayor porcentaje de producción en la zona según el DANE.

Pirólisis rápida de biomasa.

La pirólisis es un proceso termoquímico endotérmico que consiste en descomponer o romper las macromoléculas constitutivas de la biomasa como la celulosa, hemicelulosa y lignina, por la acción del calor y en ausencia de oxígeno, para obtener productos sólidos, líquidos y gaseosos. En este proceso de pirólisis ocurren una serie de reacciones complejas como la deshidrogenación, craqueo y deshidratación de la materia prima de los cuales resultan sus productos con un 10 al 20 % en gases, 15 a 25 % en biochar y 60 a 75 % en bioaceites [7].

Existen diferentes tipos de pirólisis en función de las condiciones de operación, la pirólisis lenta corresponde a un calentamiento lento entre 450 y 850°C su tiempo de residencia de los sólidos puede durar horas obteniendo alto porcentajes de biochar. Entre tanto, la pirólisis rápida se da a temperatura de 550°C, tiempos de residencia de los sólidos en el reactor son cortos, máximos de 5 a 10 segundos y tasas de calentamiento superiores a 100°C/s, para logra rendimientos en la producción de bioaceite que pueden alcanzar el valor del 75% y de biochar del orden de 20 al 30% [8].

En la pirólisis rápida el producto de mayor porcentaje es bioaceite, afectada por variables como velocidad de calentamiento, tiempo de residencia de partículas y gases en el interior del equipo, temperatura y el tamaño de partícula [7]. El aumento en la producción de líquidos se da cuando los tiempos de residencia en el reactor de los gases sean cortos, para evitar las reacciones secundarias a temperaturas en torno a los 550°C y tiempos de residencia del gas en el rango de 5 segundos. En el caso de la presión, se puede decir que cuando la presión aumenta, también aumenta la proporción de coque y CO₂ entre los productos [8]. La velocidad de calentamiento o densidad de flujo de calor está fuertemente determinada por la configuración del reactor o por la transferencia de calor externa y el tamaño de partícula, afecta tanto la composición y rendimiento de productos y es diferencia entre pirólisis lenta y rápida. Una alta tasa de calentamiento aumenta el rendimiento de bioaceite mientras que bajas tasas de temperatura favorecen la formación de producto sólido [9].

1.1 Biomasa.

La biomasa de origen vegetal o lignocelulósica lo definen como un recurso natural renovable, que contiene carbono, hidrógeno y oxígeno con menor cantidad de nitrógeno y azufre; se compone de tres polímeros naturales, que son la lignina, celulosa y la hemicelulosa. Según su origen se puede clasificar en los originados por los cultivos (herbáceos, gramíneos), conocidas como combustibles de primera generación, y los residuos (residuos forestales, industriales y desechos orgánicos), denominados combustibles de segunda generación. [6].

Rangos de temperatura de degradación de la biomasa. La biomasa se degrada a diferentes temperaturas dado por la complejidad de sus componentes, estas temperaturas de degradación son tenidas en cuenta para los diferentes procesos termoquímicos. La celulosa se inicia en el rango de 270 °C con la principal reacción hasta los 360°C, produce principalmente productos volátiles, la producción de coque se da en solo en pequeñas cantidades, las hemicelulosas es un polisacárido complejo, tiene una estructura ramificada, compuesta mayormente por azúcares como la glucosa, xilosas y se caracteriza por su estructura amorfa y poca resistencia son térmicamente las menos estables y comienzan a los 220°C y obtienen rendimientos de coque de alrededor del 30%, por último, la lignina es un polímero aromático se descompone a partir de unos 250 °C. por su estructura compleja estable en un rango de temperatura muy amplio de hasta aproximadamente 470°C [10].

Productos de la pirólisis rápida de la biomasa lignocelulósica. Con el proceso de la pirólisis es posible transformar la biomasa en tres productos diferentes: el producto sólido es carbón o char, el líquido es el alquitrán o bioaceite y producto gaseoso no condensable es utilizable como gas combustible. Adquieren un amplio valor comercial y de múltiples usos en la industria cuando son tratados y transformados en productos como en alcoholes cetonas, ácidos, ésteres, aldehídos, ácidos carboxílicos furanos, compuestos

nitrogenados, anhidroazúcares, hidrocarburos [11],[4]. El biochar es un producto carbonado de origen vegetal tiene la capacidad de mejorar las características de físico-químicas de los suelos y además contribuye con la captura de carbono, restauran el equilibrio natural y fertilidad del suelo, lo que lo hace útil para la mitigación del cambio climático[12].

1.2 Aprovechamiento de las biomásas generadas en el departamento Norte de Santander.



Figura 1.1 .Ubicación de departamento de Norte de Santander. Fuente: Gobernación del Norte de Santander

El departamento Norte de Santander está ubicado en la zona nororiental de Colombia sobre la cordillera oriental según la figura 1,1 presenta un clima tropical suavizado por la altitud y las variaciones del relieve, actualmente es un departamento de gran importancia por ser un puerto seco de economía de materias primas como coque, carbón, electrificadora y frontera con Venezuela [1].

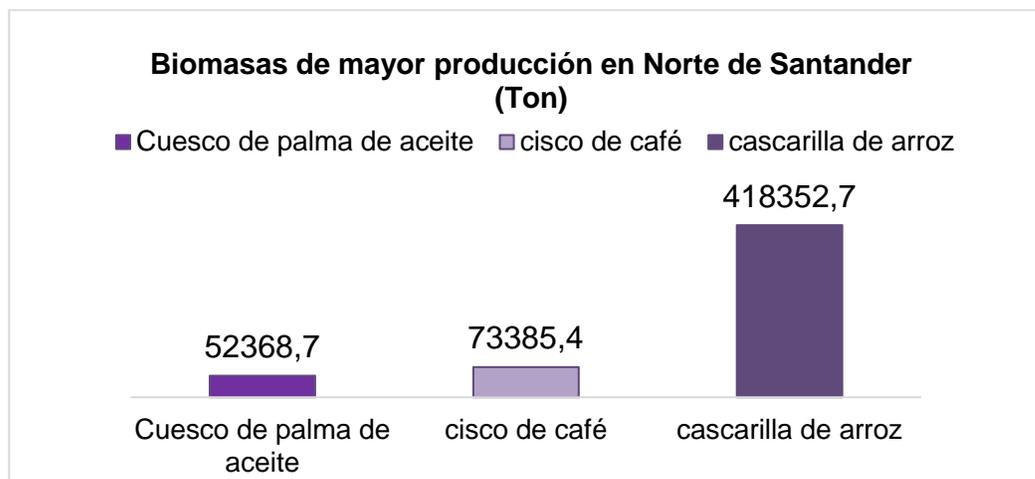


Figura 1.2. Biomasa de mayor producción en el Norte de Santander. Fuente: DANE2019.

Para el año 2019 el DANE reportó una producción de biomasa lignocelulósica de 1.346.876,8 tonelada/año [13], entre las cuales prevalece en el área metropolitana de Cúcuta la cascarilla de arroz, cuesco de palma de aceite, cisco de café y cacao (ver figura 1,2), disponible para ser tratadas y aprovechadas con fines energéticos con los nuevos avances tecnológicos y los procesos termoquímicos como lo es la pirólisis rápida en los reactores Auger de doble tornillo sinfín.



Figura1.3. Biomasa seleccionadas para el proceso de pirólisis rápida en el reactor Auger. Fuente: propia.

Para aprovechar la biomasa en el departamento, se implementará la tecnología Auger en el laboratorio de la universidad Francisco de Paula Santander, con el fin de dar manejo a los residuos agroindustriales (ver figura 1.3) convirtiéndolos en productos de valor

agregado, aumentando la eficiencia económica y encaminar a la región a la economía circular y desarrollo socioeconómico con la búsqueda de una nueva fuente de energía renovable por medio de la obtención de bioaceite y biochar., Para la investigación se seleccionaron tres tipos de biomasa (figura 1.3); cascarilla de arroz, cisco de café y cuesco de palma recolectadas en el área metropolitana de Cúcuta, por facilidad de adquisición

1.3 Tecnologías disponibles en pirólisis rápida para la obtención de bioaceites y biochar a partir de biomasa lignocelulósica agroindustrial.

Esta revisión se centra en el uso de reactores configurados al aprovechamiento de biomasa de origen agroindustrial con altos rendimientos en bioaceites y bajos en biochar.

1.3.1 Reactores de tornillo o de barrena.

Los reactores con transportador de tornillo sinfín (figura 1.4) consta de uno o dos tornillo helicoidal girando en una carcasa cerrada, recubiertas por resistencias que alcanzan hasta los 900°C o los 1000°C las cuales son temperaturas modificadas y controladas al momento de la pirólisis, el sistema de tornillos cumple la función de mezcla y transporte a la vez lo que mejora la transferencia de calor y la velocidad de reacción [14], los rendimientos en este tipo de reactor tiene rendimientos en bioaceite del 50% al 75% y con rangos de temperaturas de los 500° a los 900°C, y rendimientos de biochar de 25% al 50% [15].

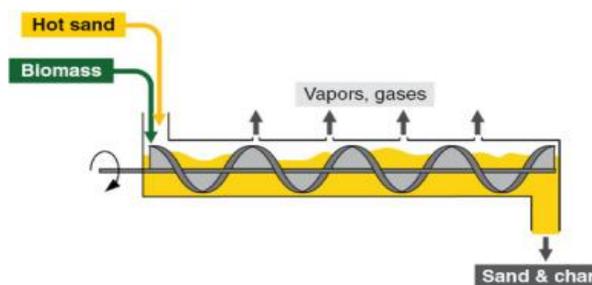


Figura 1.4. Esquema simple de reactor Auger. Fuente: [16].

La materia prima se volatiliza totalmente al pasar por el sistema desprendiendo gases y sólidos, el tiempo de residencia dentro del equipo son controlados por la velocidad del sinfín mejorando el proceso al disminuir las reacciones secundarias, estos equipos tienen doble función al realizar pirólisis lenta y rápida al variar los parámetros de operación [17]. Las principales ventajas de este tipo de reactor que hace que sea una de las tecnologías más relevantes para la pirólisis en la actualidad es controlar la cantidad de flujo masico y el procesamiento de varios tipos de biomasa y diferente granulometría que van de 0,5mm a 7mm, también permite el uso de varios tipos de portador de calor como arena, bolas de cerámica y bolas de acero inoxidable, simplicidad para diseño y operación, menor consumo de gas inerte, por otro lado las desventajas de este tipo de reactor es los taponamientos, dificulta de transferencia de calor a gran escala [18]. En la figura 1.4 se observa un esquema simple de reactores Auger.

1.3.2 Reactores de lecho fluidizados burbujeantes.

Los pirolizadores de lecho fluidizado burbujeantes (figura 1.5) tienen un rendimiento en líquido de 70% al 75% en peso, el tamaño máximo de partícula para este tipo de equipos es de 2 a 3 mm para lograr tasas de calentamiento alto, el caudal del gas de fluidificación controla el tiempo de residencia de los sólidos y vapores que van de 5 a 15 segundos, empleando de 7 a 13 m³/h de gas nitrógeno.

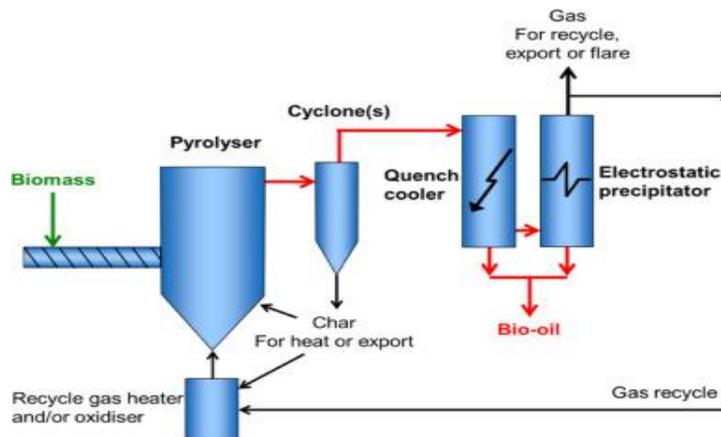


Figura 1.5. Esquema simple de reactor de lecho burbujeante. Fuente: [16].

El bioaceite producido es contaminado por el biochar por lo que requiere separación por varios ciclones para ser filtrado. Como ventajas presenta una distribución

uniforme de temperatura, el catalizador se reemplaza o regenera fácilmente, de desventajas tiene el riesgo de fusión de cenizas y el tamaño de partículas limitado[19].

1.3.3 Reactor de lecho fluidizados circulantes y lechos transportados.

El funcionamiento de este tipo de reactores (figura 1.6) es muy similar al anterior, excepto que el contenido de biochar en el bioaceite puede mayor, y es adecuado para caudales muy grandes, también es empleado por la industria petroquímica, se han reportado en bioaceite rendimiento del 60% al 70% y en bichar de 30% al 45% con temperaturas de operación desde los 500°C empleando biomásas diferente tipo (maderas, paja de trigo, cascarilla de arroz).

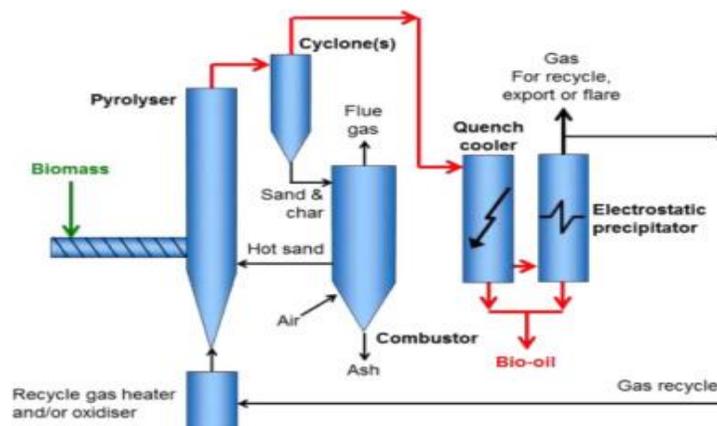


Figura 1.6 Esquema de reactor lecho circulante. Fuente: [16].

Las ventajas de este tipo de reactores presentan una mezcla uniforme de partículas que van de 0,3mm a 5mm de tamaño, con gradiente de temperatura uniformes, las desventajas para el proceso de pirólisis en estos equipos es que requiere bombeo y presenta caída de presión con tiempos de residencias de gases que 4 a 7 segundos[20].

1.3.4 Reactor de cono rotatorio.

Este diseño de reactores de cono rotatorio (figura 1.7), se basa en la mezcla intensa e instantánea de la biomasa con las partículas inertes calientes en espiral hacia arriba a lo largo de la pared del cono requiriendo gran cantidad de gas portador. Se han reportado temperaturas desde los 550°C a 700°C y presión de vacío a 0,08 MPa con rendimientos del 54,83% al 70% en rendimiento en bioaceites y con alta calidad.

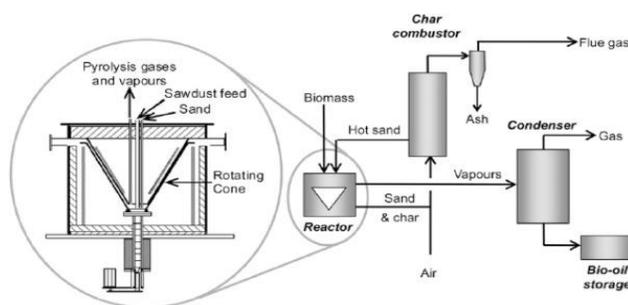


Figura 1.7. Esquema del reactor de cono giratorio. Fuente:[16]

En la figura 1.7 se observa un esquema simple del reactor del cual consiste un cono dentro del reactor, por la parte de arriba ingresa la biomasa y la arena, el tamaño de partícula de 1mm a 2mm para mayor efecto de transferencia de calor, como desventaja es el alto consumo de energía, el tiempo de residencia de los gases van de 0,5 a 7 segundos máximo[21].

1.3.5 Reactor ablativo.

Este tipo de reactor (figura 1.8) presenta los rendimientos más altos en bioaceite por su alta transferencia de calor cuando se desliza la biomasa sobre la superficie, la velocidad e reacción es controlada por la presión y la temperatura, además no requiere gas inerte.

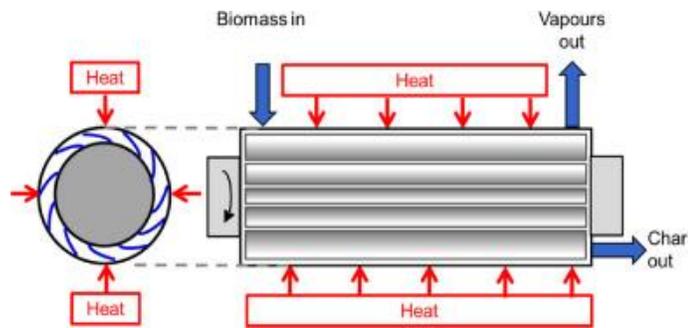


Figura 1.8. Esquema simple del reactor ablativo. Fuente: [16].

Las investigaciones realizadas han obtenido rendimientos hasta el 75% en bioaceite con temperaturas desde los 550°C para pirolisis de maderas, pajas de trigo y entre otras, con tamaños de partícula hasta de 20mm, con tiempos de residencia máximos de 20 segundos. Como desventaja de este tipo de reactor es el alto costo de ampliación, limitación de la velocidad de reacción por la transferencia de calor, en la figura 1.8 se observa un esquema simple del reactor de ablativo.

1.3.6 Reactor de lecho fijo.

Este tipo de reactor (figura 1.9) son más utilizados a nivel de laboratorio por su control sencillo, las temperaturas en investigaciones se han reportados desde los 300°C a los 800°C, el calor es suministrado por una fuente externa y rendimientos de bioaceite del 20%. La ventaja de este equipo es su fácil limpieza, los tamaños de partícula van de 1 a 3,5mm, con tiempos de residencia de gases hasta 7 segundos [20].

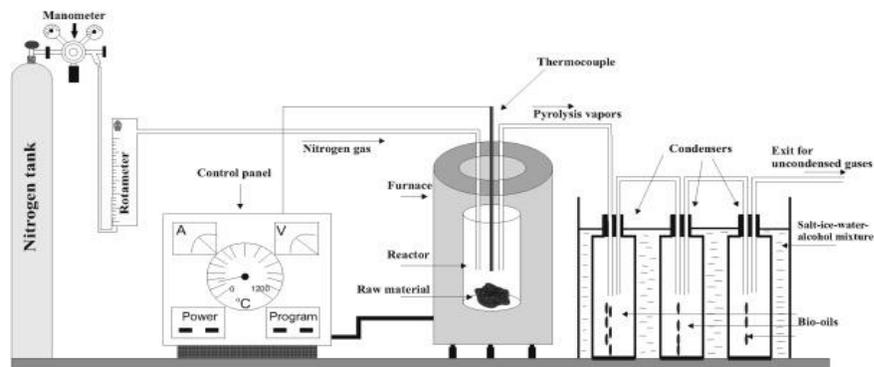


Figura 1.9. Esquema de reactor de lecho fijo. Fuente: [22].

En la tabla 1,1 se describe las características generales de los reactores de pirólisis rápida para producción de bioaceite.

Tabla 1.1 Características generales de los reactores de pirólisis rápida.

| Reactor | Rendimiento de bioaceite % | Requisito de gas inerte | Complejidad operación | Estado o escala |
|--------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------|
| Lecho fluidizado | 75 | Alto | Medio | Comercial |
| Cono giratorio | 70 | Bajo | Alto | Demostración |
| Ablativo | 75 | Bajo | Alto | laboratorio |
| Tornillo o barrena | 60 | Bajo | Medio | Piloto |
| Vacío | 60 | Bajo | alto | ninguno |

Fuente:[16]

Los caudales de materia prima a nivel comercial equivalen de 2 a 20 ton/h, demostración de 200 a 2000 kg/h, piloto 20 a 200 kg/h y laboratorio de 1 a 20 kg/h.

Metodología para el diseño y construcción del reactor de doble tornillo sinfín para la pirólisis rápida de biomasa lignocelulósica agroindustrial.

Los transportadores sinfín se han convertido en el medio más frecuentemente usado en la industria por el hombre para transportar diferentes materias primas, convirtiéndose en la tecnología más eficientes y de bajo costo y su versatilidad a la hora de operar de manera horizontal o inclinado y permitiendo varias salidas y entradas y con control de flujo másico, lo que hace una tecnología apetecible para los procesos de pirólisis [18],[23].

El reactor tipo Auger consta de dos tornillos helicoidales continuos de paso constante, su rotación es accionada por un motor eléctrico a través de un reductor de velocidad, los tornillos transportan y mezclan la biomasa con el portacalor y su tiempo de residencia es controlada por los rpm de los tornillos. En la figura 2.1 se observa el equipo que cuenta con dos tolvas las cuales es para almacenar biomasa y el portacalor con su respectivo tornillo transportador, conectadas al reactor que lo conforman los dos tornillos helicoidales enlazados entre sí, cubiertos por una carcasa en forma de corazón lo cual evita los atascamientos. El condensador se encuentra dentro un refrigerador comercial a -10°C , el cual es removible para limpieza.

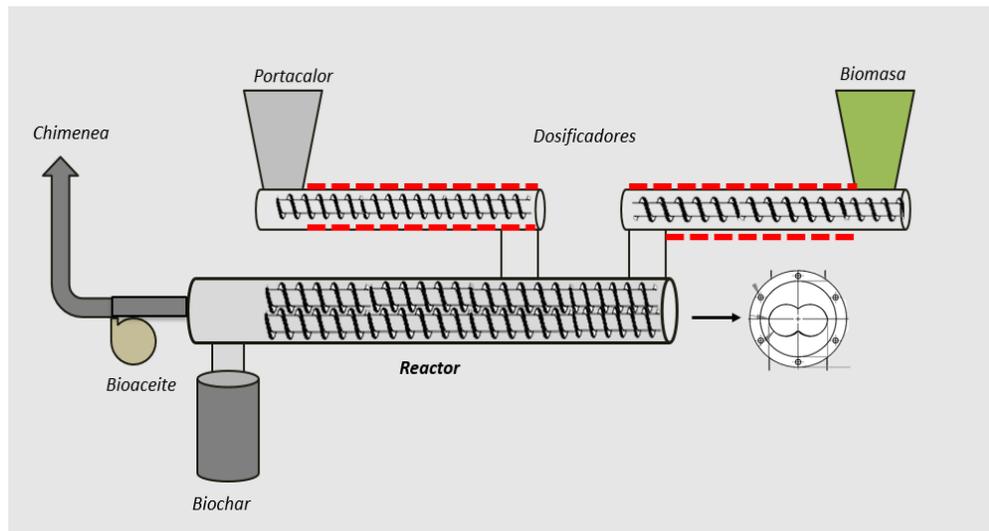


Figura 2.1. Reactor Auger de doble tornillo sinfín. Fuente: propia.

2.1 Metodología de diseño para reactor.

Para los cálculos de los tornillos sinfín se basaron en la guía de los catálogos CEMA (Conveyor Engineering & Manufacturing) y teniendo como base las medidas comerciales del acero inoxidable[24].

Paso 1. Principales parámetros del diseño.

Para diseñar adecuadamente un tornillo sinfín se requiere conocer y tener claros los siguientes parámetros.

Flujo requerido: El diseño del reactor debe tener una capacidad de procesamiento de 2 kg/h ó $0,706 \text{ ft}^3/\text{h}$, $0,002 \text{ m}^3/\text{h}$ de biomasa.

Tipo de material: las biomásas de cascarilla de arroz, cisco de café y el cuesco de palma que transportara el reactor son tipo fibroso y corrosivas, que tienden a formar atascamientos a altas temperaturas.

Distancia de los tornillos sinfín: los tornillos sinfín no tienen una distancia limitada, lo que permite diseñar según la necesidad requerida para un determinado proceso, para los procesos de pirólisis rápida varía la distancia, algunos diseños van de 50 cm a 1,50 cm.

Paso 2. Identificar el material.

Según el catálogo CEMA, el tipo de material que se mueve dentro del tornillo tiene un efecto significativo en el tamaño y el tipo de transportador, en las tablas A y B del CEMA caracterizan el material para evitar atascamientos dentro de este, en la tabla 2,1 se identifica las biomásas según las recomendaciones.

Tabla 2.1. Identificación de las biomásas según CEMA.

| Identificación del tipo de material según la tabla A y B del catálogo CEMA | | | |
|--|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Biomásas | Cascarilla de arroz | Cisco de café | Cuesco de palma |
| Densidad | 20 lb/ft ³ | 33 lb/ft ³ | 33 |
| Tamaño partícula | 0,5 a 10mm (irregular y fibroso) | 1 a 7mm (irregular y fibroso) | 1 a 7mm (irregular y fibroso) |
| Fluidez | lento | lento | lento |
| Agresividad | extremadamente abrasivo | extremadamente abrasivo | extremadamente abrasivo |
| Otras características | Acumula y endurece | Acumula y endurece | Acumula y endurece |

Fuente: propia.

Esta identificación de material en las biomásas se observa que su densidad va desde las 20 lb/ft³ hasta 33 lb/ft³, los tamaños de partícula que equipo puede manejar en óptimas condiciones van de 0,5 a 10mm tipo fibroso, su fluidez dentro del tornillo es lenta y tienden acumularse y a endurecerse.

Paso 3. Determinar la capacidad, el tamaño y la velocidad del tornillo.

Velocidad: para los tornillos sinfín de paso variado o vuelos de cinta, se debe usar una capacidad requerida equivalente, con base en los factores de la Tabla C del catálogo de CEMA ubicada en el anexo A.

$$C_{eq} = C_{req} * CF_1 * CF_2 * CF_3 = ft^3/h \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde:

C_{req} = capacidad requerida (biomasa + portador)

CF_1 = capacidad del paso del tornillo (corto).

CF_2 = porcentaje de carga, según el tipo de vuelo del tornillo.

CF_3 = capacidad de llenado con paso inverso de 45°

Para calcular el paso 3 se debe calcular primero las dimensiones del reactor y la capacidad requerida (flujo masico de biomasa + flujo masico del portacalor). Para completar la ecuación 1.

2.1.1 Cálculos geométricos del tornillo sinfín del reactor.

En general la dimensión del diámetro en los tornillos sinfín dependen del tipo de material que se a transportar, donde la relación para los materiales homogéneos, el diámetro del tornillo será al menos 12 veces mayor al diámetro del tamaño partícula o pedazos a transportar, según el catálogo CEMA.

El diámetro interno del tornillo es equivalente a 12 veces el tamaño de la partícula, se aclara que 2,3 mm es el tamaño máximo de partícula promedio de la mezcla de biomasa y portacalor empleada en la mayoría de las investigaciones de pirólisis rápida y también teniendo en cuenta las medidas comerciales del acero inoxidable.

$$D_{int} = \text{tamaño de partícula} \times 12 = mm \text{ (Ecuación 2)}$$

$$D_{interno} = 2,3 \times 12 = 27,6mm.$$

El paso de los tornillos sinfín es igual al diámetro interno, según el tipo de material a transportar, por recomendaciones del fabricante se tomo $\frac{1}{2}$ para los tornillos alimentadores y $\frac{2}{3}$ para el tornillo mezclador del reactor, el diámetro del tornillo se aproxima a 28mm por fabricación. Reemplazando tenemos la ecuación 3 para calcular el paso.

$$P_{paso} = D_{int} \text{ (Ecuación 3).}$$

$$P_{paso} = \frac{2}{3} \times 27,6 = 18mm$$

El diseño del tornillo sinfín del reactor se realizó de paso variado para transportar y mezclar las biomásas con diferentes densidades y evitar atascamientos por las altas temperaturas dentro del reactor. En la tabla 2.2 se resumen las dimensiones de los tornillos transportadores.

Tabla 2.2. Dimensiones de los tornillos sinfín.

| Dimensiones de los tornillos sinfín (mm) | | | |
|--|---------|------------|---------|
| Datos | Biomasa | Portacalor | Reactor |
| Diámetro interno | 32 | 28 | 28 |
| Diámetro externo | 46 | 43 | 69 |
| Longitud de paso | 16 | 16 | 18 |
| longitud de transporte | 608 | 700 | 580,5 |
| Espesor de paso | 2 | 2 | 2 |
| Numero de paso | 38 | 44 | 41 |

Fuente: propia.

En el anexo A, se encuentran los planos de los tornillos dosificadores y reactor.

2.1.2. Cálculo de caudal volumétrico del reactor.

Para realizar los cálculos de la cantidad de portacalor requerido para el sistema se empleó los datos de la investigación realizada [25]. Donde Q_p es el calor requerido para el proceso de pirólisis rápida que incluye la energía calorífica sensible para llevar la biomasa a la temperatura de reacción, más la energía requerida para iniciar y completar las reacciones de pirólisis, utilizando un valor de 1,61 MJ/kg para Q_p , aportado por el portacalor. Se procede a calcular la cantidad de portacalor que se requiere para 2 kg/h de biomasa con la siguiente expresión. Tomando una máxima temperatura de reacción de 700°C, y C_p del portacalor a 500 J/kg.K.

$$\dot{m}_{Hc} = \frac{Q_p * \dot{m}_b}{C_{pHc} * (T_{Hc\ Inicial} - T_{Hc\ Final})} \quad (\text{Ecuación 4}).$$

Para 2 kg/h de biomasa se calculó como máximo 64 kg/h de portacalor, un valor aproximado que fueron utilizados en las investigaciones de [26], [27]. En la tabla 2.3 se suman el caudal volumétrico de cada biomasa más el del portacalor.

Tabla 2.3. Caudales volumétricos totales.

| Caudal volumétrico total (ft ³ /h) | |
|---|----------------------|
| Biomasa | Portacalor + biomasa |
| Cascarilla de Arroz | 1,05 |
| Cisco de Café | 0,71 |
| Cuesco de palma de aceite | 0,54 |

Fuente: propia.

Completando la ecuación 1 se toma la cascarilla de arroz por su mayor caudal volumétrico, se tiene:

$$\text{Capacidad Equivalente ft}^3/\text{h} = 1,05 \times 1,5 \times 1,57 \times 1,00 = 2,472 \text{ ft}^3/\text{h}.$$

La capacidad equivalente para el sistema según la ecuación 1 $2,472 \text{ ft}^3/\text{h}$ y se procede a hallar la velocidad del tornillo con la siguiente ecuación 5. (la tabla H se encuentra en el anexo A)

$$N = \frac{\text{Capacidad equivalente } \text{ft}^3/\text{h}}{1 \text{ rpm capacidad } \text{ft}^3/\text{h} \text{ de la tabla H}} \quad (\text{Ecuación 5}).$$

$$N = \frac{2,472 \text{ ft}^3/\text{h}}{0,0412 \text{ ft}^3/\text{h}} = 60 \text{ rpm}$$

La velocidad máxima recomendada para el tornillo sinfín para la capacidad equivalente de $2,472 \text{ ft}^3/\text{h}$ es de 60 rpm.

2.1.3 Tiempo de residencia de la mezcla.

Los productos de pirólisis no todos tienen el mismo tiempo de residencia, debido a que algunos compuestos pueden pasar al estado gaseoso y ser arrastrados por el flujo del gas de arrastre, por tal motivo se toma que el tiempo de residencia es el tiempo en el sólido tarda en recorrer el largo del tornillo de acuerdo a la velocidad de giro [28], [29]. La ecuación 6 expresa el tiempo de residencia en función de la velocidad de giro para el largo total.

$$T_{res} = \frac{L_{\text{tornillo}}}{V_{\text{lineal}}} = s \quad (\text{Ecuación 6}).$$

Los valores de los tiempos de residencia calculados con la ecuación 6, serán clave para analizar los casos que se exponen más adelante en los experimentos a diferentes velocidades, dado a que se espera que las reacciones de pirólisis ocurran dentro de estos rangos.

La V_{lineal} del tornillo se calcula con los rpm y el paso del tornillo, los rpm utilizados en los experimentos son de 20 rpm, 30 rpm, 40 rpm. La velocidad lineal se obtiene mediante la ecuación 7, según la investigación [30]. Los resultados se reflejan en la tabla 2.4.

$$V_{\text{lineal}} = \frac{P_{\text{paso}}(m) * \text{rpm}}{60} = m/s \quad (\text{Ecuación 7}).$$

2.1.4 Cálculo del flujo masico total.

Para interés de esta investigación se relaciona los cálculos de flujo de las biomosas para las distintas velocidades de giro. La cantidad de material que circula a través del reactor se calcula con la ecuación 8.

$$Q_{total} = \rho_{biomasa} * V_{lineal} * A_{relleno} * k_{dis} \quad (\text{Ecuación 8}).$$

Para calcular el área de relleno total de la carcasa ($A_{relleno}$), lo que nos permitirá saber el área que ocupa el material transportado, teniendo en cuenta que los tornillos tienen un eje por lo que se debe restar el volumen que ocupa [23],[31]. Se calcula con la ecuación 9. Donde $\lambda = 0,125$ es el coeficiente de relleno obtenido del catálogo CEMA, según el tipo de material y $k_{dis} = 1$ corresponde al coeficiente de disminución por el ángulo de inclinación del tornillo.

$$A_{relleno} = \lambda * Ad \quad (\text{Ecuación 9}).$$

Ya que la capacidad de relleno esta intervenida por los dos tornillos, por lo tanto, el área disponible está calculada por la ecuación 10

$$Ad = \left(2 * \left(\frac{\pi Dex^2}{4} \right) - 2 * \left(\frac{\pi Dint^2}{4} \right) \right) \quad (\text{Ecuación 10}).$$

Dex = diámetro externo del tornillo

$Dint$ =diámetro del eje del tornillo.

Remplazando:

$$Ad = \left(2 * \frac{\pi 0,069^2}{4} - 2 * \frac{\pi 0,028^2}{4} \right) = 6,25 * 10^{-3} m^2$$

Ahora completando la ecuación 9 tenemos que el área de relleno es de: $7,80 * 10^{-4} m^2$.

Los resultados con base en el modelo plasmado en las ecuaciones 1 a 9 fueron recopilados y resumidos en la siguiente tabla 2.4.

Tabla 2.4. Resultados de Velocidad lineal, tiempo de residencia, flujo masico

| Datos | | RPM | | |
|------------------------------|---------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | 20 | 30 | 40 |
| Velocidad lineal (m/s) | | $6 * 10^{-3}$ | $9 * 10^{-3}$ | 0,012 |
| Tiempo de residencia (s) | | 97 | 65 | 48 |
| Flujo masico total (Kg/s) | Cascarilla de arroz | $5,85 * 10^{-4}$ | $8,76 * 10^{-4}$ | $1,17 * 10^{-3}$ |
| | Cisco de café | $1,46 * 10^{-3}$ | $2,20 * 10^{-4}$ | $2,93 * 10^{-3}$ |
| | Cuesco de palma | $5,6 * 10^{-3}$ | $8,48 * 10^{-3}$ | 0,0113 |

Fuente: propia.

Se puede observar que el flujo masico varía de acuerdo con la velocidad lineal del tornillo y a su vez el tiempo de residencia de la biomasa dentro del reactor disminuye. El flujo masico total entre las biomásas es diferente, dado a que cada una de estas tiene diferentes densidades.

Paso 4. Cálculo de la expansión térmica lineal y radial.

Para el transporte de material a altas temperaturas la dilatación térmica debe tenerse en cuenta para proporcionar soportes de extremo del canal que permita el movimiento cuando ocurra expansión o contracción del tornillo. La expansión de la longitud del tornillo por la temperatura de operación se calcula con la ecuación 11. Donde α es el coeficiente de dilatación térmica del acero (304/316) es de $9.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ según el catálogo CEMA.

$$\Delta L_{lineal} = L(T_1 - T_2) * \alpha = mm \text{ (Ecuación 11).}$$

$$\Delta L = 580,5(1292 - 77)^{\circ}\text{F} * 9,6 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{F} = 7mm.$$

La expansión térmica radial será la tolerancia que existirá entre la carcasa y el tornillo sinfín cuando se expande mediante la adicción de calor, será calculada mediante la siguiente expresión.

$$\delta = 2\pi(r_{carcaza} - r_{tornillo}) * \alpha (T_f - T_i) \text{ (Ecuación 12).}$$

$$\delta = 2\pi(39,5mm - 34,5mm) * 9,6 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{F} (1292 - 77)^{\circ}\text{F}$$

$$\delta = 0,373mm$$

Para una máxima temperatura de 700°C se tiene una dilatación de radial de 0,373mm.

Paso 5: Cálculo de potencia requerida.

La potencia total requerida, es la suma de la potencia requerida para mover material, la potencia requerida para mover el tornillo sin carga y la potencia del tornillo con inclinación. Lo anterior se adjunta en la siguiente ecuación (Departamento de ingeniería mecánica, 2007)según [32],[33].

$$P_{total} = P_H + P_N + P_{ST} = kWatt \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde P_H es potencia para mover el material, P_N es potencia para mover el tornillo y P_{ST} potencia del tornillo con inclinación.

- **Cálculo de la potencia requerida para mover el material**

La potencia requerida para transportar el material se calcula con el flujo másico Q_m (ton/h), por el coeficiente de fricción del material y la gravedad. Según la ecuación 14

$$P_H = \frac{Q_m * L * \lambda * g}{3600} = kW \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$P_H = \frac{0,066 \text{ ton/h} * 0,5805 \text{ m} * 0,4 * 9,81 \text{ m/s}^2}{3600} = 4,1103 * 10^{-6} kW$$

Se tomo un alto flujo másico con el fin de sobredimensionar el equipo con el objetivo se asegurar los cálculos, el coeficiente de fricción se tomó de la investigación [32].

- **Cálculo de la potencia requerida para mover el tornillo.**

Para determinar la potencia requerida del tornillo se expresa en metros con la ecuación 15.

$$P_N = \frac{D * L}{20} = kW \quad (\text{Ecuación 15}).$$

Remplazando se tiene:

$$P_N = 8,12710^{-5}kW.$$

- **Cálculo de la potencia requerida para la inclinación del tornillo**

Para el caso, la potencia requerida para la inclinación del tornillo, no requiere por que no existe inclinación, por lo tanto:

$$P_N = 0 \quad (\text{Ecuación 16}).$$

Completando la ecuación 13 se obtiene:

$$P_{total} = 4,1103 * 10^{-6} + 8,127 * 10^{-5} + 0 = 8,53803 * 10^{-5}kW.$$

- **Elección del motor y cálculo de la potencia transmitida los tornillos sinfín.**

Los tiempos de residencia máximos fueron de 97 segundos a 20 rpm, por recomendaciones mecánicas para la elección del motor se recomienda una caja reductora para que el giro de salida del equipo esté dentro del rango. Suponiendo la eficiencia de transmisión sea de 65% y la eficiencia del motor sean del 75% respectivamente[34],[28]. Se opta por 3HP para cumplir las condiciones de sobredimensionamiento, lo que permita transmitir una potencia al tornillo superior a la requerida. De acuerdo con lo anterior, se calcula la potencia transmitida a los tornillos con la ecuación 15.

$$P_{trans} = P_{motor} * \varepsilon_{motot} * \varepsilon_{tra} \quad (\text{Ecuación 17}).$$

$$P_{trans} = \frac{1}{3} HP * 0,65 * 0,75 = 0,1625 HP$$

De acuerdo al resultado de la ecuación 17 se puede evidenciar que la potencia transmitida a los tornillos es satisfactoria.

Paso 6. Balance de energía del sistema de calentamiento.

El sistema de calentamiento en esta investigación se realiza en el tornillo transportador del portacalor, por medio de resistencias eléctricas. La temperatura máxima de interés es de 700°C, a partir de este valor se realiza el balance de energía con la ecuación 18, tomando las dimensiones del tornillo transportador y los coeficientes de convección y conductividad del aire y del acero. La ecuación 16 se tomó de [30], El proceso de calentamiento del reactor se da, cuando se inicia calentando el tornillo transportador del portacalor a una

temperatura mayor a la del proceso de pirólisis, para luego hacer recirculación por el sistema hasta llegar a la temperatura deseada de pirólisis en el reactor.

$$P_{min} = \frac{T_{int} - T_{amb}}{\frac{1}{2\pi r_2 + L + h_{aire}} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L K_{acero}}} = Watt \quad (\text{Ecuación 18}).$$

Donde:

P_{min} = potencia mínima para calentar la pared interior del transportador en Watt.

T_{int} = Temperatura interna de la pared del tubo transportador, 700°C

T_{amb} = Temperatura ambiente, 25°C

r_1 y r_2 = radio interno y externo, m.

h_{aire} = coeficiente de convección del aire, (10 Watt/m²K)

K_{acero} = coeficiente de conductividad térmica del acero inoxidable, (50,2 Watt/m²K), 25°C.

Reemplazando valores en la ecuación 16, se obtiene:

$$P_{min} = 72,60 Watt \approx 73 Watt$$

Por lo tanto, para llevar el interior de tornillo transportador a 700°C, se requiere de una potencia mínima de 73 Watt, valor que es alcanzable con resistencia eléctricas.

2.2 Pruebas de calibración de flujos de biomasa y portacalor en los tornillos dosificadores.

Para realizar el proceso de pirólisis se requiere conocer la cantidad de flujo que lleva cada frecuencia a la que se va a operar el equipo. Para la biomasa se tomó de 5kg a 10kg y de portacalor se tomó hasta 35kg de bolas de acero. Para cada flujo se hace la respectiva variación de velocidad angular del tornillo dosificador. En la figura 2.2 se observa la calibración del portacalor (kg/h vs.Hz) para el prueba de calibración se tomó como tiempo límite 60 minutos.

Nota: La serie 1 corresponde a valores distintos de velocidad angular entre el dosificador y el reactor y la serie 2 a valores iguales entre las velocidades angulares del dosificador y el reactor.

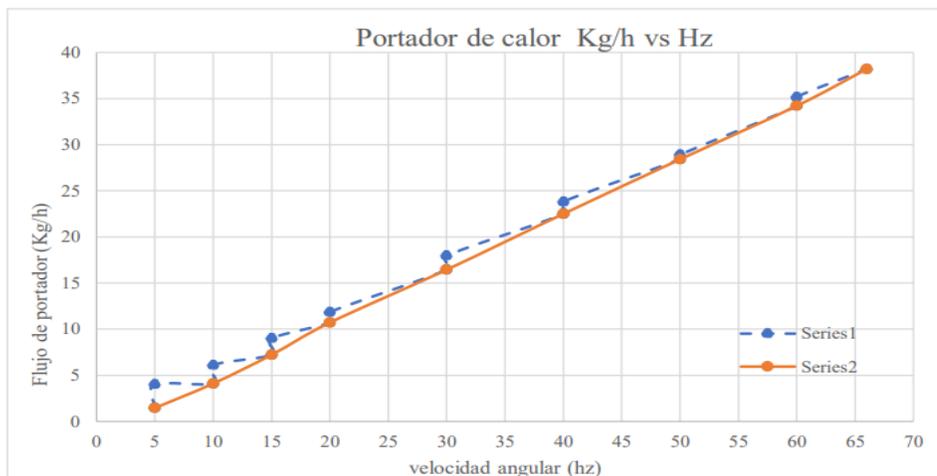


Figura 2.2. Calibración del portacalor a diferentes velocidades. fuente: Manual del reactor auger.

Para la calibración de la biomasa se realizó el procedimiento para cada una, el tiempo límite también fue de 60 minutos. En la figura 2.3 se realiza la calibración de la cascarilla de arroz donde a 20 Hz se obtiene una dosificación de 2 kg/h.

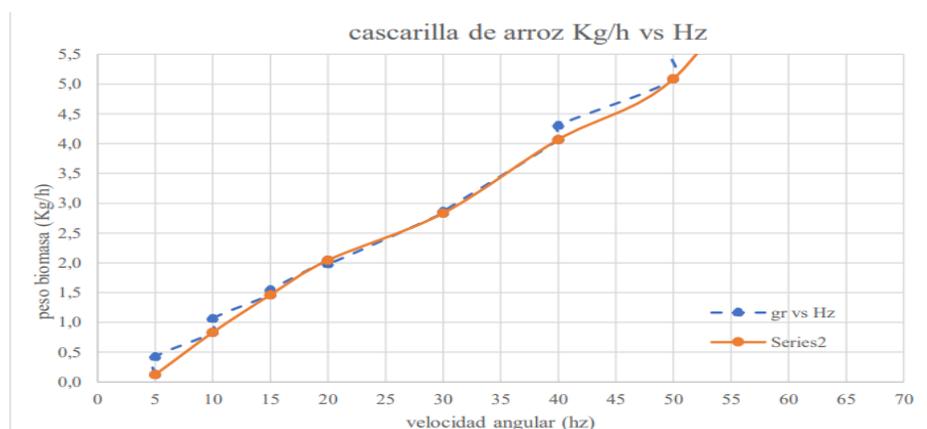


Figura 2.3. calibración de la cascarilla de arroz. Fuente: Manual del reactor Auger

Para la biomasa de cisco de café de la figura 2.4 se observa que a los 30 Hz se obtiene la dosificación de los 2 kg/h.

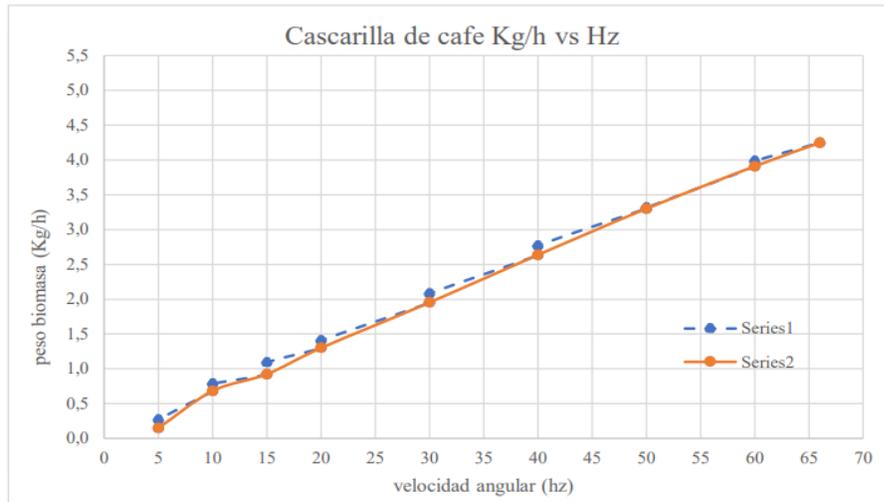


Figura 2.4. Calibración del cisco de café. Fuente: Manual de reactor auger.

Para el cuesco de palma de aceite de la figura 2.5, obtuvo a tan solo 15Hz para transportar los 2 kg/h de la tolva hasta el reactor.

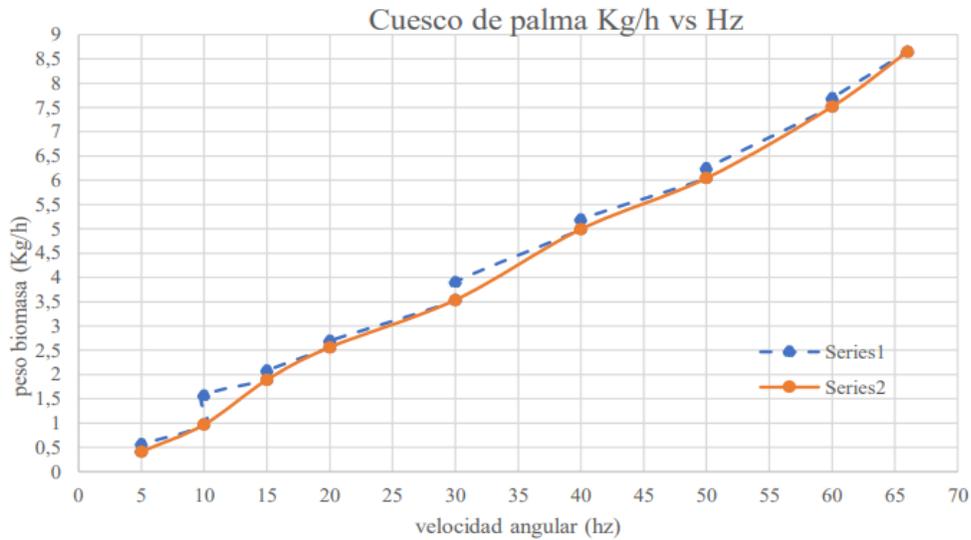


Figura 2.5. Calibración del cuesco de palma. Fuente: Manual del reactor Auger.

2.3 Diseño de tolva de almacenamiento de biomásas.

Para el diseño de tolva de almacenamiento de biomasa se requiere su respectivo análisis de la fricción del material dentro de la misma, las presiones perpendiculares que se presentan en las paredes inclinadas tomando las condiciones iniciales para el dimensionamiento del sistema. Para ello se analizaron experimentalmente en el laboratorio TAYEA la prueba de embudo a cada biomasa (ver figura 2.6) para conocer al ángulo de rozamiento interno para conocer el ángulo de fricción.



Figura 2.6. Prueba de embudo para las biomásas. Fuente: propia.

Los datos obtenidos de las pruebas de embudo, son recopiladas en la tabla 2.5 para cada biomasa.

Tabla 2.5. Ángulo de rozamiento interno calculado mediante la prueba de embudo

| Ángulo de rozamiento interno | |
|------------------------------|--------|
| Cascarilla de arroz | 43.6° |
| Cisco de café | 41.3° |
| Cuesco de palma de aceite | 38.3°. |

Fuente: [35]

Para los sistemas de dosificación de biomasa se consideró una tolva cónica o truncada con el fin de evitar los atascamientos, al proporcionar un área de salida del material mucho más amplia y de tal forma mejorar la distribución de la biomasa dentro del dosificador (ver figura 2.7) [36].

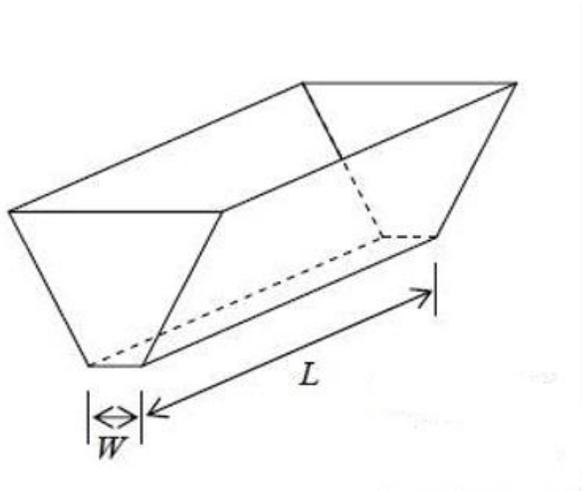


Figura 2.7. Tolva de pirámide truncada con salida simétrica. Fuente [36].

Los cálculos del sistema de dosificación de la biomasa que comprende las dimensiones de la tolva y tornillo transportador con sistema de calentamiento están desarrollados la estudiante de ingeniería mecánica de la universidad francisco de Paula Santander, Valentina Di Donato, con la tesis de pregrado “Evaluación térmica de dosificador de tornillo sinfín con suministro de biomasa, a partir de su diseño y modelado cinético”.

El diseño mecánico, análisis termodinámico, fue desarrollado por los estudiantes Nixon Contreras y Camilo Niño estudiantes de ingeniería mecánica con la tesis “Diseño y análisis termodinámico de un reactor tipo auger para el procesamiento de biomasa a escala de laboratorio” de la Universidad Francisco De Paula Santander. Los planos y manual de operación del reactor Auger elaborado por Anderson Ardila y Nixon Contreras.

2.3 Laboratorio del reactor Auger en la universidad francisco de paula Santander.

La universidad francisco de paula Santander se adecua un área en el laboratorio CIMAC de 9m de largo por 7m de ancho con una altura de 4,5 m, donde su infraestructura fue remodelada con el objetivo de presentar óptimas condiciones para la puesta en marcha y funcionamiento del equipo Auger (figura 2.8).



Figura 2.8. Laboratorio de pirólisis de biomasa en CIMAC-UFPS. Fuente: propia.

En la figura 2.8 la distribución del laboratorio cuenta con un área de datos, almacenamiento de materias primas, molino, reactor Auger, zona de limpieza y producto final, cuenta con una secuencia en forma de L, que facilita el desplazamiento y operación dentro del laboratorio.

Rendimientos y caracterización del bioaceite y biochar generado en la planta piloto a diferentes condiciones de operación y tipos de biomasa

Para la obtención de los productos de pirólisis rápida del equipo Auger se realizó por diseño factorial para la temperatura de 550°C (ver tabla 3.2). Aplicada a 9 muestras con los diferentes parámetros de operación (ver tabla 3,1) para cada biomasa (cascarilla de arroz, cisco de café y cuesco de palma) para un total 27 muestras.

Tabla 3.1. Parámetros de operación para pirolisis a 550°C.

| Parámetros de operación para pirolisis a 550°C | |
|--|--|
| Temperatura | 550°C |
| Flujo de biomasa | 2 kg/h |
| Tipo de biomasa | Cascarilla arroz, cisco de café, cuesco de palma |
| Velocidad del reactor | 20, 30, 40 rpm |
| Relación portacalor / biomasa | 1:12, 1:15, 1:18 |

Fuente: propia

Según la tabla 3.3, para cada tipo de biomasa (cisco de café, cuesco de palma de aceite y cascarilla de arroz) se sometieron al proceso de pirólisis a 9 ensayos los cuales están divididos a 20, 30 y 40 rpm de velocidad del reactor y cada uno cuenta con tres tipos de relación de portacalor que van de 1:12, 1:15 y 1:18, en un orden aleatorio.

Tabla 3.2. Diseño factorial para pirolisis rápida de 550°C para cada tipo de biomasa.

| Diseño factorial para pirolisis rápida de 550°C | | |
|--|------------------------------|--|
| N° de ensayo | Velocidad del reactor | Relación de portacalor /biomasa |
| 1 | 30 | 1:18 |
| 2 | 20 | 1:15 |
| 3 | 20 | 1:18 |
| 4 | 20 | 1:12 |
| 5 | 30 | 1:15 |
| 6 | 40 | 1:15 |
| 7 | 40 | 1:12 |
| 8 | 40 | 1:18 |
| 9 | 30 | 1:12 |

Fuente: propia

Para las pruebas de 650°C se basó en los mejores rendimientos obtenidas en las pruebas de 550°C, por lo tanto, se aumentó la temperatura y la cantidad de portacalor. las variables para cada biomasa fueron las mismas que están especificadas en la tabla 3,3. Las pruebas se realizaron por duplicado para cada biomasa.

Tabla 3.3. Parámetros de operación para pirolisis a 650°C

| Parámetros de operación para pirolisis a 650°C | |
|---|--|
| Temperatura | 650°C |
| Flujo de biomasa | 2 kg/h |
| Tipo de biomasa | Cascarilla arroz, cisco de café, cuesco de palma |
| Velocidad del reactor | 30 rpm |
| Relación portacalor / biomasa | 1:30 |

Fuente: propia

3.1 Procedimiento.

Para realizar el proceso de pirólisis rápida de las diferentes biomásas se le mide la humedad la cual debe estar por debajo de 8%[37], Previamente el equipo debe haberse llevado a 550°C y haber recirculado varias veces por el sistema completo, una vez obtenida la temperatura en el reactor se realiza las verificaciones de las tolvas, los rpm de los tornillos dosificadores y del reactor, las temperaturas en las resistencias según las variables de operación, antes de iniciar la pirólisis purgar con nitrógeno por 2 minutos e iniciar la prueba.

Los productos obtenidos son previamente almacenados y rotulados, el bioaceite se almacenó en frasco de vidrio color ámbar y llevados a la nevera, el biochar es almacenado en bolsas ziploc a temperatura ambiente (ver figura 3,1).

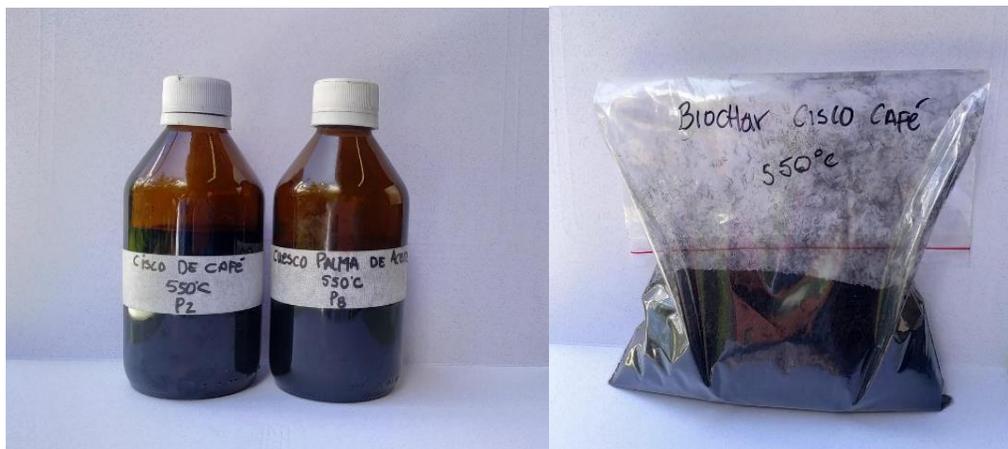


Figura 3.1. Almacenamiento de productos de la pirólisis rápida. Fuente: propia.

3.2 Rendimiento de los productos de pirólisis rápida.

En la prueba de 550°C las biomásas de cuesco de palma de aceite y cisco de café tuvieron resultados positivos a diferencia de la cascarilla de arroz que tuvo rendimientos negativos en bioaceite debido a que requiere mayor temperatura para que ocurra una pirólisis completa de la biomasa.

Rendimientos para el cuesco de palma de aceite a 550°C. Para el cuesco de palma de aceite ver tabla 3.4 y la figura 3.2, se aprecia mayor rendimiento para la relación 1:18 a 40 rpm con 52,04% en rendimiento en bioaceite, seguido a 20 rpm y después a 30 rpm. Para las relaciones de portacalor de 1:12 y 1:15 sus rendimientos de bioaceite van del 41,6 al 44,4%.

Tabla 0.4. Rendimientos de pirólisis rápida para el cuesco de palma a 550°C.

| Pirólisis rápida de cuesco de palma de aceite a 550° | | | | |
|---|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Velocidad del reactor | Productos | Relación 1:18 | Relación 1:15 | Relación 1:12 |
| Rpm 20 | Bioaceite % | 49,02 | 44,4 | 43,8 |
| | Biochar % | 41,36 | 28,2 | 30,82 |
| | Gases % | 9,44 | 27,4 | 25,38 |
| Rpm 30 | Bioaceite % | 45,2 | 41,6 | 43,32 |
| | Biochar % | 52 | 45,74 | 43,2 |
| | Gases % | 2,8 | 12,66 | 13,48 |
| Rpm 40 | Bioaceite % | 52,04 | 44,12 | 41,26 |
| | Biochar % | 44 | 54,6 | 42 |
| | Gases % | 3,6 | 1,28 | 16,74 |

Fuente: propia.

En la figura 3.2, se aprecia solo los porcentajes de bioaceite para el cuesco de palma con las diferentes velocidades del reactor y la relación de portacalor. Lo que se puede concluir es que los altos contenidos de portacalor mejoran el porcentaje de bioaceite en el proceso de pirólisis rápida, estando aun a diferentes velocidades de reacción.

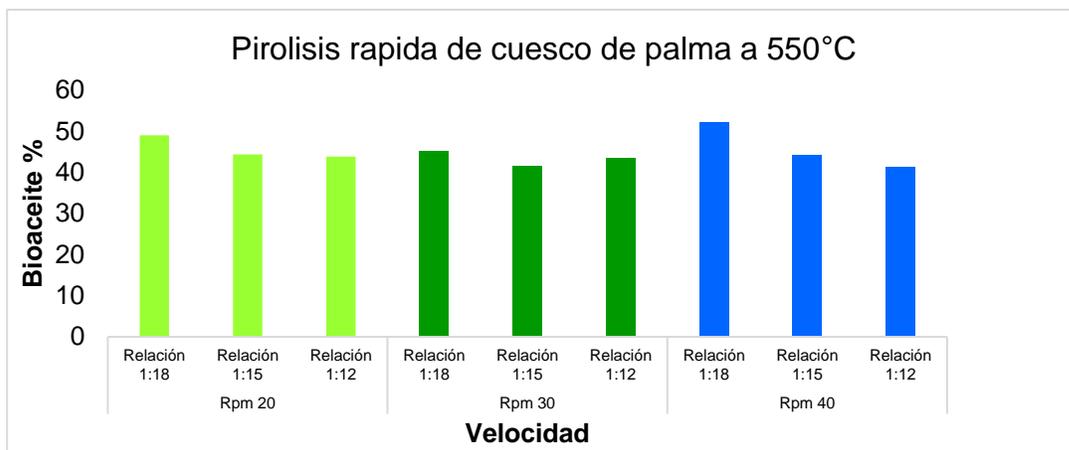


Figura 3.2. Rendimiento del bioaceite de cuesco de palma a 550°C Fuente: propia.

Rendimientos para el cisco de café a 550°C. El cisco de café se obtuvo mayor rendimiento en la relación 1:18, con rendimientos en bioaceite de 54,04 al 64,53% seguido la relación 1:15 y 1:12 (tabla 3,5). Por lo que se analiza también a mayor cantidad de portacalor mejora el rendimiento en líquidos, dado a que brinda mejor transferencia de calor entre las bolas de acero y la biomasa.

Tabla 3.5. Rendimiento de pirolisis rápida para el cisco de café a 550°C.

| Pirolisis rápida de cisco de café a 550° | | | | |
|--|-------------|---------------|---------------|---------------|
| Velocidad del reactor | Productos | Relación 1:18 | Relación 1:15 | Relación 1:12 |
| Rpm 20 | Bioaceite % | 65 | 53,2 | 38,5 |
| | Biochar % | 30 | 26,2 | 16,8 |
| | gases % | 7,5 | 20,6 | 44,7 |
| Rpm 30 | Bioaceite % | 54 | 53 | 48 |
| | Biochar % | 24,36 | 20 | 18,4 |
| | gases % | 21,6 | 27,3 | 33,6 |
| Rpm 40 | Bioaceite % | 62 | 38 | 46 |
| | Biochar % | 24 | 38 | 18 |
| | gases % | 13,6 | 24 | 35,6 |

Fuente: propia.

En la figura 3.3, se ordenan solo los porcentajes de bioaceite del cisco de café a 550°C, con las relaciones de portacalor a las diferentes velocidades de reacción.

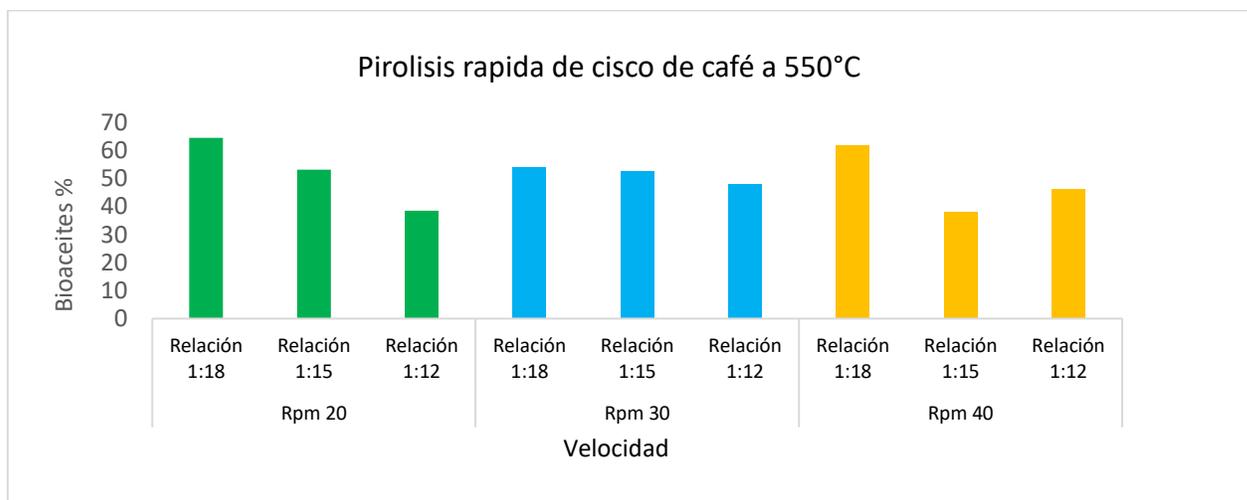


Figura 3.3. Rendimiento del bioaceite de cisco de café a 550°C. Fuente: propia.

Rendimiento de los productos de pirólisis rápida a 650°C. Las pruebas realizadas a 650°C a las tres biomásas, se observaron que los resultados en rendimiento de bioaceite son mayores que a 550°C (ver tabla 3,6 y figura 3.4), lo que indicando que a mayor flujo másico de portacalor y temperatura aumenta la tasa de calentamiento y mejora la transferencia de calor de las partículas de la biomasa, de tal modo aumentando los rendimientos en líquidos.

Tabla 3.6. Rendimiento de pirólisis rápida para el cisco de café a 650°C.

| Pirólisis rápido de biomasa a 650°C | | | |
|-------------------------------------|----------------|---------|-----|
| Biomasa | Rendimientos % | | |
| | Bioaceite | Biochar | Gas |
| cuesco de palma | 68 | 26 | 6 |
| Cisco de café | 70 | 24 | 5 |
| Cascarilla de arroz | 12 | 81 | 7 |

Fuente: propia.

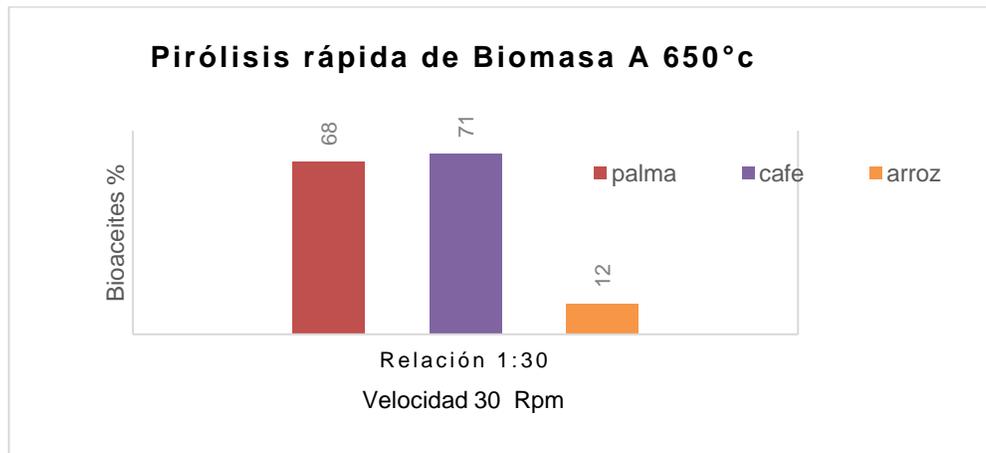


Figura 3.4. Rendimiento en bioaceite a 650°C. Fuente: propia.

En la figura 3.4 se observa que a una velocidad de 30rpm se mejora el porcentaje de bioaceite, menos la cascarilla de arroz que solo presenta el 12% en bioaceite en comparación con otras investigaciones.

3.3 Caracterización de los productos de pirolisis rápida a 550° y 650°C.

Análisis termogravimétrico a las biomásas. Para la obtención de los análisis de TGA se usaron las biomásas respectivas pasante malla 60 y previamente molidas y seca. Las condiciones de reacción fueron las siguientes: atmósfera de N_2 a 50 ml/min; la tasa de calentamiento a 10K/min y el calentamiento desde temperatura ambiente hasta los 800°C.

A continuación, en la figura 3.5 se recopila la información obtenida del análisis TGA de las biomásas.

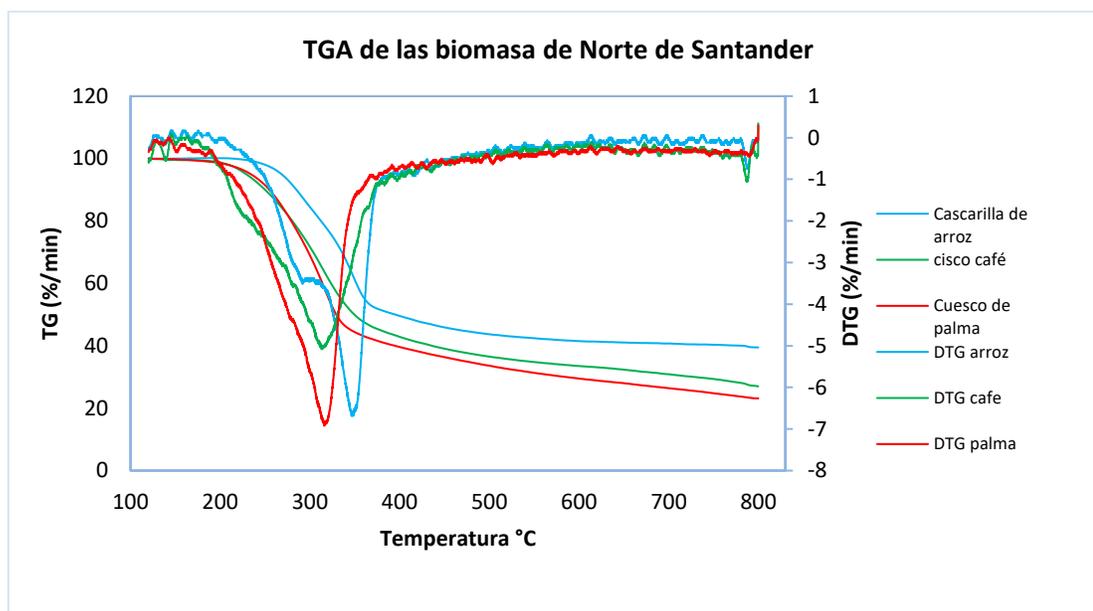


Figura 3.5. TG de las biomásas de Norte de Santander. Fuente: propia.

De la figura 3.5 se observa el cuesco de palma inicia a las temperaturas de 120°C a 194°C zona de transición se elimina o se da la evaporación del agua, su degradación se observa a los 211°C hasta llegar a su máxima descomposición a los 316°C con una pérdida de masa del 68%, presentando un pico endotérmico hasta los 353°C, después de 443°C presenta picos exotérmicos por la carbonización de compuestos volátiles y carbonados. El cisco de café a las temperaturas de 120°C a 139°C requirió absorber gran cantidad de calor para la eliminación o evaporación del agua, su degradación inicia desde los 216°C hasta llegar a su máxima descomposición a los 312°C con una pérdida de masa del 56%, presentando un pico endotérmico hasta los 370°C. Para la cascarilla de arroz a las temperaturas de 120°C a 196°C presenta varios picos endotérmicos como consecuencia de la eliminación de agua, su degradación se observa a los 270°C hasta llegar a su máxima descomposición a los 348°C con una pérdida de masa del 62%, presentando un pico endotérmico hasta los 396°C. Los datos anteriores se compararon con las investigaciones [38], [39], [40].

Análisis próximo y último a biomosas.

Los ensayos se realizaron por duplicado para biomasa, para los cuales se tomó la masa inicial de cada muestra, para el análisis próximo se empleó la metodología de [27] en el equipo de termogravimetría. Para el análisis último los contenidos de carbono (ASTM D5373), hidrógeno (ASTM D5373), nitrógeno (ASTM D5373). En la tabla 3.7, se resume el análisis próximo y ultimo de la biomasa de cascarilla de arroz, cisco de café y cuesco de palma, previamente molidas y tamizadas a 2 mm de tamaño de partícula.

Tabla 3.7. Análisis próximo y ultimo a biomosas del departamento Norte de Santander.

| Análisis próximo | | | |
|-------------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|
| Datos | <i>Cascarilla arroz</i> | <i>Cisco de café</i> | <i>Cuesco de palma</i> |
| | % (p/p) | %(p/p) | %(p/p) |
| Humedad | 8 ± 0,7 | 5,0 ± 0 | 7,0 ± 0,02 |
| Volátiles | 60 ± 3,5 | 77 ± 2,0 | 64,04 ± 1,8 |
| Carbono fijo | 16 ± 1,4 | 17 ± 2,0 | 20,2 ± 0,3 |
| Cenizas | 17 ± 1,4 | 2,0 ± 0,7 | 8,8 ± 2,1 |
| Análisis último | | | |
| C | 38,28 ± 1,80 | 47,87 ± 0,39 | 48,61 ± 0,61 |
| H | 5,08 ± 7,30 | 5,95 ± 3,86 | 5,54 ± 0,21 |
| N | 0,55 ± 13,90 | 0,74 ± 17,76 | 0,84 ± 0,21 |
| Residuo | 56,10 ± 1,97 | 45,51 ± 0,65 | 45,01 ± 0,68 |

Fuente: propia

Los datos anteriores de la tabla 3.7 se compararon con [41], [42] y donde solo para el caso del cuesco de palma el material volátil es de 65% y los reportados están por encima del 75% para el análisis próximo. El análisis último comparado con [43], [44],[41] para las biomosas son datos comparativos con diferencia aproximadamente de 3 a 5%.

Caracterización FT-IR a biomosas. Las pruebas de espectrometría FT-IR para las biomosas, se usó un espectrómetro de marca Shimadzu IR Tracer 100. La preparación de las muestras se realiza con pastillas comprimidas de KBr en proporciones de

aproximadamente 1,38 mg de biomasa y 98,62 mg de KBr. Las pruebas se hicieron por triplicado y los espectros finales fueron medidos en el modo de absorbancia, tomando el promedio de 60 escaneos para un rango de longitudes de onda entre 400 y 4000 cm^{-1} . En la figura 3.6 recopila la información del cuesco de palma, cisco de café y cascarilla de arroz.

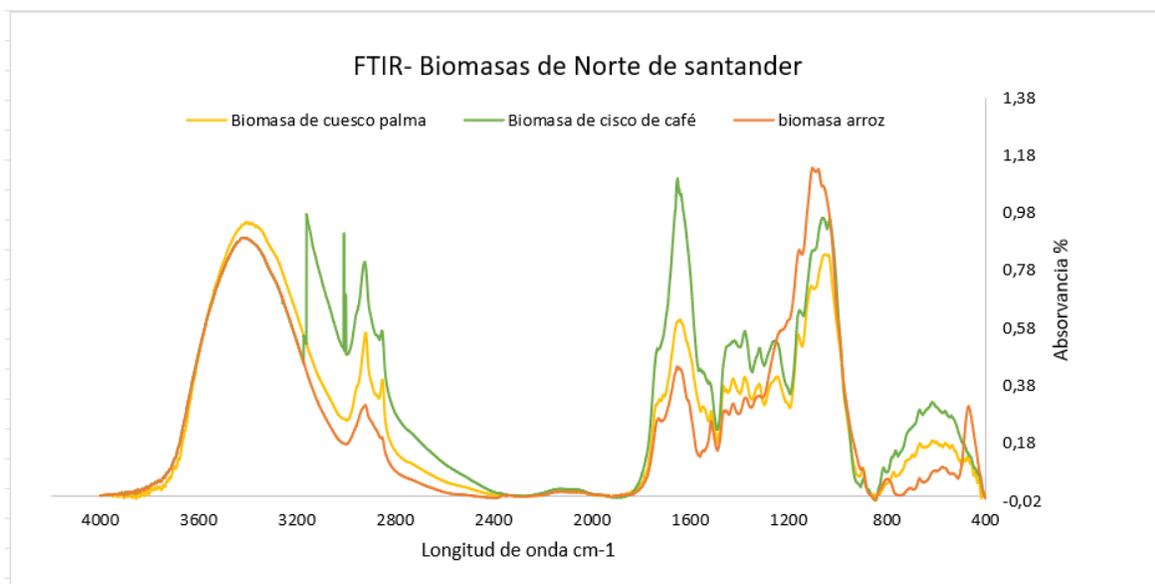


Figura 3.6. FT-IR de las biomásas de Norte de Santander. Fuente: propia.

En la figura 3.6 se observa que las biomásas de cisco de café y cuesco de palma presentan estiramiento en las mismas bandas, pero las de cisco de café tienen mayor vibración. Es posible observar las bandas en la región de 3200-3700 cm^{-1} que corresponden a las vibraciones de estiramiento de las funciones OH o NH donde se pueden encontrar ácidos carboxílicos, aminas, amidas y alcoholes. Las bandas en la región de 2995-2800 cm^{-1} representaron las vibraciones de mayor intensidad y se atribuyen a los grupos metilo y metileno. La región entre alrededor de 1680 a 1500 cm^{-1} corresponde a C=C de alquenos, mientras que la región entre 1200 y 1000 cm^{-1} corresponde a los enlaces C-O y C-C-O y se ha atribuido a la estructura de la celulosa, la hemicelulosa y la lignina según las comparaciones [45], [46], [39]

3.4 Caracterización de biochar a 550°C y 650°C de biomásas del departamento Norte de Santander.

La caracterización del biochar se realiza con el objetivo de observar la conversión de la biomasa a biochar a través del proceso de pirólisis rápida.

Análisis termogravimétrico. Para la obtención de los análisis de TGA se usó el biochar de las diferentes biomásas obtenidos a 550 y 650°C. Las condiciones de reacción fueron las siguientes: atmósfera de N_2 a 50 ml/min; la tasa de calentamiento a 10K/min y el calentamiento desde temperatura ambiente hasta los 800°C. en la figura 3.7 se observa el biochar del cuesco de palma y cisco de café a 550°C.

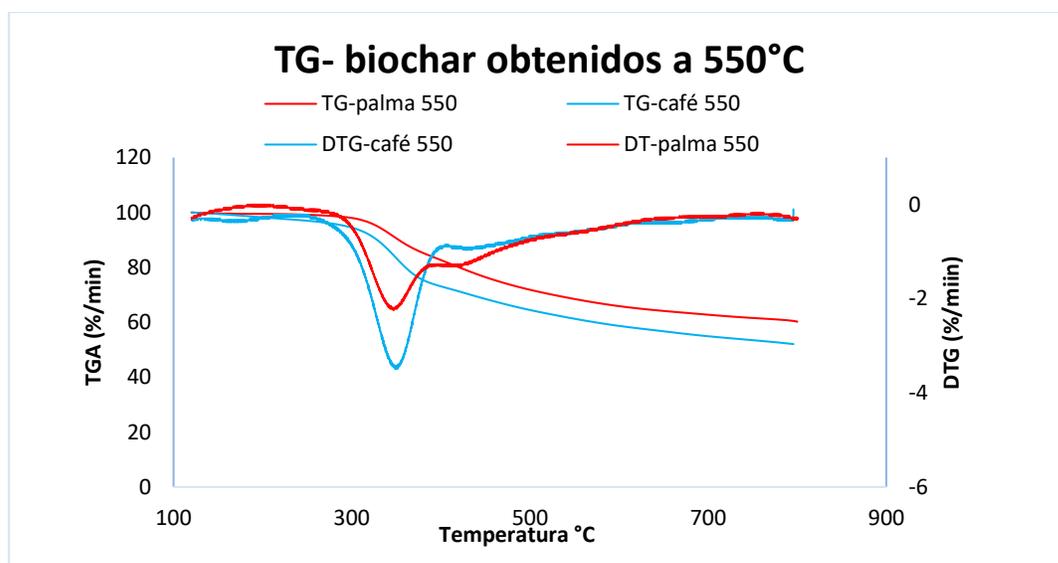


Figura 3.7. TG de biochar obtenidos a 550°C. Fuente: propia.

En la figura 3.7 se observa que el biochar del cisco de café, tiene una máxima degradación a los 350°C con una pérdida del 20% de masa, para el biochar del cuesco de palma su degradación es aproximadamente a los 345°C con una pérdida del 30% de su masa.

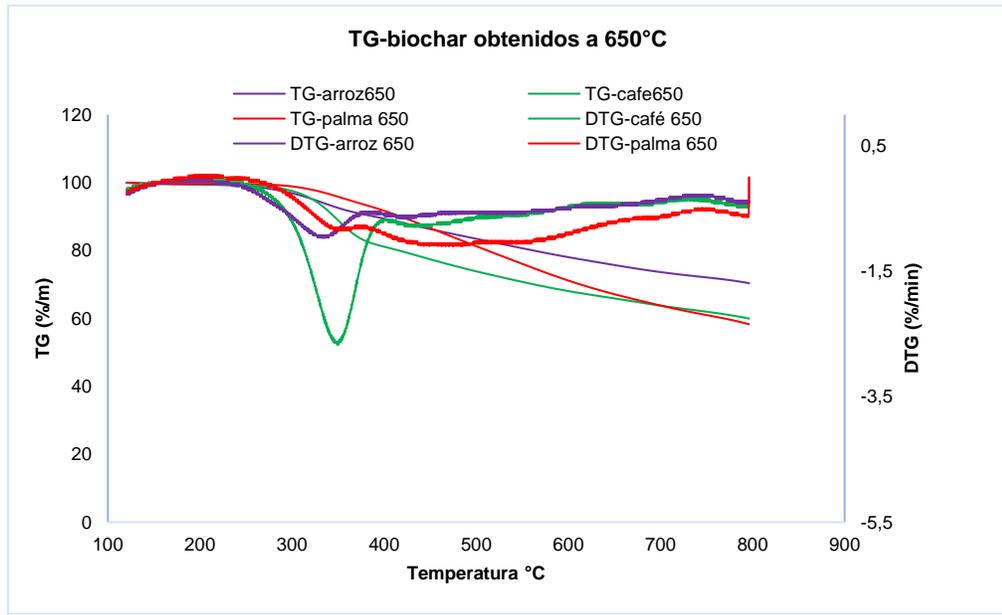


Figura 3.8. TGA de biochar obtenidos a 650°C. fuente: propia.

El TGA realizado al biochar de 650°C de la figura 3.8, se observa que el biochar de café de 650°C tiene una pérdida del 35% de masa a una temperatura de 350°C, mayor que a las demás muestras, el biochar de cascarilla de arroz tiene una pérdida de masa del 20% y el cuesco de palma de 15% alrededor de los 350°C. Las descomposiciones podrían deberse a la volatilización de fuertes enlaces orgánicos de la lignina, los datos se asemejan con las investigaciones [38], [47],[40].

Análisis próximo. Los ensayos se realizaron por duplicado para biochar, para los cuales se tomó la masa inicial de cada muestra, para el análisis próximo se empleó la metodología de [27] en el equipo de termogravimetría. Para la cascarilla de arroz a 550°C no se realizó análisis dado a que no pirolizó por completo. Se les realiza análisis a las muestras obtenidas a 30 rpm.

Tabla 3.8. Análisis próximo a biochar de biomásas del departamento Norte de Santander.

| Análisis próximo de Biochar a 550°C | | | |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|
| | <i>Cascarilla arroz</i> | <i>Cisco de café</i> | <i>Cuesco de palma</i> |
| | % (p/p) | %(p/p) | %(p/p) |
| Humedad | - | 5,0 ± 0 | 3,7 ± 0,1 |
| Volátiles | - | 77 ± 2,0 | 37,0± 1,1 |
| Carbono fijo | - | 17 ± 2,0 | 48,6± 0,6 |
| Cenizas | - | 2,0 ± 0,7 | 10,7 ± 1,0 |
| Análisis próximo de Biochar a 650°C | | | |
| Humedad | 3,80±1,0 | 2,5 ± 0,23 | 3,08 ± 0,06 |
| Volátiles | 18,99±1,0 | 25,48± 0,86 | 18,28± 0,09 |
| Carbono fijo | 29,9±0,06 | 35,72± 0,67 | 54,57±1,0 |
| Cenizas | 34,70±0,7 | 14,47± 0,26 | 10,43±0,001 |

Fuente: propia.

El comportamiento del biochar en el proceso de pirólisis rápida a diferentes temperaturas se observa que de 550°C a 650°C aumento los porcentajes de carbono fijo y disminuyo los volátiles. Para el cisco de café paso de 17± 2,0% a 35,72± 0,67% y para el cuesco de palma 48±0,6% a 54,57± 1,0% de carbono fijo, mostrando una conversión de biomasa a biochar, caso similar en estudios realizados en [48], [49]

Caracterización FT-IR. Las pruebas de espectrometría FT-IR para el biochar obtenidos a 550°C y 650°C del proceso de pirólisis rápida de las biomásas, se usó un espectrómetro de marca Shimadzu IR Tracer 100 (ver Figura 3.9). La preparación de las muestras se realiza con pastillas comprimidas de KBr en proporciones de aproximadamente 1,38 mg de biochar y 98,62 mg de KBr. Las pruebas se hicieron por triplicado y los espectros finales fueron medidos en el modo de absorbancia, tomando el promedio de 60 escaneos para un rango de longitudes de onda entre 400 y 4000 cm^{-1}

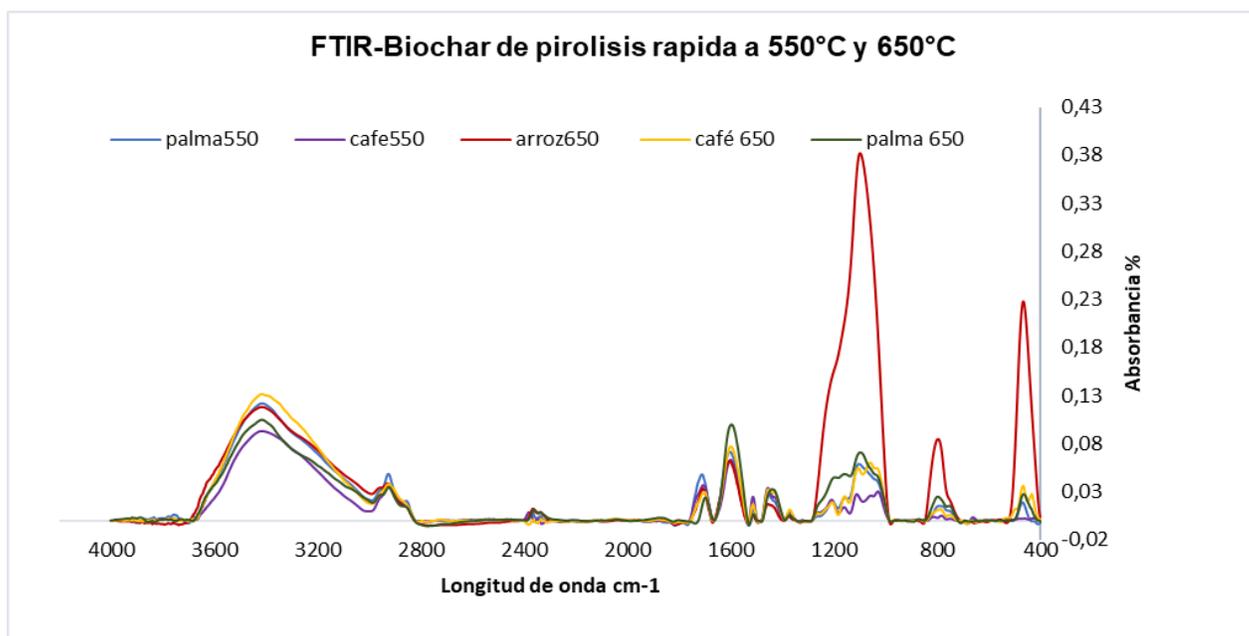


Figura 3.9. FTIR de biochar de pirólisis rápida a 550°C y 650°C de las biomásas de Norte de Santander. Fuente: propia.

Para el biochar de la figura 3.9, obtenido a las temperaturas de 550°C y 650°C de casco de café, hueso de palma y cascarilla de arroz según la figura #, se recopiló los espectros de FTIR de 4000 a 400 cm^{-1} , observándose que las muestras tienen las mismas bandas, pero con mayor vibración para la cascarilla de arroz. La banda de 3365 cm^{-1} corresponde a vibraciones de estiramiento del grupo hidroxilo (O-H), presente en las moléculas de agua. Para la banda de 2916 y 459 cm^{-1} son vibraciones que corresponden a alcanos CH_3 (C-C). La banda encontrada a 2300 cm^{-1} corresponde a vibraciones de aminas (NH_2) con estiramientos simétricos y antisimétricos. Para las bandas encontradas de 1730 a 1550 cm^{-1} corresponde a vibraciones al grupo carbonilo (C=O) de aldehídos y cetonas, donde la banda 1707 cm^{-1} corresponde a cetonas de dialquilo, la banda 1581 cm^{-1} vibran las dicetonas, 1695 cm^{-1} hace referencia a vibraciones para aldehídos aromáticos. Para las bandas de 1284 a 960 cm^{-1} , corresponde a vibraciones a monocíclicos, policíclicos y grupos aromáticos sustituidos, para las bandas de 505 a 400 cm^{-1} tiene vibraciones para alcanos, para mayor vibración de la banda 459 cm^{-1} correspondiente a alcanos ramificados (C-C), datos comparativos con las investigaciones [46], [50], [51] y [52].

3.5 Caracterización de bioaceite a 550°C y 650° de biomásas del departamento Norte de Santander.

Contenido de agua en bioaceites. El porcentaje de agua en las muestras de bioaceite fue medida en un Karl Fischer Metrohm 877 Titrino Plus. Como titulante se utilizó HYDRANAL composite 5 y como solvente HYDRANAL K. aplicando aproximadamente 15 mg de bioaceite, antes agitado por 40 segundos, cada muestra de bioaceite se hizo por triplicado para tomar un valor promedio. A continuación, en la tabla 3.9 se resume los datos obtenidos de las muestras de palma de aceite, cisco de café y cascarilla de arroz del análisis de Karl Fischer.

Tabla 3.9. Análisis de Karl Fischer para bioaceite obtenidos a 550°C y 650°C

| Análisis de Karl Fischer para bioaceite obtenidos a 550°C | | | |
|--|------------------------------------|------------------------|------------------------------|
| Muestra | Cuesco de palma de aceite % | Cisco de Café % | Cascarilla de arroz % |
| R (1:18) | 54,92± 0,8 | 36,10 ± 0,2 | 48,53 ± 0,5 |
| R (1:15) | 39,72 ± 1,0 | 39,13 ± 0,8 | - |
| R (1:12) | 39,96 ± 0,5 | 50,72± 1,2 | - |
| Análisis de Karl Fischer para bioaceite obtenidos a 650°C | | | |
| Muestra | Cuesco de palma de aceite % | Cisco de Café % | Cascarilla de arroz % |
| R (1:30) | acuosa 40,58 ± 1,5 | 42,44 ± 0,2 | 32,77 ± 0,7 |
| | oleosa 21,19 ± 0,8 | | |

Fuente: Propia

Según [53], [4], [54] sus investigaciones de pirólisis de palma de aceite reportaron porcentajes de agua hasta el 58%, para el cisco de café según [4], [38] reportan un 65% de contenido de agua (tabla 3.9).

Caracterización FT-IR. Las pruebas de espectrometría FTIR, se implementó para identificar cambios en los grupos funcionales entre las muestras obtenidas a diferentes relaciones de portacalor, se usó un espectrómetro de marca Shimadzu IR Tracer 100. La preparación de las muestras se realiza con pastillas comprimidas de KBr en proporciones de aproximadamente 1,38 mg de bioaceite y 98,62 mg de KBr. Las pruebas se hicieron por triplicado y los espectros finales fueron medidos en el modo de absorbancia, con rango de longitudes de onda entre 400 y 4000 cm^{-1} .

FTIR - bioaceites de pirólisis rápida de cuesco de Palma 550°C

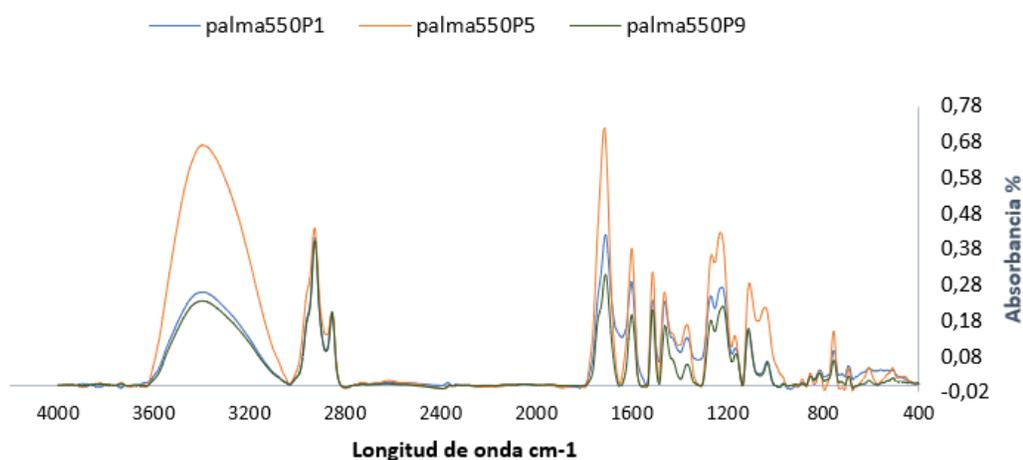


Figura 3.10. FTIR a bioaceite de cuesco de Palma a 550°C. Fuente: propia.

Las vibraciones de la figura 3.10, el análisis FTIR en el bioaceite de cuesco de palma a 550°C, obtenida a diferentes velocidades de reacción presentan las mismas bandas, pero con mayor intensidad para la muestra palma 550P9 obtenida a 30rpm y con una relación de portacalor de 1:12. Una banda fuerte transmitida entre 3600 a 3041 cm^{-1} corresponde a estiramiento de O-H, denotan la presencia de agua y el grupo hidroxilo. En la banda 2856 cm^{-1} representa el grupo alquilo, con vibración de $\text{C}\equiv\text{C}$. La banda de 1718 cm^{-1} son vibraciones de estiramiento de $\text{C}=\text{O}$, indicando la existencia de ácidos carboxílicos, cetonas y aldehídos. Las bandas de 1598 a 1512 cm^{-1} indican la presencia de aminas secundarias. Las vibraciones en la banda de 1467 cm^{-1} se relaciona la presencia de alcanos. Para 1224 cm^{-1} , atribuye a vibraciones de C-O de grupo fenol, en la banda de 1103 a 1028 cm^{-1} corresponde a vibraciones de estiramiento de C-O, como alcoholes

secundarios, las vibraciones de 761 cm^{-1} para hidrógenos aromáticos y finalmente las bandas de 692 a 400 cm^{-1} hace referencia a vibraciones poco fuerte de alquenos $\text{C}=\text{C}$. Los anteriores datos tienen similitud con la investigación [55]

La siguiente figura 3.11 corresponde al bioaceite de cisco de café realizada a 550°C a las muestra P4, P6 Y P8. Mostrando vibracion en la misma bandas pero con mayor intensidad para la muestra P4, obtenida a 20 rpm y con una relacion de portacalor de 1:12 .

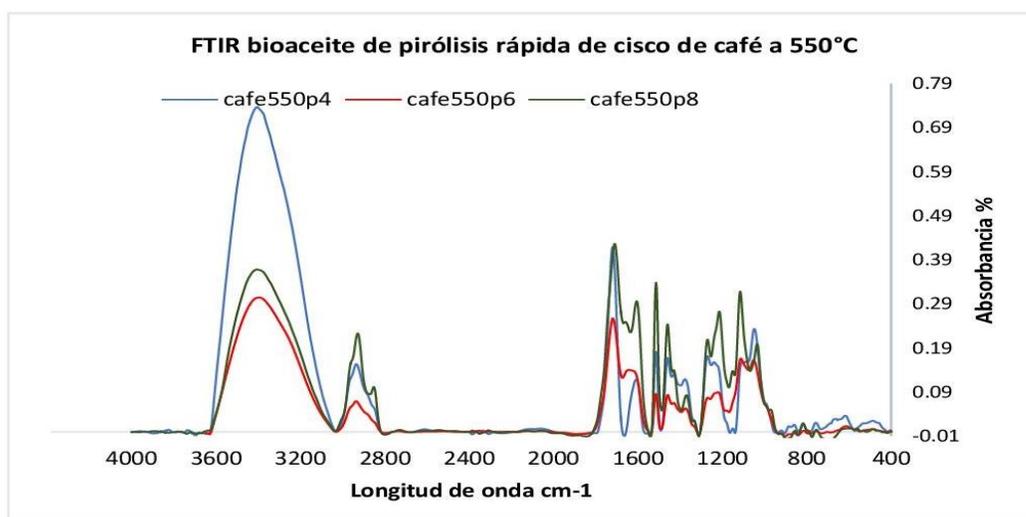


Figura 3.11. FTIR a bioaceite de cisco de café a 550°C . Fuente: Propia.

La banda de 3600 a 3032 cm^{-1} corresponde a vibraciones para de O-H, denotan la presencia de agua y el grupo hidroxilo para mayor intensidad de la muestra P4, razón por lo que la muestra presenta mayor contenido de agua. Para la banda de 2920 cm^{-1} , representa vibraciones para grupo metilo. Las vibraciones de $\text{C}=\text{O}$ característico de grupo carbonilo (aldehídos y cetonas) se presentan en la banda de 1707 cm^{-1} . Para las bandas de 1598 y 1512 cm^{-1} hace presencia las vibraciones para $\text{C}=\text{C}$ correspondientes a los alquenos y la banda de 1456 a 1220 cm^{-1} vibraciones para alcanos $\text{C}-\text{C}$. Para la banda de 1047 cm^{-1} se atribuye a los enlaces de $\text{C}-\text{O}$ y $\text{C}-\text{C}-\text{O}$ de celulosa, hemicelulosa y lignina según [56]. Para las bandas de 870 a 400 cm^{-1} pertenecen a vibraciones para alcanos de CH_2 .

Para las muestras obtenidas a 650°C de pirólisis rápida de cascarilla de arroz, cisco de café y cuesco de palma se grafica toda en la figura 3.12.

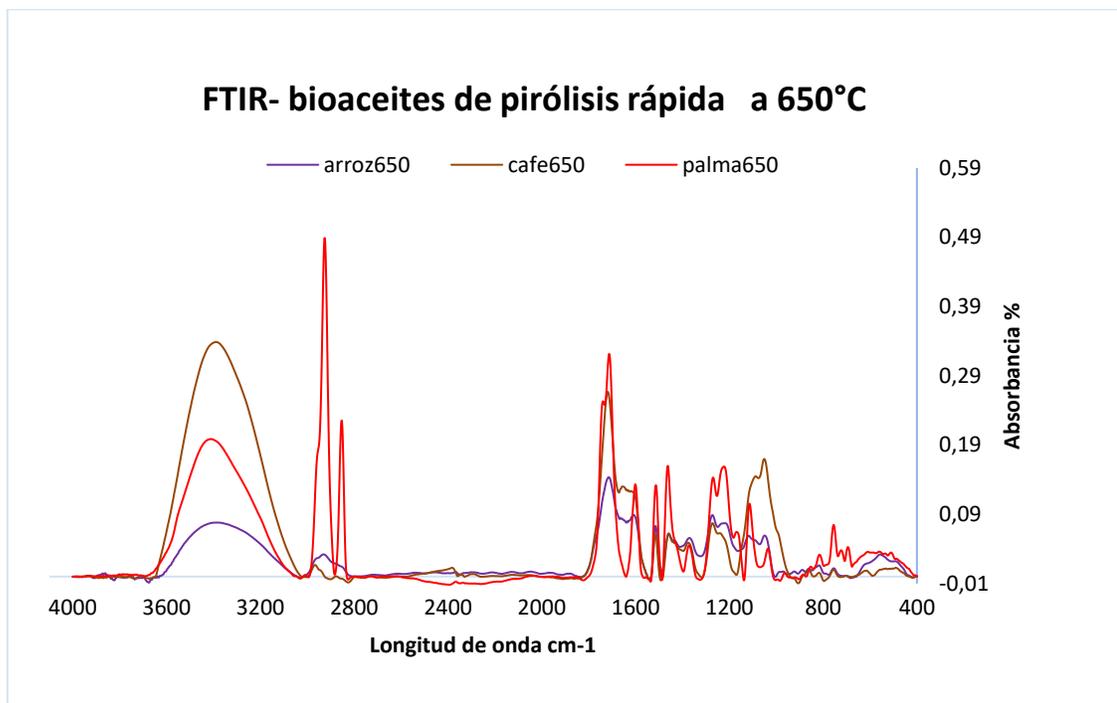


Figura 3.12. FTIR a bioaceite de pirólisis rápida a 650°C. Fuente: propia.

Los espectros de la figura 3.12 de las muestras obtenidas a 650°C son similares entre sí, las vibraciones de arroz, café y palma vibran en las mismas bandas, pero diferenciándose en la intensidad de los picos. En el rango de 3672 a 3057 cm-1 característico de la vibración de estiramiento del grupo O-H, dado por la presencia de agua, ácidos carboxílicos, alcoholes y fenoles. En el rango de 2987 a 2821 cm-1, presenta picos asociados a vibraciones del enlace C-H, se confirma con los picos en 1375 cm-1. En el pico de 1818 a 1631 cm-1 pertenecen a vibraciones C=O del grupo carbonilo (ésteres, cetonas y aldehídos). Para las bandas de 1597 cm-1 y 1508 cm-1 pertenecen a vibraciones para aminas secundarias las 1456, 1367 alcanos C-C. para los picos de las bandas 1256 cm-1 a 1041 cm-1 confirman la presencia de alcoholes, ésteres, éteres y fenoles y las bandas de 810 a 400 sus vibraciones son débiles para alquenos C=C. [57], [58] y [59].

Fluorescencia.

Es una técnica analítica que permite la determinación de concentración de compuestos en una solución, donde las moléculas absorben las radiaciones electromagnéticas, por lo que cuanto mayor sea la intensidad del pico, mayor es el contenido relativo del componente. Se preparo una solución de 50 ppm (metanol + bioaceite), los registraron espectrofotómetros se registraron con rangos de 255 nm hasta 575 nm, con incremento de paso de excitación de 2 nm y paso de banda de emisión de 10 nm y 0,2 se de integración. Las muestras se espectros se midieron en un cuarzo de cuatro caras. Se caracterizo las muestras de bioaceite de cascarilla de arroz a 650°C, cuesco de palma a 550°C y 650°C y cisco de café a 550°C y 650°C (ver figura 3.13).

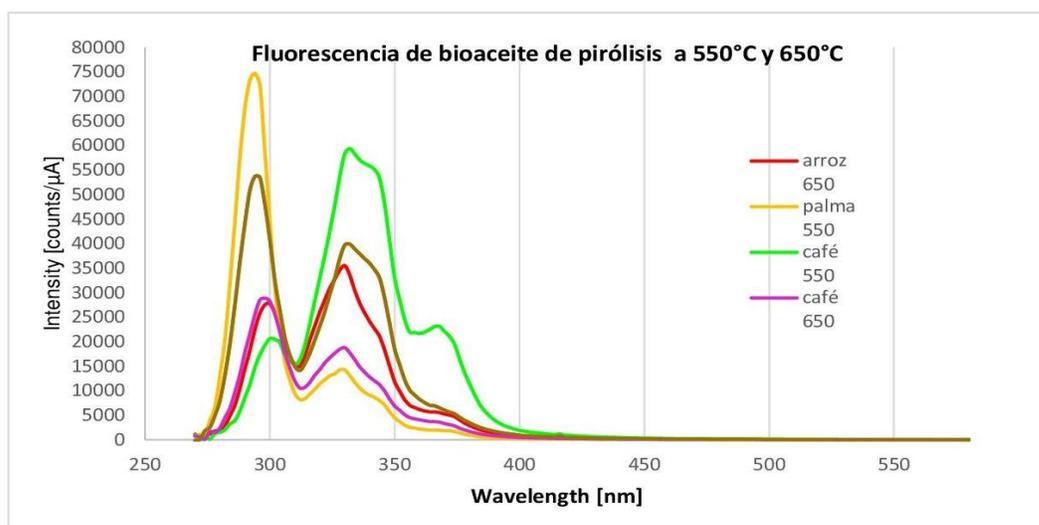


Figura 3.13. Análisis de fluorescencia a bioaceite a 550°C y 650°C. fuente: propia .

En la figura 3.13 de fluorescencia se observa que los espectros de absorción Uv se presentan en las bandas de 275 a 300 nm, las cuales están asociadas a monómeros de los espectros de 300 a 370 nm atribuyen a compuestos de dímeros y trímeros para los espectros de 370 a 425 nm están presente los oligómeros . El anterior análisis tuvo similitud con la investigación realizada con ligninas[60].

3.6 Caracterización de los gases de pirólisis rápida de biomásas a 550°C y 650°C

Para la caracterización de los gases, se tomó muestras a las pruebas de 550°C y 650°C de la biomasa de cuesco de palma, los gases fueron recolectados en bolsa tedlar de 200ml. Su análisis se realizó en un cromatógrafo de gases Agilent μ -GC3000 con detectores de conductividad térmica, como gas de arrastre se utilizó el Argon (Ar) y Helio (He). Los resultados se muestran en la tabla 3.10

Tabla 3.10. Caracterización de gases de pirólisis rápida a 550°C y 650°C.

| Pirólisis rápida a 650°C | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|----------|----------|----------|--------|
| Compuesto | H_2 | N_2 | CO | CH_4 | CO_2 | C_2H_4 | C_2H_6 | C_3H_8 | Total |
| Concentración | 1,485 | 0 | 4,316 | 0 | 13,125 | 0 | 0,047 | 0 | 13,172 |
| Pirólisis rápida a 550°C | | | | | | | | | |
| Compuesto | H_2 | N_2 | CO | CH_4 | CO_2 | C_2H_4 | C_2H_6 | C_3H_8 | Total |
| Concentración | 0,09 | 0 | 0 | 0 | 2,178 | 0 | 0,04 | 0 | 2,182 |

Fuente: propia.

a temperaturas de 550°C y 650°C se analizó los mismos compuestos, pero en diferentes concentraciones como el hidrógeno (H_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), etano (C_2H_6) y propano (C_3H_8). Por lo que se observa que a la temperatura de 550°C se tiene mayor concentración. El gas de síntesis se puede utilizar más como materia prima para la generación de hidrógeno, síntesis de combustible y la industria petroquímica como materia prima [61].

4. Conclusiones y recomendaciones.

4.1 Conclusiones.

Se implementó un reactor tipo Auger en los laboratorios de la Universidad Francisco de Paula Santander, cuyo sistema de calentamiento cuenta con el control de potencia, el cual permitió operar bajo condiciones controladas las temperaturas del portacalor, además la velocidad de los tornillos del reactor posee un tablero de operación por lo que su velocidad es ajustable y controlable; la recolección de biochar se realiza en un contenedor de acero inoxidable junto con las bolas de acero para luego hacer la separación y limpieza mediante un tamizado, los bioaceites fueron recolectados en frasco de vidrio; por lo tanto, fue factible la caracterización y cuantificación de los rendimientos del bioaceite, biochar y gases no condensables.

Los rendimientos de bioaceite aumentan cuando al sistema se le proporciona más calor a través de la recirculación del portacalor, las diferentes combinaciones de condiciones de operación para las biomásas (cascarilla de arroz, cisco de café y cuesco de palma) permitieron observar rendimientos favorables cuando se aumentaba la relación de portacalor a 1:18 operado a 20 rpm, 30 rpm y 40 rpm, obteniendo rendimiento de líquidos de 64% a 70% con temperatura de operación de 550°C y 650°C, concluyendo que el diseño del reactor es favorable para el proceso de pirólisis rápida.

Finalmente, a los productos de la pirólisis de cada biomasa (gases, biochar, bioaceite) se les realizó espectroscopia FTIR, TGA, Karl Fischer, fluorescencia, análisis próximo y último para estudiar la composición química y observar el comportamiento como la degradación

y volatilización de las moléculas sometidas al proceso termoquímico. La presencia de algunos grupos funcionales, tales como cetonas, aldehídos, ácido carboxílicos, alcoholes etc, indicaron que el bioaceite de las muestras seleccionadas para el proceso pueden ser potencial para el uso de combustibles y otros tipos de productos de origen renovable.

De acuerdo con los análisis se puede concluir que los productos obtenidos del proceso de pirólisis rápida de las biomásas (cascarilla de arroz, cisco de café y hueso de palma) contienen compuestos de interés para las grandes industrias tales como polímeros para elaboración de resinas, pegamentos, envases, fibras acrílicas, bases para medicamentos, fertilizantes y entre otros.

4.2 Recomendaciones.

A partir de los resultados obtenidos durante el proceso de diseño y puesta en marcha del reactor Auger surgen las siguientes recomendaciones:

- Implementar un sistema de calentamiento por resistencia eléctricas para el reactor, el cual permita mantener la temperatura del portacalor y del ambiente durante la recirculación por el sistema.
- Realizar un sellado a tolvas alimentadoras para evitar que los gases de la pirólisis se devuelvan por sistema de dosificación y de tal manera no afecte negativamente al proceso.
- Mejorar el sistema de condensación, añadiendo una válvula de paso, lo que impida que los gases salgan durante el calentamiento del reactor y tapen los condensadores.
- Mejorar la salida del bioaceite, haciendo que el gas tenga un recorrido más largo, con el fin que la condensación sea más eficiente.

Anexo A.

Tabla C. Factores de capacidad. CEMA.

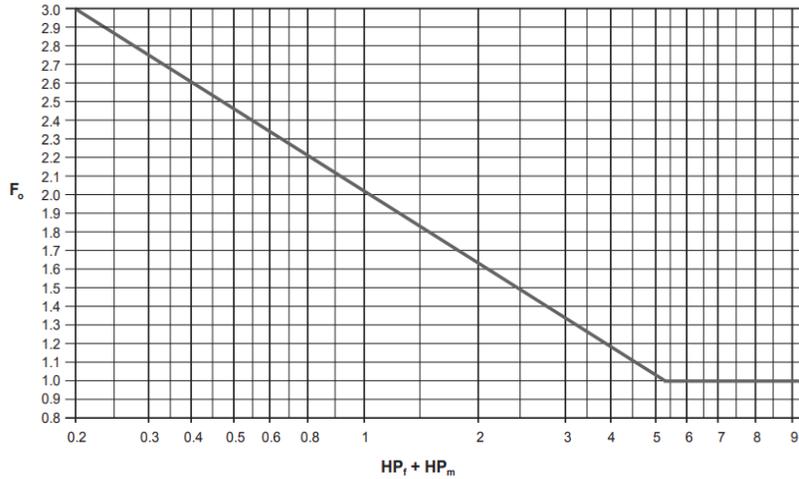
TABLE C: Capacity Factors

| SPECIAL SCREW PITCH CAPACITY FACTOR CF_1 | | | | |
|--|--|------|------|--------|
| PITCH | DESCRIPTION | | | CF_1 |
| Standard (full) | Pitch = Diameter of screw | | | 1.00 |
| Short | Pitch = $\frac{3}{4}$ Diameter of screw | | | 1.50 |
| Half | Pitch = $\frac{1}{2}$ Diameter of screw | | | 2.00 |
| Long | Pitch = $1\frac{1}{2}$ Diameter of screw | | | 0.67 |
| SPECIAL SCREW FLIGHT MODIFICATION CAPACITY FACTOR CF_2 | | | | |
| TYPE OF FLIGHT | CONVEYOR LOADING | | | |
| | 15% | 30% | 45% | |
| Standard | 1.00 | 1.00 | 1.00 | |
| Cut | 1.95 | 1.57 | 1.43 | |
| Cut & Folded | not rec. | 3.75 | 2.54 | |
| Ribbon | 1.04 | 1.37 | 1.62 | |
| SPECIAL SCREW MIXING PADDLE CAPACITY FACTOR CF_3 | | | | |
| STD PADDLES PER PITCH SET AT 45° REVERSE PITCH | | | | |
| NONE | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1.00 | 1.08 | 1.16 | 1.24 | 1.32 |

Fuente: CEMA.

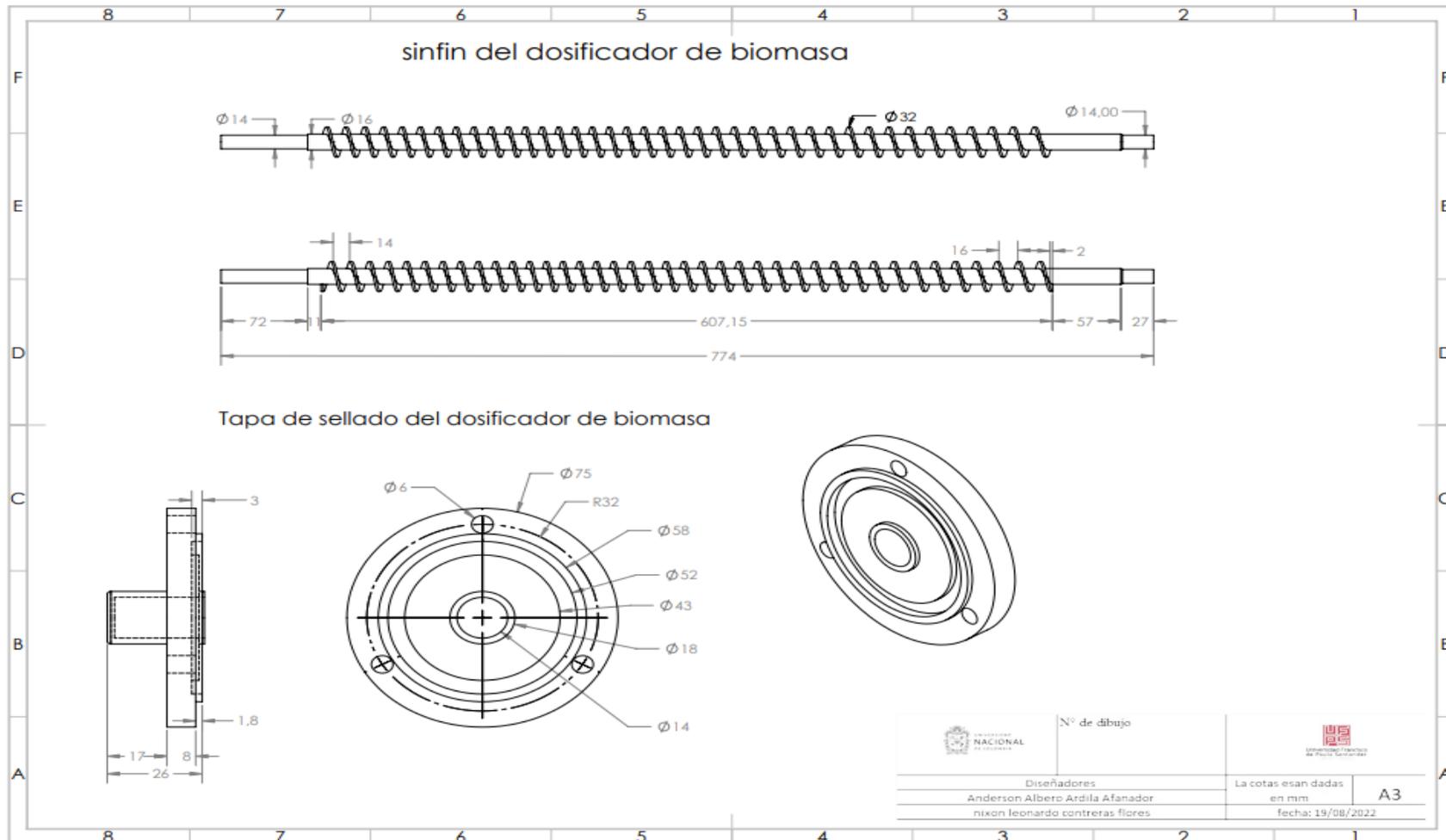
Tabla H. Sobrecarga HP Factor F_o

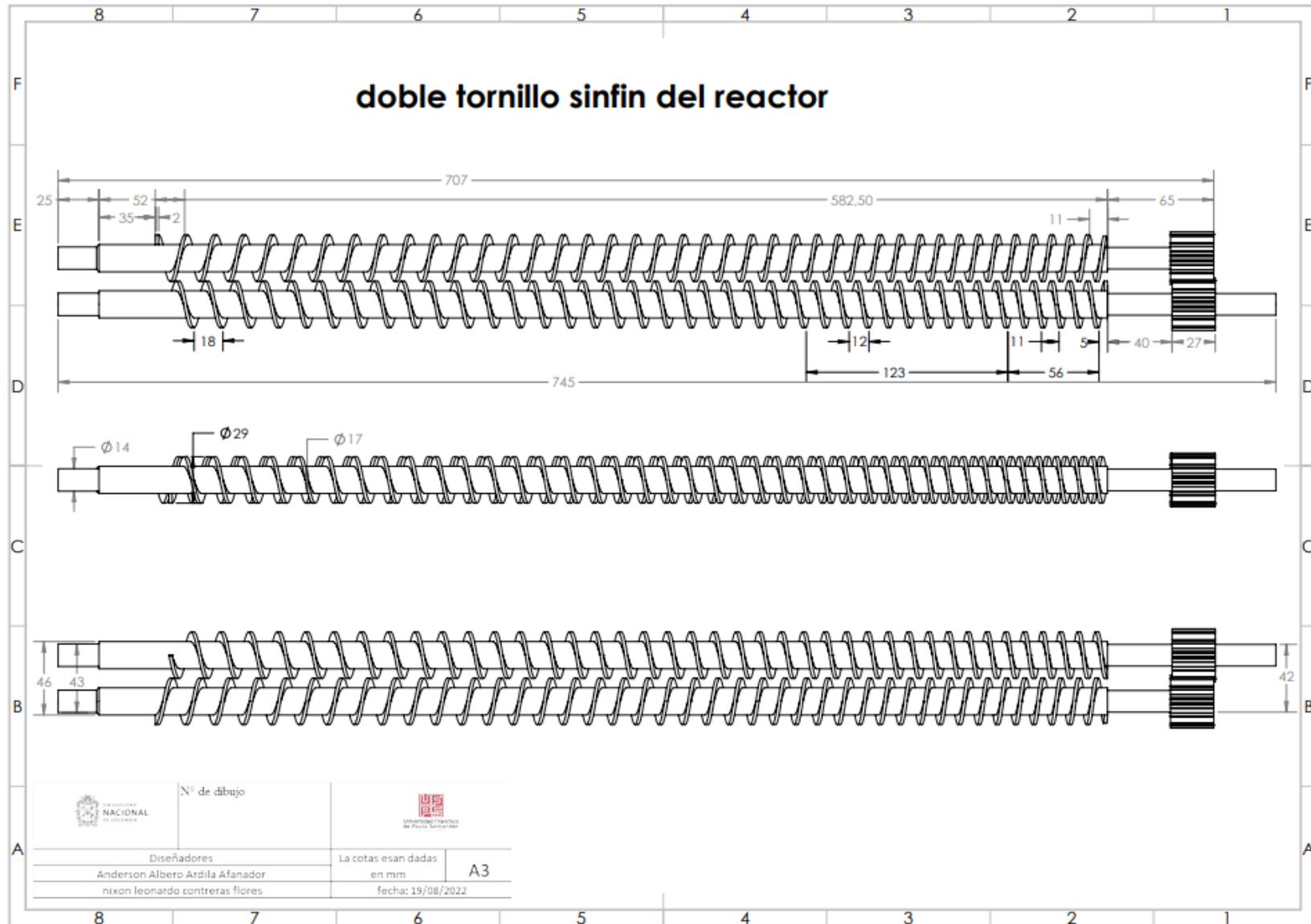
TABLE H: Overload HP Factor F_o

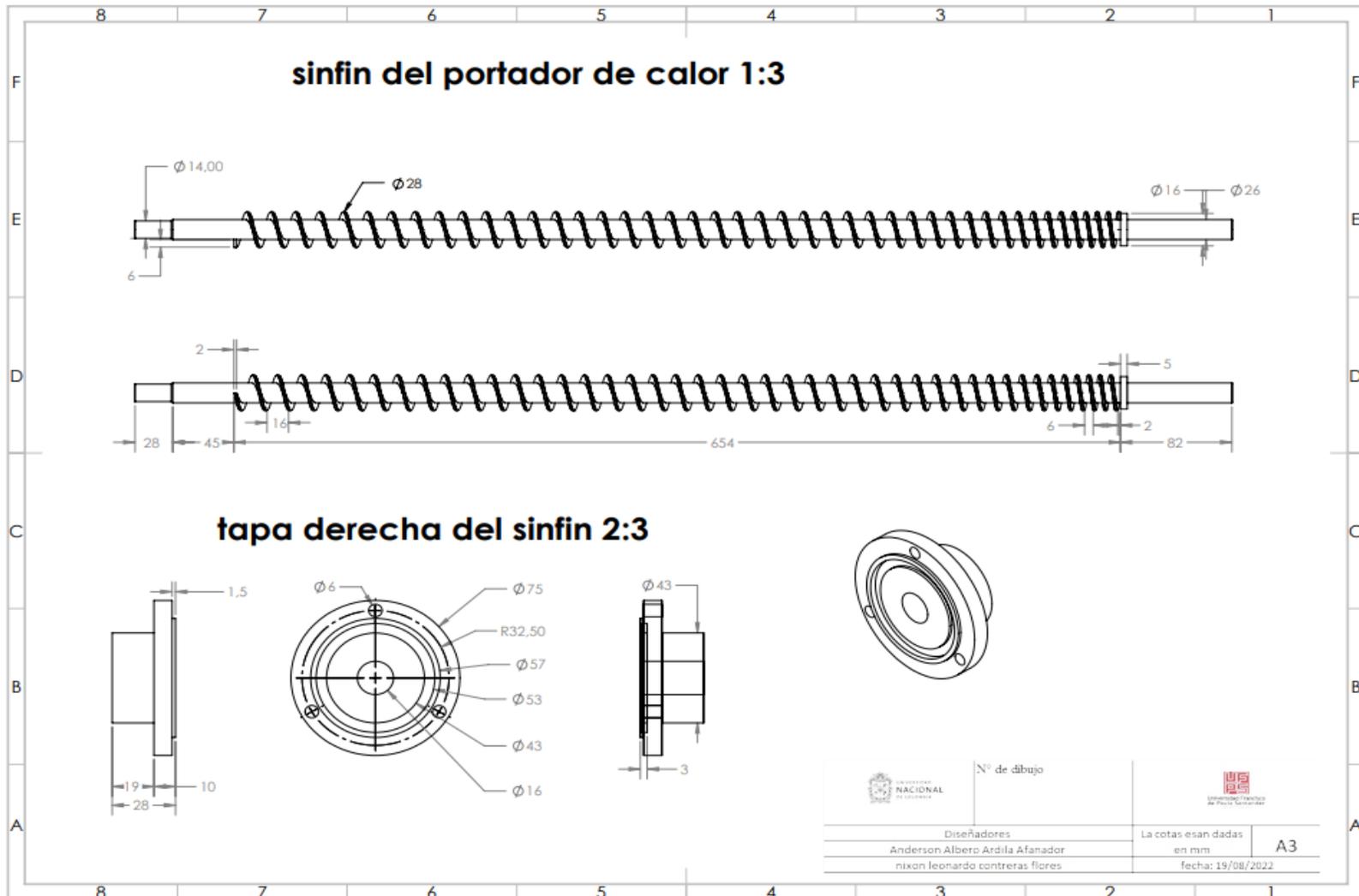


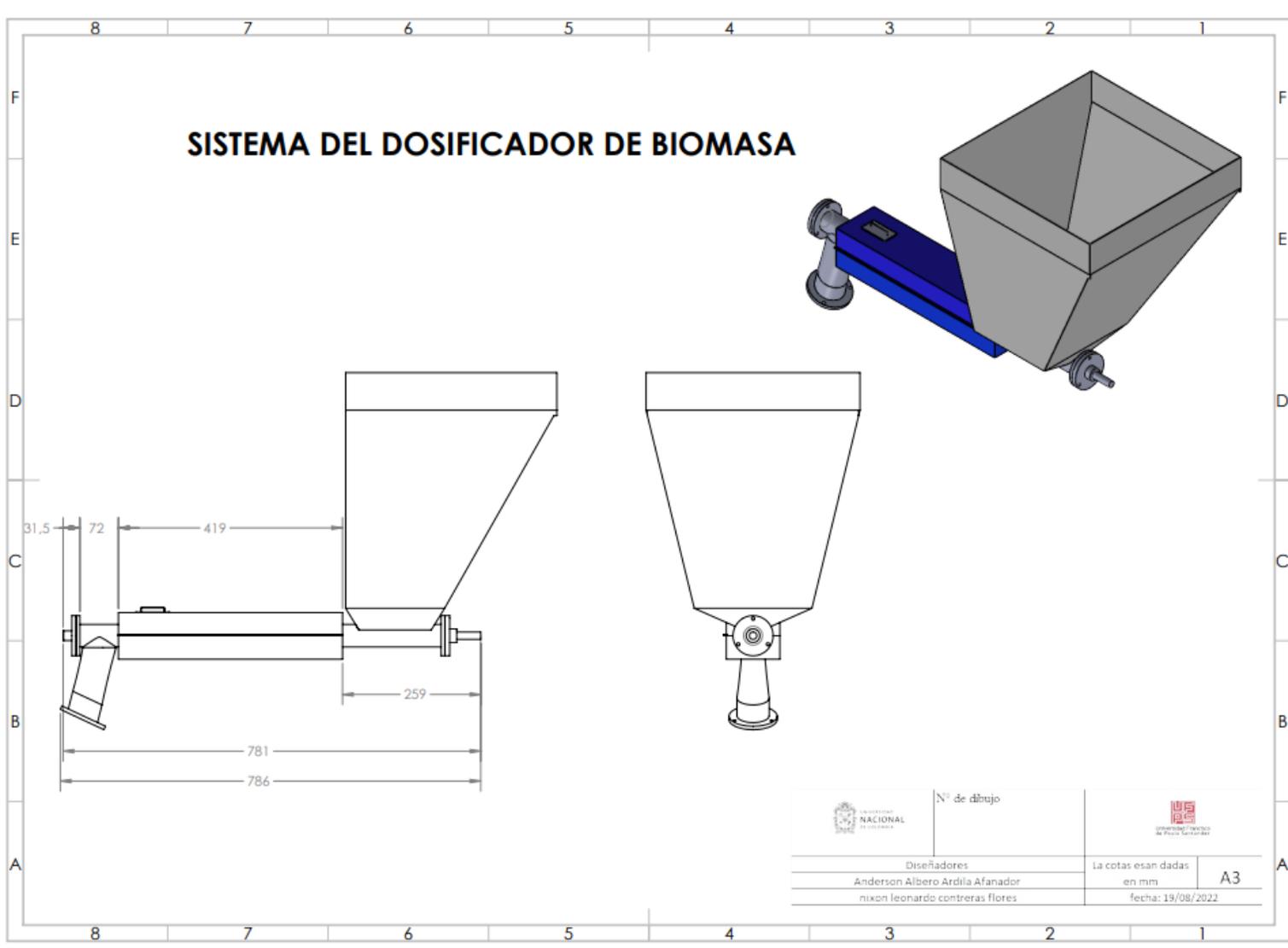
Fuente: CEMA.

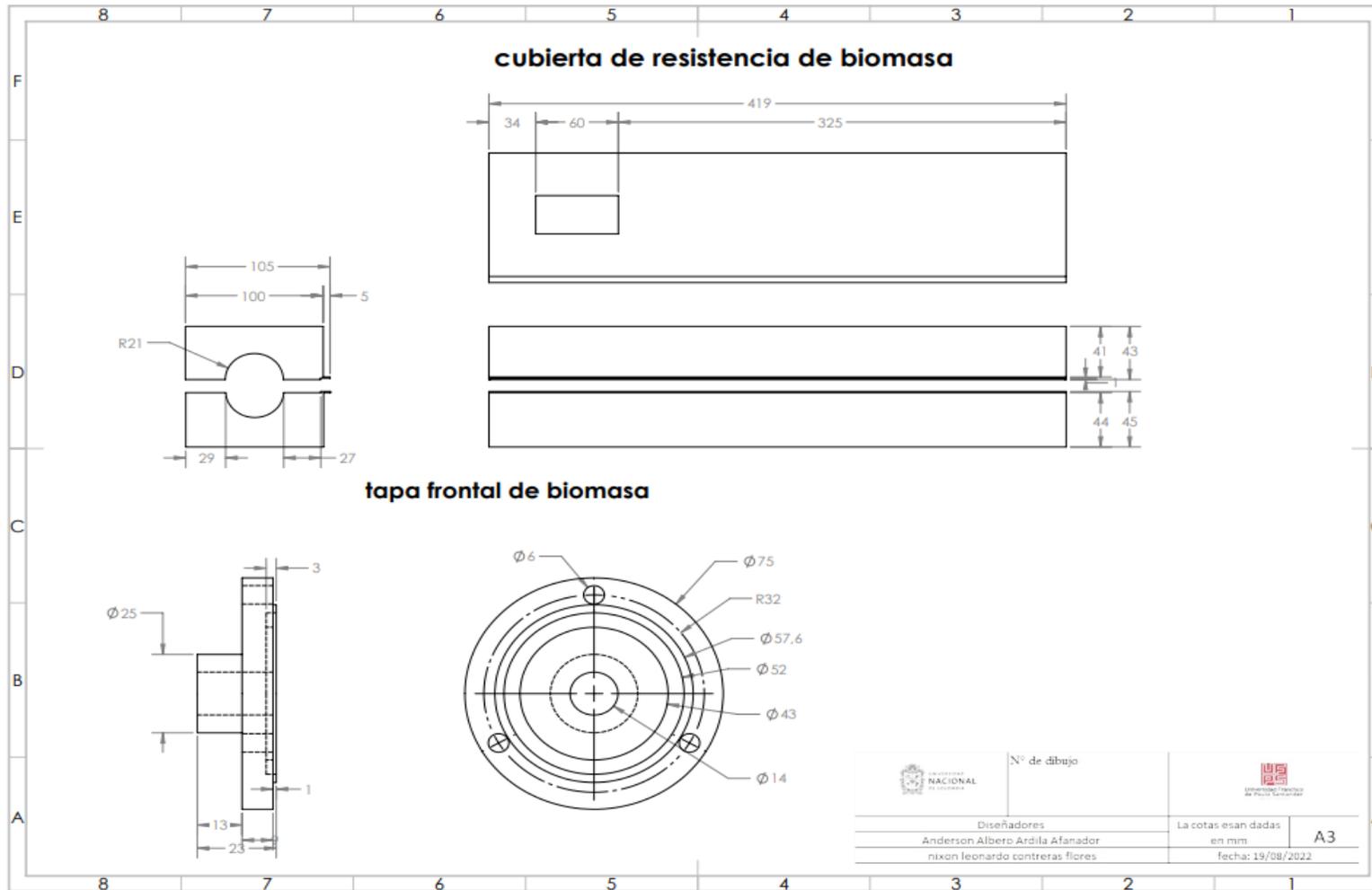
Planos del reactor Auger de doble tornillo sinfín.



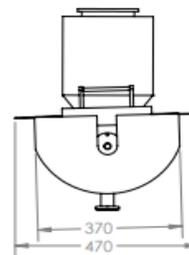
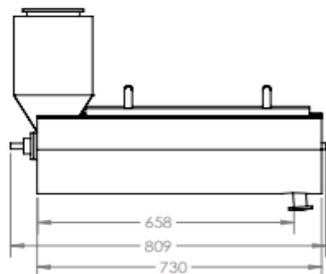
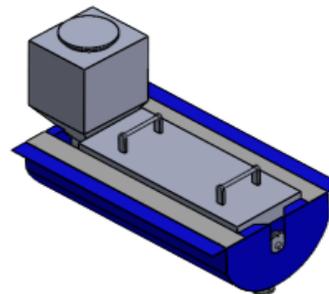
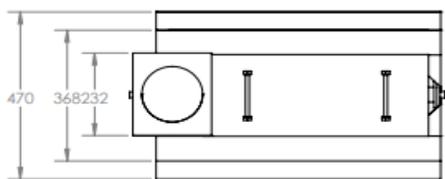




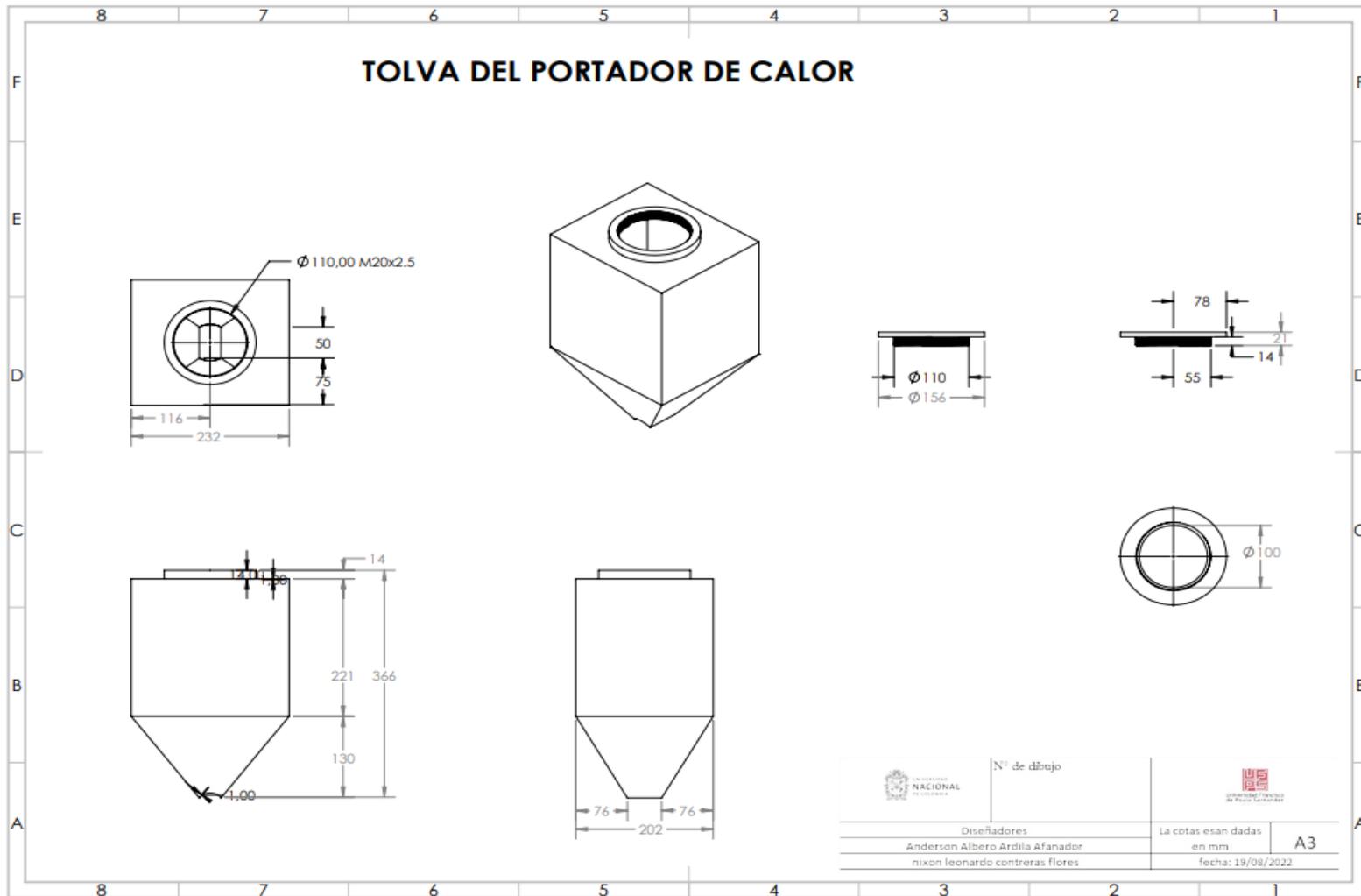




SISTEMA DE DOSIFICACION DEL PORTADOR DE CALOR



| | | | |
|---|---|---|----|
|  | Nº de dibujo |  | A3 |
| | Diseñadores Anderson Albero Ardila Afanador Nixon Leonardo Contreras Flores | | |



Bibliografía.

- [1] G. N. D. E. Santander, "Gobernacion norte de santander, Instituto departamental de salud" 2010.pdf.
- [2] A. Soriano, "Study of the Thermochemical Properties of Lignocellulosic Biomass from Energy Crops," 2021.
- [3] E. Toloza, "Biomass for electricity and heating Opportunities and challenges," no. September, 2015.
- [4] D. Acosta-Rubio, L. Castro-Camacho, and C. A. Moreno-Arias, "Pirólisis rápida para producir biocombustibles con residuos sólidos urbanos: estudio de caso, Madrid, Cundinamarca," *Gestión y Ambient.*, vol. 24, no. Supl3, pp. 47–58, 2021, doi: 10.15446/ga.v24nsupl3.97273.
- [5] A. Alarcón-zayas, "Caracterización química del bio-aceite de pirólisis rápida de biomasa," vol. 34, no. 1, pp. 131–159, 2022.pdf.
- [6] N. Arias, B. Direcci, and P. M. Ba, "Propuesta de contenidos científicos sobre biomasa en el contexto de un proyecto multidisciplinar de energías renovables Proposal of scientific content on biomass in the context of a multidisciplinary renewable energy project," pp. 2870–2884, 2022, doi: 10.46932/sfjdv3n2-101.
- [7] W. Hernández and F. Peña, "Evaluación del proceso de pirolisis en la obtención de combustibles a partir de residuos del maíz," *Univ. Libr.*, pp. 1–28, 2015, [Online]. Available: <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/9461>
- [8] S. A. Mejia Madrigal and S. A. Upegui Sosa, "La pirolisis y otros métodos para el aprovechamiento de residuos de neumáticos como fuente de energía para la

- industria. Una revisión,” *Cuad. Activa*, vol. 13, pp. 41–60, 2021.
- [9] C. Kornmayer, “Verfahrenstechnische untersuchungen zur schnellpyrolyse von lignocellulose im doppelschneckenmischreaktor,” *Ph.D Thesis Karlsruhe Inst. Technol.*, 2010.pdf
- [10] T. Rosmeir, “Abba sani kalgo Doctor of Philosophy development,” . June, 2011.
- [11] C. Alejandro, U. Vargas, C. Alejandro, and U. Vargas, *pirólisis del cisco de café Estudio de la condensación fraccionada de los gases de pirólisis del cisco de café.* 2021.pdf
- [12] P. P. Medina, “Biochar y sus aplicaciones potenciales en el suelo,” pp. 44–53, 2021, doi: 10.23800/10503.
- [13] E. Nacional and A. Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA), “Boletín Técnico Agropecuario y agrícola,” 30 de junio de 2020, pdf.
- [14] H. Tutor and F. J. Guti, “Trabajo Fin de Grado Grado en Ingeniería Química Diseño de una planta piloto para la sulfatación de sulfuro cálcico,” 2018.pdf
- [15] A. Cruz. “Diseño de tornillos sinfín para planta de alimentos agrícolas.”2017. pdf.
- [16] X. Hu and M. Gholizadeh, “Biomass pyrolysis : A review of the process development and challenges from initial researches up to the commercialisation stage,” *J. Energy Chem.*, vol. 39, no. x, pp. 109–143, 2019, doi: 10.1016/j.jechem.2019.01.024.
- [17] C. Zhou *et al.*, “Co-pyrolysis of textile dyeing sludge and red wood waste in a continuously operated auger reactor under microwave irradiation,” *Energy*, vol. 218, p. 119398, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.119398.
- [18] F. Campuzano, R. C. Brown, and J. D. Martínez, “Auger reactors for pyrolysis of biomass and wastes,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 102, no. October 2018, pp. 372–409, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.12.014.
- [19] E. Dur, “ Lecho burbujeante en la gasificación de biomasa de cisco de café,” vol. 12, pp. 35–43, 2014.
- [20] A. Lopez, J. Diaz “Diseño de un reactor de lecho fluidizado para la transformación

- termoquímica de biomasa u otros combustibles”. 2018
- [21] J. San and M. Avilés, “Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles sólidos con aporte solar,” 2017.pdf
- [22] M. Mas, “Biomass pyrolysis in a fixed-bed reactor: Effects of pyrolysis parameters on product yields and characterization of products,” vol. 64, pp. 1002–1025, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2013.11.053.
- [23] D. Exequiel and O. Orellana, “de Ensayos para un Transportador de Tornillo de Laboratorio Escuela de Ingeniería Eléctrica Facultad de Ingeniería,” 2018. pdf
- [24] C. Rapids, “Screw Conveyor components & design,” 2012.pdf
- [25] J. N. Brown and J. N. Brown, “Development of a lab-scale auger reactor for biomass fast pyrolysis and process optimization using response surface methodology by,” 2009.
- [26] Y. Yang, J. G. Brammer, A. S. N. Mahmood, and A. Hornung, “Bioresource Technology Intermediate pyrolysis of biomass energy pellets for producing sustainable liquid, gaseous and solid fuels,” *Bioresour. Technol.*, vol. 169, pp. 794–799, 2014, doi: 10.1016/j.biortech.2014.07.044.
- [27] R. García, C. Pizarro, A. G. Lavín, and J. L. Bueno, “Bioresource Technology Biomass proximate analysis using thermogravimetry,” vol. 139, pp. 1–4, 2013.
- [28] I. Juan *et al.*, “Orientador de diseño y fabricación de tornillos sinfín”2008 .
- [29] M. Ouadi, J. G. Brammer, Y. Yang, A. Hornung, and M. Kay, “Journal of Analytical and Applied Pyrolysis The intermediate pyrolysis of de-inking sludge to produce a sustainable liquid fuel,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 102, pp. 24–32, 2013, doi: 10.1016/j.jaap.2013.04.007.
- [30] T. O. Olanrewaju, I. M. Jeremiah, and P. E. Onyeanula, “Design and fabrication of a screw conveyor,” vol. 19, no. 3, pp. 156–162, 2017.
- [31] P. Niturkar, S. Kedar, M. Saraf, and P. Badhan, “Design of Auger Type Feed Screw and its Casing for Food Extrusion Process,” vol. 7, no. 7, pp. 105–107, 2017.
- [32] J. W. Fernandez, P. W. Cleary, and W. McBride, “Effect of screw design on hopper draw down by a horizontal screw feeder,” no. December, pp. 1–6, 2009.

- [33] S. Conveyor, E. Committee, and E. Conference, *Screw Conveyors for Bulk Materials*. pdf
- [34] J. Tomás and H. Guerrero "Diseño de tornillo auger para pirólisis rápida de cuesco de palma." 2017 pdf
- [35] P. Di *et al.*, "Evaluación térmica de un dosificador de tornillo sin fin con suministro de calor para biomasa , a partir de su diseño y modelado cinético," 2022.
- [36] D. I. Z. Ballaz, "Flujo y atascos de un medio granular en tornillos dosificadores," 2005.pdf
- [37] J. Alberto and P. Salazar, "bioaceite a partir de pirólisis rápida de biomasa residual Design of an auger reactor to obtain bio-oil from fast pyrolysis of residual biomass," vol. 9, pp. 26–41, DOI: <https://doi.org/10.17081/invinno.9.2.4209>. 2021.
- [38] S. Ortiz Ruiz. "Estimation of biofuels produced by pyrolysis of coffee husk," no. October, 2018.pdf.
- [39] G. Cruz, C. E. M. Braz, and P. M. Crnkovic, "Physicochemical properties of brazilian biomasses : potential physicochemical properties of brazilian biomasses :," no. November, 2013, doi: 10.13140/2.1.4761.2485.
- [40] M. Soh *et al.*, "IOP Conference Series : Materials Science and Engineering Thermogravimetric analyses (TGA) of three oil palm biomass pyrolysis : Kinetics and reaction mechanisms Thermogravimetric analyses (TGA) of three oil palm biomass pyrolysis : Kinetics and reaction mechanisms," 2020, doi: 10.1088/1757-899X/778/1/012100.
- [41] E. M. Manals-cutiño, D. Salas-tort, and D. C. Margarita, "Caracterización de la biomasa vegetal ' cascarilla de café ' Characterization of vegetable biomass coffee husk," pp. 169–181.
- [42] M. A. Sukiran, S. K. Loh, and N. A. Bakar, "Production of Bio-oil from Fast Pyrolysis of Oil Palm Biomass using Fluidised Bed Reactor," pp. 52–62, 2016.
- [43] M. P. Silva, R. Simister, L. D. Gomez, V. C. Fuertes, J. M. De Paoli, and E. L. Moyano, "Journal of Analytical and Applied Pyrolysis Fast pyrolysis of rice husk

- under vacuum conditions to produce levoglucosan,” vol. 156, no. March, 2021, doi: 10.1016/j.jaap.2021.105105.
- [44] W. Alexis, P. Caiza, R. Jefferson, and R. Aguiar, “Caracterización cuesco y fibra obtenidos del procesamiento de palma africana para un aprovechamiento eficiente de la energía térmica en calderas,” vol. 6, no. 21, pp. 110–126, 2021.
- [45] A. C. Moitinho, “Production and Characterization of the Bio-Oil Obtained by the Fast Pyrolysis of Spent Coffee Grounds of the Soluble Coffee Industry,” vol. 00, no. 00, pp. 1–8, 2019.
- [46] D.A Calderon, “Caracterizacion de biochar de cisco de café de pirólisis rapida a 550°C” Mayo 2022.pdf.
- [47] Khairuddin Md Isa “Characterization and thermal degradation of rice husk via TGA,” <https://www.researchgate.net/publication/325945195>, July 2009, pdf.
- [48] N. Kiggundu and J. Sittamukyoto, “Pryloysis of Coffee Husks for Biochar Production,” pp. 1553–1564, 2019, doi: 10.4236/jep.2019.1012092.
- [49] S. O. H. K. Loh, R. T. Bachmann, H. Zainal, and K. A. H. Y. Cheong, “palm kernel shell biochar production , characteristics and carbon sequestration potential,” 2019.
- [50] T. Islam *et al.*, “Synthesis of Rice Husk-Derived Magnetic Biochar Through Liquefaction to Adsorb Anionic and Cationic Dyes from Aqueous Solutions,” *Arab. J. Sci. Eng.*, 2020, doi: 10.1007/s13369-020-04537-z.
- [51] B. Armynah, Z. Djafar, and W. H. Piarah, “Analysis of Chemical and Physical Properties of Biochar from Rice Husk Biomass Analysis of Chemical and Physical Properties of Biochar from Rice Husk Biomass,” 2018.
- [52] N. B. Colthup and J. G. Grasselli, “The Handbook of Infrared and Raman Characteristic Frequencies of organic Molecules Daimay *Academic Press*. libro. pdf
- [53] M. Palm, O. Board, P. Institusi, and B. B. Bangi, “Bio-oils from Pyrolysis of Oil Palm Empty Fruit Bunches Mohamad Azri Sukiran , 1 Chow Mee Chin and 2 Nor Kartini Abu Bakar Department of Chemistry , University of Malaya , 50603 Kuala Lumpur , Malaysia,” vol. 6, no. 6, pp. 869–875, 2009.

- [54] B. Sutrisno and A. Hidayat, "Pyrolysis of palm empty fruit bunch : Yields and analysis of bio- oil," vol. 01036, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815401036> , February 2018.
- [55] H. Vasu, C. Fai, W. Navin, R. Vijjaretnam, and Y. Yee, "Insight into Co - pyrolysis of Palm Kernel Shell (PKS) with Palm Oil Sludge (POS): Effect on Bio - oil Yield and Properties," *Waste and Biomass Valorization*, no. 0123456789, 2019, doi: 10.1007/s12649-019-00852-1.
- [56] A. Del and C. D. E. Henequén, "Estudio de los procesos de pirólisis-gasificación de residuos agrícolas, energía renovables" Mérida, Marzo de 2018.pdf
- [57] D.A Melo "Obtención de biocombustible a través de co-pirólisis rápida de biomasa de eucalipto y palma" Bogota 2021. pdf
- [58] R. Moreira and E. Jos, "Global biomass energy potential pp. 313–342, 2006, doi: 10.1007/s11027-005-9003-8. DOI: 10.1007/s11027-005-9003-8. september 2015.
- [59] N. Gautam and A. Chaurasia, "Study on kinetics and bio-oil production from rice husk, rice straw, bamboo, sugarcane bagasse and neem bark in a fixed-bed pyrolysis process," *Energy*, p. 116434, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.116434.
- [60] E. Bartolomei, Y. Le, A. Dufour, V. Carre, F. Aubriet, and E. Terrell, "Lignin depolymerization : a comparison of methods to analyze monomers and oligomers". *ChemSusChem* Volume 13, Issue 17 p. 4633-4648. doi.org/10.1002/cssc.202001126
- [61] E. Science, "Characterization of pyrolysis products of oil palm empty fruit bunch Characterization of pyrolysis products of oil palm empty fruit bunch," 2021, doi: 10.1088/1755-1315/749/1/012041.