

EVALUAR LA VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN DE
PELLETS A BASE DEL RESIDUO AGROINDUSTRIAL DEL FRUTO DE SACHA
INCHI PARA USO COMO COMBUSTIBLE SÓLIDO

JUAN MANUEL ARCINIEGAS BARRERA
MANUEL FERNANDO BALLESTEROS RUGELES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
BUCARAMANGA

2022

EVALUAR LA VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN DE
PELLETS A BASE DEL RESIDUO AGROINDUSTRIAL DEL FRUTO DE SACHA
INCHI PARA USO COMO COMBUSTIBLE SÓLIDO

JUAN MANUEL ARCINIEGAS BARRERA
MANUEL FERNANDO BALLESTEROS RUGELES

Trabajo de grado para optar título de Ingeniero
Mecánico

Director
PhD. YESID JAVIER RUEDA ORDOÑEZ
Ingeniero Mecánico

Codirector
RAUL ANDRES SERRANO BAYONA
Ingeniero Mecánico, M. Sc

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2022

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mi madre, María Betty por su amor, trabajo, apoyo y sacrificio a lo largo de mi carrera y de mi vida. A Anggie Alexandra por haber sido mi apoyo y la mujer que me hace ser mejor cada día. A mi padrastro Gabriel, amigos y a las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito.

Juan Manuel Arciniegas Barrera

El presente trabajo está dedicado a mi familia, especialmente a mi madre Luz Stella Rúgeles, por haber sido mi apoyo, por su trabajo, sus sacrificios a lo largo de toda mi carrera universitaria y de mi vida. También, a todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación tanto profesional y como ser humano.

Manuel Fernando Ballesteros Rúgeles

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por bendecirnos la vida, por guiarnos a lo largo de nuestra vida, ser el apoyo y fortaleza en los momentos de dificultad y de debilidad. También de manera sincera a todas las personas que de una u otra forma contribuyeron en la realización de este proyecto, en especial a nuestras familias por el apoyo total en circunstancia que muchas veces se presentaron y por ser nuestro principal motor.

A la Universidad industrial de Santander por ser la creadora de nuestras bases y el pilar de nuestro conocimiento. A nuestro director de proyecto de grado PhD. Yesid Javier Rueda Ordoñez por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestra profesión. A nuestro codirector M.S.c. Raúl Andrés Serrano Bayona por la atención y apoyo dedicado, a ellos dos muchas gracias por el tiempo y paciencia lo cual ha contribuido a nuestro crecimiento personal y profesional.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
2.JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	20
3.OBJETIVO.....	22
3.1 OBJETIVO GENERAL	22
3.2 OBJETIVO ESPECIFICO	22
4.MARCO TEORICO	23
4.1 Semilla sachu inchi	23
4.2 Pellets a partir de biomasa.....	25
4.3 Dimensiones de pellet.....	26
4.4 Humedad	27
4.5 Temperatura	27
4.6 Presión.....	28
4.7 Tamaño.....	28
5. MARCO CONCEPTUAL	29
6. MARCO LEGAL	33
7. ESTADO DEL ARTE	34
8. METODOLOGÍA	39
8.1 Fase 1: Proceso de molienda, tamizado y paletización.....	40
8.2 Fase 2: Análisis y caracterización de los pellets	42
8.3 Fase 3: Caracterización de combustible	46
8.4 Fase 4: Análisis de viabilidad y documentación.....	48

9. RESULTADOS.....	50
10. CONCLUSIONES.....	72
11. RECOMENDACIONES.....	74
BIBLIOGRÁFICA	75
ANEXOS	80

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición química en base seca.....	24
Tabla 2. Potencial energético de biomasa residual vegetal en Colombia.....	35
Tabla 3. Planteamiento para la elaboración de pellets	42
Tabla 4. Elaboración de pellets datos.....	52
Tabla 5. Pellets con granulometría mayores a 0,425 mm.....	53
Tabla 6. Pellets con granulometría 0,250 mm y menores.....	54
Tabla 7. Volumen y densidad de Pellets con granulometrías mayores a 0,425 mm.....	54
Tabla 8. Volumen y densidad de Pellets con granulometría 0,250 mm y menores...	55
Tabla 9. Análisis próximo de pellets.....	55
Tabla 10. Análisis último.....	57
Tabla 11. Poder calorífico de los pellets.....	58
Tabla 12. Prueba de resistencia mecánica.....	58
Tabla 13. Desviación estándar de prueba pellet con granulometría mayores a 0,425 mm.....	66
Tabla 14. Desviación estándar de prueba pellet con granulometría mayores a 0,250 mm.....	66
Tabla 14 Precio de la materia prima y transporte.....	67
Tabla 15 Precios Maquila según empresa BALMA SAS.....	67
Tabla 16 Suma de costos totales.....	68
Tabla 17 Valor total por tonelada.....	69
Tabla 18 Comparación precios de mercado.....	69
Tabla 19. Prueba de humedad con pellet mayores a 0,425.....	70
Tabla 20. Prueba de humedad con pellet 0,250 y menores.....	80
Tabla 21. Prueba de ceniza con pellet mayores a 0,425.....	80
Tabla 22. Prueba de ceniza con pellet 0,250 y menores.....	81

Tabla 23. Prueba de material volátil con pellet mayores a 0,425.....	81
Tabla 24. Prueba de material volátil con pellet 0,250 y menores.....	81
Tabla 25. Calibración del dämper.....	82
Tabla 26. Datos de combustión teórica estequiométrica.....	83

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Semilla sachá inchi (maní de incas)	17
Figura 2. Dimensiones del pellet según EN14961-1.....	26
Figura 3. Uso y consumo energético.....	35
Figura 4. Pellet.....	37
Figura 5. Tamices y tamizadora.....	41
Figura 6. Molino.....	41
Figura 7. Peletizadora.....	41
Figura 8. Caldera de biomasa.....	46
Figura 9. Dámper.....	46
Figura 10 Anemómetro.....	47
Figura 11. Analizador de gases testo 350.....	48
Figura 12. Bulto antes de clasificar.....	50
Figura 13. Bulto después de clasificar.....	50
Figura 14. Material obtenido después de tamizar.....	51
Figura 15. Pellets obtenidos.....	53

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Flujograma de rendimiento cosecha y pos cosecha.....	18
Cuadro 2. Biomás.....	32
Cuadro 3. Procedimiento de pelletizado.....	67

LISTA DE GRAFICAS

	pág.
Grafica 1. Flujo volumétrico vs ángulo dámper	59
Grafica 2. Fracción molar X_{O_2} vs Relación aire/combustión.....	61
Grafica 3. Fracción molar X_{CO_2} vs Relación aire/combustión.....	62
Grafica 4. Fracción molar X_{CO} vs Relación aire/combustión.....	63
Grafica 5. Temperatura De cámara de combustión vs tiempo con relación de aire combustión $\lambda = 1.5$	64
Grafica 6. Temperatura De cámara de combustión vs tiempo con relación de aire combustión $\lambda = 1$	65

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Valores tomados en la prueba de humedad.....	80
Anexo B. Valores tomados en la prueba de ceniza.....	81
Anexo C. Valores tomados en la prueba de material volátil.....	81
Anexo D. Datos tomado con el anemómetro.....	82
Anexo E. Datos encontrados para la relación aire/combustión.....	83

RESUMEN

TÍTULO: EVALUAR LA VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN DE PELLETS A BASE DEL RESIDUO AGROINDUSTRIAL DEL FRUTO DE SACHA INCHI PARA USO COMO COMBUSTIBLE SÓLIDO

AUTOR: JUAN MANUEL ARCINIEGAS BARRERA, MANUEL FERNANDO BALLESTEROS RUGELES.

PALABRAS CLAVE: PELLETS, BIOMASA, SACHA INCHI, COMBUSTIÓN.

DESCRIPCIÓN: El objetivo de este proyecto es evaluar la viabilidad técnica y económica del residuo agroindustrial del fruto Sacha Inchi para combustión, este proceso se llevará a cabo mediante la elaboración de pellets a partir de la cascarilla del fruto. La cual se seleccionó manualmente, donde las primeras semanas fueron de secado a temperatura ambiente para después ser procesado por un molino de aspas.

Posteriormente, se evaluó la humedad y el uso de tres aglomerantes (Fécula de maíz, boñiga de vaca y cal orgánica deshidratada). Después de realizar varios experimentos de prueba y error, se definieron los intervalos de concentración de aglomerante, que en este caso fue del 30% de aglutinante y 70% biomasa Sacha Inchi. Seguido a esto, se realizó el diseño de una matriz de experimentos, obteniéndose 24 ensayos finales. Los pellets obtenidos se caracterizaron fisicoquímicamente según la norma para biocombustibles sólidos. Los parámetros evaluados fueron: Contenido de humedad, contenido de ceniza, material volátil, poder calorífico y dureza de los pellets. Finalmente se encontró que los mejores pellets para el proceso de combustión fueron los pellets con granulometría mayores a #40 (0.425 mm) con aglomerante de fécula maíz. Sin embargo, los otros tipos de pellets presentaron resultados muy similares.

ABSTRACT

TITLE: TO EVALUATE THE TECHNICAL AND ECONOMIC FEASIBILITY OF THE PRODUCTION OF PELLETS BASED ON THE AGRO-INDUSTRIAL RESIDUE OF THE SACHA INCHI FRUIT FOR USE AS SOLID FUEL.

AUTHOR: JUAN MANUEL ARCINIEGAS BARRERA, MANUEL FERNANDO BALLESTEROS RUGELES.

KEY WORDS: PELLETS, BIOMASS, SACHA INCHI, COMBUSTION.

DESCRIPTION: The objective of this project is to evaluate the technical and economic feasibility of the agro-industrial residue of the Sacha Inchi fruit for combustion, this process will be carried out by making pellets from the husk of the fruit. The husk was selected manually, where the first weeks were spent drying at room temperature and then processed by a blade mill.

Subsequently, moisture and the use of three binders (corn starch, cow dung and dehydrated organic lime) were evaluated. After several trial and error experiments, the binder concentration intervals were defined, which in this case was 30% binder and 70% Sacha Inchi biomass. Following this, the design of a matrix of experiments was carried out, obtaining 24 final trials. The pellets obtained were physicochemically characterized according to the standard for solid biofuels. The parameters evaluated were: moisture content, ash content, volatile material, calorific value and hardness of the pellets. Finally, it was found that the best pellets for the combustion process were pellets with a particle size greater than #40 (0.425 mm) with corn starch binder. However, the other types of pellets showed very similar results.

INTRODUCCIÓN

En los últimos siglos los avances industriales, la transformación de la economía y el mundo como hoy lo conocemos, ha sido gracias a los combustibles fósiles. Pese a que sus beneficios a nivel tecnológico e industrial son incalculables. El daño irreversible en el ambiente ha sido ignorado completamente. Extraer carbón o petróleo para transportarnos y llevar energía a nuestras casas, producen emisiones que intensifican el efecto invernadero y a su vez al ser un recurso limitado se han encendido las alarmas para buscar nuevos recursos que los reemplacen, esto ha motivado a investigar distintas fuentes energéticas con el fin de sustituir la dependencia de estos combustibles, que sean fuentes renovables, su impacto negativo al planeta y a la población mundial sea mínimo y económicamente sostenible.

En esa búsqueda de obtener diferentes alternativas de energía, se encuentra la biomasa (“se designa a un conjunto heterogéneo de materias orgánicas, tanto por su origen como por su naturaleza y composición, que puede emplearse para obtener energía”)¹. Que dependiendo de la composición de los materiales pueden clasificarse en sólidos, líquidos o gaseosos. “Los productos procedentes de la biomasa que se utilizan para fines energéticos se denominan, en general, biocombustibles y específicamente, a todos aquellos, generalmente sólidos y gases, que se aplican con fines térmicos y eléctricos”².

Esto a día de hoy son desechos de la agroindustria, donde con el debido proceso se pueden aprovechar como una fuente de combustible, uno de esos desechos es la cascarilla del fruto Sacha Inchi “(es un fruto seco originario de la Amazonía muy apetecido en el mercado alimenticio y farmacéutico por sus propiedades y

¹ ROMERO, Salvador. Sobre APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA ALTERNATIVA A LOS COMBUSTIBLES FÓSILES. *Rev.R.Acad.Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp)*, Madrid, 2010, Vol. 104, N°2, pág. 2.

² *Ibid*,p2.

beneficios al consumirlo, pues posee gran cantidad de antioxidantes y un alto índice de Omega 3, 6 y 9.

Se le atribuyen propiedades antiinflamatorias para contrarrestar los padecimientos ocasionados por enfermedades como artritis, reumatismo y osteoporosis; además ayuda a reducir el colesterol y prevenir afecciones cardiovasculares, entre otros beneficios para el organismo y la salud humana)³. Esta semilla ha tenido una gran acogida en el país lo que ha llevado a estudiar en su medida su desecho como una fuente de energía renovable para la combustión.

Con esto en mente, nuestro proyecto está encaminado a EVALUAR LA VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN DE PELLETS A BASE DEL RESIDUO AGROINDUSTRIAL DEL FRUTO DE SACHA INCHI PARA USO COMO COMBUSTIBLE SÓLIDO. Esto se realizará utilizando la cascarilla del fruto como biomasa aplicando un proceso de molienda para luego agregar un aglomerante orgánico (maíz, boñiga o cal) que se utilizarán en la fabricación de pellets, se clasificarán en dos subgrupos con tamaño de granulometría diferente para luego ser quemados en un ambiente controlado y observar cuál de todos tiene un mayor poder calorífico y cuál es el más factible.

Ya sabiendo cual cumple con los requisitos esperados, hacemos el análisis costo-beneficio de que tan viable es si se produce a una escala industrial. Adentrémonos en este proyecto y averigüemos los resultados obtenidos.

³ MINISTERIO DE AGRICULTURA DE COLOMBIA. Sacha Inchi, la apuesta de Colombia Sostenible para reducir la emisión de más de 49.000 toneladas de carbono en Córdoba, Bogotá D.C., 2019.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La semilla sachá inchi también llamada como maní de los incas ha tomado fuerza en Colombia por sus atributos, aunque estos cultivos son tradicionales en la amazonia peruana, ecuatoriana se pueden sembrar acá gracias a nuestra diversidad climática como esta crece entre 100 – 2000 m.s.n.m. a temperaturas entre 12 °C y 32 °C. “se caracteriza por tener un valor nutricional ya que contiene omega 3, 6 y 9”⁴, esta semilla presento una composición química “de proteína y grasa de 29.85±0.085 y 42.75±0.5%”⁵ por tanto es principalmente utilizada para la obtención de aceite.

Figura 1. Semilla sachá inchi (maní de incas)



Fuente: https://es.123rf.com/photo_44652464_imagen-de-semilla-de-man%C3%AD-sacha-inchi.html

Su demanda es global y la poca oferta ha rentabilizado este cultivo. No obstante, podría sustituir con ventaja los cultivos ilícitos, como la coca. Una planta de sachá inchi empieza a producir a los 7 meses de sembrada, dos meses más que la coca.

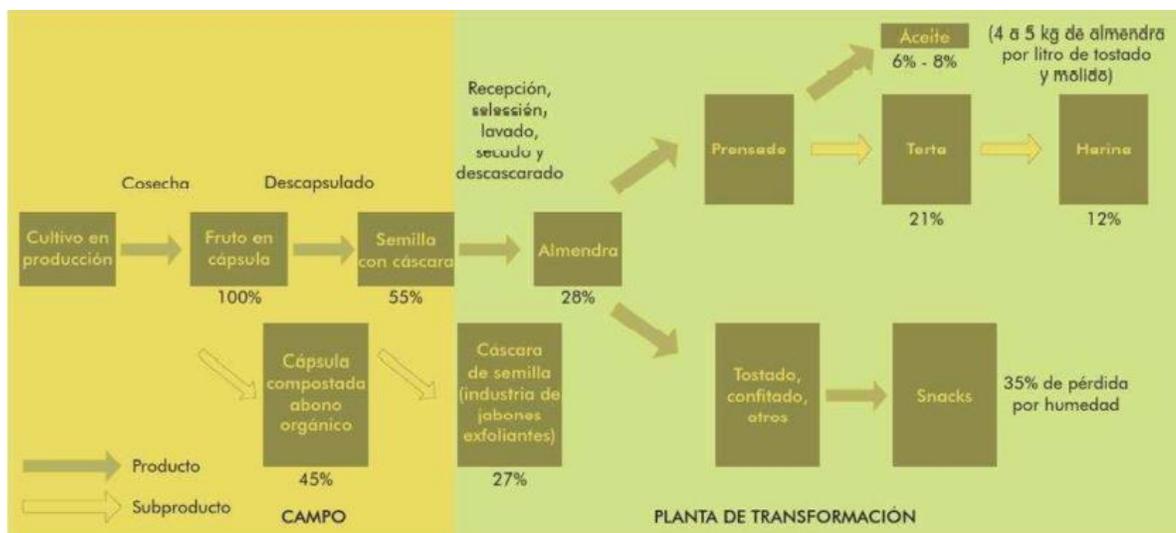
⁴ AYALA MARTINEZ, Guillermo Alexander. Análisis de crecimiento y producción de 3 variedades de sachá inchi, en el municipio de tena Cundinamarca. Trabajo de grado para optar el título de ingeniero agrónomo. Universidad de ciencias aplicadas y ambientales U.D.C.A. Facultad de ingeniería, 2016, 11p.

⁵ GUTIERREZ CORENA, Hernán Darío. Plan de negocios para la creación de una empresa extractora de aceite de ricino en el bajo cauca. Trabajo de grado presentado para optar el título de magister en administración de empresas MBA. Cauca – Colombia. Universidad EAN. Facultad de estudios en ambientes virtuales, 2020. P.21.

“por la producción de una hectárea un campesino puede recibir entre \$15 millones y \$18 millones, frente a \$20 millones de la coca, lo que lo convierte en un verdadero sustituto”⁶

Por tanto, si esta semilla comienza a producirse en grandes cantidades para la obtención del aceite y otros derivados generaría desperdicios los cuales en vez de favorecer el ambiente lo desmejorarían. A continuación, podemos ver un flujograma de rendimiento cosecha y pos cosecha de esta:

Cuadro 1. Flujograma de rendimiento cosecha y pos cosecha



Fuente: Manual de producción de sachá inchi para el biocomercio y la agroforestería sostenible

Con la información anterior podemos exponer que se tiene un desperdicio aproximado del 27% en cada cultivo. Lo que genera una oportunidad de aprovechamiento para la biomasa con el fin de obtener energía eléctrica a partir de la quema de esta. Es una alternativa para que Colombia no solo dependa de las centrales hidroeléctricas sí que tenga un beneficio de la biomasa, ya que “Es la

⁶ REVISTA dinero. (2019). La planta que puede competir en rentabilidad con la coca. [online] disponible en: <https://www.dinero.com/edicion-impresa/negocios/articulo/la-planta-que-puede-competir-en-rentabilidad-con-la-coca/267323> [Acceso 26 Jan. 2020].

fracción biodegradable de productos, desechos y residuos de la agricultura (incluyendo sustancias vegetales y animales)”⁷; Sabemos que Colombia es uno de los países más agricultores, pero no le damos un buen manejo a los residuos de los diferentes cultivos.

Con el fin de aprovechar los residuos de la semilla sachá inchi como biomasa se plantea fabricar pellets a partir de la cascara de esta semilla con el fin de analizar sus propiedades caloríficas ya que los pellets son utilizados como combustibles en calderas de biomasa. Se puede decir que los pellets son un tipo de combustible granulado y se fabrican mediante prensado.

Para que Colombia no solo viva a cuenta de sus centrales hidroeléctricas sino también de energía producida por las biomásas ya que el uso energético en los últimos tiempos aumentado consideradamente a nivel mundial. La utilización de esta ha generado un gran daño en el medio ambiente y si observamos “Colombia, la dependencia de las grandes centrales hidroeléctricas es aún mayor que en otros países, el 68.5% de la energía total del país es generada de fuentes hídricas”⁸.

⁷ F. N. Jiménez-García, A. M. Restrepo-Franco, and L. F. Mulcúe-Nieto, “Estado de la investigación en energía en Colombia: una mirada desde los grupos de investigación,” *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 28 (52), pp. 9-26, Jul. 2019.

⁸ F. N. Jiménez-García, A. M. Restrepo-Franco, and L. F. Mulcúe-Nieto, “Estado de la investigación en energía en Colombia: una mirada desde los grupos de investigación,” *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 28 (52), pp. 9-26, Jul. 2019.

2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Es claro observar que las fuentes energéticas que actualmente utilizamos en Colombia generan demasiados residuos e impacto ambiental, aunque en la actualidad el uso de los biocombustibles. Es una nueva tecnología que permite el manejo y aprovechamiento de una manera controlada de las biomasa, un ejemplo es la cascarilla de arroz para su uso como combustible; en España, la empresa valenciana Dacsa, están utilizando la cascarilla de arroz como biomasa en una planta de cogeneración eléctrica y tienen una potencia de 2 megavatios; así como en “Durán Ecuador, genera 830 toneladas de cascarilla de arroz mensualmente, de las cuales se aprovechan 5.3 ton/h; con esto se plantea reemplazar 14.5 millones de galones de Diésel en un período de 10 años”⁹.

Debido a la Ley 1715 de 2014 que promueve a la utilización y aprovechamiento de fuentes no convencionales de energía actualmente en el país existen 10 proyectos en diferentes zonas que generan 40 MW a partir de la biomasa. Un ejemplo es la “planta de bioenergy, aporta el 38% del etanol que se produce en el país, y la recién inaugurada Planta Incubadora Santander, aporta 4,4 MW de energía eléctrica”¹⁰. Por otro lado, Colombia para el 2016 generó “65.935 GWh de electricidad en el Sistema Interconectado Nacional, de los cuales 597,81 GWh fueron generados a partir de biomasa. Esto equivale al 0,9 % del total producido, siendo el bagazo y el biogás las fuentes principales de materia prima para la generación eléctrica”¹¹.

⁹ Alternativas tecnológicas para el uso de cascarilla de arroz (2020). Retrieved 19 February 2020, from <http://red.uao.edu.co/bitstream/10614/1327/1/TME00462.pdf>

¹⁰ Tiempo, C. (2020). 'Colombia tiene potencial para producir energía con biomasa'. Retrieved 19 February 2020, from <https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/colombia-tiene-potencial-para-producir-energia-con-biomasa-505377>

¹¹ Tiempo, C. (2020). 'Colombia tiene potencial para producir energía con biomasa'. Retrieved 19 February 2020, from <https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/colombia-tiene-potencial-para-producir-energia-con-biomasa-505377>

Teniendo en cuenta el potencial energético bruto a partir de las biomasas residuales a nivel nacional es alto en algunas industrias agrícolas, en el caso de la semilla de sachá inchi se halla dicho potencial en los residuos que se producen en su proceso de extracción, la semilla sachá inchi la cual en la actualidad está siendo sembrada y se espera una acogida mayor; está generando un desperdicio del “fruto en cápsula del 45% que usualmente se utiliza para abono orgánico y de la semilla con cáscara 27% que se utiliza para industria de jabones exfoliantes”¹².

Las posibilidades energéticas de esta semilla como biomasa no son claras hasta el momento, es una planta relativamente nueva en Colombia, pero con un crecimiento favorable en su siembra en diferentes partes como por ejemplo en el sur de córdoba tres de los cuatro municipios que conforman el PDET se a cofinanciar la producción de 94 hectáreas de sachá inchi para “la iniciativa que acaba de iniciar ejecución y contará con el apoyo económico del programa hasta finales del 2022 es administrada por Sachaamara UEAI S.A.S. Zomac. Su apuesta es la venta de productos obtenidos de la transformación de las semillas de Sacha Inchi como: aceite, almendra y torta proteica hechos a base del también llamado maní de los Incas”¹³. Un proceso que se ha venido investigando para la utilización de la biomasa es la obtención de pellets a partir de esta. Con esto se reduce el problema en cuanto a su manejo y transporte, lo que genera menos costo, es decir que al darle un buen manejo producirá grandes ventajas competitivas, además de ser una buena estrategia de comercialización; por esto se desea generar pellets compactos de biomasa para determinar si son una posible sustitución de algunos combustibles fósiles.

¹² BLAIR, Carlos. “Manual de producción de sachá inchi para el biocomercio y la agroforestería sostenible”. {En línea}. {26 de enero del 2020} disponible en: https://issuu.com/agronegocioscr/docs/manual_de_produccion_de_sacha_inchi_para_web.

¹³ Portal para la paz. [sitio web]. Montelíbano(córdoba): sachá inchi, la apuesta de Colombia sostenible para reducir la emisión de más de 49.0000 toneladas de carbono en córdoba. [consultado el 23 de julio]. Disponible en: <https://portalparalapaz.gov.co/publicaciones/1676/sacha-inchi-la-apuesta-de-colombia-sostenible-para-reducir-la-emision-de-mas-de-49000-toneladas-de-carbono-en-cordoba/>

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la viabilidad técnica y económica de la producción de pellets a base del residuo agroindustrial del fruto de sacha Inchi para uso como combustible sólido en regiones aisladas.

3.2 OBJETIVO ESPECIFICO

- Seleccionar la granulometría de la biomasa a utilizar y los tipos de aglomerantes para la obtención de los pellets utilizando residuo agroindustrial de la cascarilla Sacha Inchi ajustándose a un Diámetro y altura ideal.
- Caracterizar los diferentes pellets obtenidos a partir del análisis próximo, análisis ultimo para estimar las condiciones en proceso de combustión.
- Medir las emisiones de gases en la combustión de los pellets, y evaluar el efecto de la relación aire/combustible en el proceso.
- Evaluar la viabilidad técnica y económica del pellet como un posible sustituto de pellets comerciales de madera y de carbono.

4. MARCO TEORICO

4.1 Semilla sacha inchi

La semilla sacha inchi es una planta “oleaginosa trepadora que crece en países como Perú, Bolivia y Colombia”¹⁴, principalmente era utilizada por los incas como medicina. Este fruto nace de una planta donde puede alcanzar alturas de hasta 3 metros, es de tipo enredadera muy parecida a la de maracuyá.

Su fruto tiene forma de estrella puede tener desde cuatro a ocho puntas, dentro contiene una semilla de color marrón oscuro, normalmente tiene un diámetro de 1 a 2 cm, esta planta presenta polinización cruzada, es decir, que los granos de polen se transfieren hasta una flor gracias a los insectos. Esta semilla al pertenecer a las oleaginosas; se puede extraer aceite, el cual es su principal uso ya que posee altos niveles de “omega 3, 6 y 9”¹⁵, esto resulta atractivo en el mercado, para el consumo humano, por sus propiedades proteínicas.

Su cosecha se hace de forma manual y posterior mente se realiza un proceso de secado estilo marquesina muy similar al del café, el cual se hace para reducir la humedad de esta para después llevar a descascarado, se puede manual o con maquina descascaradora; al estar solo la almendra con ayuda de una prensa hidráulica y con un cilindro perforado se obtiene el aceite. Que es su principal uso, pero para obtener este deben ser almendras en buen estado.

¹⁴ ALAYON N., Alicia and ECHEVERRI J., Isabella. Sacha inchi (*plukenetia volubilis* Linneo) ¿una experiencia ancestral desaprovechada? Evidencias clínicas asociadas a su consumo. Revista chilena de nutrición. 2016. versión On-line ISSN 0717-7518

¹⁵ AYALA MARTINEZ, Guillermo Alexander. Análisis de crecimiento y producción de 3 variedades de sacha inchi, en el municipio de tena Cundinamarca. Trabajo de grado para optar el título de ingeniero agrónomo. Universidad de ciencias aplicadas y ambientales U.D.C.A. Faculta de ingeniería, 2016, 11p.

La semilla está compuesta aproximadamente por 28% de cascarilla y el resto es almendra donde es utilizada para el proceso del aceite como se puede apreciar en el cuadro 1, este fruto en general tiene unas propiedades que las destacan sobre otras oleaginosas.

Tabla 1. Composición química en base seca

Componente	%
Fibra cruda	12.07
Grasa cruda	54.90
Carbohidratos	4.30
Ceniza	2.87
Proteína	25.86
Total	100.00

Fuente: Anales científicos, universidad agraria la molina, Perú.

Por estas características y otras el aceite tiene una gran acogida, en Colombia se dice que la semilla sacha inchi tiene un gran apogeo por “Hace unos días, la asociación y Agroincolsa, lograron enviar con destino a Bélgica 600 botellas de 250 ml de aceite de sacha-inchi, un producto que poco mercado tiene en Colombia, pero que comerciantes en Europa y Norteamérica demandan por sus propiedades”¹⁶.por esto se espera que su producción siga en crecimiento ya que esta se siembra en climas cálidos o templados y tiene una gran rentabilidad.

¹⁶ El espectador. Sacha Inchi: la semilla de paz que Colombia quiere plantar en el mundo. [sitio web]. Bogotá. [Consultado: 31/12/21] disponible en: <https://www.elespectador.com/judicial/sacha-inchi-la-semilla-de-paz-que-colombia-quiere-plantar-en-el-mundo/>

4.2 Pellets a partir de biomasa

“En estos productos, la biomasa se densifica mediante un proceso mecánico donde se aplica presión, disminuyendo los espacios entre las partículas de la madera e incrementando su densidad”¹⁷; en esta presentación el contenido de humedad, de cenizas, como los costos de transporte y almacenamiento mejoran considerablemente.

Para la elaboración de pellets debemos tener en cuenta los parámetros básicos requeridos en las normas internacionales. Antes de empezar a elaborar debemos hacerle un proceso a nuestra biomasa y analizar las propiedades de la misma para poder tener un producto final de calidad.

Los factores que influyen en la densificación de los pellets son:

- “La materia prima empleada: Cuanto mayor sea la densidad de la materia prima, mayor será la densidad del pellet. Una mayor densidad implica un menor volumen, lo que facilita su manejo, almacenamiento y transporte.
- La presión ejercida por la prensa determina el poder de manipulación de la biomasa. Las presiones de compactación son variables, de acuerdo a la maquinaria empleada”¹⁸.

El mercado de los pellets se ha incrementado en los últimos años, aunque del que se tiene mayor conocimiento es del pellet de madera, es un buen inicio para esta manera de generar un biocombustible a partir de desperdicios y desechos orgánicos, aunque no se conoce un precio de pellets se dice que en Europa “están entre 200 €/ton y 300 €/ton, a excepción de Suiza y Francia, donde los precios son

¹⁷ ALVAREZ GAITAN, Johanna; MOYA, Roger. Características y propiedades de pellets de biomasa torrefaccionada de Gmelina arbórea y Dipterix panaramensis a diferentes tiempos. Escuela de ingeniería forestal – Instituto tecnológico de costa rica. Cartago, 2015. 2p

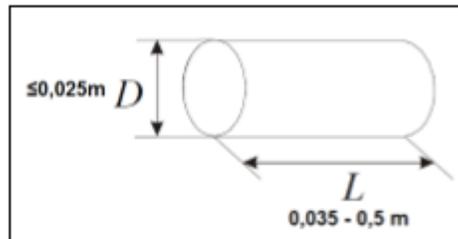
¹⁸ VARGAS LAZO, Angélica Maria. Estudio de la producción de pellets a partir de café. Tesis de magister, mención en ingeniería química. Colombia: universidad nacional de Colombia. Facultad de ingeniería, 2018, 25p.

superiores. En 2013 se alcanzaron los más altos precios en Austria, Alemania, Suecia e Italia, mientras que en el 2014 aumentaron para los consumidores suizos, franceses y españoles. En el año 2016 los precios cayeron en todos los países debido a un exceso de oferta en los mercados de pellets pequeños”¹⁹

4.3 Dimensiones de pellet

Las dimensiones se establecen ya que es necesario para poder diferenciar un pellet de una briqueta. En el caso del pellet su diámetro no puede “superar los 0,025 m, siendo los más habituales entre 0,006 y 0,022 m. De la misma forma, la longitud también es variable, entre 0,035 y 0,5 m según la norma EN14961-1. En cuanto a las briquetas, estas tienen un diámetro $\geq 0,025$ m.”²⁰

Figura 2. Dimensiones del pellet según EN14961-1.



Fuente: VARGA LAZO, Angélica Maria. Estudio de la producción de pellets a partir de café. Tesis de magister, mención en ingeniería química. Colombia: universidad nacional de Colombia. Facultad de ingeniería,2018, 33p

¹⁹ Ibid., 30p.

²⁰ VARGAS LAZO, Angélica Maria. Estudio de la producción de pellets a partir de café. Tesis de magister, mención en ingeniería química. Colombia: universidad nacional de Colombia. Facultad de ingeniería,2018, 33p.

4.4 Humedad

Esto es uno de los parámetros que más importancia debemos dar porque de ella depende algunas características como lo son “el poder calorífico del biocombustible, la estructura del pellet, su resistencia a la deformación, la aglomeración de la biomasa, entre otras propiedades. La humedad de la biomasa se debe controlar en dos momentos del proceso, cada uno dependiente de la otra. La primera etapa es la humedad inicial de la biomasa, es decir, la cantidad de agua que tiene la materia prima en el momento de su recolección. Materias primas como la borra de café contienen un porcentaje de humedad de aproximadamente 70%, razón por la cual es necesario secarla hasta obtener un porcentaje apropiado para la elaboración de los pellets. En la segunda etapa, el proceso de peletizado, es necesario controlar nuevamente la humedad puesto que también se deben considerar pérdidas de agua al momento de utilizar la maquina peletizadora, la cual ha sido precalentada previamente a una temperatura recomendada por el fabricante.

Se recomienda adecuar la biomasa a utilizar, de tal manera que después de un proceso de secado, esta tenga un porcentaje de humedad entre el 8-12%”²¹

4.5 Temperatura

Este parámetro sirve como referencia de la temperatura que recubre la cámara por la cual es alimentada la biomasa. “Se tienen reportes en donde la temperatura de peletización es 90°C y la mayoría de los autores reportan que se obtienen pellets de mejor calidad a temperaturas mayores de 60°C, sin importar el tipo de biomasa.”²²

²¹ S. Döring, Power from Pellets: Technology and Applications, Springer Science & Business Media, 2013

²² ZAPATA SAAD, Andres Jose. Investigación del Efecto de los Parámetros de Elaboración de Pellets de Cuesco de Palma en el Proceso de Pirólisis. Tesis de magister. Mención Ingeniería mecánica Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2016, 14p.

4.6 Presión

este es un parámetro que depende de la densidad de los pellets. “La presión que influye en el proceso de peletización es la ejercida por el émbolo en el momento de empujar la biomasa a través de la recámara de alimentación. Algunos autores reportan presiones de peletización entre 5MPa y 800MPa para diferentes tipos de biomasa”²³.

4.7 Tamaño

“El tamaño de partícula determina los espacios libres entre las partículas que forman el pellet, así mismo, su durabilidad y resistencia mecánica. Cuando el tamaño de partícula es menor, el área superficial aumenta, facilitando la densificación. Las partículas grandes son un punto de fractura del material. El tamaño de los granos debe tener un diámetro medio, determinado en procesos de adecuación previos de la biomasa, como lo es la molienda y tamizado. El intervalo de tamaño recomendado oscila entre 0,5 – 0,7 mm”²⁴.

²³ Ibid., 15p.

²⁴ VARGAS LAZO, Angélica María. Estudio de la producción de pellets a partir de café. Tesis de magister, mención en ingeniería química. Colombia: universidad nacional de Colombia. Facultad de ingeniería, 2018, 33p.

5 MARCO CONCEPTUAL

Biocombustibles

Estos son combustibles de origen biológico obtenidos de manera renovable. En el mercado existen diferentes tipos de combustibles provenientes de distintos materiales residuales, como la cascarilla de arroz, caña de azúcar, pulpa de papel, cáscaras de coco, cartón, carbón, aserrín, entre otros, usados por la industria para generar energía. Uno de estos productos son los pellets, un tipo de biocombustible fabricado a partir de residuos o desperdicios de productos orgánicos que son debidamente triturados y compactados, para generar energía calórica.

Los biocombustibles pueden reemplazar parcialmente a los combustibles fósiles, dentro de los cuales se encuentran:

- La biomasa tradicional. Esta energía es neutra en emisiones de CO (utiliza fotosíntesis).
- Los biocombustibles líquidos proporcionan actualmente, aproximadamente la energía equivalente a 20 millones de toneladas de petróleo (lo que equivale al 1% del combustible utilizado mundialmente para transporte por carretera).
- Los biocombustibles que más se utilizan son el etanol y el biodiesel. El etanol está hecho a base de alcohol, el cual se obtiene directamente de la caña de azúcar, la remolacha, el maíz o de cualquier residuo vegetal que pueda ser transformado en azúcar.

Biocombustibles obtenidos de aceites o grasas, por medio de plantas como la soja o el girasol, son las más eficientes para producir aceites. Pueden ser utilizados directamente o ser procesados para obtener un biocombustible más refinado.¹⁶

Energías renovables

Son una fuente energética que causa un mínimo impacto al ambiente debido a que se genera de procesos naturales, como la radiación solar, los vientos, la materia orgánica, las fuentes de agua, entre otros. El uso de estas energías se evidencia desde hace varios siglos, pero es ahora cuando se le ha dado su verdadero valor, ya que, el consumo energético va en aumento y las fuentes fósiles usadas se están viendo seriamente comprometidas, debido al derroche generado por el hombre.

Estas energías se pueden obtener de las fuentes más abundantes en la tierra, un ejemplo de ésta es la energía solar, ya que se tiene de forma cotidiana y la energía recibida es 10,000 veces superior al consumo total energético del mundo. De igual forma, la fotosíntesis es la utilización más importante de la energía solar, y la única fuente de materia orgánica, alimentos y biomasa. Un ejemplo de esto es la leña, ya que se puede decir que es energía solar almacenada a lo largo de millones de años, además de un almacenamiento seguro de CO₂. Igualmente, las mareas son consecuencia de la acción combinada del sol y la luna; el sol, que es quién provee la energía necesaria para evaporar agua del mar y elevarla a las montañas para que su fuerza pueda ser aprovechada al descender; el viento, provee la energía con ayuda del sol, al calentar las masas de aire.

Lo anterior, es una clara muestra de que las energías renovables tienen un valor incalculable, cuyo potencial no ha sido debidamente utilizado, ya que, el uso dado a los combustibles fósiles sigue en aumento, causando un daño irreparable al medio ambiente, como lo es el cambio climático.

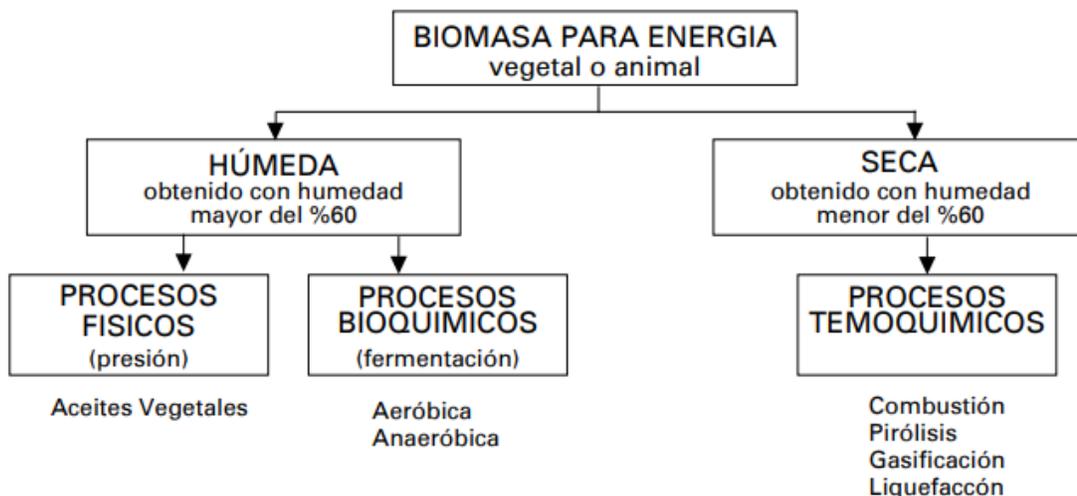
Biomasa

La energía que se puede obtener de la biomasa proviene de la luz solar, la cual gracias al proceso de fotosíntesis, es aprovechada por las plantas verdes mediante reacciones químicas en las células, las que toman CO₂ del aire y lo transforman en sustancias orgánicas, según una reacción del tipo: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{H-COH}) + \text{O}_2$ En estos procesos de conversión la energía solar se transforma en energía química que se acumula en diferentes compuestos orgánicos (polisacáridos, grasas) y que es incorporada y transformada por el reino animal, incluyendo al ser humano, el cual invierte la transformación para obtener bienes de consumo.

Desde el punto de vista del aprovechamiento energético, la biomasa se caracteriza por tener un bajo contenido de carbono, un elevado contenido de oxígeno y compuestos volátiles. Estos compuestos volátiles (formados por cadenas largas del tipo C_nH_m, y presencia de CO₂, CO e H₂) son los que concentran una gran parte del poder calorífico de la biomasa. El poder calorífico de la biomasa depende mucho del tipo de biomasa considerada y de su humedad. Así normalmente estos valores de poder calorífico de la biomasa se pueden dar en base seca o en base húmeda.

Cabe destacar que, desde el punto de vista ambiental, el aprovechamiento energético de la biomasa no contribuye al aumento de los gases de efecto invernadero, dado que el balance de emisiones de CO₂ a la atmósfera es neutro. En efecto, el CO₂ generado en la combustión de la biomasa es reabsorbido mediante la fotosíntesis en el crecimiento de las plantas necesarias para su producción y, por lo tanto, no aumenta la cantidad de CO₂ presente en la atmósfera. Al contrario, en el caso de los combustibles fósiles, el carbono que se libera a la atmósfera es el que está fijo a la tierra desde hace millones de años. Desde el punto de vista energético resulta conveniente dividir la biomasa en dos grandes grupos (*Ver Figura 3*).

Cuadro 2. Biomasa



Fuente:

http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_biomasa.pdf

Combustión

Es el más sencillo y más ampliamente utilizado, tanto en el pasado como en el presente. Permite obtener energía térmica, ya sea para usos domésticos (cocción, calefacción) o industriales (calor de proceso, vapor mediante una caldera, energía mecánica utilizando el vapor de una máquina). Las tecnologías utilizadas para la combustión directa de la biomasa abarcan un amplio espectro que va desde el sencillo fogón a fuego abierto (aún utilizado en vastas zonas para la cocción de alimentos) hasta calderas de alto rendimiento utilizadas en la industria.²⁵

²⁵ [ANÓNIMO] Energías Renovables – Energía Biomasa, 2008, p. 4-5

6 MARCO LEGAL

Aunque podemos decir que no es necesario tener unos parámetros y normativas para la fabricación de pellet, es necesario para que no se confunda con una briqueta ya que tienen una forma parecida y se puede decir que están hechas en algunos casos para el mismo propósito. De igual manera debemos tener en cuenta unas reglas o leyes para poder trabajar o manipular biomasa para que estas sean aprobadas y demuestren que ayudan al medio ambiente.

La normativa depende del uso final, tipo de biomasa ya que no en todos los países tienen la misma facilidad para producir o exportar y si miramos los países con mayor productividad tiene sus propias normas y los países como Colombia se rigen bajo estas. “cuya normatividad no es tan clara respecto a la producción y comercialización de biocombustibles sólidos elaborados con biomasa diferentes a la madera. Algunas de las normas existentes a nivel mundial son:

- Pellet Fuel Institute (PFI) [USA].
- European Common Standard for Solid Fuel (CEN) (CEN/TC 335) [Europa].
- ÖNORM 7135, Compressed wood or compressed bark in natural state – pellets and briquettes [Austria].
- Pellsam [Suecia].
- IN 51731 (Testing of solid fuels – compressed untreated wood) [Alemania].”²⁶

Las normas nombradas anteriormente son para el diseño, tamaño y fabricación de pellet, pero como decía anteriormente Colombia no tiene una normativa de fabricación, pero si cuenta con normativa que fomenta el uso razonado y eficaz de la energía y promueve el uso de la energía alternativa como lo son la ley 697 de 2001, ley 1715. Igualmente existe una norma técnica GTC-24 que nos habla sobre el manejo y gestión de residuos sólidos.

²⁶ Ibid., 37p.

7 ESTADO DEL ARTE

¿Qué es la biomasa y qué lugar ocupan en el panorama energético colombiano y mundial?

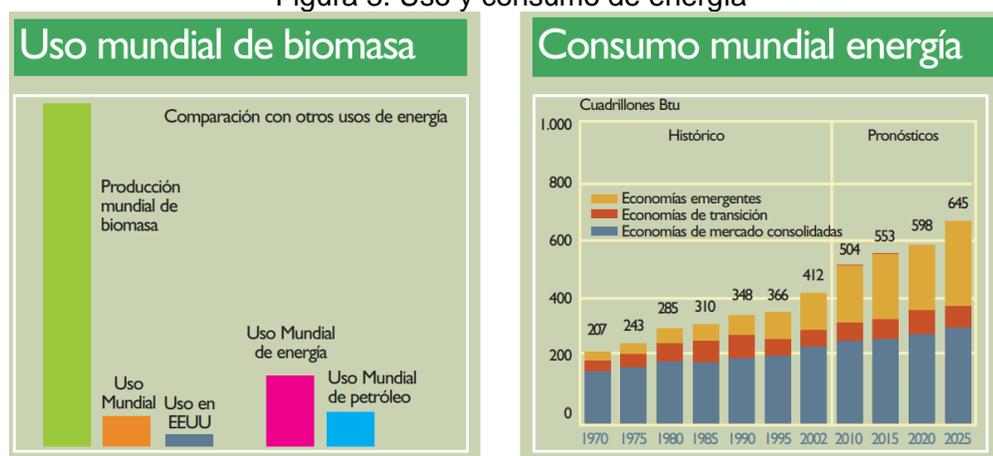
La biomasa es una excelente alternativa energética por dos razones. La primera es que, a partir de ella se pueden obtener una gran diversidad de productos; la segunda, se adapta perfectamente a todos los campos de utilización actual de los combustibles tradicionales. Así, mediante procesos específicos, se puede obtener toda una serie de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos que pueden ser aplicados para cubrir las necesidades energéticas de confort, transporte, cocinado, industria y electricidad, o servir de materia prima para la industria. El consumo de biomasa naturales a nivel mundial es muy utilizado pero muy mal aprovechada. La Agencia Internacional de la “Energía lleva a cabo diversos estudios y proyectos en el campo de la biomasa a través de su división IEA Bioenergy y cifra en un 10% la energía primaria mundial procedente de los recursos asociados a esta fuente, incluidos los relacionados con biocombustibles líquidos y biogás.”²⁷

Gran parte de ese porcentaje corresponde a los países pobres y en desarrollo, donde resulta ser la materia prima más utilizada para la producción de energía. Según datos del Fondo de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), “algunos países pobres obtienen el 90% de su energía de la leña y otros biocombustibles”²⁸. En África, Asia y Latinoamérica representa la tercera parte del consumo energético y para 2.000 millones de personas es la principal fuente de energía en el ámbito doméstico.

²⁷JOSE A. ROCA. Las 10 mayores plantas de biomasa del mundo. *El periódico de la energía.com* [En línea].2016, enero. [Consultado el 11 de septiembre del 2020]. Disponible en: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-de-biomasa-del-mundo/>

²⁸ FAO. 2019. El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos. Roma. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

Figura 3. Uso y consumo de energía



Fuente: extraída de energías renovables Iberdrola.

Colombia se caracteriza por tener un gran potencial de biomasa a partir de residuos vegetales (tabla 1) y se tiene un estimado de residuo de poda mayores a 44815 ton/años correspondientes al 27% de los Residuos Sólidos Orgánicos Urbanos (RSOU), el potencial energético de los residuos de poda es mayor (78%) que el resto de RSOU²⁹.

Tabla 2. Potencial energético de la biomasa residual vegetal en Colombia

Residuo	Ton/año	Potencial Energético (TJ/año)
Plátano	11.500.000	6.600
Café	5.050.000	49.100
Caña de Azúcar	15.534.600	118.578
Palma	1.660.000	16.073
Maíz	1.940.000	20.800
Arroz	6.282.400	27.736
Banano	11.551.000	6.600

Fuente: los centros de investigación y federales relacionadas con los gremios (Cenipalma, Cenicaña, Cimpa, Cenicafé, Augura, Fedearroz y Fenalce)

1. ²⁹ PATIÑO Pedro Elías. Biomasa residual vegetal: Tecnologías de transformación y estado actual. Revista científica UDES [En línea]. 2014, diciembre. [Consultado el 11 de septiembre del 2020]. Disponible en: <https://revistas.udes.edu.co/innovaciencia/article/view/1849>.

En el Departamento de Santander se han realizado estudios experimentales para determinar el aprovechamiento de los residuos vegetales entre los que está el beneficio del fique en “Colombia que genera 15.000 toneladas de residuo (bagazo)/ha sembrada”³⁰.

Adicionalmente, la biomasa es considerada un potencial sustituto de los combustibles fósiles, debido a sus bajas emisiones de gases de efecto invernadero y gases ácidos. En este orden de ideas, la biomasa puede ser utilizada en numerosas aplicaciones; sin embargo, presenta algunos retos relacionados con su forma original. El alto contenido de humedad, su tamaño y forma irregular y la baja densidad de bulto, evita que sea aprovechada de una manera adecuada dificultando el almacenamiento, transporte y aplicación.

Por estas cualidades que se presentan en su ambiente natural, requieren un acondicionamiento especial. Las formas generalizadas de utilización de este tipo de combustibles son astillas, serrín, briquetas y pellets, con estos procesos se puede optimizar los costos de transporte y almacenamiento, además puede ser utilizada en procesos termoquímicos de combustión, co-combustión con carbón, pirolisis, gasificación, entre otros.

Este último, los pellets son cilindros pequeños. Se preparan mediante prensas de granulación, análogas a las utilizadas para la fabricación de los piensos compuestos. La compactación se consigue de forma natural o mediante la adición de elementos químicos que no contengan elementos contaminantes en la combustión. La materia prima, al igual que en el caso de las briquetas, debe tener poca humedad y baja granulometría. Es un producto muy manejable que puede servir para automatizar instalaciones de pequeño o mediano tamaño.

³⁰ Ibid., p. 45-52

Figura 4. Pellets



Fuente: <https://mitreyelcampo.cienradios.com/ventajas-desventajas-la-calefaccion-pellets/>

Las investigaciones sobre peletización de biomasa en los últimos años se han centrado en evaluar diferentes condiciones de operación como humedad inicial, temperatura, tamaño de partícula del material y analizar su influencia en el rendimiento, consumo energético y aspectos de calidad de pellet con base en algunas normas internacionales. Estos estudios se han realizado para diferentes tipos biomasa como aserrín, paja de arroz, residuos de árboles de olivo, residuos de palma de aceite, sorgo, sauco, residuos de palma de coco y plantas herbáceas como la alfalfa, festuca y miscanthus, estas investigaciones evaluaron características como tamaño, la densidad de bulto, densidad de pellet, durabilidad, poder calorífico, rendimientos y consumo energético. Entre las investigaciones más relevantes Lehtikangas P. Realizó pruebas de peletización de aserrín de dos diferentes especies a diferentes tiempos de almacenamiento, evaluando contenido de humedad, poder calorífico, contenido de ceniza, sulfuros, cloro y lignina; además, evaluó algunas características como el tamaño, la densidad de bulto, densidad de pellet, durabilidad y riesgo de ser sinterizado. Lehtikangas encontró que la durabilidad del pellet fue influenciada por el contenido de lignina y contenido de humedad de manera positiva, a medida que el material tenía mayor tiempo almacenado el contenido de lignina aumenta y por lo tanto la durabilidad del pellet fue mayor. Además, se determinó que el contenido de impurezas en las muestras causa efectos negativos respecto el poder calorífico. Sin embargo, en este estudio

no se evaluó la distribución del tamaño de pellet con este material bajo las condiciones propuestas. C. A. Alzate *et al.* evaluaron la co-gasificación de pellet de residuos de madera, los pellets se fabricaron con mezcla de dos especies de pino y carbón con dos tamaños de partícula, y se utilizó carboximetil celulosa como aglomerante. Los experimentos de co-gasificación se llevaron a cabo con vapor y un reactor fluidizado eléctrico operado por lotes a 850 °C y se obtuvo gas de síntesis entre 7,1 y 9,5 MJ/Nm; sin embargo, no se analizaron factores de peletización con el material y no se realizó una valoración energética del material aglomerado.³¹

En cuanto a aplicaciones de combustión con pellet se ha determinado que tienen varias ventajas como que tiene un CO₂ neutral, se utiliza un recurso renovable y las emisiones son menores en comparación con otros sistemas de alimentación de biomasa. Aún con todo el potencial que hay en Colombia la transformación de la biomasa residual vegetal y la elaboración de pellets como una alternativa para el aprovechamiento de los residuos agroindustriales hasta ahora se encuentra en fase de experimentación en laboratorios de Investigación científica principalmente en instituciones de educación superior, puesto que las tecnologías de transformación de la biomasa son variadas y requieren infraestructuras que permitan la eficiencia económica y ambiental del proceso. Colombia es un país con poco desarrollo en energías renovables a excepción de la termo hidráulica y las políticas estatales no son claras, así como son mínimos los incentivos para invertir en ellas, razón por la cual la empresa privada no les apuesta a inversiones tan altas en la implementación de tecnologías que permitan la producción de energía limpia. En tanto a la utilización del fruto sacha inchi como biocombustible sólido existe muy poca información publicada e incluso aún es desconocido el proceso de elaboración de los pellets a base de la cascarilla de sacha inchi a nivel industrial.

³¹ MANRRIQUE Raiza Johanna. Estudio de la combustión del Pellet de Cisco de café. Trabajo de grado Ingeniería Mecánica. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas, Departamento de Ingeniería Mecánica. 2018, 20p.

8 METODOLOGÍA

En este capítulo se va a describir los materiales, métodos y elaboración que se necesitan para la obtención de pellets, como también la caracterización de estos para evaluar la viabilidad.

➤ Fase 1: PROCESO DE MOLIENDA, TAMIZADO Y PELETIZACION

Molienda

- Clasificación cascara de semilla
- Selección de tamiz para la molienda

Tamizadora

- Selección de tamiz más apropiado
- Clasificación de materia prima al tamizar

Peletizadora

- Determinación de tamaño de partícula a utilizar de biomasa.
- Muestras de peletización.

➤ Fase 2: ANALISIS Y CARACTERIZACION DE LOS PELLETS

Caracterización del pellet

- Dimensiones obtenidas.
- Verificación de contenido de humedad.
- Cantidad que se desperdicia de biomasa al pasar por la peletizadora.

Análisis del pellet

- Análisis próximo.
- Análisis último.
- Poder calorífico.
- Resistencia al impacto.

➤ **Fase 3: CARACTERIZACION DE COMBUSTIBLE**

- Poder calorífico.
- Tiempo de encendido.
- Periodo de combustión.
- Temperatura de gases.

➤ **Fase 4: ANALISIS DE VIABILIDAD Y DOCUMENTACIÓN**

Análisis de Viabilidad

- Analizar resultados
- Tiempo de elaboración
- Complejidad

8.1 Fase 1: Proceso de molienda, tamizado y paletización

En esta fase se clasifica la materia prima a utilizar, se encuentra mezclada y no se utilizará toda ya que con lo que se trabajará en este proyecto es la cascarilla de la sachá inchi. Será necesario utilizar un molino con el cual cuenta el laboratorio de combustión; Después de utilizar este molino se llevará a una tamizadora con la que

cuenta la escuela de ingeniería química de la universidad industrial de Santander, con la tamizadora se utilizará diferentes tamices seleccionados previamente para tener tamaños de granulometría distintos como son No. 40, No. 50, No 60 según la norma ASTM E-11.

Figura 5. Tamices y tamizadora



Fuente: Autores del proyecto

Figura 6. Molino



Fuente: Autores del proyecto

Para la fabricación del pellet se utiliza la maquina peletizadora (figura 7) con la que cuenta el laboratorio. Antes de ser utilizada debe ser limpia, luego se lleva a cabo la preparación de la mezcla que llevara cada pellet para luego ser anotada como se ve en la tabla 3.

Figura 7. peletizadora



Fuente: Autores del proyecto

Tabla 3. Planteamiento para la elaboración de pellets

Aglomerante	tamaño de biomasa	masa de biomasa (g)	masa de aglomerante (g)	agua agregada (ml)
fécula de maíz	0,250 mm y menores			
cal	0,250 mm y menores			
boñiga	0,250 mm y menores			
fécula de maíz	mayores a 0,425 mm			
cal	mayores a 0,425 mm			
boñiga	mayores a 0,425 mm			

Para la selección de la relación biomasa/aglomerante se deberá hacer a prueba y error hasta conseguir una textura, apariencia aceptable de la mezcla.

8.2 Fase 2: Análisis y caracterización de los pellets

Al terminar la fase uno obtenemos los pellets los cuales estarán formados de diferentes aglomerantes y con dos diferentes tamaños de composición. Para determinar las siguientes características descritas a continuación:

Densidad: para la determinación de la densidad del pellet es necesario conocer volumen y masa. Para esto utilizamos las siguientes formulas:

$$(1) \rho = \frac{m}{v}$$

$$(2) v = \pi * r^2 * h$$

En donde:

$\rho =$ Densidad del pellet

$m =$ masa del pellet

$v =$ volumen del pellet

$r =$ radio del pellet

$h =$ altura de pellet

Para conocer la masa se utilizará una balanza analítica con la que cuenta el laboratorio, el volumen se determinó tomando las medidas del diámetro y altura con un pie de rey en centímetros.

Contenido de humedad en los pellets: para encontrar la humedad se sigue el procedimiento de acuerdo a la norma española UNE-EN ISO 18134-3, Para esta prueba los pellets se llevan a un horno a (105 ± 2) °C hasta alcanzar una masa constante, es decir que la masa tenga un cambio menor a 1 mg durante un tiempo 60 minutos. Luego se deja secar a temperatura ambiente, todo lo anterior se hace con el fin de evaporar su contenido de agua. Tener en cuenta que la muestra siempre debe permanecer tapada, con la siguiente formula se encuentra el porcentaje de humedad:

$$(3) M_{ad} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} * 100$$

Donde

$m_1 =$ es la masa en gramos del plato vacío y la tapa;

$m_2 =$ es la masa en gramos del plato, la tapa y la porción del ensay antes del secado;

$m_3 =$ es la masa en gramos del plato, la tapa y la porción del ensay después del secado.

Material volátil: para esta se utiliza la norma ASTM E872-82 la cual trata de utilizar un horno que pueda alcanzar la temperatura de 950 ± 20 °C para mantener el pellet

en esta temperatura durante 7 minutos en un crisol que este bien cerrado con su muestra adentro y al pasar el tiempo dejar enfriar para volver a pesar. Luego se utilizará la siguiente ecuación:

$$(4) W_{\text{pedida de peso, \%}} = 100 * \frac{(w_i - w_f)}{(w_i - w_c)} = A$$

$$(5) VM(\text{material volátil}), \% = A - B$$

Donde:

W_i = peso de crisol y tapa.

W_f = peso inicial;

W_c = peso final;

A = pérdida de peso;

B = humedad, %.

Ceniza: para esta prueba utilizamos de la norma UNE-EN ISO 18122 la cual trata de utilizar un crisol con tapa, la muestra debe tener un mínimo de 1 gramo para comenzar con la prueba se debe pesar el crisol con tapa sin muestra y con muestra para luego colocar el crisol con la muestra respectiva dentro de un horno hasta alcanzar 250 °C durante 30 min para permitir que se evaporen los volátiles antes de la ignición para luego poder elevar la temperatura a 550 ± 10 °C durante un periodo de 30 minutos y mantener esta temperatura durante 120 minutos. Luego con ayuda de las ecuaciones encontramos la ceniza:

$$(6) Ash = A_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} * 100 * \frac{100}{100 - M_{ad}}$$

Donde

m_1 = masa del plato vacío, en gramos;

m_2 = masa del plato más la porción de la muestra, en gramos;

m_3 = masa del plato más la ceniza, en gramos;

M_{ad} = es el contenido de humedad en porcentaje.

Carbón fijo: para encontrar se utilizan los datos anteriores como son ceniza (Ad, Ash), material volátil (VM), humedad (Mad) todo en porcentajes, se calcula como se muestra en la ecuación:

$$(7) \%FC = 100 - (\%Mad + \%Ad + \%VM)$$

Análisis ultimo: para este análisis se plantea en utilizar el análisis próximo porque “la determinación de los datos de análisis ultimo requiere instrumentación especial, mientras que los datos de análisis próximo se pueden obtener fácilmente mediante el uso de equipos comunes”³². por esta razón se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$(8) C = 0,635FC + 0,460VM - 0,095Ash(wt\%)$$

$$(9) H = 0,059FC + 0,060VM + 0,010Ash(wt\%)$$

$$(10) O = 0,340FC + 0,469VM - 0,023Ash(wt\%)$$

Poder calorífico del pellet: Para encontrar el poder calorífico de cada pellet se “utilizó una predicción tiempo real de parámetros cruciales de la calidad de los pellets de biomasa”³³ donde se encontró la siguiente fórmula para hallar el poder calorífico a partir del análisis próximo:

$$(11) HHV = 23,068 - (0,157 * MC) - (0,047 * TCC) - (0,583 * AC)$$

³² Jianfeng Shen, Shuguang Zhu, Xinzhi Liu, Houlei Zhang and Junjie Tan. Energy Conversion and Management: The prediction of elemental composition of biomass based on proximate analysis. (en línea) 2009, abril – diciembre. 51 (2010) 983–987. (consultado 13 de julio 2021). www.elsevier.com/locate/enconman

³³ Gary D. Gillespie, Colm D. Everard, Colette C. Fagan and Kevin P. McDonnell. Prediction of quality parameters of biomass pellets from proximate and ultimate análisis (en línea) 2013, enero – mayo. 771-777. (consultado 23 de noviembre 2021). www.elsevier.com/locate/fuel

Resistencia al impacto: para esta parte nos basamos en la norma ASTM D444-80 que trata de que la muestra es decir el pellet se deja caer de una altura de 1,85 m a una placa o piso 4 veces y se registra el cambio de masa.

$$(12) \%Durabilidad = \frac{masa\ final}{masa\ inicial} * 100$$

Donde:

Masa final = masa del pellet al dejar caer 4 veces.

Masa inicial = masa del pellet antes de empezar la prueba.

8.3 Fase 3: Caracterización de combustible

En esta fase se comienza primero con la calibración de la caldera de biomasa (figura 9) es decir medir la variación de la velocidad del aire que entra al cambiar de posición el dámper (figura 10), para con este poder tener una buena apreciación de que cantidad de aire va a ingresar a la cámara de combustión cuando se disponga a hacer la quema de los pellets.

Figura 8. caldera de biomasa



Fuente: autores del proyecto

Figura 9. Dámper



Fuente: autores del proyecto

Para la calibración del d mper se us  un anemómetro; este mide la velocidad del gas a la salida de la caldera. Se tomaron medidas con aire atmosférico y con gases de combustión, y se observa que la variación no es significativa.

Figura 10. Anemómetro



Fuente: Autores del proyecto

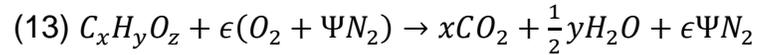
Posteriormente, Se evalúa el proceso de combustión en la cámara mediante inspección, y realizando mediciones con el analizador de gases testo 350 (figura12). Esto con el fin de comprobar que la termocupla de la cámara de combustión se encuentre operando con normalidad, y observar las etapas del proceso de combustión dentro de la cámara, en términos de su duración y presencia de llama.

Figura 11. Analizador de gases testo 350



Fuente: Autores del proyecto

Luego pasamos a calcular la relación aire/combustión teórica, para esto implementamos la siguiente fórmula general de la estequiometría:



Donde:

$$\epsilon = x + \frac{1}{4}y - \frac{1}{2}z$$

$\Psi = 3,77 \rightarrow$ Cuando es oxidación con aire atmosférico, porque con aire teórico (aire sintético) se utiliza 3,76.

También se tiene en cuenta la composición molar es:

$$(14) n = \frac{m}{M}$$

Donde:

n = número de moles

m = masa de la sustancia

M = masa atómica o molecular

El aire se asume seco, ya que para un buen resultado hace falta instrumentos para una medición de la humedad relativa en tiempo real al momento de hacer las pruebas de combustión.

8.4 Fase 4: Análisis de viabilidad y documentación

Para esta fase se realiza un análisis económico para los pellets con las mejores propiedades para la combustión, este proceso se realiza para tener una proyección

del costo de producción a una escala industrial y hacer una comparativa con otras biomasas. La estimación de costos para una biomasa depende de tres factores fundamentales.

Volumen y tipo de biomasa: El volumen determina el factor de escala del sistema y los procesos auxiliares; mientras que el tipo y las características de la biomasa determinan los tratamientos previo y posterior requeridos.

Proceso de conversión: éstos se establecen con base en el volumen y las características de la biomasa: de la tecnología seleccionada depende el grado de complejidad del sistema.

Aplicación de la energía: el uso final de la energía obtenida influye fuertemente en el costo total de la instalación. En los casos en que el objetivo es la generación de calor, el equipo auxiliar requerido se limita a los quemadores adecuados. Cuando el uso final es la generación de electricidad, la complejidad y el número de equipos incrementa el costo de inversión.³⁴

Con lo anterior tenemos una mayor apreciación de la viabilidad que se puede dar para futuros proyectos con esta biomasa. La documentación se lleva a cabo durante el proyecto por medio de una agenda, Excel, Word, fotografías entre otros medios.

³⁴ Manuales sobre energía renovable: Biomasa/ Biomass Users Network (BUN-CA). -1 ed. -San José, C.R. : Biomass Users Network (BUN-CA), 2002. 42 p.

9 RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos durante la metodología propuesta para el desarrollo de este proyecto desde el proceso de molienda hasta la quema de los pellets en la caldera de biomasa.

Proceso de molienda, tamizado y palatización

Para el proceso de molienda se selecciona la materia prima a utilizar, el bulto que se consigue normalmente viene mezclado; Como se ve en la figura 12 que son todos los desperdicios del proceso de la obtención de aceite de sachá inchi.

Figura 12. bulto antes de clasificar



Fuente: Autores del proyecto

Figura 13. bulto después de clasificar



Fuente: Autores del proyecto

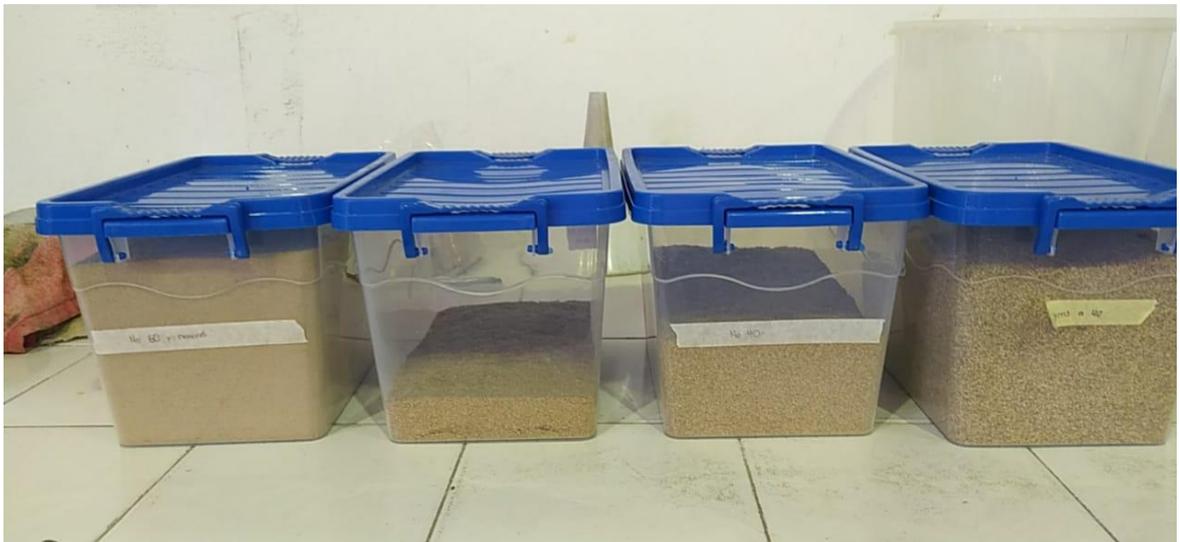
El molino con el que cuenta el laboratorio de combustión tiene un motor de 2,0 Cv – 60 Hz y puede ser utilizado con diferentes tamices. El tamiz seleccionado fue de granulometría 0,8 mm que nos permite de 60 hasta 90 kg/h, permite obtener una materia prima tipo harina; después es llevó a la tamizadora en la cual se obtiene diferente granulometría de biomasa. En esta se utiliza 3 tamices No.40 – No.50 –

No.60 que están estandarizados según la norma ASTM E-11. Al tamizar se obtuvo cuatro diferentes tamaños de nuestra cascarilla, que fueron:

- No. 40 → 0,425 mm
- No. 50 → 0,300 mm
- No 60 → 0,250 mm

A continuación, se muestran de derecha a izquierda:

Figura 14. Material obtenido después de tamizar



Fuente: Autores del proyecto

Al obtener las cuatro muestras que se ven en la figura anterior, se seleccionaron las dos muestras con mayor cantidad de materia prima y donde se podía apreciar más la diferencia; los tamaños seleccionados fueron 0,250 mm y menores, mayores a 0,425 mm. Para observar los pellets con sus diferencias de aglomerante y granulometría.

La siguiente tabla muestra la composición que lleva cada pellet a nivel de tamaño de biomasa, masa de biomasa, masa de aglomerante y agua agregada en el momento de mezclar dependiendo también del aglomerante y granulometría utilizada.

Tabla 4. Elaboración de pellets

Aglomerante	tamaño de biomasa	masa de biomasa (g)	masa de aglomerante (g)	agua agregada (ml)
fécula de maíz	0,250 mm y menores	100	43	140
cal	0,250 mm y menores	100	43	100
boñiga	0,250 mm y menores	100	43	200
fécula de maíz	mayores a 0,425 mm	100	43	200
cal	mayores a 0,425 mm	100	43	100
boñiga	mayores a 0,425 mm	100	43	250

Fuente: Autores del proyecto

Como se puede apreciar los pellets de fécula de maíz, boñiga con granulometría mayores a 0,425 mm fue necesaria más agua para la mezcla esto se debe a que el tamaño influye para obtener una mezcla más compacta. En cambio, en la mezcla con cal en ambos casos se utilizó la misma cantidad de agua, esto se debe a que el agua y la cal suelen mezclarse para hacer pintura casera es decir reaccionan muy bien entre ellos. Tener en cuenta que se repitió el procedimiento hasta obtener 1kg de cada pellet para las pruebas de quemado.

Figura 15. Pellets obtenidos



Fuente: Autores del proyecto

En la figura 16 se puede observar algunos de los pellets obtenidos con las mezclas que se hicieron en la tabla 4, antes de llegar a estos resultados se hizo varias pruebas preliminares.

Análisis y caracterización de los pellets

Al obtener los pellets con una diferencia en granulometría y aglomerante se midió diámetro, altura, peso para conocer su forma geométrica aceptable por consiguiente se obtuvieron las siguientes tablas:

Tabla 5. Pellets con granulometría mayores a 0,425 mm

Aglomerante	Masa Promedio	Diámetro (mm)	Largo (mm)
Fécula de Maíz	0,31	6,39	22,315
Cal orgánica	0,36182	6,2	20,075
Boñiga	0,2364	6,31	20,511

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 6. Pellets con granulometría 0,250 mm y menores

Aglomerante	Masa Promedio	Diámetro (mm)	Largo (mm)
Fécula de Maíz	0,44913	6,34	22,43
Cal orgánica	0,42385	6,425	22,037
Boñiga	0,2364	6,53	22,57

Fuente: Autores del proyecto

De acuerdo con la tabla 5 y tabla 6 se puede observar que el peso cambia para ambas; si se observa los pellets con aglomerante de boñiga se puede ver que esta pesa menos a los demás, esto se debe a que la boñiga pierda más humedad y en menos tiempo a comparación de los otros aglomerantes. También si observamos en la tabla 5 el largo de los pellets de cal y fécula de maíz son un poco más cortos a los demás, esto se ocurre por contener una mayor cantidad de agua y al tipo de granulometría que es mayor lo que genera que al manipular o salir de la peletizadora se partan.

La densidad y el volumen promedio de los pellets obtenidos fue:

Tabla 7. Volumen y densidad de Pellets con granulometrías mayores a 0,425 mm.

Volumen (mm3)	Densidad (gr/mm3)
715,63	0,000433
606,08	0,000497
641,41	0,000369

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 8. Volumen y densidad de Pellets con granulometría 0,250 mm y menores.

Volumen (mm ³)	Densidad (gr/mm ³)
708,11	0,000634
714,48	0,000593
755,87	0,000413

Fuente: Autores del proyecto

Como se puede ver los pellets de la tabla 7 fueron los que presentaron menor densidad esto es por la granulometría utilizada, en cambio los de la tabla 8 presentaron una mayor densidad. Por lo que se entiende que entre menor sea el tamaño de la materia prima mejor será su densidad. Además, es importante para la quema porque representa más energía por volumen ocupado.

Teniendo los datos anteriores pasamos hacer el análisis próximo como se dice en la metodología planteada, para mostrar los datos se hace mediante la siguiente tabla:

Tabla 9. Análisis próximo de pellets

Análisis próximo					
Granulometría	Aglomerante	humedad (Mad) %	Ceniza (Ad%):	material volátil %	Carbón fijo %
mayores a 0,425 mm	fécula de maíz	11,300	3,27	68,73	27,99
	boñiga	10,839	8,26	71,90	10,25
	cal	8,967	27,01	60,12	4,85
0,250 mm y menores	fécula de maíz	11,10	6,51	80,75	12,74
	Boñiga	11,10	8,79	84,62	11,53
	cal	9,34	33,38	67,76	0,20

Fuente: Autores del proyecto

De acuerdo a la tabla anterior podemos decir que los pellets con sus diferentes aglomerantes tienen un bajo porcentaje de humedad, estando dentro de los parámetros para la norma DIN 51731. Si se tiene un “porcentaje alto de humedad esta disminuye la capacidad calórica de la biomasa, ya que una proporción de la

energía generada por el material tiene que ser consumida en evaporar el agua presente en el material³⁵. Es decir, esto influye directamente con el poder calorífico, eficiencia en la combustión y la temperatura que se pueda alcanzar en el momento de la quema.

En tabla 9 los pellets con aglomerante de cal contienen mayor ceniza. Este parámetro “alto por lo general tiene efectos negativos en el poder calórico o en el comportamiento de la caldera”³⁶. También la norma DIN 51731 de pellets y briquetas nos dice que la ceniza no puede superar el 10%; es decir que mientras mayor porcentaje de cenizas generen los pellets menor poder calorífico tendrán.

Sabemos que “una biomasa debe contener bajo contenido de materiales volátiles para que mayor proporción de esta sea convertida en energía, por el contrario, biomasa con alto contenido de material volátil no es adecuado para una buena Combustión”³⁷. Al observar la tabla 9 el material volátil de los pellets con compuesto de fécula de maíz y boñiga tienen valores altos en comparación con los de cal; por lo que se puede decir que va a tener una pérdida de energía para producir estos materiales, pero será más fácil para presentar combustión.

Para calcular el carbono fijo se utilizó la ecuación 7, la cual se trabajó en base seca. Se puede apreciar en la tabla 9 el comportamiento de carbono, este porcentaje queda después de que los volátiles se liberan durante el proceso de combustión, éste actúa como un generador de calor principal durante la combustión lo cual contribuye al poder calorífico.

³⁵ ROQUE M, Roger. Uso de la biomasa forestal y resultados de propiedades dendroenergéticas para especies de interés. Ingeniería en energías renovables. 2017, 34 p. [Consultado el 18 de diciembre 2021]. Disponible en: https://fondohonduraspana.bcie.org/fileadmin/fhe/espanol/archivos/publicaciones/Educacion_Superior/6_Intro_Uso_Biomasa_Forestal_Resultados_Dendroenerg.pdf

³⁶ Ibid:,p.23

³⁷ Ibid:,p.24

Al obtener todos resultados anteriores se pasó hacer el análisis último con el fin de hacer una estequiometría y tener un estimado del comportamiento de la quema. A continuación, se muestra los resultados:

Tabla 10. Análisis último

Granulometría	Aglomerante	%Carbono (C)	%Hidrogeno (H)	%Oxigeno (O)
mayores a 0,425 mm	fécula de maíz	45,883	6,145	40,904
	Cal	0,887	7,035	22,618
	boñiga	35,489	6,389	39,644
0,250 mm y menores	fécula de maíz	38,363	6,319	40,539
	cal	-3,851	7,236	21,553
	boñiga	34,708	6,437	39,047

Fuente: Autores del proyecto

La tabla 10 muestra la cantidad de C, H y O que tiene cada pellet con su respectivo aglomerante y granulometría. Si se analiza el valor de carbono en cal en ambos pellets tiene un valor poco coherente, esto se debió a que las ecuaciones implementadas tienen las siguientes limitaciones “9.2% 6 FC 6 32.79%, 57.2% 6 VM 6 90.6%, 0.1% 6 ASH 6 24.6%”³⁸.

Para encontrar el poder calorífico (HHV) de los pellets se utilizó la ecuación 11, esta da con “errores estándar de la estimación de 0.08 MJ/kg”³⁹

³⁸ Jianfeng Shen, Shuguang Zhu, Xinzhi Liu, Houlei Zhang and Junjie Tan. Energy Conversion and Management: The prediction of elemental composition of biomass based on proximate analysis. (en línea) 2009, abril – diciembre. 51 (2010) 983–987. (consultado 13 de julio 2021). www.elsevier.com/locate/enconman

³⁹ Gary D. Gillespie, Colm D. Everard, Colette C. Fagan and Kevin P. McDonnell. Prediction of quality parameters of biomass pellets from proximate and ultimate análisis (en línea) 2013, enero – mayo. 771-777. (consultado 23 de noviembre 2021). www.elsevier.com/locate/fuel

Tabla 11. Poder calorífico de los pellets

Granulometría	Aglomerante	Poder calorífico (MJ/kg)
mayores a 0,425 mm	fécula de maíz	18,071
	cal	1,007
	boñiga	16,069
0,250 mm y menores	fécula de maíz	16,929
	cal	0,004
	boñiga	15,660

Fuente: Autores del proyecto

En la tabla 11 observamos que nuevamente la cal da un valor no coherente esto es porque desde que se utilizó la ecuación 8 que nos entrega el valor de carbono lógico por las limitaciones de estas.

La resistencia mecánica que se encontró de acuerdo con la metodología propuesta y la ecuación 11 fue:

Tabla 12. Prueba de resistencia mecánica

Granulometría	Aglomerante	1	2	3	4	Durabilidad (%)
mayores a 0,425 mm	Boñiga	0,290	0,290	0,290	0,290	99,966
	Cal	0,555	0,554	0,554	0,554	99,838
	fécula de maíz	0,457	0,457	0,456	0,265	57,914
0,250 mm y menores	boñiga	0,278	0,278	0,277	0,277	99,568
	cal	0,703	0,703	0,769	0,668	95,024
	fécula de maíz	0,534	0,534	0,386	0,386	72,314

Fuente: Autores del proyecto

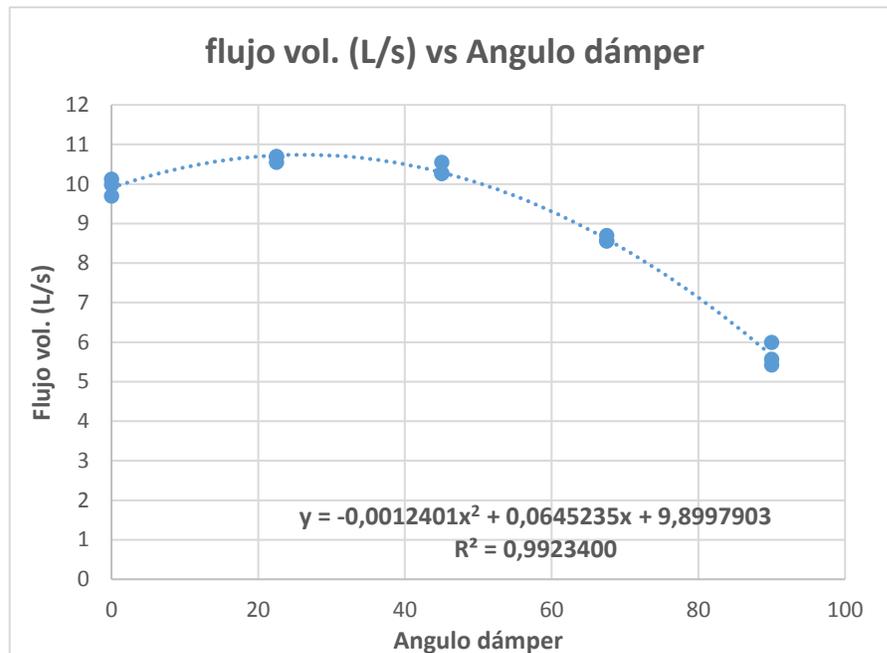
Al ver la tabla 12 se muestra que los pellets tienen una buena resistencia en general, es decir que se pueden transportar sin complicación. Los únicos que presentaron un porcentaje de durabilidad bajo fueron fécula de maíz con granulometría mayores a

0,425 mm, lo que da a entender que el tamaño de partícula y aglomerante influye bastante en su durabilidad.

Caracterización de combustible

Lo que se busca lograr al caracterizar la caldera de biomasa es saber el flujo volumétrico que entra a la cámara de combustión lo que permite tener una combustión más controlada. la gráfica siguiente muestra la posición del ángulo de dámper vs el flujo volumétrico en litros/segundos.

Grafica 1. Flujo volumétrico vs ángulo dámper

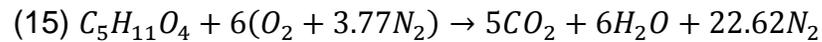


Fuente: Autores del proyecto

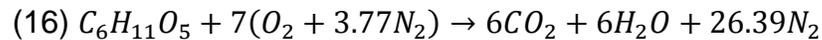
En la gráfica se aprecia que el flujo es mayor en un ángulo de 20° a 40° grados lo que indica esto es que en las posiciones anteriores hay un mayor flujo de aire que entra en la cámara de combustión gracias al ventilador. Al caracterizar se pudo encontrar la ecuación que describe el comportamiento y esto ayuda a saber la masa de aire que debe entrar para una combustión controlada.

De acuerdo a la ecuación 13 se encontró la estequiometria de cada pellet con su aglomerante respectivo.

Para boñiga:



Para fécula de maíz:

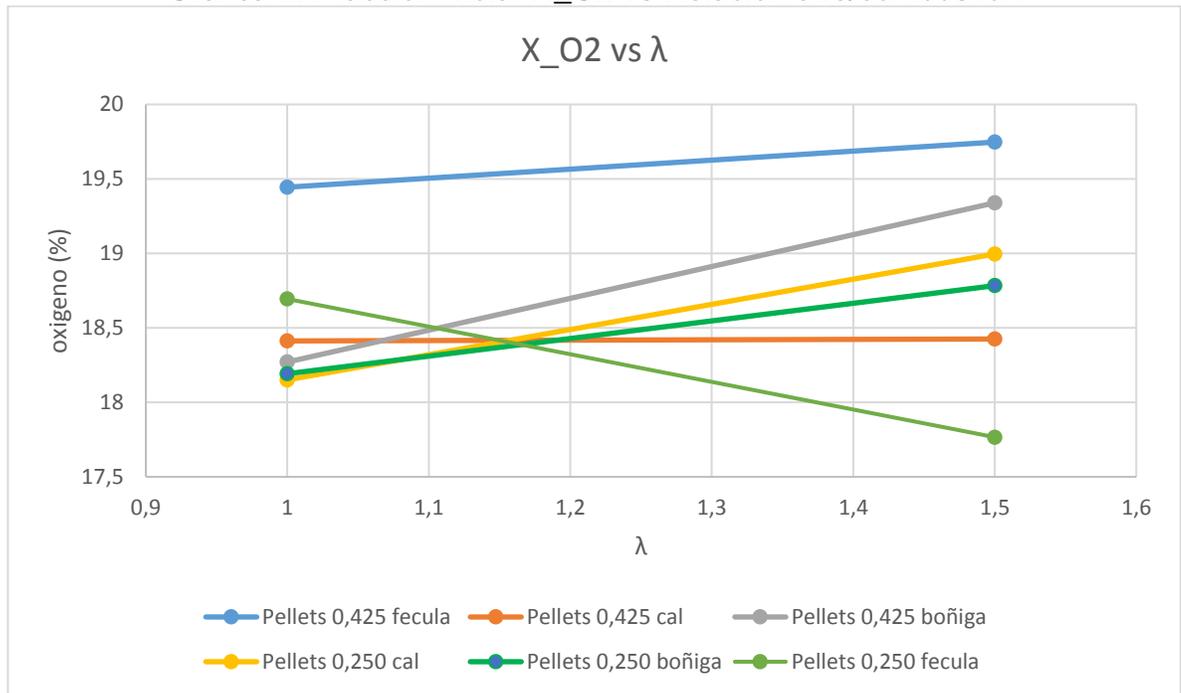


Para cal se presenta una situación particular por las ecuaciones que se utilizaron, como anterior mente se menciona. Por tanto, para hacer un balance estequiométrico se supuso que tenía 0,5 de carbono lo que da siguiente:



Al hacer la quema de los pellets en el quemador de biomasa con ayuda del analizador de gases testo 350 (figura 12), los resultados que dio se muestran mediante gráficas; Tener en cuenta que la quema es duplicada lo que da un total de 24 pruebas. Se comienza con los pellets de granulométrica mayores a 0,425 mm a 0,250 mm y menores. Todos los valores dados por el analizador fueron integrados para encontrar una fracción volumétrica que en ultima se convierte en fracción molar. Con el fin de comparar el valor global de los productos más no los reactantes de una manera más práctica como se ve en las siguientes gráficas:

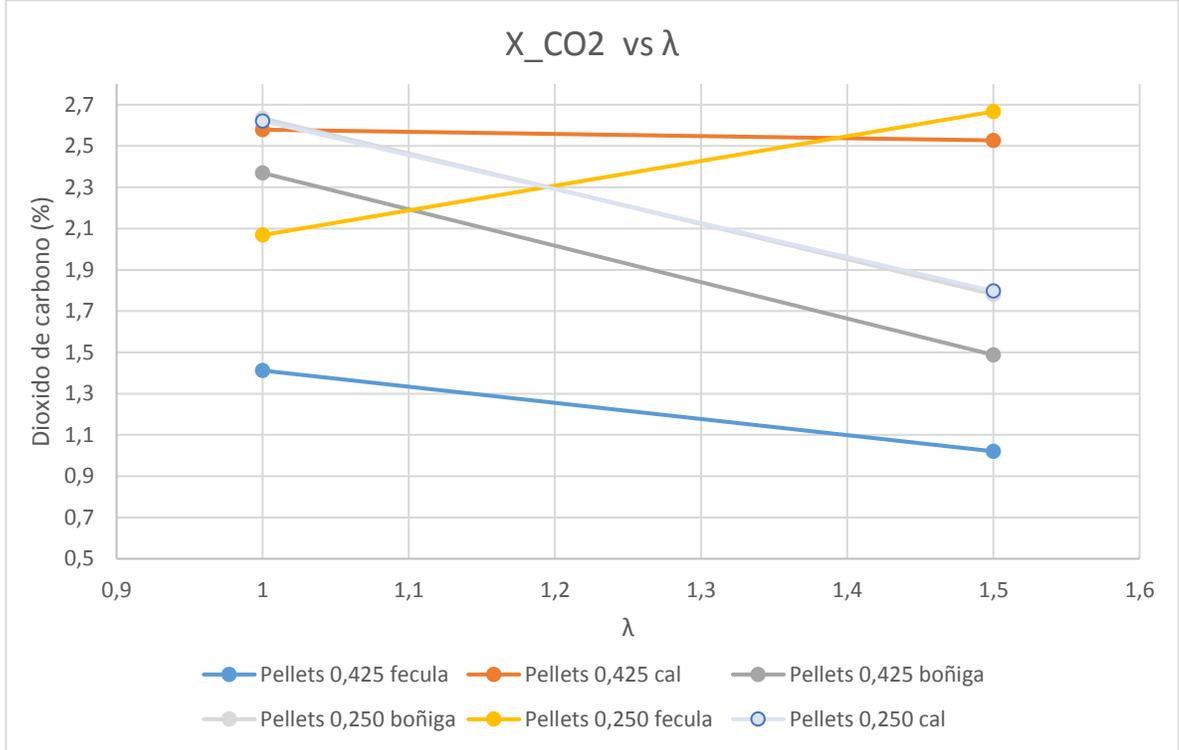
Grafica 2. Fracción molar X_{O_2} vs Relación aire/combustión



Fuente: Autores del proyecto

En la gráfica 2 se puede apreciar que en general los pellets con una relación aire/combustión de $\lambda=1.5$ tuvieron un menor consumo de oxígeno a los pellets con relación de $\lambda=1$ como se aprecia. En el caso de los pellets 0,250 de fécula tuvo un comportamiento diferente al igual que el pellet 0,425 de fécula a pesar de que ambos tienen el mismo aglomerante y lo único que cambian es en la granulometría. Por esto se puede decir que el tamaño de partícula podría tener un efecto en la variación al momento de la quema, en cambio el pellet 0,425 de cal no tuvo ningún cambio en ninguno de los casos. Entonces se puede decir que el pellet que mejor comportamiento tuvo fue el de fécula de maíz con una granulometría mayor a 0,425 porque en ambos casos de la combustión teórica estequiométrica mantuvo un consumo bajo de oxígeno.

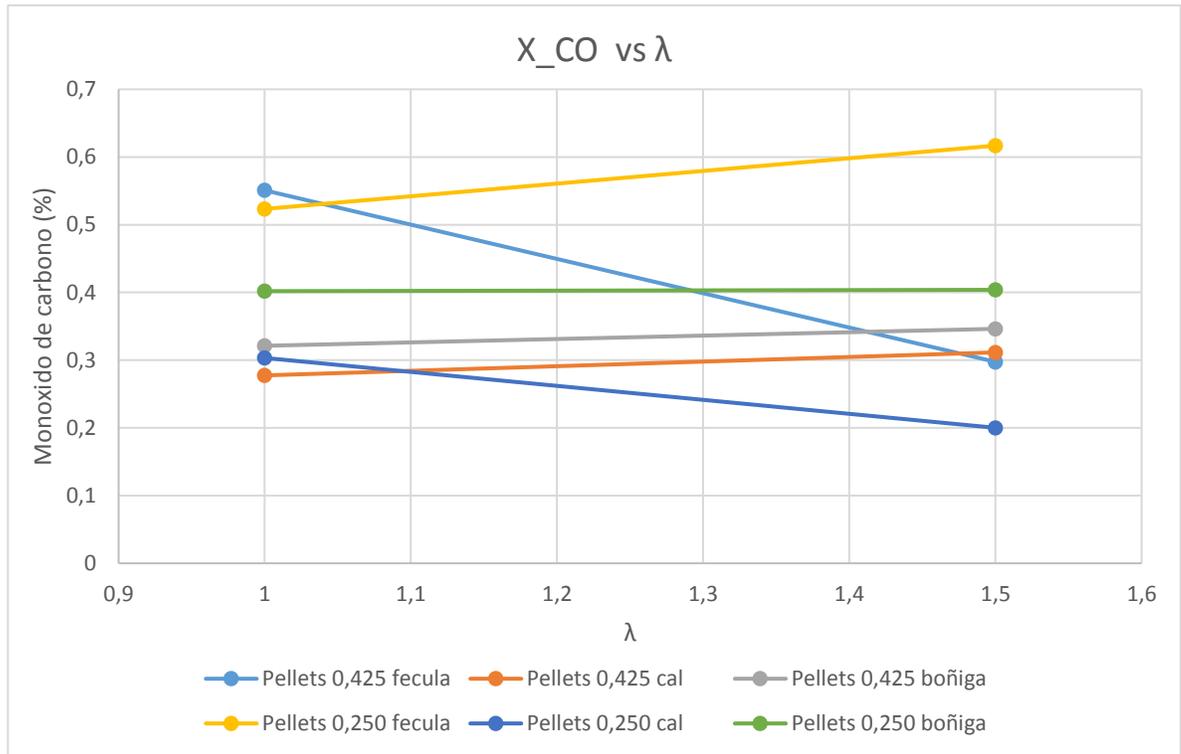
Grafica 3. Fracción molar X_{CO_2} vs Relación aire/combustión



Fuente: Autores del proyecto

La gráfica 3 muestra la producción de dióxido de carbono respecto a la relación aire/combustión, todos los pellets tienen una producción de dióxido de carbono que es normal en una combustión; pero al observar la mayoría de los pellets con una relación aire/combustión de $\lambda=1.5$ el valor tiende a disminuir lo que nos indica que si hay un menor consumo de oxígeno también habrá una menor producción de dióxido de carbono; Al ver el pellet 0,250 de fécula afirma lo dicho anteriormente porque fue el pellet que más consumió oxígeno durante la prueba por esto es el que más produce dióxido de carbono. El pellet 0,425 es el que menos produce dióxido de carbono en los dos casos por esto sigue siendo la mejor opción.

Grafica 4. Fracción molar X_{CO} vs Relación aire/combustión

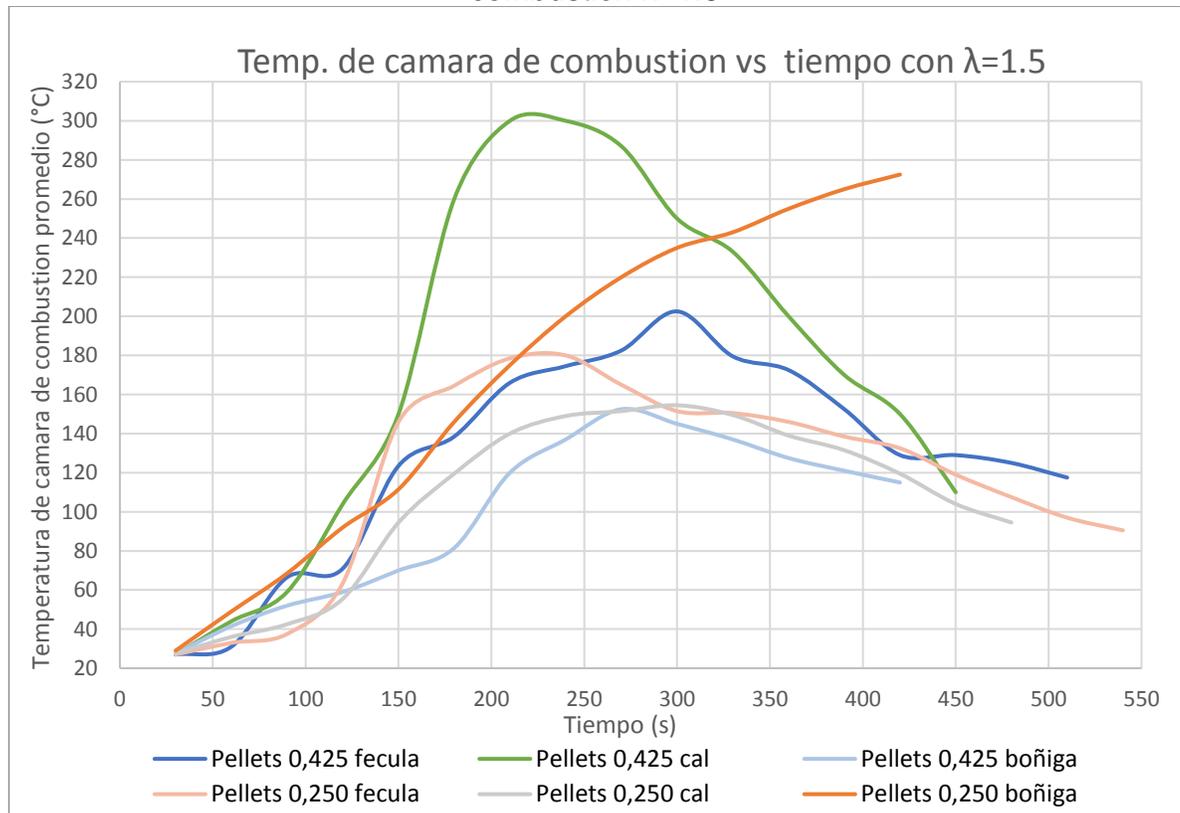


Fuente: Autores del proyecto

En la gráfica 4 se puede ver la producción de monóxido de carbono que esta de la mano del consumo de oxígeno y de la producción de dióxido de carbono, al ver el comportamiento de pellet 0,250 de fécula se puede observar que en la relación aire/combustión $\lambda=1.5$ es el que más monóxido de carbono produce en el momento de la quema. lo que da a entender que Niveles insuficientes de oxígeno y bajas temperaturas conducen a la formación de mayores porcentajes de CO en la mezcla de la combustión. Pero si vemos el pellet 0,250 de cal fue el que menos producción de monóxido de carbono por esto se dice que su combustión fue mejor a pesar de que tuvo valores más altos en dióxido de carbono que el pellet 0,425 de fécula, porque la producción de monóxido de carbono en valores altos puede generar intoxicación. En base a lo expuesto en la gráfica 4, el pellet con granulometría 0,250mm y menores con aglomerante de fécula de maíz no es idóneo para una producción por su alto contenido de dióxido de carbono y monóxido de carbono.

Las gráficas siguientes muestra el comportamiento de la temperatura de la cámara de combustión durante el tiempo de la quema con respecto a la relación aire/combustión.

Grafica 5. Temp. De cámara de combustión vs tiempo con relación de aire combustión $\lambda=1.5$

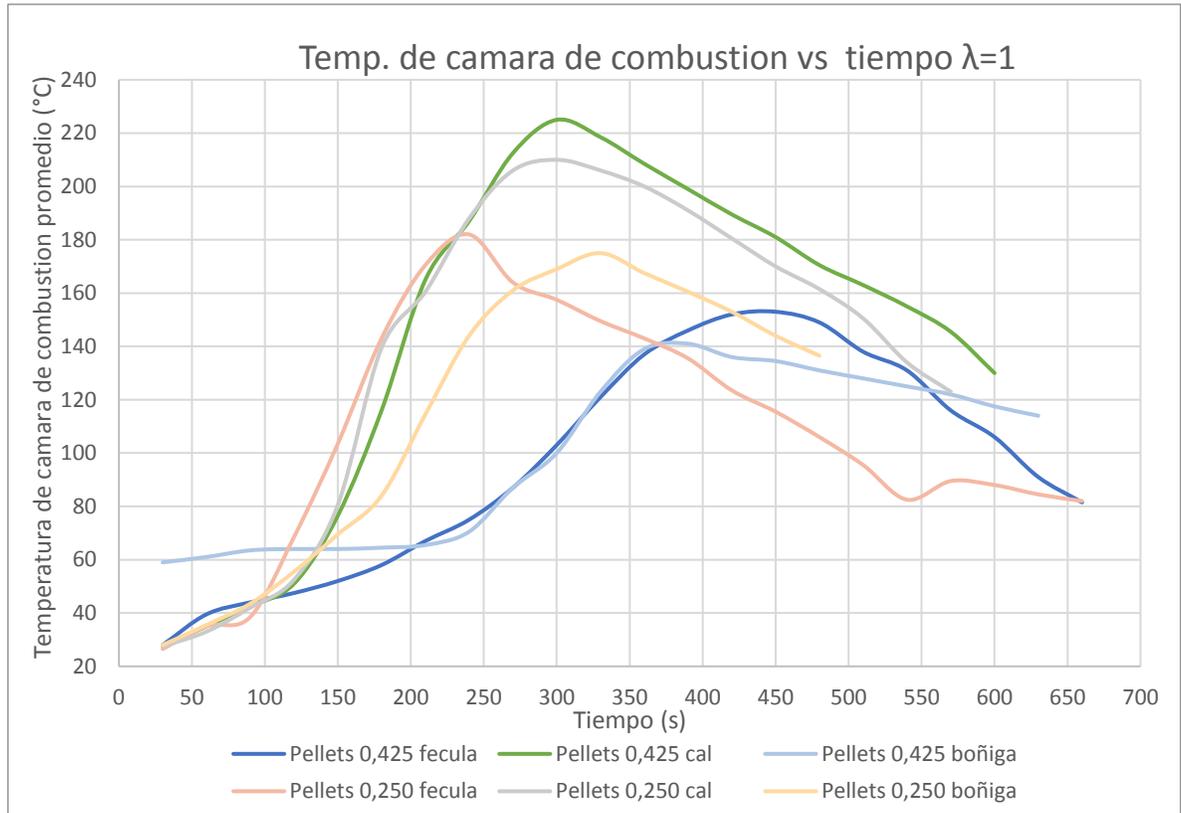


Fuente: Autores del proyecto

En la gráfica 5 se puede apreciar que los pelletes con un $\lambda=1.5$ mantuvieron una temperatura que no superaba los 200 °C, en cambio los únicos que pasaron esta temperatura fue el pellet 0,425 de cal y pellet 0,250 de boñiga lo que nos dice que estos son los que pueden alcanzar una mayor temperatura, pero su tiempo de duración es menor a los demás. También se dice que su comportamiento es de esperarse ya que, en el consumo de oxígeno, producción de dióxido de carbono y monóxido de carbono fue similar. Pero el que sigue manteniendo el mejor

rendimiento es el pellet 0,425 con fécula de maíz como se puede apreciar, su comportamiento de la temperatura se mantiene estable durante la quema.

Grafica 6. Temp. De cámara de combustión vs tiempo con relación de aire combustión $\lambda = 1$



Fuente: Autores del proyecto

Para el caso de la gráfica 6 que tiene un $\lambda=1$ las temperaturas fueron más bajas pero el tiempo fue mayor durante la combustión; se puede apreciar que los dos pellets con aglomerante de cal fueron los que alcanzaron una mayor temperatura. Pero al ver el pellet 0,425 con fécula mantuvo el mismo comportamiento que en la gráfica anterior, se afirma que el comportamiento de la combustión depende de la relación aire/combustión. De este modo, en las gráficas 4 y 5 nos muestra que el pellet que alcanzo mayor temperatura fue el de la cal con una granulometría de 0,425 con una relación aire/combustión $\lambda=1.5$ y $\lambda=1$.

Las siguientes tablas nos muestra la desviación estándar que tuvo cada prueba que se realizó en los pellets:

Tabla 13. Desviación estándar de prueba pellet con granulometría mayores a 0,425 mm

pellets					
granulometrías mayores a 0,425mm		relación aire/ combustión $\lambda=1.5$		relación aire/ combustión $\lambda=1$	
		Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar
Fécula de maíz	X_O2	19,747	0,017	19,445	0,077
	X_CO2	1,021	0,001	1,412	0,001
	X_CO	0,297	0,015	0,551	0,024
cal	X_O2	18,426	0,273	18,413	0,259
	X_CO2	2,528	0,078	2,579	0,004
	X_CO	0,311	0,030	0,277	0,010
boñiga	X_O2	19,339	0,076	18,271	0,112
	X_CO2	1,488	0,038	2,370	0,010
	X_CO	0,346	0,007	0,321	0,026

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 14. Desviación estándar de prueba pellet con granulometría mayores a 0,250 mm

pellets					
granulometría 0,250 mm y menores		relación aire/ combustión $\lambda=1.5$		relación aire/ combustión $\lambda=1$	
		Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar
Fécula de maíz	X_O2	17,766	0,860	18,694	0,447
	X_CO2	2,667	0,935	2,069	0,566
	X_CO	0,617	0,049	0,523	0,044
cal	X_O2	18,996	0,068	18,151	0,199
	X_CO2	1,797	0,040	2,621	0,225
	X_CO	0,200	0,028	0,303	0,040
boñiga	X_O2	18,784	0,166	18,192	0,075
	X_CO2	1,781	0,080	2,634	0,003
	X_CO	0,404	0,005	0,402	0,030

Fuente: Autores del proyecto

10.4 Análisis de viabilidad y documentación

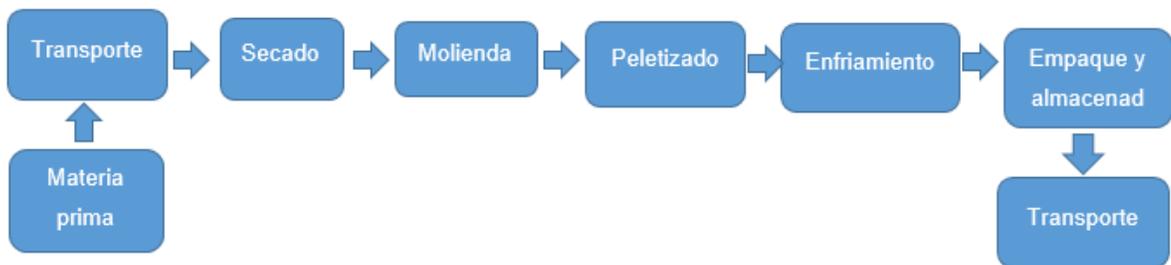
La documentación se llevó durante todo el proceso de elaboración del proyecto y se utilizaron diferentes métodos para llevar apuntes y resultados.

Estudio de la viabilidad Económica:

Para este análisis económico se tendrá en cuenta el proceso de maquila de un producto, “que tiene muchos años en el medio empresarial, consiste en pagar un servicio de producción, manufactura, transformación, ensamble, empaclado y etiquetado del producto”⁴⁰. Esto con el fin de ahorrar grandes cantidades de dinero en costos de inversión de maquinaria, mano de obra e infraestructura. Sin embargo, no se encontraron empresas de pelletizado de biomasa a escala industrial ya que el mercado a nivel nacional aún es muy pequeño. Aun así, hicimos un estimado con una de las empresas que se dedican a este proceso, pero con paletizado de concentrados y alimentos para animales de granja. Esta empresa es Balanceados del Magdalena SaS (Balma SAS) con más de 30 años de trayectoria, ubicada en Santa Marta, les maquila a diferentes empresas de la región, una de ellas es Espartaco Concentrados, una empresa local de Santander.

Teniendo en cuenta los datos suministrados por ellos, dividiremos el proceso en las siguientes fases:

Cuadro 3. Procedimiento de pelletizado



⁴⁰ Que es el proceso de Maquila y cuál es su aplicación [En línea]. Sistema Impulsa, Santander, 2019. [Fecha de consulta: 18 de enero de 2021]. Disponible: <https://www.sistemaimpulsa.com/blog/que-es-el-proceso-maquila-y-cual-es-su-aplicacion/>

Obtención de la materia prima

La materia prima es extraída de la región de Santander, específicamente de Lebrija donde la recolectan los agricultores y la venden a un precio de \$ 1.000 COP/kilogramo eso sin incluir el transporte. En la siguiente tabla se anexan los valores de la cascarilla más el aglomerante y el transporte, que va desde donde la recogen hasta la empresa que maquila del producto. Para este caso elegimos el pellet con aglomerante de fécula de maíz, aunque los resultados con los otros aglutinantes (Boñiga y cal) fueron muy similares y óptimos según la norma, el que mejor presento un PCI (Poder Calorífico Inicial) fue el de fécula de maíz, por ende, trabajaremos el análisis de costos con este. Pueden ver los resultados del PCI en la tabla 18.

Tabla 15 Precio de la materia prima y transporte

Materiales	Cantidad	Unidad	Precio
Materia prima (Cascarilla de la semilla)	1	Tonelada	\$ 1.000.000,00
Aglomerante (fécula de maíz)	300	Kilogramos	\$ 2.087.500,00
Transporte	1	Tonelada	\$ 2.000.000,00
		Total	\$ 5.087.500,00

Fuente: Autores del proyecto

Maquila

Ya entregada, la empresa hace el proceso de la maquila, esto incluye lo siguiente con su respectivo valor del mercado en pesos colombianos.

Tabla 26 Precios Maquila según empresa BALMA SAS

Proceso	Cantidad	Unidad	Precio
Almacenamiento en tolva	1	Tonelada	\$ 20.000,00
Secado	1	Tonelada	\$ 60.000,00
Molienda	1	Tonelada	\$ 50.000,00
Pelletizado	1	Tonelada	\$ 90.000,00
Enfriamiento	1	Tonelada	\$ 20.000,00
Transporte y almacenada	1	Tonelada	\$ 150.000,00
Empaque + Etiqueta + Hilo	1	Tonelada	\$ 21.000,00
Merma del 3%	1	Tonelada	\$ 11.600,00
		Total	\$ 422.600,00

Fuente: Autores del proyecto

En siguiente tabla se suman todos los costos totales de materia prima, de maquila y de transporte de ida y vuelta; el costo de transporte se tomó desde la ciudad de Bucaramanga hasta Santa Marta y regreso de la misma.

Tabla 17 Suma de costos totales

Descripción	Precio	Unidad
Costo total de la materia prima	\$ 3.087.500,00	COP/Ton
Costo total de la maquila	\$ 422.600,00	COP/Ton
Costo total del transporte	\$ 4.000.000,00	COP/Ton
Costo total neto	\$ 7.510.100,00	COP/Ton

Fuente: Autores del proyecto

Con el proceso que hace la planta y entrega del producto final definido, se hace la suma de costo total neto más el porcentaje de ganancia e impuestos.

Tabla 18 Valor total por tonelada

Descripción	Precio	Unidad
Costo total neto	\$ 7.510.100,00	COP/Ton
Ganancia del 33% del costo neto	\$ 2.478.333,00	COP/Ton
Total	\$ 9.988.433,00	COP/Ton

Fuente: Autores del proyecto

Teniendo el valor total del producto por tonelada se hace el siguiente cálculo para hallar el costo del pellet de cascarilla sachá Inchi en COP/Kg y hacer una comparativa de precios con respecto a otros combustibles en el mercado.

$$(18) \text{Precio por bulto} = 9.988.433 \frac{\text{COP}}{\text{Ton}} * \frac{1 \text{ Ton}}{25 \text{ Bultos}} = 399.537 \frac{\text{COP}}{\text{Bulto}}$$

$$(19) \text{Precio por Kilogramo} = 399.537 \frac{\text{COP}}{\text{Bulto}} * \frac{1 \text{ Bulto}}{40 \text{ Kg}} = 9.988 \frac{\text{COP}}{\text{Kg}}$$

Cabe aclarar que la capacidad de producción de la planta juega un papel importante en el precio final del producto. Que es, en este caso, de 80.000 Ton/año, y operativa durante 8.000 horas al año. En la siguiente tabla se observa los precios que hay actualmente en el mercado comercial colombiano con respecto a otros combustibles convencionales en COP/Kg.

Tabla 19 Comparación precios de mercado

Combustible	Precio	Unidad
Pellets Sacha Inchi	\$ 9.988,00	COP/Kg
Pellets de madera (Marca Oklahoma)	\$ 9.700,00	COP/Kg
Carbón vegetal	\$ 11.900,00	COP/Kg

Fuente: Autores del proyecto

Consumo de combustibles:

Para tener una referencia de cómo influye los pellets de Cascarilla Sacha Inchi en el uso cotidiano y la diferencia que hay comparado con otros pellets de madera que hay en el mercado, se propone el siguiente ejemplo:

- “Consumo de combustible en una vivienda unifamiliar de 4 personas que cuenta con una caldera de 30 kW de potencia y su rendimiento es del 90%: La demanda de calefacción, suponiendo que la vivienda se encuentra situada en un clima frío, en el que la calefacción se usa 1.909 h/año. La demanda de calefacción es la siguiente”⁴¹:

(20) *Demanda calefacción*

$$= \text{Potencia caldera} * \frac{h}{\text{día}} \text{ uso caldera} * \frac{\text{días}}{\text{año}} * \text{coeficiente de intermitencia}$$

$$\text{Demanda calefacción} = 30KW * 1.909 \frac{h}{\text{año}} * 0,85 = 48.700 \frac{KWh}{\text{año}}$$

Demanda de ACS, para un consumo de 30 l/día por persona para una temperatura de referencia, según establece el Documento básico de Ahorro de Energía en la sección HE4 (DB-HE4):

$$(21) \text{Demanda ACS} = n^{\circ} \text{ personas} * \frac{l}{\text{día}} * \text{días} * C_p * \Delta T$$

Donde C_p es el calor específico del agua y ΔT es el salto térmico del fluido.

$$\text{Demanda ACS} = 4 \text{ personas} * 30 \frac{l}{\text{días}} * 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} * 1 \frac{Kcal}{Kg^{\circ}C} * 60^{\circ}C = 2.628.000 \frac{Kcal}{\text{año}}$$

⁴¹ LOSADA, Laura. Estudio de viabilidad técnico económico para el uso de pellets con biomasa residual torrefactada en calderas. León, Madrid. Universidad de León. Escuela superior y técnica de ingenieros de minas. 2016, 112p.

$$Demanda ACS = 2.628.000 \frac{Kcal}{año} * 1 \frac{KWh}{860Kcal} = 3.055,81 \frac{KWh}{año}$$

Demanda total

$$(22) Demanda total = 48.700 \frac{KWh}{año} + 3.055,81 \frac{KWh}{año} = 51.755,81 \frac{KWh}{año}$$

El consumo energético por tanto será:

$$(23) Consumo energético = \frac{51.755,81 \frac{KWh}{año}}{0,9} = 57.506,45 \frac{KWh}{año}$$

Teniendo en cuenta las características de cada combustible, el consumo de cada uno de ellos se muestra a continuación.

El caudal de combustible necesario se calcula de acuerdo al PCI del combustible empleado, para el pellet de cascarilla Sacha Inchi con fécula de maíz, será con un PCI de 18.070 KJ/Kg, y para pellets de madera convencional, con un PCI en general de 16.000 KJ/Kg. El valor del PCI de la cascarilla sachu inchi se obtuvo de la Tabla 11.

$$(24) Caudal combustible pellet Sacha Inchi = \frac{57.506,45 \frac{KWh}{año}}{18.070 \frac{KJ}{Kg} * \frac{1KWh}{3600KJ}} = 11.456,73 \frac{Kg}{año}$$

$$(25) Caudal combustible pellet madera = \frac{57.506,45 \frac{KWh}{año}}{16.000 \frac{KJ}{Kg} * \frac{1KWh}{3600KJ}} = 12.938 \frac{Kg}{año}$$

El ahorro obtenido es de 1.481,2 Kg/año.

10 CONCLUSIONES

- Se puede evidenciar que para los pellets de boñiga y fécula de maíz fue necesario utilizar una cantidad mayor de agua para su mezcla antes de peletizar; porque si bien sabemos la fécula de maíz necesita una buena cantidad de agua para una mezcla compacta y en el caso de la boñiga a pesar de tener su propia humedad no tiene una composición homogénea, lo cual hace difícil su mezclado.
- Podemos concluir que el diámetro y altura que se obtuvo de cada pellet son muy similares entre ellos a pesar de que el valor de la masa cambió por su diferencia en el aglomerante y la granulometría, también de acuerdo a la caracterización en el análisis próximo. Se puede decir que algunos cumplen con las diferentes normativas y estándares; se dice algunos ya que en el caso del pellet con aglomerante de cal el valor de ceniza fue alto y este sobrepasa el valor de las normas internacionales.
- Por consiguiente, para los pellets en el proceso de quema la granulometría tiene un efecto a nivel su apariencia, dureza y el aglomerante afecta directamente los valores de humedad, ceniza, material volátil y poder calorífico.
- En definitiva, el pellet con granulometría mayor a 0,425 mm y aglomerante de fécula de maíz es el que mejor comportamiento mostró en el proceso de quema, porque en el caso de consumo de oxígeno fue bajo y en la producción de Dióxido de carbono, monóxido de carbono tubo menor valor en comparación a los otros.
- A partir del análisis en la tabla 17, se puede decir que el pellet con biomasa de sachá inchi entraría a competir con un precio bueno en el mercado no el

más económico, pero si estaría a un precio de \$9.988, aparte el ahorro de consumo de combustibles comparando con el pellet de madera seria de 1.481,2 kg/año este cálculo fue con el pellet con granulometría mayor a 0,425 mm y aglomerante de fécula de maíz que fue el que mayor poder calorífico obtuvo.

11 RECOMENDACIONES

- Como parte del estudio, mediante los ensayos preliminares para el mezclado de la biomasa y el aglomerante, sería buena idea poder realizar un precalentamiento y premezclado antes de entrar a la peletizadora. Esto favorecería para obtener pellets con un comportamiento más homogéneo.
- Para el análisis último no se logró emplear una máquina de análisis elemental CHNS, se utilizaron fórmulas que a partir del análisis próximo se podría encontrar los valores Carbono, Hidrogeno, y oxígeno. En el caso de los pellets hechos con cal no fue posible utilizarla en su totalidad por su alto contenido de ceniza el cual no acepta la fórmula para encontrar el porcentaje de carbono.
- Se recomienda que, a pesar de los valores positivos del estudio económico, se debe tener en cuenta, que solo es posible si se hace a una escala industrializada. Como se dijo anteriormente la capacidad de producción de la planta es inversamente proporcional al precio final del producto, es decir, a mayor cantidad de materia procesada, menor es el precio.

BIBLIOGRAFIA

1. AYALA MARTINEZ, Guillermo Alexander. Análisis de crecimiento y producción de 3 variedades de sachá inchi, en el municipio de tena Cundinamarca. Trabajo de grado para optar el título de ingeniero agrónomo. Universidad de ciencias aplicadas y ambientales U.D.C.A. Faculta de ingeniería, 2016, 11p
2. Alternativas tecnológicas para el uso de cascarilla de arroz (2020). Retrieved 19 February 2020, from <http://red.uao.edu.co/bitstream/10614/1327/1/TME00462.pdf>
3. ALVAREZ GAITAN, Johanna; MOYA, Roger. Características y propiedades de pellets de biomasa torrefaccionada de Gmelina arbórea y Dipterix panaramensis a diferentes tiempos. Escuela de ingeniería forestal – Instituto tecnológico de costa rica. Cartago, 2015. 3p
4. ALAYON N., Alicia and ECHEVERRI J., Isabella. Sachá inchi (*plukenetia volubilis* Linneo) ¿una experiencia ancestral desaprovechada? Evidencias clínicas asociadas a su consumo. Revista chilena de nutrición. 2016. versión On-line ISSN 0717-7518
5. ANZIL, Federico. Biocombustibles. {En línea}. {22 de octubre de 2012}. Disponible en: <http://www.zonaeconomica.com/biocombustibles>).
6. BLAIR, Carlos. “Manual de producción de sachá inchi para el biocomercio y la agroforestería sostenible”. {En línea}. {26 de enero del 2020} disponible en: https://issuu.com/agronegocioscr/docs/manual_de_producci_n_de_sachá_inchi_para_web

7. FAO. 2019. El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos. Roma. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
8. F. N. Jiménez-García, A. M. Restrepo-Franco, and L. F. Mulcúe-Nieto, "Estado de la investigación en energía en Colombia: una mirada desde los grupos de investigación," *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 28 (52), pp. 9-26, Jul. 2019
9. GUTIERREZ CORENA, Hernán Darío. Plan de negocios para la creación de una empresa extractora de aceite de ricino en el bajo cauca. Trabajo de grado presentado para optar el título de magister en administración de empresas MBA. Cauca – Colombia. Universidad EAN. Facultad de estudios en ambientes virtuales, 2020. P.21
10. Gary D. Gillespie, Colm D. Everard, Colette C. Fagan and Kevin P. McDonnell. Prediction of quality parameters of biomass pellets from proximate and ultimate analysis (en línea) 2013, enero – mayo. 771-777. (consultado 23 de noviembre 2021). www.elsevier.com/locate/fuel
11. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. *Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y Marco de referencia*. NTC-ISO 14040. Bogotá D.C.: El instituto, 2007. 8p.
12. Jianfeng Shen, Shuguang Zhu, Xinzhi Liu, Houlei Zhang and Junjie Tan. Energy Conversion and Management: The prediction of elemental composition of biomass based on proximate analysis. (en línea) 2009, abril – diciembre. 51 (2010) 983–987. (consultado 13 de julio 2021). www.elsevier.com/locate/enconman.

13. JOSE A. ROCA. Las 10 mayores plantas de biomasa del mundo. *El periódico de la energía.com [En línea].2016, enero. [Consultado el 11 de septiembre del 2020]. Disponible en: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-de-biomasa-del-mundo/>.*
14. LOSADA, Laura. Estudio de viabilidad técnico económico para el uso de pellets con biomasa residual torrefactada en calderas. León, Madrid. Universidad de León. Escuela superior y técnica de ingenieros de minas.2016, 112p.
15. Manuales sobre energía renovable: Biomasa/ Biomass Users Network (BUN-CA). -1 ed. -San José, C.R. : Biomass Users Network (BUN-CA), 2002. 42 p.
16. MAGNE, Angélica Rocío. *Uso de residuos agroindustriales en forma de pellets para fines energéticos en zonas rurales de Bolivia*. Trabajo de grado Ingeniería Industrial. Navarra. Universidad Pública de Navarra. E.T.S. de Ingeniería Industrial, Informática y de Telecomunicación. 2018. P.20.
17. MINISTERIO DE AGRICULTURA DE COLOMBIA. Sacha Inchi, la apuesta de Colombia Sostenible para reducir la emisión de más de 49.000 toneladas de carbono en Córdoba, Bogotá D.C., 2019.
18. PATIÑO Pedro Elías. Biomasa residual vegetal: Tecnologías de transformación y estado actual. Revista científica UDES [En línea]. 2014, diciembre. [Consultado el 11 de septiembre del 2020]. Disponible en: <https://revistas.udes.edu.co/innovaciencia/article/view/1849>.
19. Portal para la paz. [sitio web]. Montelíbano(córdoba): sachá inchi, la apuesta de Colombia sostenible para reducir la emisión de más de 49.0000 toneladas de carbono en córdoba. [consultado el 23 de julio]. Disponible en: <https://portalparalapaz.gov.co/publicaciones/1676/sacha-inchi-la-apuesta-de-colombia-sostenible-para-reducir-la-emision-de-mas-de-49000-toneladas-de-carbono-en-cordoba/>

20. Que es el proceso de Maquila y cuál es su aplicación [En línea]. Sistema Impulsa, Santander, 2019. [Fecha de consulta: 18 de enero de 2021]. Disponible: <https://www.sistemaimpulsa.com/blog/que-es-el-proceso-maquila-y-cual-es-su-aplicacion/>
21. ROMERO, Salvador. Sobre APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA ALTERNATIVA A LOS COMBUSTIBLES FÓSILES. *Rev.R.Acad.Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp)*, Madrid, 2010, Vol. 104, N°2, pág. 2.
22. REVISTA dinero. (2019). La planta que puede competir en rentabilidad con la coca. [online] disponible en: <https://www.dinero.com/edicion-impresa/negocios/articulo/la-planta-que-puede-competir-en-rentabilidad-con-la-coca/267323> [Acceso 26 Jan. 2020].
23. RINCÓN RINCÓN, Sahra Nathalie; CASTILLO GONZÁLEZ, Yuri Alexandra. Estudio de factibilidad para la fabricación de pellets a partir de materia lignocelulósico proveniente de pala de aceite. Trabajo de grado, mención en ingeniero ambiental. Bogotá D.C.: Universidad libre. Departamento de ingeniería ambiental, 2014, 26p
24. MANRRIQUE Raiza Johanna. Estudio de la combustión del Pellet de Cisco de café. Trabajo de grado Ingeniería Mecánica. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas, Departamento de Ingeniería Mecánica. 2018, 20p..
25. S. Döring, Power from Pellets: Technology and Applications, Springer Science & Business Media, 2013
26. Tiempo, C. (2020). 'Colombia tiene potencial para producir energía con biomasa'. Retrieved 19 February 2020, from

<https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/colombia-tiene-potencial-para-producir-energia-con-biomasa-505377>

27. VARGAS LAZO, Angélica María. Estudio de la producción de pellets a partir de café. Tesis de magister, mención en ingeniería química. Colombia: universidad nacional de Colombia. Facultad de ingeniería, 2018, 7p.

28. ZAPATA SAAD, Andrés José. Investigación del Efecto de los Parámetros de Elaboración de Pellets de Cuesco de Palma en el Proceso de Pirólisis. Tesis de magister. Mención Ingeniería mecánica Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2016, 14p.

ANEXOS

Anexo A. Valores tomados en la prueba de humedad

Tabla 20. Prueba de humedad con pellet mayores a 0,425

porcentaje de humedad en los pellets con granulometría mayores a 0,425				
Aglomerante	Peso placa (g)	Peso placa con biomasa(g)	Peso placa con biomasa caliente(g)	humedad (Mad) %
fécula de maíz	19,3542	23,1375	22,71	11,30
boñiga	19,354	22,86	22,48	10,84
cal	17,839	23,56	23,047	8,97

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 21. Prueba de humedad con pellet 0,250 y menores

porcentaje de humedad en los pellets con granulometría 0,250 y menores				
Aglomerante	Peso placa (g)	Peso placa con biomasa(g)	Peso placa con biomasa caliente(g)	humedad (Mad) %
fécula de maíz	17,84	23,05	22,47	11,10
boñiga	17,84	21,15	20,79	11,10
cal	19,35	25,33	24,77	9,34

Fuente: Autores del proyecto

Anexo B. Valores tomados en la prueba de ceniza

Tabla 22. Prueba de ceniza con pellet mayores a 0,425

porcentaje de ceniza en los pellets con granulometría mayores a 0,425				
Aglomerante	Peso placa (g)	Peso placa+biomasa (g)	Peso Placa+biomasa fria (g)	Ceniza (Ad%):
fécula de maíz	11,61	13,71	11,67	3,27
boñiga	11,61	13,80	11,77	8,26
cal	11,61	12,22	11,76	27,01

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 23. Prueba de ceniza con pellet 0,250 y menores

porcentaje de ceniza en los pellets con granulometría 0,250 y menores				
Aglomerante	Peso placa (g)	Peso placa+biomasa (g)	Peso Placa+biomasa fria (g)	Ceniza (Ad%):
fécula de maíz	16,36	19,11	16,52	6,51
boñiga	15,83	17,45	15,97	8,79
cal	15,83	16,13	15,92	33,38

Fuente: Autores del proyecto

Anexo C. Valores tomados en la prueba de material volátil

Tabla 24. Prueba de material volátil con pellet mayores a 0,425

porcentaje de material volátil en los pellets con granulometría mayores a 0,425				
Aglomerante	Wc (peso crisol y tapa) g	Wi (Peso inicial) g	Wf (Peso final) g	material volátil %
fécula de maíz	34,01	35,08	34,23	68,73
boñiga	36,67	37,30	36,78	71,90
cal	36,38	37,29	36,66	60,12

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 25. Prueba de material volátil con pellet 0,250 y menores

porcentaje de material volátil en los pellets con granulometría 0,250 y menores				
Aglomerante	Wc (peso crisol y tapa) g	Wi (Peso inicial) g	Wf (Peso final) g	material volátil %
fécula de maíz	36,43	37,62	36,66	80,75
boñiga	39,05	40,09	39,21	84,62
cal	39,11	40,39	39,52	67,76

Fuente: Autores del proyecto

Anexo D. Datos tomado con el anemómetro

Tabla 26. Calibración del dámper

Calibración del dámper					
posición dámper	Toma 1 (m/s)	Toma 2 (m/s)	Toma 3 (m/s)	Velocidad (M/s)	Grados
0	3,8	4,2	3,9	3,967	90
1	6	6,1	6	6,033	67,5
2	7,2	7,4	7,2	7,267	45
3	7,5	7,4	7,5	7,467	22,5
4	7	6,8	7,1	6,967	0

Fuente: Autores del proyecto

Anexo E. Datos encontrados para la relación aire/combustión

Tabla 27. Datos de combustión teórica estequiométrica

Combustión teórica estequiométrica								
Aglomerante	N_moles_aire	masa molar del aire	relación de aire en exceso	Masa de aire (g)	Masa de aire (kg)	Volumen de aire (m3)	Volumen de aire(l)	Angulo dámper
boñiga	5,873574531	137,644	1	808,462293	0,80846229	0,67371858	673,718577	90
	5,873574531	137,644	1,5	1212,69344	1,21269344	1,01057787	1010,57787	69
cal	9,557768469	137,644	1	1315,56948	1,31556948	1,0963079	1096,3079	26
	9,557768469	137,644	1,5	1973,35422	1,97335422	1,64446185	1644,46185	82
fécula de maíz	6,741355597	137,644	1	927,90715	0,92790715	0,77325596	773,255958	84
	6,741355597	137,644	1,5	1391,86072	1,39186072	1,15988394	1159,88394	55

Fuente: Autores del proyecto

