

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA FABRICACIÓN DE PELLETS A  
PARTIR DE MATERIAL LIGNOCELULÓSICO PROVENIENTE DE PALMA DE  
ACEITE

SAHRA NATHALÍ RINCÓN RINCÓN  
YURI ALEXANDRA GONZÁLEZ CASTILLO

UNIVERSIDAD LIBRE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
BOGOTÁ D.C.  
2014

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA FABRICACIÓN DE PELLETS A  
PARTIR DE MATERIAL LIGNOCELULÓSICO PROVENIENTE DE PALMA DE  
ACEITE

SAHRA NATHALÍE RINCÓN RINCÓN Cód. 064082026  
YURI ALEXANDRA GONZÁLEZ CASTILLO Cód. 064082045

Proyecto de Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Ambiental

Director: Ingeniero Gabriel Camargo

UNIVERSIDAD LIBRE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
BOGOTÁ D.C.  
2014

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá (22, 11, 2013)

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos de manera sincera a todas las personas que de una u otra forma han contribuido en la realización de este proyecto, en especial a nuestras familias por el apoyo incondicional ante cualquier circunstancia y por ser nuestro principal motor.

A la Universidad Libre por ser la creadora de nuestras bases y el pilar de nuestro conocimiento. A nuestro director de trabajo de grado el Msc. Gabriel Camargo Vargas, por la atención y el tiempo dedicado a esta investigación, lo cual ha contribuido a nuestro crecimiento personal y profesional y a la Msc. Gina Paola González por ser la principal gestora en dar a conocer nuestro proyecto de forma internacional.

Al grupo de investigación *Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética*, de la Universidad Nacional de Colombia liderado por el Dr. Fabio Emiro Sierra Vargas y sus integrantes, en especial al Dr. Carlos Andrés Forero Núñez, al Ingeniero Luis Atuesta y a la estudiante de Ingeniería Química Laura Carolina Hernández.

Al Instituto Tecnológico de Sonora en Cd. Obregón, Sonora – México, en especial al Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, liderado por el Doctor Germán Eduardo Dévora, por el apoyo dado a la investigación.

## CONTENIDO

|  | pág. |
|--|------|
| INTRODUCCIÓN                                     | 13   |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA                    | 15   |
| 2. JUSTIFICACIÓN                                 | 16   |
| 3. OBJETIVOS                                     | 18   |
| 3.1 OBJETIVO GENERAL                             | 18   |
| 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS                        | 18   |
| 4. MARCO DE REFERENCIA                           | 19   |
| 4.1 MARCO DE ANTECEDENTES                        | 19   |
| 4.1.1 Teóricos institucionales                   | 19   |
| 4.1.2 Teóricos externos                          | 19   |
| 4.1.2.1 Nacionales                               | 19   |
| 4.1.2.2 Internacionales                          | 20   |
| 4.2 MARCO TEÓRICO                                | 23   |
| 4.2.1 La palma de aceite                         | 23   |
| 4.2.2 Fabricación de pellets a partir de biomasa | 24   |
| 4.2.3 Características y ventajas de los pellets  | 25   |
| 4.2.4 Desventajas                                | 25   |
| 4.3 MARCO CONCEPTUAL                             | 27   |
| 4.3.1 Biocombustible                             | 27   |
| 4.3.2 Energía renovable                          | 28   |
| 4.3.3 Biomasa                                    | 28   |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.3.4 | Combustión directa  | 30 |
| 4.4   | MARCO LEGAL   | 32 |
| 5.    | DISEÑO METODOLÓGICO   | 33 |
| 5.1   | HIPÓTESIS   | 33 |
| 5.2   | TIPO  | 33 |
| 5.3   | METODOLOGÍA   | 33 |
| 5.3.1 | Fase 1: Caracterización de la materia prima                       | 34 |
| 5.3.2 | Fase 2: Trabajo experimental                                      | 34 |
| 5.3.3 | Fase 3: Análisis de los pellets                                   | 38 |
| 5.3.4 | Fase 4: Discusión de resultados                                   | 43 |
| 6     | RESULTADOS  | 44 |
| 6.1   | CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA                               | 44 |
| 6.1.1 | Análisis Último   | 44 |
| 6.1.2 | Contenido de Lignina  | 44 |
| 6.2   | FABRICACIÓN DE PELLETS  | 45 |
| 6.3   | CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS PELLETS | 46 |
| 6.3.1 | Densidad  | 46 |
| 6.3.2 | Contenido de humedad  | 51 |
| 6.3.3 | Resistencia al impacto (% durabilidad)                            | 52 |
| 6.3.4 | Esfuerzo de compresión  | 54 |
| 6.3.5 | Módulo de elasticidad   | 55 |
| 6.3.6 | Material volátil  | 65 |
| 6.3.7 | Proceso de quemado  | 67 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 6.3.8 | Poder calorífico  | 67 |
| 7     | DISCUSIÓN DE RESULTADOS   | 68 |
| 7.1   | CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA                               | 68 |
| 7.1.1 | Análisis Último   | 68 |
| 7.1.2 | Contenido de Lignina  | 69 |
| 7.2   | CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS PELLETS | 69 |
| 7.2.1 | Densidad  | 69 |
| 7.2.2 | Contenido de humedad  | 70 |
| 7.2.3 | Resistencia al impacto (% durabilidad)                            | 70 |
| 7.2.4 | Esfuerzo de compresión  | 71 |
| 7.2.5 | Módulo de elasticidad   | 72 |
| 7.2.6 | Material volátil  | 72 |
| 7.2.7 | Proceso de quemado  | 73 |
| 7.2.8 | Poder calorífico  | 73 |
| 8     | CONCLUSIONES  | 74 |
| 9     | RECOMENDACIONES   | 76 |
| 10    | GLOSARIO  | 77 |
| 11    | BIBLIOGRAFÍA  | 79 |
| 12    | ANEXOS  | 86 |

## LISTA DE TABLAS

|  | pág. |
|--|------|
| Tabla 1. Uso directo de desechos sólidos _____   | 30   |
| Tabla 2. Procesos de conversión de biomasa en energía_____                             | 31   |
| Tabla 3. Resultados preliminares de pellets_____                                       | 35   |
| Tabla 4. Análisis Último de la biomasa_____  | 44   |
| Tabla 5. Combinación final de pellets _____  | 45   |
| Tabla 6 .Reporte de datos para determinación de densidad (pellet 1)_                   | 46   |
| Tabla 7. Reporte de datos para determinación de densidad (pellet 2)_                   | 47   |
| Tabla 8. Reporte de datos para determinación de densidad (pellet 3)_                   | 47   |
| Tabla 9. Reporte de datos para determinación de densidad (pellet 4)_                   | 47   |
| Tabla 10. Reporte de datos para determinación de densidad (pellet 5)                   | 48   |
| Tabla 11. Reporte de datos 24 h después para determinación de densidad (pellet 1)_____ | 49   |
| Tabla 12 .Reporte de datos 24 h después para determinación de densidad (pellet 2)_____ | 49   |
| Tabla 13 .Reporte de datos 24 h después para determinación de densidad (pellet 3)_____ | 49   |
| Tabla 14 .Reporte de datos 24 h después para determinación de densidad (pellet 4)_____ | 50   |
| Tabla 15 .Reporte de datos 24 h después para determinación de densidad (pellet 5)_____ | 50   |
| Tabla 16.Reporte de caídas pellet 1 _____  | 52   |
| Tabla 17.Reporte de caídas pellet 2 _____  | 53   |
| Tabla 18.Reporte de caídas pellet 3 _____  | 53   |



|  |    |
|--|----|
| Tabla 19. Reporte de caídas pellet 4_____  | 53 |
| Tabla 20. Reporte de caídas pellet 5_____  | 54 |
| Tabla 21. Compresión de pellets_____   | 54 |
| Tabla 22. Datos esfuerzo-deformación pellet 1_____                                     | 56 |
| Tabla 23. Datos esfuerzo-deformación pellet 2_____                                     | 57 |
| Tabla 24. Datos esfuerzo-deformación pellet 3_____                                     | 60 |
| Tabla 25. Datos esfuerzo-deformación pellet 4_____                                     | 62 |
| Tabla 26. Datos esfuerzo-deformación pellet 5_____                                     | 64 |
| Tabla 27. Quema de pellets _____   | 67 |
| Tabla 28. Tratamientos para la elaboración de pellets de biomasa<br>palma de coco_____ | 87 |
| Tabla 29. Resultados de pellets con biomasa de palma de coco_____                      | 89 |

## LISTA DE FIGURAS

|   | pág. |
|---|------|
| Figura 1. Distribución de plantaciones de palma de aceite en Colombia_____  | 24   |
| Figura 2. Fuente de la biomasa_____   | 29   |
| Figura 3. Molino_____   | 36   |
| Figura 4. Tamices No. 16 y No. 50_____                                      | 36   |
| Figura 5. Biomasa molida y tamizada_____                                    | 37   |
| Figura 6. Prensa Peletizadora _____   | 37   |
| Figura 7. Prensa hidráulica _____   | 40   |
| Figura 8. Deformímetro y prensa_____  | 41   |
| Figura 9. Bomba calorimétrica 1341_____                                     | 43   |
| Figura 10. Pellets finales_____   | 46   |
| Figura 11. Densidad de los pellets respecto su composición_____             | 48   |
| Figura 12. Contenido de humedad de los pellets respecto su composición_____ | 52   |
| Figura 13. Esfuerzo Vs deformación pellet 1_____                            | 56   |
| Figura 14. Esfuerzo Vs deformación pellet 2_____                            | 59   |
| Figura 15. Esfuerzo Vs deformación pellet 3_____                            | 61   |
| Figura 16. Esfuerzo Vs deformación pellet 4_____                            | 63   |
| Figura 17. Esfuerzo Vs deformación pellet 5_____                            | 65   |
| Figura 18. Comparación Esfuerzo-deformación _____                           | 66   |
| Figura 19. Pellet 3 tras cuatro caídas_____                                 | 71   |
| Figura 20. Pellets con biomasa de palma de coco_____                        | 88   |

Figura 21. Compresión de pellets con biomasa de palma de coco\_\_\_\_ 90

Figura 22. Esfuerzo Vs deformación pellets con biomasa de palma  
de coco\_\_\_\_\_ 91

## LISTA DE ANEXOS

|   | pág. |
|---|------|
| Anexo A. Análisis último biomasa de palma de aceite_____  | 86   |
| Anexo B. Investigación realizada en el Instituto Tecnológico de Sonora ITSON en Ciudad Obregón, Sonora, México_____ | 87   |

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, las principales fuentes energéticas provienen de los combustibles fósiles, los cuales generan una alta contaminación y un agotamiento de los recursos no renovables, lo que causa un incremento progresivo de su costo al ser más compleja su explotación y al ser innegable su extinción al pasar de los años.

Este agotamiento ha provocado que las principales fuentes energéticas se estén empezando a sustituir con las energías alternativas, pues al originarse en los recursos naturales renovables se consideran las fuentes más abundantes en la tierra con un valor incalculable, además que han sido poco explotadas y su impacto al ambiente es mínimo. Dentro de estas se encuentra la biomasa, una fuente importante de energía, la cual se puede comparar con una batería, ya que guarda su energía para luego liberarla.

Este material lignocelulósico permite crear una interacción positiva entre los sectores agrícola-forestal (generadores), industrial (transformación), y energético (utilización), dándole un valor agregado al producto, debido a la generación de empleo y al desarrollo local en zonas rurales. De igual forma, conociendo que la producción de biomasa es descentralizada ésta se puede realizar a pequeña o gran escala, lo anterior sin mencionar los numerosos servicios ambientales que ofrece.

Así mismo, el desarrollo doméstico e industrial que está teniendo la biomasa como productora de calor y electricidad, ha hecho que muchos países la tomen como una fuente de crecimiento económico, generando a su vez un incremento en el mercado de pellets, un biocombustible densificado cuyas principales materias primas son residuos de madera, tales como, aserrín, virutas y astillas, los agro-residuos, como la paja y productos de desecho de la industria de alimentos.

En este contexto se enmarca el presente proyecto, en darle solución a un problema higiénico-ambiental, por medio de la generación de energía, reutilizando un residuo con alto potencial energético para la fabricación de pellets.

En el caso Colombiano, al ser el sexto país productor a nivel mundial de palma de aceite, la cantidad de residuos es significativa, por lo que su reutilización también lo es, teniendo en cuenta que no es sólo la

generación de un residuo, sino también el desperdicio energético, debido a que actualmente los desechos se usan de forma incipiente.

Para poder determinar la factibilidad de la biomasa primero se realizó su caracterización por medio del contenido de lignina, siendo este un biopolímero el cual sostiene las células adyacentes y le da rigidez al pellet, de forma que no es necesaria la utilización de un aglutinante para generar una óptima compactación; de igual forma se llevó a cabo el análisis último, el cual determina el contenido de los principales agentes contaminantes de la biomasa, como el azufre, con el fin de conocer su posible generación de gases de efecto invernadero.

En un segundo momento la biomasa pasó por un proceso de molienda y tamizado, debido a que la biomasa con el tamaño original no presenta una buena compactación, por lo tanto el material se transforma hasta conseguir un producto con las adecuadas características físicas. Seguidamente, se analizó el comportamiento de la palma de aceite en la elaboración de pellets, por medio de cinco combinaciones de biomasa, elegidas mediante un diseño de experimentos.

Posteriormente, los pellets se analizaron considerando diversas propiedades físico-químicas como el porcentaje de humedad, densidad, material volátil y poder calorífico. De igual forma, se determinó la resistencia mecánica por medio de pruebas de esfuerzo de compresión y pruebas de impacto, además de una caracterización del material por medio del módulo de elasticidad.

Finalmente, se establecieron las características de los pellets como biocombustible, con el fin de dar a conocer su factibilidad como fuente energética.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La palma de aceite se caracteriza por tener una composición física que puede ser utilizada para la fabricación de diversos productos, tales como, biodiesel, aceite, pan, entre otros. Estos usos generan el incremento de cultivos, los cuales, producen una mayor cantidad de residuos y a su vez provocan problemas higiénico-ambientales al no ser reutilizados.

Según AQEEL AHMED, Bazmi; GHOLAMREZA, Zahedi y HASLEND, Hashim<sup>1</sup>, Indonesia es el mayor productor de palma de aceite en el mundo, cuyos residuos producidos (fibra, cáscara y racimos de fruta) son utilizados como combustibles para generar electricidad en las plantas de procesamiento de palma o como abono en las plantaciones; pero es tal la cantidad de residuos que muchos de estos se pierden.

Colombia tiene 73 de sus 1,120 municipios dedicados a la siembra de palma de aceite, sin embargo, ésta se encuentra concentrada en 9 de los 32 departamentos, lo que indica que estos cultivos son una gran parte productiva del país. Estas plantaciones se utilizan principalmente para la generación de aceite de palma crudo, que en el año 2010 fue de 593.6 mil toneladas en un área de 360,000 hectáreas, esta es una clara evidencia de la cantidad de residuos generados, demostrando así que es necesario darle un buen uso.

La biomasa de palma de aceite (material lignocelulósico) sufre diversas transformaciones, tales como, pirólisis, gasificación, termólisis, entre otras; no obstante, para el desarrollo de este estudio se pretende analizar la transformación de dicha biomasa a pellet, como una solución para la reducción del exceso de residuos agroindustriales, donde se determine la viabilidad del combustible alternativo como un sustituto para aquellos usados en la actualidad.

---

<sup>1</sup>AQEEL AHMED, Bazmi; GHOLAMREZA, Zahedi y HASLEND, Hashim. Progress and challenges in utilization of palm oil biomass as fuel for decentralized electricity generation. *En: Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol 15. p. 547 – 583.

## 2. JUSTIFICACIÓN

Hoy en día, es clara la evidencia que la utilización de los combustibles tradicionales no sólo causa un impacto negativo al ambiente, sino que a medida que se siguen usando de manera indiscriminada provocan un agotamiento de los recursos.

El calentamiento global es una de las mayores amenazas de la época, por lo tanto, las investigaciones que se desarrollen en este campo son de vital importancia para reducir los efectos de este fenómeno. Una posible solución son las energías alternativas, dentro de estas se encuentra la biomasa, una fuente importante de energía renovable con una gran viabilidad, ya que se encuentra en grandes cantidades alrededor del mundo. La Palma de Aceite es un gran ejemplo, la cual se caracteriza por tener un gran potencial energético.

Colombia ha incrementado la producción de palma de aceite con más de 360,000 hectáreas sembradas, catalogándolo como el primer país productor en América Latina y el sexto en el mundo, AQEEL AHMED, Bazmi; GHOLAMREZA, Zahedi y HASLEND, Hashim <sup>2</sup>. Este aumento en el área cultivada trae consigo un exceso de residuos orgánicos, los cuales se utilizan de manera incipiente, principalmente como abono o en la mayoría de los casos no tienen un uso en particular; lo que constituye una problemática ambiental con el manejo de residuos sólidos, que puede provocar problemas higiénicos, desembocando en enfermedades. En otros casos la quema indiscriminada de este residuo contribuye a problemas de contaminación atmosférica, ya que producen gases de efecto invernadero, además, del desperdicio energético debido a que no se le da un uso eficiente a esta biomasa.

Las posibilidades energéticas de esta biomasa se han venido conociendo por medio de diferentes investigaciones en todo el mundo, donde emplean el cusco de la palma de aceite como materia prima para procesos de gasificación<sup>3</sup>, pirólisis, etc. Un proceso que se ha investigado para esta biomasa es la obtención de pellets, los cuales permiten obtener un combustible de mayor densidad, contribuyendo a

---

<sup>2</sup>Ibíd., p. 578.

<sup>3</sup> MARQUEZ LASSO, Ismael. Gasificación por lecho fijo de fibra obtenida en el proceso de extracción del aceite de palma africana. Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica. Bogotá D.C.: Universidad de Los Andes. Facultad de Ingeniería. 2012. 81 p.



que el tamaño de los equipos en los cuales se pueda usar sea menor, lo que ocasiona menores costos y equipos auxiliares más económicos.

En el plano ambiental, si al material lignocelulósico no se le reduce el tamaño y se emplea sin densificar, acarreará problemas en cuanto a su manejo y transporte, lo que incrementa el costo, la contaminación y genera problemas de salud; por el contrario, al darle un buen manejo se producirían ventajas competitivas que incrementan la productividad, además, de ser una buena estrategia de comercialización.

Es por esto, que se desea generar pellets compactos de biomasa para determinar si son un posible sustituto de algunos combustibles usados en la actualidad.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el comportamiento del material lignocelulósico proveniente de residuos de Palma de Aceite en la elaboración de Pellets, para la sustitución de combustibles tradicionales.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar la biomasa de palma de aceite en cuanto a su composición físico-química mediante el análisis último, con el fin de conocer su porcentaje de humedad, poder calorífico, Azufre (S), Carbono (C), Hidrógeno (H) y Nitrógeno (N).
- Elaborar los pellets a partir de la transformación del material lignocelulósico proveniente de Palma de Aceite.
- Analizar el comportamiento químico y físico de los pellets elaborados, determinando así si son un sustituto adecuado de combustibles tradicionales y convencionales.

## **4. MARCO REFERENCIAL**

La alternativa más viable para la reducción de contaminación provocada por el uso indiscriminado de los combustibles fósiles, se da al impulsar nuevas alternativas a través de la fabricación de pellets con los desechos agrícolas de palma de aceite.

### **4.1 MARCO DE ANTECEDENTES**

Los antecedentes de este proyecto son de dos tipos: teóricos institucionales que hacen referencia a investigaciones realizadas en la Universidad Libre y teóricos externos que evidencian propuestas nacionales e internacionales relacionadas con el tema.

#### **4.1.1 Teóricos Institucionales**

La información encontrada en la base de datos de la biblioteca no presenta información referente al tema, sin embargo, cabe aclarar que a la Universidad le interesa realizar investigaciones de este tipo, ya que tiene una maestría en esta área, “Maestría de Energías Alternativas con Énfasis en Ingeniería”.

#### **4.1.2 Teóricos Externos**

##### **4.1.2.1 Nacionales**

Las investigaciones nacionales sobre la fabricación de pellets a partir de biomasa de palma de aceite son escasas. No obstante, se encontró un proyecto de pellets con contenido de cáscara de coco y aserrín. Un ejemplo de esto es el artículo de la Universidad Nacional de Colombia titulado “Densificación de biomasa mediante el uso de pellet con contenido de cáscara de coco y aserrín” en donde utilizaron diferentes equipos para la fabricación de pellets y el posterior análisis del contenido de humedad, resistencia al impacto, contenido de cenizas, contenido de material volátil y la evaluación del poder calorífico de dicho biocombustible.

#### 4.1.2.2 Internacionales

A continuación se hará referencia a los diferentes estudios realizados en distintos países, donde se enfocan en el aprovechamiento de biomasa (residuos agrícolas) para la elaboración de combustibles densificados (pellets y briquetas).

FENGMIN, Li y MINGQUAN, Zhang<sup>4</sup>; en su artículo *Technological Parameters of Biomass Briquetting of Macrophytes in Nansi Lake*, estudian la proporción óptima de aglutinante, agentes de combustión y la adición de carbón; para así obtener la adecuada formulación en la fabricación de briquetas de biomasa. Se utilizó el Gigante de la caña y el carrizo como biomasa, los cuales, fueron pasados por un procedimiento de secado al aire libre y posteriormente puestos en un horno a una temperatura entre 70 y 80 °C. El material fue molido y posteriormente se pasó a través de un tamiz de 2 mm. Los aglutinantes Loess y carbón fueron también triturados y pasados a través de un tamiz de 2 mm. Con lo anterior se realizó una comparación entre las diversas cantidades y propiedades de la biomasa.

De igual forma, al saber que China es uno de los países con más incursión en el tema de briquetas, sus investigaciones son una muestra de los problemas que se pueden tener al realizar un proceso de fabricación de briquetas. Este es el caso de XUTAO, Wang y BAILIANG, Zhang en su artículo *Application and problems of biomass briquetting densification fuel (BBDF) technology in China*<sup>5</sup>, donde se muestra que China es un país que genera 500 millones de toneladas de paja de caña anualmente, los cuales pueden ser utilizados en la producción de BBDF, sustituyendo 210 millones de toneladas de carbón, 420 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, 1.2 millones de toneladas de SO<sub>2</sub>, y 3 millones de toneladas de hollín. Por lo tanto, la densificación, o proceso por el cual se reduce el espacio entre partículas, de pajas o tallos se justifica, ya que además de reducir su volumen, modifica sus propiedades optimizándolas. El problema radica en la insuficiencia de las máquinas utilizadas para realizar dicho proceso, ya que, se enfrentan a procesos de

---

<sup>4</sup>FENGMIN, Li y MINGQUAN, Zhang. *Technological Parameters of Biomass Briquetting of Macrophytes in Nansi Lake*. *En: Science Direct. China*. 2011. Vol. 5. p. 2449 – 2454.

<sup>5</sup>WANG. Xutao y BAILIANG, Zhang. *Application and problems of biomass briquetting densification fuel (BBDF) technology in China*. *En: Proceedings of ISES Solar World Congress 2007: Solar Energy and Human Settlement. China*. p. 2458 – 2461.

recolección de biomasa, abrasión mecánica de los equipos y cauterización de la chimenea en el proceso de combustión, lo que limita el buen desempeño de BBDF.

Por otra parte, Malasia se caracteriza por tener una diversidad de cultivos, entre ellos arroz, azúcar, palma de coco, caucho y palma de aceite; en esta última, la fibra, la cáscara y el racimo de fruta seca son las principales fuentes energéticas. En general, el racimo de fruta fresca contiene alrededor del 21% de aceite de palma, 6-7% de palmiste, 14-15% de fibra, 6-7% de cáscara y el 23% de racimos de fruta vacíos. El método utilizado para mejorar las propiedades de combustión de los componentes anteriormente mencionados es por medio de la densificación de cationes en briquetas, explicado por HUSAIN, Z., ZAINAC, Z y ABDULLAH, Z. en *Briquetting of palm fibre and Shell from the processing of palm nuts to palm oil*<sup>6</sup>.

AQEEL AHMED, Bazmi; GHOLAMREZA, Zahedi y HASLEND, Hashim<sup>7</sup> en su artículo *Progress and challenges in utilization of palm oil biomass as fuel for decentralized electricity generation*, muestran el origen de la palma de aceite, sus características, usos (generación de energía) y la distribución de ésta alrededor del mundo, ubicando a Colombia como el sexto productor de palma de aceite en el mundo y el primero en América Latina, lo que demuestra que la generación de residuos incrementa cada vez más.

En el artículo de KALIYAN, Nalladurai y MOREY, R. Vance<sup>8</sup> titulado *Factors affecting strength and durability of densified biomass products*, se muestra la eficacia del proceso de densificación para crear pellets y briquetas con mayor resistencia y durabilidad. Para demostrar esto hacen pruebas de resistencia mecánica como resistencia a la compresión, resistencia al impacto y resistencia al agua, al igual, que pruebas de durabilidad como la resistencia a la abrasión. Dichas pruebas indican el máximo de fuerza y estrés a los que pueden ser sometidos los pellets y la cantidad de finos producidos durante la manipulación, transporte y almacenamiento de estos.

---

<sup>6</sup>HUSAIN, Z; ZAINAC, Z y ABDULLAH, Z. *Briquetting of palm fibre and shell from the processing of palm nuts to palm oil*. *En: Biomass & Bioenergy*. Malasia. 2002. Vol. 22. p. 505 – 509.

<sup>7</sup>AQEEL AHMED, Bazmi; GHOLAMREZA, Zahedi y HASLEND, Hashim. *Op. cit.*, p. 547 – 583.

<sup>8</sup>KALIYAN, Nalladurai y MOREY, R Vance. *Factors affecting strength and durability of densified biomass products*. *En: Biomass & Bioenergy*. Estados Unidos. 2009. Vol. 33. p. 337-359.

De otra parte, los agroresiduos constituyen la mayor fuente de biomasa en Grecia, que al ser densificados reducen los costos de transporte, manejo y almacenamiento. Lo anterior se ve reflejado en el artículo titulado Review of sustainable biomass pellets production – A study for agricultural residues pellets’ market in Greece<sup>9</sup>.

El artículo Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions<sup>10</sup> tuvo como objetivo identificar los factores clave que afectan a la presión de peletización en los procesos de prensado de biomasa. Se demostró que el aumento de la temperatura ayuda a disminuir la presión al momento de hacer los pellets, al igual que entre más pequeño sea el tamaño de partícula de la biomasa mayor será la presión de peletización.

Una de las pocas investigaciones de Sur América referentes al tema, es dada por CABEZAS, R.<sup>11</sup> en su tesis realizada en el 2009, titulada Diseño de un sistema de compactación de biomasa de cascarilla de arroz y aserrín, en la producción de bloques sólidos combustibles (BSC). Él realiza el diseño de una compactadora de biomasa para la producción de bloques sólidos combustibles (BSC), para ser usados en la fundación Eco-Sur Ecuador, en la producción de eco-materiales. La biomasa está compuesta por partes iguales de cascarilla de arroz y aserrín.

---

<sup>9</sup> KARKANIA, V; FANARA, E y ZABANIOTOU, A. Review of sustainable biomass pellets production – A study for agricultural residues pellets’ market in Greece. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Grecia. 2012. Vol. 16. p. 1426-1436.

<sup>10</sup> WOLFGANG, Stelte, *et al.* Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. En: Fuel. Dinamarca. 2011. Vol. 90. p. 3285-3290.

<sup>11</sup> CABEZAS, R. Diseño de un sistema de compactación de biomasa de cascarilla de arroz y aserrín, en la producción de bloques sólidos combustibles (BSC). Tesis de grado Ingeniero Químico. Riobama – Ecuador. Escuela superior politécnica de Chimborazo. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 2009. 135 p.

## 4.2 MARCO TEÓRICO

### 4.2.1 La palma de aceite

La palma de aceite es una planta proveniente del Golfo de Guinea en África Occidental, cuyas características hacen factible la creación de varios productos, por lo que es generador de una gran cantidad de residuos.

Dicha planta tiene frutos esféricos, ovoides o alargados, para conformar racimos compactos que en su interior guardan una única semilla, la almendra o palmiste, la cual es protegida con el cuesco, un endocarpio leñoso rodeado, y a su vez, por una pulpa carnosa. Este cuesco y pulpa conforman la ligno-celulosa de la palma, donde la celulosa es un biopolímero el cual le da la rigidez a los filamentos. Por su parte, la lignina da soporte estructural a la planta, interviene en la impermeabilidad y da resistencia a ataques microbianos.

El cuesco y la fibra seca constituyen aproximadamente el 19%<sup>12</sup> de los residuos generados en el proceso de obtención de aceite, por lo tanto, se tiene un alto porcentaje de material lignocelulósico, que favorece la obtención de pellets, al proporcionarles un alto grado de dureza.

Por otra parte, la introducción de palma de aceite en América tropical se atribuye a los colonizadores y comerciantes esclavos portugueses, que la usaban como parte de la dieta alimentaria de sus esclavos en el Brasil.

En 1932, Florentino Claes fue quien introdujo la palma africana de aceite en Colombia y fueron sembradas con fines ornamentales en la Estación Agrícola de Palmira (Valle del Cauca). Pero el cultivo comercial sólo comenzó en 1945 cuando la United Fruit Company estableció una plantación en la zona bananera del departamento de Magdalena.

La expansión del cultivo en Colombia ha mantenido un crecimiento sostenido. A mediados de la década de 1960 existían 18,000 hectáreas en producción. Hoy en día existen más de 73 municipios

---

<sup>12</sup> GÓMEZ, Alexander; KLOSE, Wolfgang y RINCÓN, Sonia. Pirólisis de Biomasa – Cuesco de palma de aceite. Universidad Nacional de Colombia – Universidad de Kassel Alemania. 2008. p. 15-21.

del país con dichas plantaciones, las cuales, se distribuyen en cuatro zonas productivas.

- Norte: Magdalena, Norte del Cesar, Atlántico, Guajira.
- Central: Santander, Norte de Santander, sur del Cesar, Bolívar.
- Oriental: Meta, Cundinamarca, Casanare, Caquetá.
- Occidental: Nariño.

Los departamentos que poseen más área sembrada en palma de aceite son en su orden: Meta (1), Cesar (2), Santander (3), Magdalena (4), Nariño (5), Casanare (6), Bolívar (7), Cundinamarca (8) y Norte de Santander (9),<sup>13</sup> como se observa en la figura No. 1.

Figura 1. Distribución de plantaciones de palma de aceite en Colombia



Fuente. Fedepalma

#### 4.2.2 Fabricación de pellets a partir de biomasa

La biomasa se caracteriza por tener una estructura fibrosa y alta humedad en comparación con los combustibles fósiles; por consiguiente, la combustión de la biomasa sin ningún tratamiento previo no es favorable, además, el contenido de humedad se debe disminuir antes de la combustión. Es por esto, que la biomasa pasa por un proceso de molienda y tamizado, en el cual, se disminuye el tamaño de la partícula y posteriormente es prensado. Es en el

<sup>13</sup>Fedepalma. Historia de la palma de aceite. {En línea}. {15 de Octubre de 2012}. Disponible en: (<http://portal.fedepalma.org//palma.htm>).



desarrollo de estas fases donde se logra determinar si dicho procedimiento es el adecuado para obtener un pellet con buenas condiciones de resistencia mecánica.

La fabricación de pellets se hace mediante el proceso de densificación, es decir, se realiza una compactación de la biomasa de palma de aceite, con el fin de facilitar su utilización, almacenamiento y transporte.

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.

#### **4.2.3 Características y ventajas de los pellets**

Los pellets no contienen ningún componente aditivo o tóxico, por lo tanto no emite olor ni humo. Además ecológicamente son considerados como una energía limpia proveniente de un recurso renovable<sup>14</sup>. Es por esto que su manipulación y uso es estimado como fácil y seguro, por lo que no ofrece ningún riesgo de combustión espontánea, con ello se evitan episodios de quemaduras al no utilizar líquidos inflamables.

En comparación con la leña, que produce hasta más de un 10% de ceniza, los pellets sólo producen un 2%; por lo tanto, el residuo sólido que queda después de la combustión es muy poco y en algunos casos la combustión es completa (esto depende de la materia prima), por lo que no se forman emisiones de sílice aluminio, hierro y calcio, componentes principales de la ceniza.

En el caso de la humedad de los pellets después de su fabricación equivale a un 8%, mientras que la leña sobrepasa el 40%.

---

<sup>14</sup> ZHAO, Fang., *et al.* Standardized processes of biomass briquetting densification fuel. China. 2012. Vol. 14. p. 1.

Debido a su alta densidad y baja humedad los pellets arden más lento, esto significa una mayor duración a comparación de la leña. Además el pellet tiene un poder calorífico mayor a 20,000 KJ/Kg, duplicando el de la leña convencional y facilitando su combustión.

Así mismo, el pellet se ofrece en formas cilíndricas o cuadradas, por lo cual, son más fáciles de almacenar y organizar y no ocupan un espacio considerable en la industria o el hogar.

Por último, están hechos a partir de residuos agrícolas, lo que permite su aprovechamiento y la disminución de la contaminación atmosférica.

#### **4.2.4 Desventajas**

Una de las principales desventajas de los pellets es la diferencia de precios con la leña convencional, ya que se puede obtener una cantidad de dos a cuatro veces más de madera a la mitad del precio de los pellets. No obstante, el poder calorífico es la característica más importante en la combustión de estos productos, demostrando, que aunque el precio de los pellets es mayor, la rentabilidad de estas también lo es, puesto que la energía que libera por unidad de masa es similar al de la leña.

Para la fabricación de pellets es necesaria la implementación de equipos especializados, lo que podría ser una desventaja ya que para la obtención de la madera no es necesario de una maquinaria específica.

Se recomienda la utilización de agua o extractos naturales como aglutinante, debido a que, si se usa una sustancia química tóxica ésta provocará un daño en la salud humana.

## 4.3 MARCO CONCEPTUAL

### 4.3.1 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<sub>2</sub> (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).<sup>15</sup>

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.

---

<sup>15</sup>ANZIL, Federico. Biocombustibles. {En línea}. {22 de Octubre de 2012}. Disponible en: (<http://www.zonaeconomica.com/biocombustibles>).

### **4.3.2 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 CO<sub>2</sub>. 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.

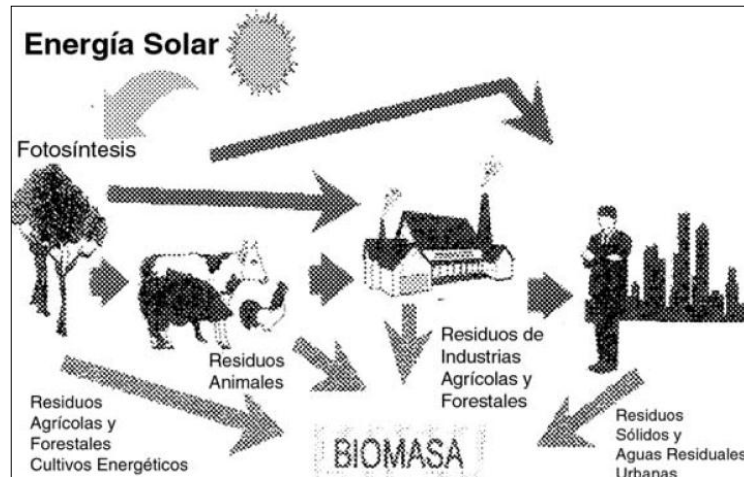
Lo anterior, es una clara muestra de que las energías renovables tienen un valor incalculable, cuyo potencial no ha sido debidamente utilizado, ya que, el uso dado a los combustibles fósiles sigue en aumento, causando un daño irreparable al medio ambiente, como lo es el cambio climático.

### **4.3.3 Biomasa**

La biomasa es una fuente de energía renovable, su valor principal proviene del sol por medio de la fotosíntesis, donde la clorofila de las plantas captura energía y convierte el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) del aire y el agua, en carbohidratos, para formar materia orgánica. Al quemarse estos carbohidratos, vuelven a su forma de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua y expulsa la energía que contienen. Es así, como la biomasa es reconocida como una especie de batería, puesto

que guarda toda su energía para posteriormente liberarla. La leña, el bagazo, la cascarilla de arroz o cualquier otra fuente de materia orgánica, son llamados biomasa, que proveen un alto porcentaje de energía. Éstos cubren un amplio rango de materiales y fuentes, como los residuos de la industria forestal y las plantaciones energéticas, ilustrado en la siguiente figura.

Figura 2. Fuente de la biomasa



Fuente. Manual sobre energía renovable Biomasa.

Por una parte, los residuos forestales son una fuente importante de biomasa que actualmente es poco explotada, donde se considera que, “de cada árbol extraído para la producción maderera, sólo se aprovecha comercialmente un porcentaje cercano al 20%. Se estima que un 40% es dejado en el campo, en las ramas y raíces, a pesar de que el potencial energético es mucho mayor y otro 40% en el proceso de aserrío, en forma de astillas, corteza y aserrín”<sup>16</sup>. Los desechos son aprovechados en la generación de calor en sistemas de combustión directa, para la generación de vapor. En el caso de los desechos de campo, estos son principalmente usados como fuente de energía para zonas intercomunicadas.

Por otro lado, las plantaciones energéticas, son grandes plantaciones de árboles o plantas cultivadas con el fin específico de producir energía, para ello, se seleccionan árboles o plantas de crecimiento rápido y bajo mantenimiento, las cuales, usualmente se cultivan en tierras de bajo valor productivo. También, muchos cultivos agrícolas pueden ser utilizados para la generación de energía, como la caña de azúcar, maíz, sorgo y trigo. De igual forma, se pueden usar

<sup>16</sup> BUN-CA. Manuales sobre Energía Renovable. Biomasa. San José de Costa Rica. 2002. p. 6-8.

plantas oleaginosas como palma de aceite, girasol o soya y algunas plantas acuáticas como Jacinto de agua o las algas, para producir combustibles líquidos como el etanol y el biodiesel.

#### 4.3.4 Combustión directa

La combustión directa se ha utilizado desde épocas de la prehistoria para extraer calor o energía de la biomasa, pero a medida que pasa el tiempo se han desarrollado procesos más eficientes y amigables con el medio ambiente para la conversión de la biomasa en energía, siendo un ejemplo de esto los pellets.

La siguiente tabla muestra los métodos desarrollados para la combustión directa de los residuos sólidos en América Central.

Tabla 1. Uso directo de desechos sólidos

| Producto       | Tecnología   | Usos en América Central | Características   |
|----------------|--|-------------------------|---|
| Polvos         | Quemadores de polvo                                | De moderado a bajo      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Costo de inversión elevado</li> <li>- Facilita su empleo, incluyendo la escala doméstica</li> <li>- Mejora la eficiencia y las características de la combustión</li> </ul> |
| Astillas       | Hornos y calderas en suspensión y lecho fluidizado | De moderado a bajo      |   |
| Pellets        |  |                         |   |
| Briquetas      | Hornos y calderas en parrilla                      | De moderado a bajo      |   |
| Leñosos        | Hornos y calderas, estufas domésticas              | Amplio                  | El tamaño dificulta el empleo en dispositivos de alta eficiencia, requiere procesamiento.   |
| Carbón vegetal | Estufas domésticas                                 |                         | Disminuye la eficiencia energética total, pero su uso es más conveniente con menos humo.  |

Fuente. Manual sobre energía renovable Biomasa.

Actualmente, la combustión directa es la que más se utiliza para usos energéticos de la biomasa, ya que procesos avanzados como la gasificación o la digestión anaeróbica a pesar de tener más eficiencia tienen un costo y complejidad mucho mayor.

En la tabla 2 se muestra una distribución de los procesos de conversión aplicables, de acuerdo con las características y el tipo de biomasa, así como los posibles usos finales de la energía convertida.

Tabla 2. Procesos de conversión de biomasa en energía

| Tipo de biomasa  | Características físicas  | Procesos de conversión aplicables                                | Producto final                                | Usos  |
|--|--|--|---|---|
| Materiales orgánicos de alto contenido de humedad.   | Estiércoles.<br>Residuos de alimentos.<br>Efluentes industriales.<br>Residuos urbanos. | Digestión anaeróbica y fermentación alcohólica.                  | Biogas.<br>Metanol.<br>Etanol.<br>Bio diesel. | Motores de combustión.<br>Turbinas de gas.<br>Hornos y calderas.<br>Estufas domésticas. |
| Materiales lignocelulósicos (cultivos energéticos, residuos forestales de cosechas y urbanos). | Polvo<br>Astillas<br>Pellets<br>Briquetas<br>Leños<br>Carbón vegetal                   | Densificación<br>Combustión directa<br>Pirólisis<br>Gasificación | Calor,<br>Gas pobre<br>Hidrógeno<br>Biodiesel | Estufas domésticas<br>Hornos y calderas<br><br>Motores de combustión<br>Turbinas de gas |

Fuente. Manual sobre energía renovable Biomasa.

En cuanto a las emisiones que los pellets pueden generar, depende de si se realiza una combustión completa o incompleta.

Cuando la combustión es completa se produce CO<sub>2</sub> y vapor de agua, esto indica que toda la biomasa se ha quemado completamente. No obstante, el CO<sub>2</sub> emitido por los pellets es capturado por los árboles, es decir, que si esta tecnología se usa de manera sostenible, no habrá descargas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

Sin embargo, cuando la combustión es incompleta, los productos serán CO, CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub> y otras sustancias, las cuales generan daños en la salud de las personas y contaminan el ambiente.

Las razones por las cuales la combustión es incompleta son:

- Cuando la entrada de aire no es adecuada, pues no hay suficiente oxígeno disponible para transformar todo el carbono en CO<sub>2</sub>. Esto puede ser causado por el diseño inadecuado del equipo, la falta de ventilación y la sobrecarga con el combustible.
- Cuando la biomasa tiene una humedad alta. Esto indica que la temperatura de combustión no es suficientemente elevada como para completar las reacciones químicas.<sup>17</sup>

<sup>17</sup>Ibíd., p. 17.

#### 4.4 MARCO LEGAL

En Colombia no se tiene una normatividad sobre la fabricación de pellets. Sin embargo, se encuentra la Ley 697 de 2001<sup>18</sup> mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía y se promueve la utilización de energías alternativas. Igualmente, se tiene la normatividad de residuos sólidos dentro de las cuales está la Norma técnica GTC-24 de Gestión ambiental de residuos sólidos<sup>19</sup>.

Por otra parte, se encuentra el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, dado mediante el Decreto 2811 de 1974<sup>20</sup>, en cuyo título III artículo 34 literal 4, hace referencia al desarrollo de nuevos métodos para el tratamiento, recolección, depósito y disposición final de los residuos sólidos.

Con respecto a la fabricación de pellets, existen ciertas normas internacionales, tales como, la norma Austriaca ÖNORM M 7135, la Alemana DIN 51731, la Sueca SS 187120 (pellets) y SS 187121 (briquetas); las cuales muestran todos los requisitos y ensayos para la fabricación de Pellets y Briquetas, con unas características específicas como tamaño, poder calorífico, densidad, contenido de cenizas, contenido de nitrógeno, entre otros<sup>21</sup>.

Debido a que en Colombia no existe una pauta específica para la fabricación de pellets, este proyecto se regirá con la norma Austriaca ÖNORM M7135 nombrada anteriormente.

---

<sup>18</sup>COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 697. (03, Octubre, 2001). Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogotá D.C., 2001. No. 44573. 4 p.

<sup>19</sup>INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Gestión Ambiental. Residuos Sólidos. Guía para la separación en la fuente y la recolección selectiva. GTC-24. Bogotá D.C.: El Instituto, 2003. 16 p.

<sup>20</sup>COLOMBIA. PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA. Decreto 2811. (18, Diciembre, 1974). Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Bogotá D.C.: La Presidencia, 1974. 62 p.

<sup>21</sup>QUALITY STANDARDS for pellets in European countries. [Anónimo]. {En línea}. {07 Octubre de 2012}. Disponible en: <http://www.pelletcentre.info/cms/site.aspx?p=2550>



## **5. DISEÑO METODOLÓGICO**

### **5.1 HIPÓTESIS**

Pueden los residuos agroindustriales de la palma de aceite utilizarse para la fabricación de pellets, cuya cinética de combustión y accesibilidad de oxígeno se ven afectadas por el tamaño de partícula (molida y tamizada) y la presión de compactación, los cuales ejercen un efecto en el poder calorífico de los pellets.

### **5.2 TIPO**

La investigación es de tipo cuantitativa-experimental, ya que, se estudia y analiza la obtención de pellets a partir de material lignocelulósico.

### **5.3 METODOLOGÍA**

La metodología del proyecto se basó en las siguientes fases:

Fase 1: Caracterización de la materia prima.

- Análisis último
- Contenido de lignina

Fase 2: Trabajo experimental.

- Diseño experimental.
- Molienda y tamizado de la materia prima.
- Preparación de mezclas.
- Proceso de prensado.

Fase 3: Análisis de los pellets.

- Caracterización de las propiedades físico-químicas de los pellets.
- Evaluación del poder calorífico de los pellets.

Fase 4: Discusión de resultados.

### 5.3.1 Fase 1: Caracterización de la materia prima

Los siguientes son los procedimientos que se efectuaron para la caracterización de la materia prima:

- **Análisis último:** Es una técnica que proporciona el contenido total de Carbono (C), Hidrógeno (H), Nitrógeno (N) y Azufre (S). Dicho análisis, se llevó a cabo en el Laboratorio de Carbones del Servicio Geológico Colombiano (INGEOMINAS) en conjunto con la Universidad Nacional de Colombia.
- **Contenido de lignina:** Es una prueba que determina la cantidad total de lignina presente en la materia prima (palma de aceite). Este procedimiento se realizó en el Laboratorio de Química de la Universidad Libre, siguiendo la norma TAPPI T 222 os-74<sup>22</sup>, la cual se explica a continuación:

A un gramo de materia prima (Biomasa de Palma de Aceite), se le adicionaron 15 mL de ácido sulfúrico al 72% en baño maría a 20± 1°C, manteniéndose en agitación durante 1 h. Después se transfirió a un matraz con agua destilada (500 - 400 mL), se enjuagó y diluyó con agua hasta alcanzar una concentración de ácido al 3% y un volumen de 575 mL. Posteriormente se colocó a reflujo por 4 h para asegurar un volumen constante de agua. La solución se dejó reposar, se filtró y se lavó con agua caliente. Luego se secó a 105°C ± 3°C hasta alcanzar un peso constante. El porcentaje de lignina se calculó de la siguiente manera:

$$\% \text{ lignina} = \frac{\text{peso de lignina}}{\text{peso anhídrido de la muestra}} \times 100$$

### 5.3.2 Fase 2: Trabajo experimental

A continuación se describen los procedimientos llevados a cabo para la elaboración de pellets a partir de biomasa de palma de aceite, siguiendo apartes de la metodología de HUSAIN, Z; ZAINAC, Z y ABDULLAH, Z<sup>23</sup>.

---

<sup>22</sup>Tappi Test Methods. Technical Association of the Pulp and Paper Industry. TAPPI T 222 os-74. TAPPI Press, Atlanta. 1999.

<sup>23</sup>HUSAIN, Z; ZAINAC, Z y ABDULLAH, Z. Op. cit., p. 2.

- **Diseño Experimental**

En un primer momento se hizo un diseño experimental con el software libre Design Expert versión 7.0. Sin embargo, los resultados que este programa arrojó no se pudieron realizar debido a que los tamaños de partícula y presión no se lograban obtener de manera exacta. Al no poder llevar a cabo la ejecución del diseño experimental con dicho software, se decidió realizar un diseño de experimentos completamente al azar<sup>24</sup>, en donde se realizaron diferentes experimentos con dos tamaños de tamices N° 16 (1.18 mm) y N° 50 (0.30 mm) y una presión de 40 y 30 bares, los cuales no fueron los resultados esperados. Dichos experimentos fueron los siguientes:

Tabla 3. Resultados Preliminares de Pellets

| <b>Materia prima</b>                      | <b>Porcentaje de materia prima</b> | <b>Tamaño de partícula</b> | <b>Presión</b> |
|---|------------------------------------|----------------------------|----------------|
| Cuesco de palma de aceite                 | 100%                               | Entre 0.30 mm y 1.18 mm.   | 30 Bar         |
| Cuesco de palma de aceite                 | 100%                               | ≤ 0.30 mm.                 | 30 Bar         |
| Mezcla de cuesco-fibra de palma de aceite | 60% cuesco<br>40% fibra            | ≤ 0.30 mm.                 | 40 Bar         |
| Mezcla de cuesco-fibra de palma de aceite | 40% cuesco<br>60% fibra            | ≤ 0.30 mm.                 | 40 Bar         |
| Mezcla de cuesco-fibra de palma de aceite | 60% cuesco<br>40% fibra            | Entre 0.30 mm y 1.18 mm.   | 40 Bar         |
| Mezcla de cuesco-fibra de palma de aceite | 40% cuesco<br>60% fibra            | Entre 0.30 mm y 1.18 mm.   | 40 Bar         |

Fuente. Autores del proyecto.

<sup>24</sup> GUTIERREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y Diseño de Experimentos. 3 ed. México D.F.: McGraw-Hill, 2012. 571p.

Por otra parte, se llevó a cabo otra serie de pellets con una mezcla de cuesco, almidón de yuca y agua, que sirvió para establecer parámetros definitivos en pruebas posteriores. Estos pellets presentaron ciertos inconvenientes, ya que al densificarlos en la prensa se desmoronaban de inmediato debido a la alta humedad. Por último, y con base en las pruebas preliminares antes mencionadas, se elaboraron pellets con cinco diferentes condiciones de proceso a partir de cuesco, fibra y una mezcla de cuesco-fibra de palma de aceite, se tomaron dos tamaños de tamices N° 16 (1.18 mm) y N° 50 (0.30 mm) y una presión de 40 bares. Estas últimas cinco combinaciones fueron las que presentaron un mejor comportamiento, por lo que fueron analizadas mediante las pruebas físico-químicas y de resistencia mecánica.

- **Molienda y tamizado de la materia prima**

En esta fase se molió y tamizó la totalidad de la materia prima, con el fin de obtener los diferentes tamaños de partícula necesarios para dar cumplimiento al diseño experimental. La molienda de la biomasa se realizó utilizando un molino manual marca Corona (figura 3). Posteriormente, se tamizó por medio de los tamices No. 16 y No. 50 (figura 4) estandarizados por la norma ASTM E-11, dispuestos en el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Nacional de Colombia.

Figura 3. Molino



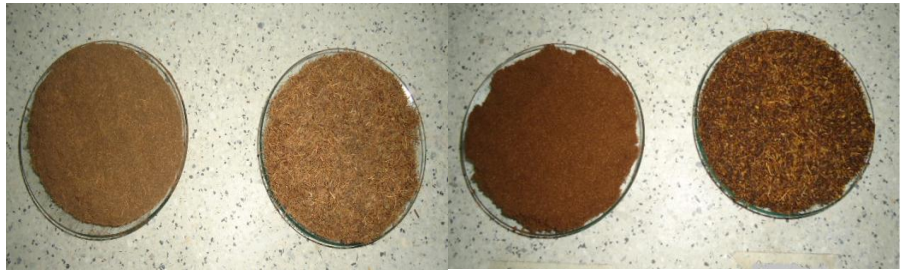
Fuente. Autores del proyecto

Figura 4. Tamices No. 16 y 50



Fuente. Universidad Nacional

Figura 5. Biomasa molida y tamizada



Fibra pasa malla 50    Fibra pasa malla 16    Cuesco pasa malla 50    Cuesco pasa malla 16

Fuente. Autores del proyecto

- **Preparación de mezclas**

Se llevó a cabo la preparación de mezclas siguiendo el diseño de experimentos mostrado en la tabla 5, con una presión y un tamaño de partícula específicos para cada experimento.

- **Proceso de prensado**

Se realizaron los experimentos mencionados anteriormente a una presión de 40 bares, es decir la máxima presión que proporcionaba la prensa utilizada, puesto que elaborar pellets con una presión menor a 40 bares implicó una menor resistencia y duración de estos. Este proceso se realizó por medio de una prensa peletizadora, ensamblada en la Universidad Nacional de Colombia.

Figura 6. Prensa peletizadora



Fuente. Universidad Nacional

### 5.3.3 Fase 3: Análisis de los pellets

A continuación se describen cada uno de los análisis llevados a cabo para la caracterización de los pellets.

- **Caracterización de las propiedades físico-químicas de los pellets**

Una vez obtenidos los pellets, se realizó la caracterización de sus propiedades físico-químicas, tales como: contenido de humedad, compresión, módulo de elasticidad, cenizas, densidad, resistencia al impacto, entre otras; las cuales se describen a continuación:

**Densidad:** Para determinar la densidad de los pellets es necesario tener la masa y el volumen de estos. La masa se calculó por medio de una balanza analítica y el volumen se determinó midiendo la altura y el diámetro del pellet (cilindro) a través de un calibrador digital. El volumen y la densidad se calcularon por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\sigma = \frac{m}{v}$$

$$v = \pi \times r^2 \times h$$

En donde:

$\rho$  = Densidad del pellet

$m$  = Masa del pellet

$v$  = Volumen del pellet

$r$  = Radio del pellet

$h$  = Altura del pellet

El cálculo de la densidad se hizo para los cinco pellets obtenidos (recién elaborados y 24 horas después de haberlos hecho). Para cada composición se tomaron tres pellets, se les midió la masa y el volumen y se promediaron los datos.

**Contenido de humedad:** Para determinar el contenido de humedad de los pellets, se siguió el procedimiento de la

norma Austriaca ÖNORM M 7135<sup>25</sup>. Los pellets fueron pesados y llevados a un horno a 103°C ± 2°C por 24 h, posteriormente fueron puestos en un desecador por 30 min y se pesaron. Con el fin de evaporar todo su contenido de agua, se repitió el procedimiento anterior disminuyendo el tiempo tanto en el horno, como en el desecador, de la siguiente manera: 2 h en el horno y 30 min en el desecador, 30 min en el horno y 30 min en el desecador, 10 min en el horno y 10 min en el desecador. Pasado este tiempo se detuvo el experimento, ya que la variación de la masa de los pellets era insignificante. El porcentaje de humedad se halló de la siguiente manera:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{masa inicial} - \text{masa final}}{\text{masa inicial}} \times 100$$

**Resistencia al impacto (% durabilidad):** Se toma como el porcentaje de durabilidad del pellet. Para la realización de este experimento se dejó caer el pellet desde una altura de 1.85 m sobre una superficie lisa cuatro veces, tomando en cada caída el trozo de mayor tamaño. El procedimiento se realizó con tres pellets de cada combinación para dar una mayor veracidad a los resultados. Este experimento se basó en las pruebas realizadas por SAH *et al.*, KHANKARI *et al.*, SHRIVASTAVA *et al.* y AL-WIDYAN AND AL-JALIL, citadas en el artículo de KALIYAN, N. y MORELY, R.<sup>26</sup>. El porcentaje de durabilidad es la relación entre la masa final tras las cuatro caídas y la masa inicial, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Durabilidad} = \frac{\text{masa final}}{\text{masa inicial}} \times 100$$

**Esfuerzo de compresión:** En este experimento se tomaron dos pellets de cada composición, se les midió su diámetro y altura y se procedió a hacer la prueba. Para determinar el esfuerzo de compresión se colocó el pellet entre dos placas, donde la placa que se ubicaba en la parte superior aplicó una

---

<sup>25</sup>Austrian Standard. Technical Committee 241. Energy from solid biofuels. Compressed wood and compressed bark in natural state – Pellets and briquettes. ÖNORM M 7135. Edition: 2000-11-01. Austria. 2000. 10 p.

<sup>26</sup>KALIYAN, Nalladurai y MOREY, R. Vance. Op. Cit., p. 340.

fuerza de forma constante por medio de una prensa hidráulica tal y como se muestra en la figura 7, hasta que se generara una falla por la formación de grietas hasta producir su ruptura. El esfuerzo de compresión es tomado como la máxima presión que puede soportar un pellet antes de su ruptura.

Figura 7. Prensa hidráulica



Fuente. Universidad Nacional

**Módulo de elasticidad:** Para el desarrollo de esta prueba fue necesario de un deformímetro y de una prensa hidráulica (figura 8), la cual aplicará una fuerza axial al pellet. Inicialmente se tomaron las dimensiones del pellet (diámetro y altura), después se colocó en la prensa y se empezó a aplicar la fuerza; a medida que esta se aplicaba, se tomó la medida de su deformación a un intervalo de tiempo determinado hasta llegar a su punto de ruptura.

El esfuerzo y la deformación unitaria se calcularon de la siguiente manera:

$$D = \frac{l_o - l_f}{l_o}$$

En donde:

$D =$  Deformacion unitaria

$l_o =$  Longitud inicial

$l_f =$  Longitud final

$$E = \frac{F}{A}$$



Siendo,

$E = \text{Esfuerzo}$

$F = \text{Fuerza}$

$A = \text{Área del pellet}$

$$F = P \times A$$

En donde:

$F = \text{Fuerza}$

$P = \text{Presión}$

$A = \text{Área del gato hidráulico}$

Por último, el módulo de elasticidad se determina como la pendiente de la recta dada en la gráfica de esfuerzo Vs deformación.

Figura 8. Deformímetro y prensa



Fuente. Universidad Nacional

**Material volátil:** Para determinar el material volátil de los pellets, estos fueron pesados y puestos en una estufa hasta completar su proceso de quemado, luego se dejaron enfriar y se determinó su masa final. Este se calculó de acuerdo a la siguiente expresión<sup>27</sup>:

$$\text{masa perdida} = \frac{\text{masa inicial} - \text{masa final}}{\text{masa inicial}} \times 100$$

$$\% \text{ volatilidad} = \text{masa perdida} - \% \text{ humedad}$$

---

<sup>27</sup>ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. D 3175 – 02. Estados Unidos. 4 p.

**Proceso de quemado:** Los pellets fueron puestos sobre un recipiente de metal y posteriormente pasados a una estufa convencional. Se tomó la variación de la temperatura de la resistencia de la estufa en un intervalo de tiempo definido hasta su punto de calcinación.

- **Evaluación del poder calorífico de los pellets:** Se analizó el poder calorífico de cada pellet por medio de la bomba calorimétrica modelo 1341 marca Parr (figura 9).

Inicialmente se midieron 12 cm de alambre de platino (filamento de ignición), el cual fue conectado a los electrodos de la bomba y puesto en contacto con el crisol que contenía el pellet (este inicialmente fue pasado por un proceso de peso seco). Luego se presurizó la bomba a 30 atmósferas de oxígeno y se conectó a un instrumento de ignición. Posteriormente la bomba se puso en un recipiente con 1800 mL de agua y fue introducido en una camisa adiabática, conectada a un termómetro digital. Finalmente se tomaron datos de temperatura cada 5 s hasta una temperatura constante y fue hallado el poder calorífico según la ecuación dada en el manual de la bomba calorimétrica:<sup>28</sup>

$$H_g = \frac{t \times W - e_1 - e_2 - e_3}{m}$$

En donde:

*t = Incremento neto de temperatura.*

*W = Energía equivalente del calorímetro, determinado bajo estandarización.*

*e<sub>1</sub> = Corrección en calorías para el calor de formación del ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>).*

*e<sub>2</sub> = Corrección en calorías para el calor de formación del ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).*

*e<sub>3</sub> = Corrección en calorías para el calor de combustión del alambre fusible.*

*m = Masa de la muestra en gramos.*

---

<sup>28</sup> Operating Instruction Manual .Oxygen Bomb Calorimeter. Marca Parr 1341. 16 p.

Figura 9. Bomba calorimétrica 1341



Fuente. Operating Instruction Manual

#### **5.3.4 Fase 4: Discusión de resultados**

Una vez fabricados los pellets y realizada la caracterización de las propiedades físico-químicas, por medio de los procedimientos descritos anteriormente, se hizo un análisis de resultados, donde se pudo determinar si la biomasa de palma de aceite es factible o no para la obtención de pellets.

Éste se realizó mediante análisis de laboratorios y los resultados que arrojaron las pruebas de ensayo y error, los cuales se representan por medio de gráficas y tablas.

## 6. RESULTADOS

### 6.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

#### 6.1.1 Análisis Último

En la tabla 4 se muestran los resultados del análisis último que se le realizó a la biomasa de palma de aceite. De igual forma se presenta en el anexo 1 el Informe de Resultados realizado por el Servicio Geológico Colombiano (INGEOMINAS).

Tabla 4. Análisis Último de la biomasa

| <b>Parámetro</b>        | <b>Resultado</b> | <b>Norma ASTM</b> |
|-------------------------|------------------|-------------------|
| Humedad (105°C) % masa  | 8.17             | D-3173-03 (08)    |
| Azufre % masa           | 0.20             | D-4239-08         |
| Poder calorífico Btu/lb | 7,385.00         | D-5865-04         |
| Poder calorífico J/g    | 17,170.00        | D-5865-04         |
| Carbono % masa          | 45.21            | D-5373-08         |
| Hidrógeno % masa        | 6.37             | D-5373-08         |
| Nitrógeno % masa        | 1.14             | D-5373-08         |

Fuente. INGEOMINAS

#### 6.1.2 Contenido de Lignina

*Masa del papel filtro seco = 0.79 g*

*Masa papel filtro húmedo + biomasa húmeda = 2.94 g*

Para determinar el contenido de lignina la muestra pasó por un proceso de secado hasta alcanzar una masa constante. Esta se dejó en el horno durante 1h a  $105 \pm 3$  °C y se puso en el desecador por 30 min, obteniendo:

*Masa papel filtro + biomasa = 0.99 g*

Se secó nuevamente a la misma temperatura por 30 min y puesto en el desecador 10 min:

*Masa papel filtro + biomasa = 0.97 g*

El procedimiento anterior se repitió dando como resultado:

*Masa papel filtro + biomasa = 0.97 g*

Por último, se secó la muestra a la temperatura ya conocida por 15 min y consecutivamente se colocó en el desecador 10 min obteniendo el mismo resultado. Por lo tanto, al no presentarse una variación de masa se determinó esta como la masa seca de la muestra.

$$\text{Masa seca de la muestra} + \text{papel filtro} = 0.97 \text{ g}$$

$$\text{Materia seca} = 0.97 \text{ g} - 0.79 \text{ g} = 0.18 \text{ g}$$

$$\text{Masa de lignina} = 1 \text{ g} - 0.18 \text{ g} = 0.81 \text{ g}$$

$$\% \text{ Lignina} = \frac{0.81 \text{ g}}{1 \text{ g}} \times 100 = 81.80 \%$$

## 6.2 FABRICACIÓN DE PELLETS

Como resultado del diseño de experimentos se llega a cinco combinaciones de biomasa, las cuales se muestran en la tabla 5; estas combinaciones dan como resultado los pellets que posteriormente se analizan (figura 10).

Tabla 5. Combinación final de pellets

| No. De pellet | Materia prima                                   | Porcentaje de materia prima | Tamaño de partícula      | Presión |
|---------------|---|-----------------------------|--------------------------|---------|
| 1             | 10 g de Cuesco de palma de aceite               | 100%                        | Entre 0.30 mm y 1.18 mm. | 40 Bar  |
| 2             | 10 g de Fibra de palma de aceite                | 100%                        | Entre 0.30 mm y 1.18 mm. | 40 Bar  |
| 3             | 10 g de Fibra de palma de aceite                | 100%                        | ≤ 0.30 mm.               | 40 Bar  |
| 4             | 5 g de cuesco y 5 g de fibra de palma de aceite | 50% cuesco<br>50%fibra      | Entre 0.30 mm y 1.18 mm. | 40 Bar  |

Tabla 5. (Continuación)

|   |   |                        |            |        |
|---|---|------------------------|------------|--------|
| 5 | 5 g de cuesco y<br>5 g de fibra de<br>palma de aceite | 50% cuesco<br>50%fibra | ≤ 0.30 mm. | 40 Bar |
|---|---|------------------------|------------|--------|

Fuente. Autores del proyecto.

Figura 10. Pellets finales



Fuente. Autores del proyecto

### 6.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS PELLETS

#### 6.3.1 Densidad

**Pellet 1: 100% cuesco con un tamaño de partícula entre 0.30 mm y 1.18 mm.**

Tabla 6.Reporte de datos para determinación de densidad

|                 | Masa (g) | Diámetro (mm) | Altura (mm) |
|-----------------|----------|---------------|-------------|
| <b>Prueba 1</b> | 9.98     | 21.07         | 28.15       |
| <b>Prueba 2</b> | 9.97     | 20.32         | 28.21       |
| <b>Prueba 3</b> | 9.83     | 20.16         | 28.31       |
| <b>Promedio</b> | 9.93     | 20.52         | 28.22       |

Fuente. Autores del proyecto

$$v = \pi \times (10.26 \text{ mm})^2 \times 28.22 \text{ mm}$$

$$v = 9,332.58 \text{ mm}^3 \approx 9.33 \text{ cm}^3$$

$$\rho = \frac{9.93 \text{ g}}{9.33 \text{ cm}^3} = 1.06 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \approx 1.06 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$$

**Pellet 2: 100% fibra con un tamaño de partícula entre 0.30 mm y 1.18 mm.**

Tabla 7. Reporte de datos para determinación de densidad

|                 | <b>Masa (g)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b>Altura (mm)</b> |
|-----------------|-----------------|----------------------|--------------------|
| <b>Prueba 1</b> | 9.98            | 20.20                | 29.75              |
| <b>Prueba 2</b> | 10.03           | 20.15                | 30.15              |
| <b>Prueba 3</b> | 10.12           | 20.08                | 29.51              |
| <b>Promedio</b> | 10.04           | 20.14                | 29.80              |

Fuente. Autores del proyecto

$$v = \pi \times (10.07 \text{ mm})^2 \times 29.80 \text{ mm}$$

$$v = 9,493.47 \text{ mm}^3 \approx 9.49 \text{ cm}^3$$

$$\rho = \frac{10.04 \text{ g}}{9.49 \text{ cm}^3} = 1.06 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \approx 1.06 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$$

**Pellet 3: 100% fibra con un tamaño de partícula  $\leq 0.30$  mm.**

Tabla 8. Reporte de datos para determinación de densidad

|                 | <b>Masa (g)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b>Altura (mm)</b> |
|-----------------|-----------------|----------------------|--------------------|
| <b>Prueba 1</b> | 10.03           | 20.03                | 25.00              |
| <b>Prueba 2</b> | 10.05           | 20.00                | 25.12              |
| <b>Prueba 3</b> | 10.05           | 20.00                | 25.00              |
| <b>Promedio</b> | 10.04           | 20.01                | 25.04              |

Fuente. Autores del proyecto

$$v = \pi \times (10.01 \text{ mm})^2 \times 25.04 \text{ mm}$$

$$v = 7,874.42 \text{ mm}^3 \approx 7.87 \text{ cm}^3$$

$$\rho = \frac{10.04 \text{ g}}{7.87 \text{ cm}^3} = 1.28 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \approx 1.28 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$$

**Pellet 4: 50% fibra y 50% cuesco con un tamaño de partícula entre 0.30 mm y 1.18 mm.**

Tabla 9. Reporte de datos para determinación de densidad

|                 | <b>Masa (g)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b>Altura (mm)</b> |
|-----------------|-----------------|----------------------|--------------------|
| <b>Prueba 1</b> | 9.90            | 20.17                | 28.76              |
| <b>Prueba 2</b> | 10.20           | 21.02                | 30.00              |
| <b>Prueba 3</b> | 9.95            | 20.17                | 28.51              |
| <b>Promedio</b> | 10.02           | 20.45                | 29.09              |

Fuente. Autores del proyecto

$$v = \pi \times (10.23 \text{ mm})^2 \times 29.09 \text{ mm}$$

$$v = 9,564.12 \text{ mm}^3 \approx 9.56 \text{ cm}^3$$

$$\rho = \frac{10.02 \text{ g}}{9.56 \text{ cm}^3} = 1.05 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \approx 1.05 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$$

**Pellet 5: 50% fibra y 50% cuesco con un tamaño de partícula  $\leq 0.30 \text{ mm}$ .**

Tabla 10. Reporte de datos para determinación de densidad

|                 | Masa (g) | Diámetro (mm) | Altura (mm) |
|-----------------|----------|---------------|-------------|
| <b>Prueba 1</b> | 10.33    | 20.20         | 28.24       |
| <b>Prueba 2</b> | 9.88     | 20.13         | 27.00       |
| <b>Prueba 3</b> | 10.20    | 20.13         | 27.56       |
| <b>Promedio</b> | 10.14    | 20.15         | 27.60       |

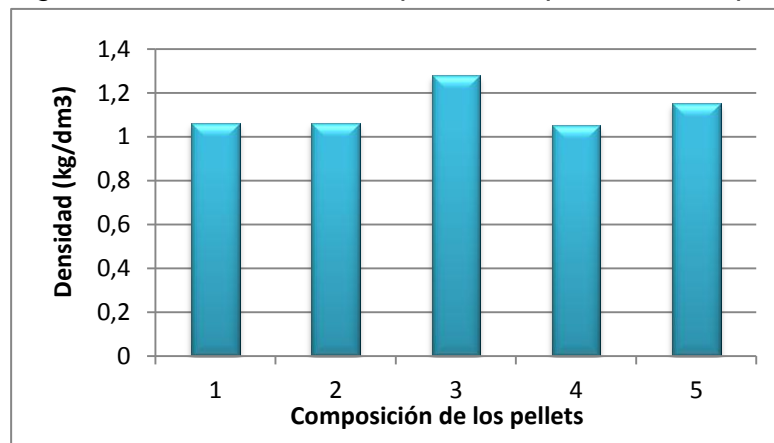
Fuente. Autores del proyecto

$$v = \pi \times (10.08 \text{ mm})^2 \times 27.60 \text{ mm}$$

$$v = 8,810.08 \text{ mm}^3 \approx 8.81 \text{ cm}^3$$

$$\rho = \frac{10.14 \text{ g}}{8.81 \text{ cm}^3} = 1.15 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \approx 1.15 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$$

Figura 11. Densidad de los pellets respecto su composición



Fuente. Autores del proyecto

A su vez, se determinó la densidad de los pellets 24 horas después de haberlos hecho, con el fin de establecer si la densidad de estos se mantenía constante.



**Pellet 1: 100% cuesco con un tamaño de partícula entre 0.30 mm y 1.18 mm.**

Tabla 11. Reporte de datos para determinación de densidad

|                 | <b>Masa (g)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b>Altura (mm)</b> |
|-----------------|-----------------|----------------------|--------------------|
| <b>Prueba 1</b> | 9.61            | 20.14                | 28.10              |
| <b>Prueba 2</b> | 9.72            | 20.30                | 28.21              |
| <b>Prueba 3</b> | 9.61            | 20.10                | 28.05              |
| <b>Promedio</b> | 9.65            | 20.18                | 28.12              |

Fuente. Autores del proyecto

$$v = \pi \times (10.09 \text{ mm})^2 \times 28.12 \text{ mm}$$

$$v = 8,993.89 \text{ mm}^3 \approx 8.99 \text{ cm}^3$$

$$\rho = \frac{9.65 \text{ g}}{8.99 \text{ cm}^3} = 1.07 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \approx 1.07 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$$

**Pellet 2: 100% fibra con un tamaño de partícula entre 0.30 mm y 1.18 mm.**

Tabla 12. Reporte de datos para determinación de densidad

|                 | <b>Masa (g)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b>Altura (mm)</b> |
|-----------------|-----------------|----------------------|--------------------|
| <b>Prueba 1</b> | 10.03           | 20.02                | 30.09              |
| <b>Prueba 2</b> | 10.08           | 20.03                | 29.49              |
| <b>Prueba 3</b> | 9.98            | 20.18                | 29.40              |
| <b>Promedio</b> | 10.03           | 20.08                | 29.66              |

Fuente. Autores del proyecto

$$v = \pi \times (10.04 \text{ mm})^2 \times 29.66 \text{ mm}$$

$$v = 9,392.66 \text{ mm}^3 \approx 9.39 \text{ cm}^3$$

$$\rho = \frac{10.03 \text{ g}}{9.39 \text{ cm}^3} = 1.07 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \approx 1.07 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$$

**Pellet 3: 100% fibra con un tamaño de partícula  $\leq 0.30$  mm.**

Tabla 13. Reporte de datos para determinación de densidad

|                 | <b>Masa (g)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b>Altura (mm)</b> |
|-----------------|-----------------|----------------------|--------------------|
| <b>Prueba 1</b> | 10.05           | 20.03                | 25.04              |
| <b>Prueba 2</b> | 10.04           | 20.00                | 25.00              |
| <b>Prueba 3</b> | 10.03           | 20.00                | 25.00              |
| <b>Promedio</b> | 10.04           | 20.01                | 25.01              |

Fuente. Autores del proyecto

$$v = \pi \times (10.005 \text{ mm})^2 \times 25.01 \text{ mm}$$

$$v = 7,864.98 \text{ mm}^3 \approx 7.86 \text{ cm}^3$$

$$\rho = \frac{10.04 \text{ g}}{7.86 \text{ cm}^3} = 1.28 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \approx 1.28 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$$

**Pellet 4: 50% fibra y 50% cuesco con un tamaño de partícula entre 0.30 mm y 1.18 mm.**

Tabla 14. Reporte de datos para determinación de densidad

|                 | <b>Masa (g)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b>Altura (mm)</b> |
|-----------------|-----------------|----------------------|--------------------|
| <b>Prueba 1</b> | 9.92            | 20.14                | 28.64              |
| <b>Prueba 2</b> | 10.03           | 20.24                | 29.36              |
| <b>Prueba 3</b> | 9.91            | 20.12                | 28.23              |
| <b>Promedio</b> | 9.95            | 20.17                | 28.74              |

Fuente. Autores del proyecto

$$v = \pi \times (10.08 \text{ mm})^2 \times 28.74 \text{ mm}$$

$$v = 9,173.98 \text{ mm}^3 \approx 9.17 \text{ cm}^3$$

$$\rho = \frac{9.95 \text{ g}}{9.17 \text{ cm}^3} = 1.09 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \approx 1.09 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$$

**Pellet 5: 50% fibra y 50% cuesco con un tamaño de partícula  $\leq 0.30$  mm.**

Tabla 15. Reporte de datos para determinación de densidad

|                 | <b>Masa (g)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b>Altura (mm)</b> |
|-----------------|-----------------|----------------------|--------------------|
| <b>Prueba 1</b> | 10.19           | 20.20                | 27.56              |
| <b>Prueba 2</b> | 9.86            | 20.13                | 27.00              |
| <b>Prueba 3</b> | 10.33           | 20.13                | 28.20              |
| <b>Promedio</b> | 10.13           | 20.15                | 27.59              |

Fuente. Autores del proyecto

$$v = \pi \times (10.08 \text{ mm})^2 \times 27.59 \text{ mm}$$

$$v = 8,806.89 \text{ mm}^3 \approx 8.81 \text{ cm}^3$$

$$\rho = \frac{10.13 \text{ g}}{8.81 \text{ cm}^3} = 1.15 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \approx 1.15 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$$

### 6.3.2 Contenido De Humedad

**Pellet 1: 100% cuesco con un tamaño de partícula entre 0.30 mm y 1.18 mm.**

$$Masa\ inicial = 9.93\ g$$

$$Masa\ final = 9.08\ g$$

$$\% Humedad = \frac{9.93\ g - 9.08\ g}{9.93\ g} \times 100 = 8.56\ \%$$

**Pellet 2: 100% fibra con un tamaño de partícula entre 0.30 mm y 1.18 mm.**

$$Masa\ inicial = 10.44\ g$$

$$Masa\ final = 9.53\ g$$

$$\% Humedad = \frac{10.44\ g - 9.53\ g}{10.44\ g} \times 100 = 8.72\ \%$$

**Pellet 3: 100% fibra con un tamaño de partícula  $\leq 0.30$  mm.**

$$Masa\ inicial = 10.15\ g$$

$$Masa\ final = 9.47\ g$$

$$\% Humedad = \frac{10.15\ g - 9.47\ g}{10.15\ g} \times 100 = 6.70\ \%$$

**Pellet 4: 50% fibra y 50% cuesco con un tamaño de partícula entre 0.30 mm y 1.18 mm.**

$$Masa\ inicial = 9.80\ g$$

$$Masa\ final = 8.92\ g$$

$$\% Humedad = \frac{9.80\ g - 8.92\ g}{9.80\ g} \times 100 = 8.98\ \%$$

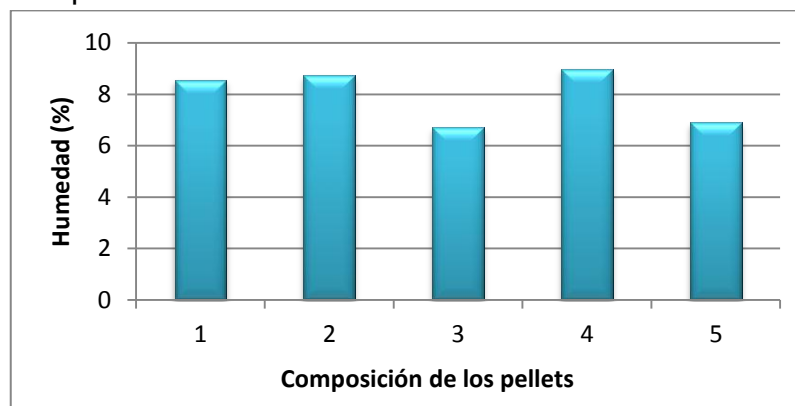
**Pellet 5: 50% fibra y 50% cuesco con un tamaño de partícula  $\leq 0.30$  mm.**

$$Masa\ inicial = 10.02\ g$$

$$Masa\ final = 9.33\ g$$

$$\% \text{ Humedad} = \frac{10.02 \text{ g} - 9.33 \text{ g}}{10.02 \text{ g}} \times 100 = 6.89 \%$$

Figura 12. Contenido de humedad de los pellets respecto su composición.



Fuente. Autores del proyecto

### 6.3.3 Resistencia al impacto (% durabilidad)

**Pellet 1: 100% cuesco con un tamaño de partícula entre 0.30 mm y 1.18 mm.**

Tabla 16. Reporte de caídas pellet 1

| Masa (g)      | Prueba 1 | Prueba 2 | Prueba 3 | Promedio |
|---------------|----------|----------|----------|----------|
| Inicial       | 9.55     | 9.59     | 9.48     | 9.54     |
| Primera caída | 0.68     | 2.22     | 0.94     | 1.28     |
| Segunda caída | 0.09     | 0.18     | 0.37     | 0.21     |
| Tercera caída | -        | -        | -        | -        |
| Cuarta caída  | -        | -        | -        | -        |

Fuente. Autores del proyecto

Este pellet no soportó las cuatro caídas requeridas, por lo tanto, se tomó la segunda caída como la masa final.

$$Masa \text{ inicial} = 9.54 \text{ g}$$

$$Masa \text{ final} = 0.21 \text{ g}$$

$$\% \text{ Durabilidad} = \frac{0.21 \text{ g}}{9.54 \text{ g}} \times 100 = 2.20 \%$$

**Pellet 2: 100% fibra con un tamaño de partícula entre 0.30 mm y 1.18 mm.**

Tabla 17.Reporte de caídas pellet 2

| <b>Masa (g)</b> | <b>Prueba 1</b> | <b>Prueba 2</b> | <b>Prueba 3</b> | <b>Promedio</b> |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Inicial         | 9.98            | 10.05           | 10.07           | 10.03           |
| Primera caída   | 7.55            | 10.00           | 6.22            | 7.92            |
| Segunda caída   | 6.10            | 5.26            | 6.21            | 5.86            |
| Tercera caída   | 6.07            | 2.77            | 6.20            | 5.01            |
| Cuarta caída    | 3.03            | 1.60            | 4.72            | 3.12            |

Fuente. Autores del proyecto

*Masa inicial* = 10.03 g

*Masa final* = 3.12 g

$$\% \text{ Durabilidad} = \frac{3.12 \text{ g}}{10.03 \text{ g}} \times 100 = 31.11 \%$$

**Pellet 3: 100% fibra con un tamaño de partícula  $\leq$  0.30 mm.**

Tabla 18.Reporte de caídas pellet 3

| <b>Masa (g)</b> | <b>Prueba 1</b> | <b>Prueba 2</b> | <b>Prueba 3</b> | <b>Promedio</b> |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Inicial         | 10.04           | 10.05           | 10.07           | 10.05           |
| Primera caída   | 10.03           | 10.03           | 10.04           | 10.03           |
| Segunda caída   | 10.00           | 10.02           | 10.03           | 10.02           |
| Tercera caída   | 5.17            | 10.00           | 10.01           | 8.39            |
| Cuarta caída    | 5.16            | 5.70            | 9.99            | 6.95            |

Fuente. Autores del proyecto

*Masa inicial* = 10.05 g

*Masa final* = 6.95 g

$$\% \text{ Durabilidad} = \frac{6.95 \text{ g}}{10.05 \text{ g}} \times 100 = 69.15 \%$$

**Pellet 4: 50% fibra y 50% cuesco con un tamaño de partícula entre 0.30 mm y 1.18 mm.**

Tabla 19.Reporte de caídas pellet 4

| <b>Masa (g)</b> | <b>Prueba 1</b> | <b>Prueba 2</b> | <b>Prueba 3</b> | <b>Promedio</b> |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Inicial         | 9.90            | 10.03           | 9.93            | 9.95            |
| Primera caída   | 8.55            | 7.23            | 9.77            | 8.52            |
| Segunda caída   | 2.66            | 6.24            | 4.91            | 4.60            |
| Tercera caída   | 2.60            | 4.62            | 2.60            | 3.27            |
| Cuarta caída    | 2.55            | 4.55            | 2.58            | 3.23            |

Fuente. Autores del proyecto

*Masa inicial* = 9.95 g

*Masa final* = 3.23 g

$$\% \text{ Durabilidad} = \frac{3.23 \text{ g}}{9.95 \text{ g}} \times 100 = 32.46 \%$$

**Pellet 5: 50% fibra y 50% cuesco con un tamaño de partícula  $\leq 0.30$  mm.**

Tabla 20. Reporte de caídas pellet 5

| <b>Masa (g)</b> | <b>Prueba 1</b> | <b>Prueba 2</b> | <b>Prueba 3</b> | <b>Promedio</b> |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Inicial         | 9.83            | 10.32           | 10.17           | 10.11           |
| Primera caída   | 9.81            | 8.63            | 10.16           | 9.53            |
| Segunda caída   | 9.79            | 8.62            | 8.03            | 8.81            |
| Tercera caída   | 4.57            | 7.35            | 5.99            | 5.97            |
| Cuarta caída    | 4.53            | 4.61            | 3.19            | 4.11            |

Fuente. Autores del proyecto

*Masa inicial* = 10.11 g

*Masa final* = 4.11 g

$$\% \text{ Durabilidad} = \frac{4.11 \text{ g}}{10.11 \text{ g}} \times 100 = 40.65 \%$$

#### 6.3.4 Esfuerzo de compresión

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos al realizar la prueba de esfuerzo de compresión (presión máxima) de los pellets.

Tabla 21. Compresión de pellets

|                 | <b>Longitud (mm)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b>Compresión máxima (MPa)</b> | <b>Compresión promedio (MPa)</b> |
|-----------------|----------------------|----------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| <b>Pellet 1</b> | 28.31                | 20.37                | 1.24                           | 1.19                             |
|                 | 28.10                | 20.24                | 1.13                           |                                  |
| <b>Pellet 2</b> | 31.72                | 20.24                | 16.44                          | 17.23                            |
|                 | 33.07                | 20.00                | 18.02                          |                                  |
| <b>Pellet 3</b> | 24.20                | 20.25                | 10.79                          | 11.60                            |
|                 | 25.00                | 20.20                | 12.40                          |                                  |
| <b>Pellet 4</b> | 31.15                | 20.25                | 7.91                           | 7.02                             |
|                 | 28.15                | 21.31                | 6.12                           |                                  |
| <b>Pellet 5</b> | 27.49                | 20.24                | 3.20                           | 4.75                             |
|                 | 27.00                | 20.15                | 6.30                           |                                  |

Fuente. Autores del proyecto.

### 6.3.5 Módulo de elasticidad

Para los cálculos del módulo de elasticidad se tomó el área del gato hidráulico como  $14.45 \text{ cm}^2$ .

**Pellet 1: 100% cuesco con un tamaño de partícula entre 0.30 mm y 1.18 mm.**

$$A = \pi \times r^2$$

Dónde:

*A = Área del pellet*

*r = radio del pellet*

$$\emptyset = 21.05 \text{ mm}$$

$$r = 10.52 \text{ mm}$$

$$A = \pi \times (10.52 \text{ mm})^2 = 348.01 \text{ mm}^2$$

Se registraron datos de longitud inicial y final del pellet a intervalos de 0.25 mm, con el fin de determinar su deformación unitaria hasta llegar a su punto de ruptura (máxima presión ejercida). A continuación se muestra el cálculo para hallar la deformación en su segundo intervalo.

$$\text{Desplazamiento} = 2.10 \text{ mm}$$

$$l_f = l_o - \text{desplazamiento}$$

$$l_f = 28.68 \text{ mm} - 2.10 \text{ mm} = 26.58 \text{ mm}$$

$$D = \frac{28.68 \text{ mm} - 26.58 \text{ mm}}{28.68 \text{ mm}} = 0.07$$

Este mismo procedimiento se llevó a cabo para evaluar las deformaciones restantes del pellet.

Así mismo, se determinó la fuerza generada por el gato hidráulico para después calcular el esfuerzo al que fue sometido el pellet.

$$F = 2 \text{ psi} \times \frac{1 \text{ N/cm}^2}{1.45 \text{ psi}} \times 14.45 \text{ cm}^2 = 19.93 \text{ N}$$

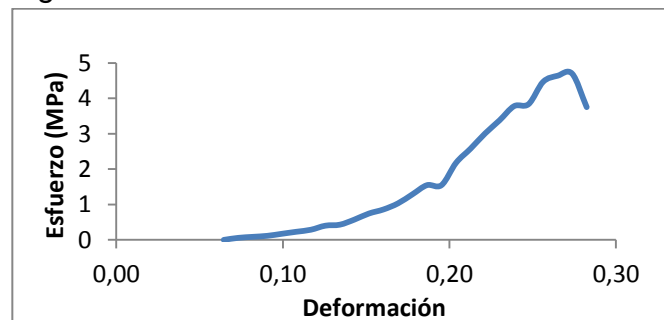
$$E = \frac{19.93 \text{ N}}{348.01 \text{ mm}^2} = 0.06 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 0.06 \text{ Mpa}$$

Tabla 22. Datos esfuerzo-deformación

| Presión (psi) | Desplazamiento (mm) | Lf (mm) | Deformación unitaria | Fuerza (N) | Esfuerzo (MPa) |
|---------------|---------------------|---------|----------------------|------------|----------------|
| 0             | 1.85                | 26.83   | 0.06                 | 0.00       | 0.00           |
| 2             | 2.10                | 26.58   | 0.07                 | 19.93      | 0.06           |
| 3             | 2.35                | 26.33   | 0.08                 | 29.89      | 0.09           |
| 4             | 2.60                | 26.08   | 0.09                 | 39.85      | 0.11           |
| 6             | 2.85                | 25.83   | 0.10                 | 59.78      | 0.17           |
| 8             | 3.10                | 25.58   | 0.11                 | 79.71      | 0.23           |
| 10            | 3.35                | 25.33   | 0.12                 | 99.64      | 0.29           |
| 14            | 3.60                | 25.08   | 0.13                 | 139.49     | 0.40           |
| 15            | 3.85                | 24.83   | 0.13                 | 149.45     | 0.43           |
| 20            | 4.10                | 24.58   | 0.14                 | 199.27     | 0.57           |
| 26            | 4.35                | 24.33   | 0.15                 | 259.05     | 0.74           |
| 30            | 4.60                | 24.08   | 0.16                 | 298.91     | 0.86           |
| 36            | 4.85                | 23.83   | 0.17                 | 358.69     | 1.03           |
| 45            | 5.10                | 23.58   | 0.18                 | 448.36     | 1.29           |
| 54            | 5.35                | 23.33   | 0.19                 | 538.04     | 1.55           |
| 54            | 5.60                | 23.08   | 0.20                 | 538.04     | 1.55           |
| 76            | 5.85                | 22.83   | 0.20                 | 757.24     | 2.18           |
| 90            | 6.10                | 22.58   | 0.21                 | 896.73     | 2.58           |
| 105           | 6.35                | 22.33   | 0.22                 | 1,046.18   | 3.01           |
| 118           | 6.60                | 22.08   | 0.23                 | 1,175.71   | 3.38           |
| 132           | 6.85                | 21.83   | 0.24                 | 1,315.20   | 3.78           |
| 134           | 7.10                | 21.58   | 0.25                 | 1,335.13   | 3.84           |
| 156           | 7.35                | 21.33   | 0.26                 | 1,554.32   | 4.47           |
| 162           | 7.60                | 21.08   | 0.26                 | 1,614.11   | 4.64           |
| 164           | 7.85                | 20.83   | 0.27                 | 1,634.03   | 4.70           |
| 131           | 8.10                | 20.58   | 0.28                 | 1,305.23   | 3.75           |

Fuente. Autores del proyecto

Figura 13. Esfuerzo Vs deformación



Fuente. Autores del proyecto



El módulo de elasticidad se determina como la pendiente de la curva de la gráfica de esfuerzo Vs deformación, por lo tanto el módulo de elasticidad en este caso es:

$$E = 23.53 \text{ MPa}$$

**Pellet 2: 100% fibra con un tamaño de partícula entre 0.30 mm y 1.18 mm.**

$$\varnothing = 20.15 \text{ mm}$$

$$r = 10.07 \text{ mm}$$

*A = Área del pellet*

$$A = \pi \times (10.07 \text{ mm})^2 = 318.89 \text{ mm}^2$$

Los siguientes son los cálculos para hallar la deformación en su segundo intervalo. Este procedimiento se aplica de igual forma para todos los datos.

$$\text{Desplazamiento} = 2.00 \text{ mm}$$

$$l_f = l_o - \text{desplazamiento}$$

$$l_f = 29.45 \text{ mm} - 2.00 \text{ mm} = 27.45 \text{ mm}$$

$$D = \frac{29.45 \text{ mm} - 27.45 \text{ mm}}{29.45 \text{ mm}} = 0.07$$

$$F = 5 \text{ psi} \times \frac{1 \text{ N/cm}^2}{1.45 \text{ psi}} \times 14.45 \text{ cm}^2 = 49.82 \text{ N}$$

$$E = \frac{49.82 \text{ N}}{318.89 \text{ mm}^2} = 0.16 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 0.16 \text{ MPa}$$

Tabla 23. Datos esfuerzo-deformación

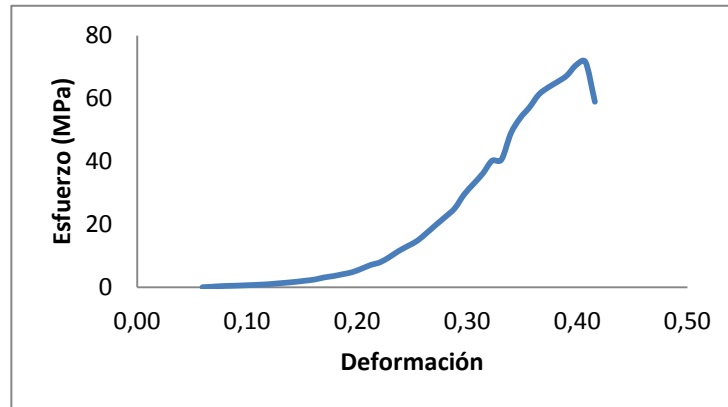
| Presión (psi) | Desplazamiento (mm) | Lf (mm) | Deformación unitaria | Fuerza (N) | Esfuerzo (MPa) |
|---------------|---------------------|---------|----------------------|------------|----------------|
| 0             | 1.75                | 27.70   | 0.06                 | 0.00       | 0.00           |
| 5             | 2.00                | 27.45   | 0.07                 | 49.82      | 0.16           |
| 11            | 2.25                | 27.20   | 0.08                 | 109.60     | 0.34           |
| 14            | 2.50                | 26.95   | 0.08                 | 139.49     | 0.44           |

Tabla 23. Continuación

|       |       |       |      |           |       |
|-------|-------|-------|------|-----------|-------|
| 17    | 2.75  | 26.70 | 0.09 | 169.38    | 0.53  |
| 21    | 3.00  | 26.45 | 0.10 | 209.24    | 0.66  |
| 25    | 3.25  | 26.20 | 0.11 | 249.09    | 0.78  |
| 30    | 3.50  | 25.95 | 0.12 | 298.91    | 0.94  |
| 38    | 3.75  | 25.70 | 0.13 | 378.62    | 1.19  |
| 46    | 4.00  | 25.45 | 0.14 | 458.33    | 1.44  |
| 55    | 4.25  | 25.20 | 0.14 | 548.00    | 1.72  |
| 66    | 4.50  | 24.95 | 0.15 | 657.60    | 2.06  |
| 78    | 4.75  | 24.70 | 0.16 | 777.16    | 2.44  |
| 99    | 5.00  | 24.45 | 0.17 | 986.40    | 3.09  |
| 113   | 5.25  | 24.20 | 0.18 | 1,125.89  | 3.53  |
| 132   | 5.50  | 23.95 | 0.19 | 1,315.20  | 4.12  |
| 152   | 5.75  | 23.70 | 0.20 | 1,514.47  | 4.75  |
| 187   | 6.00  | 23.45 | 0.20 | 1,863.20  | 5.84  |
| 226   | 6.25  | 23.20 | 0.21 | 2,251.78  | 7.06  |
| 253   | 6.50  | 22.95 | 0.22 | 2,520.80  | 7.90  |
| 306   | 6.75  | 22.70 | 0.23 | 3,048.87  | 9.56  |
| 368   | 7.00  | 22.45 | 0.24 | 3,666.61  | 11.50 |
| 420   | 7.25  | 22.20 | 0.25 | 4,184.72  | 13.12 |
| 473   | 7.50  | 21.95 | 0.25 | 4,712.79  | 14.78 |
| 552   | 7.75  | 21.70 | 0.26 | 5,499.92  | 17.25 |
| 635   | 8.00  | 21.45 | 0.27 | 6,326.90  | 19.84 |
| 716   | 8.25  | 21.20 | 0.28 | 7,133.95  | 22.37 |
| 802   | 8.50  | 20.95 | 0.29 | 7,990.82  | 25.06 |
| 943   | 8.75  | 20.70 | 0.30 | 9,395.69  | 29.46 |
| 1,050 | 9.00  | 20.45 | 0.31 | 10,461.80 | 32.81 |
| 1,156 | 9.25  | 20.20 | 0.31 | 11,517.95 | 36.12 |
| 1,287 | 9.50  | 19.95 | 0.32 | 12,823.18 | 40.21 |
| 1,298 | 9.75  | 19.70 | 0.33 | 12,932.78 | 40.56 |
| 1,564 | 10.00 | 19.45 | 0.34 | 15,583.10 | 48.87 |
| 1,720 | 10.25 | 19.20 | 0.35 | 17,137.43 | 53.74 |
| 1,830 | 10.50 | 18.95 | 0.36 | 18,233.43 | 57.18 |
| 1,960 | 10.75 | 18.70 | 0.37 | 19,528.70 | 61.24 |
| 2,032 | 11.00 | 18.45 | 0.37 | 20,246.08 | 63.49 |
| 2,089 | 11.25 | 18.20 | 0.38 | 20,814.00 | 65.27 |
| 2,153 | 11.50 | 17.95 | 0.39 | 21,451.68 | 67.27 |
| 2,260 | 11.75 | 17.70 | 0.40 | 22,517.78 | 70.61 |
| 2,290 | 12.00 | 17.45 | 0.41 | 22,816.69 | 71.55 |
| 1,887 | 12.25 | 17.20 | 0.42 | 18,801.35 | 58.96 |

Fuente. Autores del proyecto

Figura 14. Esfuerzo Vs deformación



Fuente. Autores del proyecto

Módulo de elasticidad:

$$E = 215.34 \text{ MPa}$$

**Pellet 3: 100% fibra con un tamaño de partícula  $\leq 0.30$  mm.**

$$\varnothing = 20.17 \text{ mm}$$

$$r = 10.08 \text{ mm}$$

*A = Área del pellet*

$$A = \pi \times (10.08 \text{ mm})^2 = 319.52 \text{ mm}^2$$

Los siguientes son los cálculos para hallar la deformación en su segundo intervalo. Este procedimiento se aplica de igual forma para todos los datos.

$$\text{Desplazamiento} = 3.70 \text{ mm}$$

$$l_f = l_o - \text{desplazamiento}$$

$$l_f = 25.07 \text{ mm} - 3.70 \text{ mm} = 21.37 \text{ mm}$$

$$D = \frac{25.07 \text{ mm} - 21.37 \text{ mm}}{25.07 \text{ mm}} = 0.15$$

$$F = 2 \text{ psi} \times \frac{1 \text{ N/cm}^2}{1.45 \text{ psi}} \times 14.45 \text{ cm}^2 = 19.93 \text{ N}$$

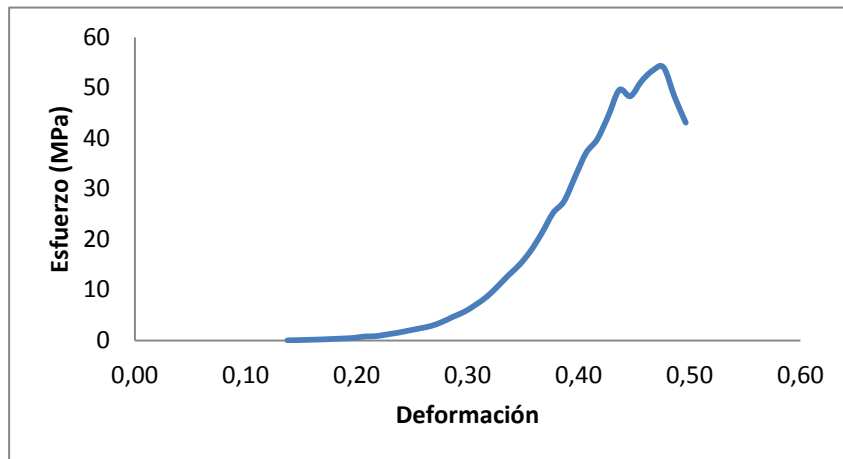
$$E = \frac{19.93 \text{ N}}{319.52 \text{ mm}^2} = 0.06 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 0.06 \text{ MPa}$$

Tabla 24. Datos esfuerzo-deformación

| Presión (psi) | Desplazamiento (mm) | Lf (mm) | Deformación unitaria | Fuerza (N) | Esfuerzo (MPa) |
|---------------|---------------------|---------|----------------------|------------|----------------|
| 0             | 3.45                | 21.62   | 0.14                 | 0.00       | 0.00           |
| 2             | 3.70                | 21.37   | 0.15                 | 19.93      | 0.06           |
| 4             | 3.95                | 21.12   | 0.16                 | 39.85      | 0.12           |
| 6             | 4.20                | 20.87   | 0.17                 | 59.78      | 0.19           |
| 9             | 4.45                | 20.62   | 0.18                 | 89.67      | 0.28           |
| 12            | 4.70                | 20.37   | 0.19                 | 119.56     | 0.37           |
| 16            | 4.95                | 20.12   | 0.20                 | 159.42     | 0.50           |
| 25            | 5.20                | 19.87   | 0.21                 | 249.09     | 0.78           |
| 27            | 5.45                | 19.62   | 0.22                 | 269.02     | 0.84           |
| 38            | 5.70                | 19.37   | 0.23                 | 378.62     | 1.18           |
| 49            | 5.95                | 19.12   | 0.24                 | 488.22     | 1.53           |
| 63            | 6.20                | 18.87   | 0.25                 | 627.71     | 1.96           |
| 77            | 6.45                | 18.62   | 0.26                 | 767.20     | 2.40           |
| 92            | 6.70                | 18.37   | 0.27                 | 916.65     | 2.87           |
| 118           | 6.95                | 18.12   | 0.28                 | 1,175.71   | 3.68           |
| 151           | 7.20                | 17.87   | 0.29                 | 1,504.51   | 4.71           |
| 182           | 7.45                | 17.62   | 0.30                 | 1,813.38   | 5.68           |
| 226           | 7.70                | 17.37   | 0.31                 | 2,251.78   | 7.05           |
| 276           | 7.95                | 17.12   | 0.32                 | 2,749.96   | 8.61           |
| 343           | 8.20                | 16.87   | 0.33                 | 3,417.52   | 10.70          |
| 415           | 8.45                | 16.62   | 0.34                 | 4,134.90   | 12.94          |
| 482           | 8.70                | 16.37   | 0.35                 | 4,802.47   | 15.03          |
| 570           | 8.95                | 16.12   | 0.36                 | 5,679.26   | 17.77          |
| 682           | 9.20                | 15.87   | 0.37                 | 6,795.19   | 21.27          |
| 808           | 9.45                | 15.62   | 0.38                 | 8,050.61   | 25.20          |
| 883           | 9.70                | 15.37   | 0.39                 | 8,797.88   | 27.53          |
| 1,039         | 9.95                | 15.12   | 0.40                 | 10,352.20  | 32.40          |
| 1,191         | 10.20               | 14.87   | 0.41                 | 11,866.67  | 37.14          |
| 1,276         | 10.45               | 14.62   | 0.42                 | 12,713.58  | 39.79          |
| 1,425         | 10.70               | 14.37   | 0.43                 | 14,198.16  | 44.44          |
| 1,590         | 10.95               | 14.12   | 0.44                 | 15,842.16  | 49.58          |
| 1,550         | 11.20               | 13.87   | 0.45                 | 15,443.61  | 48.33          |
| 1,645         | 11.45               | 13.62   | 0.46                 | 16,390.16  | 51.30          |
| 1,712         | 11.70               | 13.37   | 0.47                 | 17,057.72  | 53.39          |
| 1,732         | 11.95               | 13.12   | 0.48                 | 17,256.99  | 54.01          |
| 1,544         | 12.20               | 12.87   | 0.49                 | 15,383.83  | 48.15          |
| 1,382         | 12.45               | 12.62   | 0.50                 | 13,769.72  | 43.09          |

Fuente. Autores del proyecto.

Figura 15. Esfuerzo Vs deformación



Fuente. Autores del proyecto

Módulo de elasticidad:

$$E = 169.59 \text{ MPa}$$

**Pellet4: 50% fibra y 50% cuesco con un tamaño de partícula entre 0.30 mm y 1.18 mm.**

$$\phi = 20.22 \text{ mm}$$

$$r = 10.11 \text{ mm}$$

*A = Área del pellet*

$$A = \pi \times (10.11 \text{ mm})^2 = 321.11 \text{ mm}^2$$

Los siguientes son los cálculos para hallar la deformación en su segundo intervalo. Este procedimiento se aplica de igual forma para todos los datos.

$$\text{Desplazamiento} = 3.35 \text{ mm}$$

$$l_f = l_o - \text{desplazamiento}$$

$$l_f = 24.36 \text{ mm} - 3.35 \text{ mm} = 21.01 \text{ mm}$$

$$D = \frac{24.36 \text{ mm} - 21.01 \text{ mm}}{24.36 \text{ mm}} = 0.14$$

$$F = 4 \text{ psi} \times \frac{1 \text{ N/cm}^2}{1.45 \text{ psi}} \times 14.45 \text{ cm}^2 = 39.85 \text{ N}$$

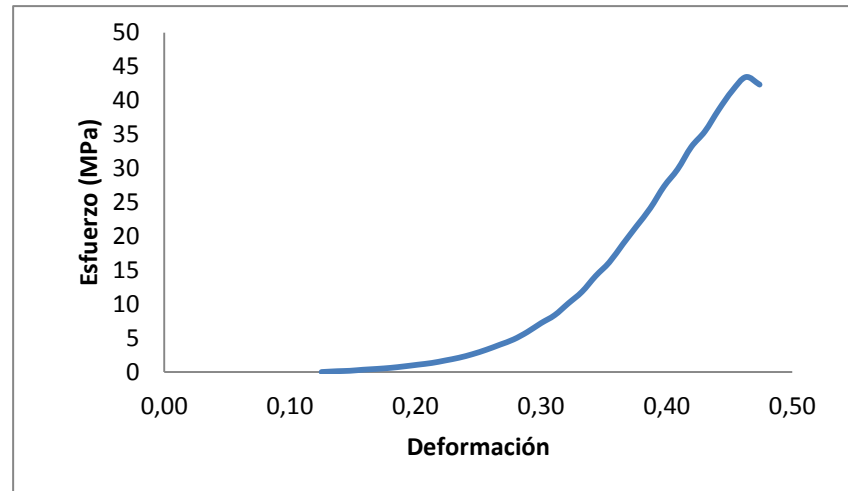
$$E = \frac{39.85 \text{ N}}{321.11 \text{ mm}^2} = 0.12 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 0.12 \text{ MPa}$$

Tabla 25. Datos esfuerzo-deformación

| Presión<br>(psi) | Desplazamiento<br>(mm) | Lf<br>(mm) | Deformación<br>unitaria | Fuerza<br>(N) | Esfuerzo<br>(MPa) |
|------------------|------------------------|------------|-------------------------|---------------|-------------------|
| 0                | 3.05                   | 21.31      | 0.13                    | 0.00          | 0.00              |
| 4                | 3.35                   | 21.01      | 0.14                    | 39.85         | 0.12              |
| 6                | 3.60                   | 20.76      | 0.15                    | 59.78         | 0.19              |
| 11               | 3.85                   | 20.51      | 0.16                    | 109.60        | 0.34              |
| 15               | 4.13                   | 20.24      | 0.17                    | 149.45        | 0.47              |
| 20               | 4.39                   | 19.97      | 0.18                    | 199.27        | 0.62              |
| 27               | 4.66                   | 19.71      | 0.19                    | 269.02        | 0.84              |
| 35               | 4.92                   | 19.44      | 0.20                    | 348.73        | 1.09              |
| 43               | 5.19                   | 19.18      | 0.21                    | 428.44        | 1.33              |
| 55               | 5.45                   | 18.91      | 0.22                    | 548.00        | 1.71              |
| 68               | 5.72                   | 18.65      | 0.23                    | 677.53        | 2.11              |
| 85               | 5.98                   | 18.38      | 0.25                    | 846.91        | 2.64              |
| 106              | 6.25                   | 18.12      | 0.26                    | 1,056.14      | 3.29              |
| 130              | 6.51                   | 17.85      | 0.27                    | 1,295.27      | 4.03              |
| 155              | 6.78                   | 17.59      | 0.28                    | 1,544.36      | 4.81              |
| 190              | 7.04                   | 17.32      | 0.29                    | 1,893.09      | 5.90              |
| 232              | 7.31                   | 17.06      | 0.30                    | 2,311.56      | 7.20              |
| 270              | 7.57                   | 16.79      | 0.31                    | 2,690.18      | 8.38              |
| 326              | 7.84                   | 16.53      | 0.32                    | 3,248.14      | 10.12             |
| 381              | 8.10                   | 16.26      | 0.33                    | 3,796.14      | 11.82             |
| 456              | 8.37                   | 16.00      | 0.34                    | 4,543.41      | 14.15             |
| 521              | 8.63                   | 15.73      | 0.35                    | 5,191.05      | 16.17             |
| 608              | 8.90                   | 15.47      | 0.37                    | 6,057.88      | 18.87             |
| 693              | 9.16                   | 15.20      | 0.38                    | 6,904.79      | 21.50             |
| 778              | 9.43                   | 14.94      | 0.39                    | 7,751.70      | 24.14             |
| 881              | 9.69                   | 14.67      | 0.40                    | 8,777.95      | 27.34             |
| 963              | 9.96                   | 14.41      | 0.41                    | 9,594.97      | 29.88             |
| 1,069            | 10.22                  | 14.14      | 0.42                    | 10,651.11     | 33.17             |
| 1,143            | 10.49                  | 13.88      | 0.43                    | 11,388.42     | 35.47             |
| 1,245            | 10.75                  | 13.61      | 0.44                    | 12,404.71     | 38.63             |
| 1,336            | 11.02                  | 13.35      | 0.45                    | 13,311.40     | 41.45             |
| 1,401            | 11.28                  | 13.08      | 0.46                    | 13,959.03     | 43.47             |
| 1,365            | 11.55                  | 12.82      | 0.47                    | 13,600.34     | 42.35             |

Fuente. Autores del proyecto.

Figura 16. Esfuerzo Vs deformación



Fuente. Autores del proyecto

Módulo de elasticidad:

$$E = 131.41 \text{ MPa}$$

**Pellet 5: 50% fibra y 50% cuesco con un tamaño de partícula  $\leq 0.30$  mm.**

$$\varnothing = 20.20 \text{ mm}$$

$$r = 10.10 \text{ mm}$$

*A = Área del pellet*

$$A = \pi \times (10.10 \text{ mm})^2 = 320.47 \text{ mm}^2$$

Los siguientes son los cálculos para hallar la deformación en su segundo intervalo. Este procedimiento se aplica de igual forma para todos los datos.

$$\text{Desplazamiento} = 3.50 \text{ mm}$$

$$l_f = l_o - \text{desplazamiento}$$

$$l_f = 27 \text{ mm} - 3.50 \text{ mm} = 23.50 \text{ mm}$$

$$D = \frac{27 \text{ mm} - 23.50 \text{ mm}}{27 \text{ mm}} = 0.13$$

$$F = 4 \text{ psi} \times \frac{1 \text{ N/cm}^2}{1.45 \text{ psi}} \times 14.45 \text{ cm}^2 = 39.85 \text{ N}$$

$$E = \frac{39.85 \text{ N}}{320.47 \text{ mm}^2} = 0.12 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 0.12 \text{ MPa}$$

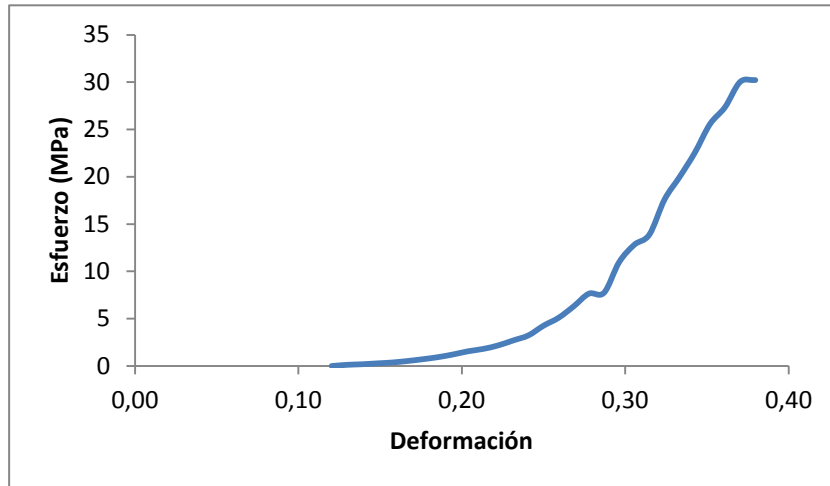
Tabla 26. Datos esfuerzo-deformación

| Presión (psi) | Desplazamiento (mm) | Lf (mm) | Deformación unitaria | Fuerza (N) | Esfuerzo (MPa) |
|---------------|---------------------|---------|----------------------|------------|----------------|
| 0             | 3.25                | 23.75   | 0.12                 | 0.00       | 0.00           |
| 4             | 3.50                | 23.50   | 0.13                 | 39.85      | 0.12           |
| 6             | 3.75                | 23.25   | 0.14                 | 59.78      | 0.19           |
| 9             | 4.00                | 23.00   | 0.15                 | 89.67      | 0.28           |
| 12            | 4.25                | 22.75   | 0.16                 | 119.56     | 0.37           |
| 17            | 4.50                | 22.50   | 0.17                 | 169.38     | 0.53           |
| 23            | 4.75                | 22.25   | 0.18                 | 229.16     | 0.72           |
| 30            | 5.00                | 22.00   | 0.19                 | 298.91     | 0.93           |
| 39            | 5.25                | 21.75   | 0.19                 | 388.58     | 1.21           |
| 50            | 5.50                | 21.50   | 0.20                 | 498.18     | 1.55           |
| 58            | 5.75                | 21.25   | 0.21                 | 577.89     | 1.80           |
| 70            | 6.00                | 21.00   | 0.22                 | 697.45     | 2.18           |
| 87            | 6.25                | 20.75   | 0.23                 | 866.84     | 2.70           |
| 104           | 6.50                | 20.50   | 0.24                 | 1,036.22   | 3.23           |
| 137           | 6.75                | 20.25   | 0.25                 | 1,365.02   | 4.26           |
| 164           | 7.00                | 20.00   | 0.26                 | 1,634.03   | 5.10           |
| 203           | 7.25                | 19.75   | 0.27                 | 2,022.62   | 6.31           |
| 246           | 7.50                | 19.50   | 0.28                 | 2,451.05   | 7.65           |
| 249           | 7.75                | 19.25   | 0.29                 | 2,480.94   | 7.74           |
| 353           | 8.00                | 19.00   | 0.30                 | 3,517.16   | 10.97          |
| 412           | 8.25                | 18.75   | 0.31                 | 4,105.01   | 12.81          |
| 447           | 8.50                | 18.50   | 0.31                 | 4,453.74   | 13.90          |
| 566           | 8.75                | 18.25   | 0.32                 | 5,639.41   | 17.60          |
| 643           | 9.00                | 18.00   | 0.33                 | 6,406.61   | 19.99          |
| 725           | 9.25                | 17.75   | 0.34                 | 7,223.63   | 22.54          |
| 822           | 9.50                | 17.50   | 0.35                 | 8,190.10   | 25.56          |
| 880           | 9.75                | 17.25   | 0.36                 | 8,767.99   | 27.36          |
| 966           | 10.00               | 17.00   | 0.37                 | 9,624.86   | 30.03          |
| 972           | 10.25               | 16.75   | 0.38                 | 9,684.64   | 30.22          |

Fuente. Autores del proyecto



Figura 17. Esfuerzo Vs deformación



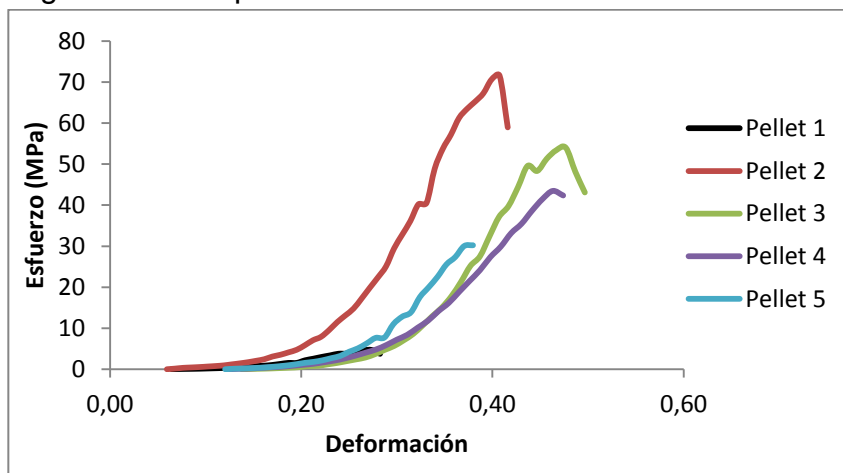
Fuente. Autores del proyecto

Módulo de elasticidad:

$$E = 117.29 \text{ MPa}$$

Finalmente, se muestra la comparación de la gráfica de esfuerzo-deformación de todos los pellets.

Figura 18. Comparación Esfuerzo-deformación



Fuente. Autores del proyecto

### 6.3.6 Material volátil

**Pellet 1: 100% cuesco con un tamaño de partícula entre 0.30 mm y 1.18 mm.**

*Masa inicial* = 9.31 g

*Masa final* = 3.13 g

$$\text{Masa perdida} = \frac{9.31 \text{ g} - 3.13 \text{ g}}{9.31 \text{ g}} \times 100 = 66.38\%$$

$$\text{Material Volátil} = 66.38\% - 8.56\% = 57.82\%$$

**Pellet 2: 100% fibra con un tamaño de partícula entre 0.30 mm y 1.18 mm.**

$$\text{Masa inicial} = 10.22 \text{ g}$$

$$\text{Masa final} = 2.35 \text{ g}$$

$$\text{Masa perdida} = \frac{10.22 \text{ g} - 2.35 \text{ g}}{10.22 \text{ g}} \times 100 = 77.00\%$$

$$\text{Material Volátil} = 77.00\% - 8.72\% = 68.28\%$$

**Pellet 3: 100% fibra con un tamaño de partícula  $\leq 0.30$  mm.**

$$\text{Masa inicial} = 10.03 \text{ g}$$

$$\text{Masa final} = 1.98 \text{ g}$$

$$\text{Masa perdida} = \frac{10.03 \text{ g} - 1.98 \text{ g}}{10.03 \text{ g}} \times 100 = 80.26\%$$

$$\text{Material Volátil} = 80.26\% - 6.70\% = 73.56\%$$

**Pellet 4: 50% fibra y 50% cuesco con un tamaño de partícula entre 0.30 mm y 1.18 mm.**

$$\text{Masa inicial} = 9.71 \text{ g}$$

$$\text{Masa final} = 2.02 \text{ g}$$

$$\text{Masa perdida} = \frac{9.71 \text{ g} - 2.02 \text{ g}}{9.71 \text{ g}} \times 100 = 79.20\%$$

$$\text{Material Volátil} = 79.20\% - 8.98\% = 70.22\%$$

**Pellet5: 50% fibra y 50% cuesco con un tamaño de partícula  $\leq 0.30$  mm.**

$$\text{Masa inicial} = 10.47 \text{ g}$$

*Masa final* = 2.00 g

$$\text{Masa perdida} = \frac{10.47 \text{ g} - 2.00 \text{ g}}{10.47 \text{ g}} \times 100 = 80.90\%$$

*Material Volátil* = 80.90% – 6.89% = 74.00%

### 6.3.7 Proceso de quemado

Se realizó la quema de los pellets para determinar su reacción en el momento de ignición. Su tiempo de incineración se tomó como (A) y el momento en el que se produjo humo (B), este se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 27. Quema de pellets

|         | Pellet 1 | Pellet 2 | Pellet 3 | Pellet 4 | Pellet 5 |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| A (min) | 18       | 28       | 46       | 40       | 56       |
| B (min) | 2        | 1        | 2        | 1        | 2        |

Fuente. Autores del proyecto

### 6.3.8 Poder calorífico

Los resultados obtenidos indican que los pellets tienen un poder calorífico que se encuentran alrededor de 17,186.81 kJ/kg, siendo el No. 2 el más factible con 18,421.92 kJ/kg, lo que demuestra la amplia energía que este posee.

**Pellet 2: 100% fibra con un tamaño de partícula entre 0.30 mm y 1.18 mm.**

*Peso de muestra* = 1.01g

*Temperatura del agua de trabajo* = 25 °C

Lo anterior dio como resultado un poder calorífico de:

$$H_g = 18,34 \frac{\text{J}}{\text{g}} = 4,380.67 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}}$$

*Incremento de la temperatura* = 2.10 °K

## 7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 7.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

#### 7.1.1 Análisis Último

Los resultados obtenidos en la tabla 4, muestran que la biomasa tiene propiedades ambientales adecuadas, con un bajo contenido de azufre (0.20%), siendo este una de las impurezas más preocupantes y problemáticas, ya que durante la combustión se transforma en  $\text{SO}_2$  y  $\text{SO}_3$  formando compuestos corrosivos en las calderas como costras, además de los gases que emite a la atmósfera provocando la lluvia ácida. De igual manera, este análisis muestra que la humedad es la adecuada, indicando que este material va a ser fácilmente manejable, no se atascará en las tolvas y su combustión va a ser rápida.

Comparando este análisis último con el de la investigación realizada por SITI SHAWALLIAH, Idris; NORAZAH ABD Rahman y KHUDZIR Ismail<sup>29</sup>, los resultados allí registrados son muy parecidos, donde el porcentaje de azufre fue del 0.23% el de carbono 51.52%, el de nitrógeno 1.89%, el de hidrógeno 5.45% y el poder calorífico de 19,000 kJ/kg.

Por otro lado, aunque el contenido de nitrógeno fue bajo (1.14%), este no debe ser mayor a 0.60% ya que puede causar problemas relacionados con las emisiones de óxido de nitrógeno.

En cuanto a la generación de  $\text{CO}_2$ , el alto contenido de H/C indica un menor nivel de  $\text{CO}_2$  en los gases por unidad de energía producida. Además, la biomasa tiene emisiones potencialmente bajas de este contaminante con respecto al carbón.

Por último, cabe destacar que el poder calorífico de la biomasa es muy similar al de la madera, el cual oscila de 18,800 a 20,00 kJ/kg, indicando su gran capacidad para generar energía.

---

<sup>29</sup>SITI SHAWALLIAH, Idris; NORAZAH ABD Rahman y KHUDZIR Ismail. Combustion characteristics of Malaysian oil palm biomass, sub-bituminous coal and their respective blends via thermogravimetric analysis (TGA). Bioresource Technology. 2012 Vol. 123. p. 581-591.

### **7.1.2 Contenido de lignina**

La lignina es un polímero (componente de la madera) el cual realiza múltiples funciones vitales para la vida de las plantas. Entre sus principales funciones se encuentran, proporcionar rigidez a la pared celular y actuar como puente de unión entre las células, creando así un material resistente a los impactos y compresiones. Además, los tejidos lignificados protegen la biomasa de ataques de microorganismos, actuando como un fungicida.

Por tal motivo, la lignina presente en la biomasa de palma de aceite (81.80%) actúa como un agente aglutinante, permitiéndole a esta densificarse por sí sola sin necesidad de usar químicos o alguna otra sustancia, la cual pueda afectar el ambiente por medio de la emisión de gases contaminantes.

## **7.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS PELLETS**

### **7.2.1 Densidad**

De acuerdo a la norma Austriaca ÖNORM M 7135, la densidad de los pellets debe ser  $\geq 1,12 \text{ kg/dm}^3$ , siendo los pellets 3 y 5 los que cumplieron con este parámetro. Una mayor densidad implica un menor volumen, lo que favorece su manejo, almacenamiento y transporte, reduciendo costos y demostrando la viabilidad de estos pellets a ser manipulados con mayor facilidad que los demás.

De igual forma, se comparó la variación de la densidad del biocombustible 24 horas después de su elaboración, señalando un cambio poco significativo.

Así mismo, se observó el comportamiento de la densidad de los pellets según su composición (Figura 11), indicando que los pellets 3 (100% fibra con un tamaño de partícula  $\leq 0,30 \text{ mm}$ ) y 5 (50% cuesco y 50% fibra con un tamaño de partícula  $\leq 0,30 \text{ mm}$ ) presentaron una mejor densidad, lo que demuestra que entre menor sea el tamaño de partícula de la materia prima mejor será su densidad.

Además, para poder aprovechar el potencial energético que pueden entregar los pellets, es necesario tener en cuenta la densidad de estos. A mayor densidad y mayor poder calorífico, el biocombustible

representa más energía por volumen ocupado. Es por esto, que al tener una densidad mayor a  $1 \text{ kg/dm}^3$ , los pellets pueden generar grandes cantidades de energía por kilogramo de sustancia en el proceso de combustión.

## 7.2.2 Contenido de humedad

El porcentaje de humedad desempeña un papel importante en todo biocombustible, ya que determina la facilidad de compactación de la materia prima y la estabilidad y durabilidad de los pellets. Es por esta razón que la biomasa se pudo densificar fácilmente ya que su porcentaje de humedad fue del 8.17%, siendo que TRIPATHI *et al.*,<sup>30</sup> en su investigación sugiere un 10-15% de contenido de humedad de la biomasa para la fabricación de pellets.

De otro lado, el contenido de humedad está directamente relacionado con la densidad de los pellets, ya que si la biomasa tiene mucha humedad estos no compactarán de la manera adecuada, por lo tanto quedará más espacio entre las partículas y por ende ocuparán más volumen, además se generarán fisuras y grietas.

Con respecto a la norma Austriaca ÖNORM M 7135, el contenido de humedad debe ser  $\leq 18.0\%$ , por lo que todos los pellets elaborados indican que tienen un buen porcentaje. No obstante, los pellets 3 y 5 presentan el mejor contenido. Una baja humedad revela que los pellets generarán una rápida combustión, por lo que su poder calorífico será alto, ya que no desperdiciará tanta energía en la evaporación del agua.

## 7.2.3 Resistencia al impacto (Porcentaje de durabilidad)

En la tabla 16 se puede observar que el pellet 1 sólo soporta dos caídas, debido a las condiciones del material (100% cuesco), indicando que este no soporta movimientos bruscos, ni fuertes caídas, por lo que su almacenamiento y transporte requieren de un mayor cuidado. Caso contrario ocurrió con el resto de los pellets en especial el tercero (100% fibra), el cual soportó cuatro caídas y no presentó rompimientos aunque si algunas fallas, como se muestra en la figura 19.

---

<sup>30</sup>TRIPATHI Arun, IYER P.V.R y KANDPAL Tara. A techno-economic evaluation of biomass briquetting in India. Biomass and Bioenergy. 1998. Vol. 14. p. 479–488.

Figura 19. Pellet No. 3 tras cuatro caídas.



Fuente. Autores del proyecto.

Es por tal motivo, que elaborar un pellet con 100% cuesco no es factible, debido a que este no tiene los ligamentos que si posee la fibra para que las partículas se unan entre sí, las cuales impiden la disipación de la fuerza del impacto sobre el pellet.

Por tanto, se puede decir que los pellets de fibra o una combinación de fibra-cuesco tienen una mayor capacidad de absorber golpes y energía sin romperse, ya que este material el cual contiene celulosa (fibras) actúa como barrera para distribuir la energía provocada al momento de impactar los biocombustibles.

#### 7.2.4 Esfuerzo de compresión

La tabla 21 deja ver la máxima presión que soportan los pellets ante la acción de una fuerza, demostrando que el pellet con una mejor compresión es el 2 y el que presenta una menor compresión es el pellet 1, lo anterior debido a las diferentes biomásas utilizadas (cuesco y fibra).

Esto ratifica el análisis anterior, que un pellet el cual contenga fibra soportará movimientos violentos de una mejor forma, debido a que es más difícil romper la unión que existe entre partículas, esto por las características que posee esta biomasa.

Por otra parte, se comparó el esfuerzo de compresión de los pellets frente a la investigación realizada por HUSAIN *et al.*,<sup>31</sup> en donde sometieron los pellets a una fuerza vertical, dando como resultado una resistencia a la compresión promedio de  $2.56 \text{ kN/m}^2$ , es decir  $0.03 \text{ MPa}$ . Esto indica que los pellets elaborados en esta investigación, son mucho más resistentes a la acción de una fuerza.

---

<sup>31</sup> HUSAIN. Op. cit., p. 3.

## 7.2.5 Módulo de elasticidad

En la figura 13 se representa el esfuerzo de los pellets en función de la deformación unitaria. Se puede observar que al aumentar el esfuerzo de los pellets, la deformación unitaria también se incrementó, pero al reducir el esfuerzo, los materiales no recobraron su estado original. Esto indica que son materiales plásticos puesto que adquirieron una deformación permanente.

Por lo tanto, se puede decir que los pellets son materiales frágiles, ya que su ruptura ocurrió poco después del límite elástico.

De otro lado, se comparó el módulo de elasticidad de los pellets con el de la madera, teniendo este último una mejor capacidad de resistir un esfuerzo, ya que su  $\varepsilon$  esta entre 7,580.81 y 121,361.63 MPa frente a 215.34 MPa de los pellets.

## 7.2.6 Material volátil

El contenido de material volátil es de vital importancia en la velocidad de combustión, ya que en un combustible rico en volátiles estos se desprenden más rápido produciéndose una disminución en su masa y formándose gases que arden rápidamente, por tanto debe haber una menor producción de hollín, monóxido de carbono e hidrocarburos y se esperaría una combustión completa.

De otro lado, el alto contenido de material volátil ayuda a que la llama en el proceso de combustión sea de mayor longitud.

Por consiguiente, al tener los pellets un alto porcentaje de volatilidad (> 50%), se demuestra que estos arden con gran facilidad, además que la llama en el proceso de combustión es de muy buena calidad.

También se comparó el porcentaje de material volátil (MV) con la investigación de GALLIPOLLITI *et al.*,<sup>32</sup> en donde registraron un 60.90% de MV, indicando que el porcentaje reportado en esta investigación es mayor.

---

<sup>32</sup> GALLIPOLLITI, V. et al. Fabricación de briquetas con aserrín blanco de pino. Análisis inmediato y obtención de su poder calorífico. Argentina. 6 p.



### **7.2.7 Proceso de quemado**

En la tabla 27 se puede observar el tiempo que dura quemándose cada pellet, siendo el 3 y el 5 los que más duran en este proceso. Esto se debe principalmente a que el contenido de humedad de estos dos biocombustibles es menor, por lo que no es necesario invertir tanta energía en la eliminación del agua, por ende el periodo de tiempo de quemado va a ser mayor.

De otro lado, se puede apreciar que aunque la generación de humo de los pellets se produce al poco tiempo de iniciar el proceso de quemado, se tiene la ventaja que la combustión es completa y el CO<sub>2</sub> que se produce es neutro.

### **7.2.8 Poder calorífico**

Analizando los resultados del poder calorífico de los pellets, se puede decir que aunque se obtuvieron valores menores a los del carbón, este biocombustible es capaz de generar una gran cantidad de energía por kilogramo de sustancia en el proceso de combustión.

Además, los pellets de palma de aceite presentan un mayor poder calorífico con respecto a muchos otros residuos agrícolas, como la cáscara de café, los tallos de algodón, la cáscara de cacao, la cáscara de arroz, el aserrín, entre otros, los cuales registran valores de 11,000 a 16,000 kJ/kg frente a los 18,000 kJ/kg de los pellets, indicando que estos son una fuente potencial de energía.

Cabe resaltar que el buen resultado del poder calorífico de estos materiales se debe en gran parte a su adecuada densidad y a su bajo contenido de humedad. Entre mayor sea la densidad, mayor será la energía que el pellet pueda entregar por volumen ocupado. Así mismo, un porcentaje de humedad inferior al 10% permite que el pellet se quemara con mayor facilidad, al no tener que gastar su energía en evaporar el agua de este.

## 8. CONCLUSIONES

Este estudio evaluó el comportamiento de la biomasa de palma de aceite en la elaboración de pellets, determinando que es un buen biocombustible, ya que su porcentaje de lignina es alto al igual que su poder calorífico. Además, la densificación de la biomasa en forma de pellets, gránulos u otros, reduce los costos generados en su manipulación y almacenamiento y aumenta la energía entregada, puesto que es mayor el poder calorífico de la biomasa prensada que sin prensar.

La factibilidad de la biomasa se comprobó por medio de cinco condiciones de proceso a partir de fibra, cuesco y una mezcla de fibra-cuesco, donde es claramente identificable que los pellets 2 (100% fibra con un tamaño de partícula entre 1.18 y 0.30 mm) y 3 (100% fibra con un tamaño de partícula < 0.30 mm) presentan las condiciones adecuadas para ser un buen biocombustible, ya que su contenido de humedad, densidad y la reacción ante diversas pruebas de resistencia mecánica sobresalen a las demás; caso contrario ocurre con el pellet 1 (100% cuesco) el cual no presenta las características adecuadas, debido a su desfavorable reacción ante algunos ensayos.

Lo anterior se encuentra plenamente relacionado con el tipo de biomasa, ya que la fibra es el complemento que necesita el cuesco para compactar de una mejor forma, debido a que éste cuenta con pequeños filamentos capaces de unir las partículas. De igual forma, el alto módulo de elasticidad que presenta la fibra ayuda a recibir gran parte de la presión, soportándola mejor que el cuesco.

Por otra parte, las características visuales de los pellets ratifican lo anteriormente expuesto, ya que un buen pellet se identifica por tener una superficie lisa y brillante, no presentar grietas y no desmoronarse en su manejo, por lo que se puede concluir que elaborar un pellet con 100% biomasa de cuesco no desempeña un buen trabajo como biocombustible, pero elaborar un pellet con 100% fibra o una mezcla de cuesco-fibra si es viable y factible.

Como resultado del proceso experimental, es adecuado decir que si se desea obtener un pellet con una longitud mayor se debe agregar más biomasa y por lo tanto aplicar más presión. En este caso, el biocombustible tiene una pequeña longitud, debido a que si se añadía más biomasa y se compactaba con una presión de 40 Bar, este tendía hacia la deformación. Esto a su vez se relaciona con el tamaño de partícula, puesto que a un tamaño de partícula menor se debe aplicar una mayor presión.

También se encuentra una amplia dependencia entre el comportamiento del pellet y la humedad de la biomasa, ya que esta es la principal causa de la formación de fallas en los pellets. Así mismo, si se calienta la biomasa al momento de iniciar su proceso de prensado, la presión necesaria será menor, debido a que la acción de calor en la biomasa hace que se active la lignina, compactándose de una mejor manera.

De igual manera, debido a su forma cilíndrica los pellets mostraron una óptima combustión, mayor a 40 min. Además se quemaron uniformemente comenzando desde la capa externa y evolucionando hacia el interior, indicando que su combustión será más lenta y la generación de gases contaminantes se verá reducida.

Además, al ser viable la producción de pellets, se encuentra una solución al exceso de residuos generados y a la contaminación atmosférica producida por los gases de efecto invernadero. Así mismo, se considera viable la sustitución de combustibles tradicionales por pellets, ya que aunque 1 kg de carbón genera un poder calorífico de aproximadamente 29,500 kJ/kg, con 1.6 kg de pellets se puede entregar el mismo calor, evitando así los impactos que se causan al ambiente desde la exploración hasta el consumo de este combustible fósil.

Por último, se realizó una investigación con residuos de biomasa de palma de coco, con el fin de identificar su factibilidad para la fabricación de pellets. Esta se hizo por medio de convenios interinstitucionales e internacionales ya que se llevó a cabo en el Instituto Tecnológico de Sonora ITSON en Ciudad Obregón, Sonora, México. Sus resultados se muestran en el Anexo B.

## 9. RECOMENDACIONES

Después de verificar que la biomasa de palma de aceite es útil para la fabricación de pellets y con el propósito de fortalecer más las investigaciones con esta biomasa, se recomiendan las siguientes actividades:

Ampliar la aplicación de los pellets en estudios de pirolisis, cofiring y gasificación, para la obtención de otros biocombustibles y/o compuestos químicos. Esto podría incrementar el valor agregado de los pellets.

Para lo antes mencionado se hace importante, estudiar las velocidades de combustión por lo cual se sugiere realizar estudios y pruebas con diferentes condiciones en una balanza termogravimétrica (TGA).

Para analizar los efectos de transferencia de calor se recomienda realizar una investigación sobre cómo desarrollar un correcto análisis mediante una cámara termográfica, similar a la disponible en la Universidad Libre.

Se aconseja iniciar un estudio sobre el efecto de variar la presión para los pellets. Se sugiere utilizar las características del pellet No. 3 e incrementar la presión.

Se recomienda realizar un estudio de campo empleando estos pellets en una caldera y verificar la eficiencia de operación de este proceso, junto con un estudio de los gases de combustión generados. En este estudio se puede utilizar el analizador de gases disponibles en la Universidad.

## 10. GLOSARIO

Dentro de los conceptos más importantes para la realización de este proyecto se encuentran los siguientes:

**BIOMASA:** “Se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros)”.<sup>33</sup>

**PELLET:** “Los pellets se pueden definir como la densificación o compactación de la biomasa por la aplicación de presión. Se distinguen de las briquetas por su tamaño. Los Pellets tienen típicamente una longitud de 5 mm a 30 mm, en comparación con las briquetas que pueden ir desde 30 mm a 200 mm de diámetro y tener una longitud de 50 mm a 400 mm”.

**COMPOSICIÓN QUÍMICA Y FÍSICA:** Todas las formas de biomasa consisten en una parte orgánica, una inorgánica y agua. En la combustión se quema la parte orgánica. La inorgánica influye en el proceso de combustión y forma la ceniza o residuo sólido que queda después de la combustión. Los elementos químicos más importantes son carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), azufre (S) y, en algunos casos, cloro (Cl). Esta composición química determina el tipo de combustible o subproducto energético que se puede generar. Por otro lado, las características físicas influyen en el tratamiento previo que sea necesario aplicar.<sup>34</sup>

**CONTENIDO DE HUMEDAD:** “Relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%”.<sup>35</sup>

**DENSIDAD APARENTE:** Esta se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que presenta, bajo condiciones dadas. Combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requiriéndose menores tamaños de los equipos y aumentando los períodos entre cargas. Por otro lado, materiales con baja densidad aparente necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte y, algunas veces, presentan problemas para fluir por

---

<sup>33</sup>Manuales sobre Energía Renovable. Biomasa. San José. Costa Rica. BUN-CA. 2002. p. 4.

<sup>34</sup>Ibíd., p. 10.

<sup>35</sup>Ibíd., p. 10.

gravedad, lo cual complica el proceso de combustión y eleva los costos del proceso.<sup>36</sup>

**DISEÑO EXPERIMENTAL:** El diseño de experimentos hace referencia a una serie de técnicas estadísticas de investigación que permiten establecer diferencias o relaciones entre las variables de un problema a través de métodos científicos, buscando comprobar o rechazar hipótesis para la toma de decisiones.

El diseño experimental busca entonces a través de una serie de herramientas estadísticas aplicar y metodizar los ensayos de prueba y error para encontrar la mejor combinación de variables independientes que optimice una variable de respuesta en unas circunstancias determinadas<sup>37</sup>.

**MÓDULO DE ELASTICIDAD:** Representa el grado de rigidez de un material y es el resultado de dividir su esfuerzo unitario entre su deformación unitaria correspondiente.

**PODER CALÓRICO:** El contenido calórico por unidad de masa es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa. Su poder calórico está relacionado directamente con su contenido de humedad. Un elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia de la combustión debido a que una gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material.<sup>38</sup>

**PODER CALORÍFICO INFERIOR O NETO:** Cantidad de energía disponible después de la evaporación del agua en la biomasa; es decir, es la cantidad de energía realmente aprovechable.<sup>39</sup>

**PODER CALORÍFICO SUPERIOR:** Cuando el calor latente de condensación del agua está incluido en el valor calórico, se conoce como el poder calórico superior (PCS) o el valor de calentamiento más alto.<sup>40</sup>

**PORCENTAJE DE CENIZAS:** “El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. En los procesos que incluyen la combustión de la biomasa, es importante conocer el porcentaje de generación de ceniza y su composición, pues, en algunos casos, ésta puede ser utilizada como aditivos o en la fabricación de filtros de carbón activado”<sup>41</sup>

---

<sup>36</sup> *Ibíd.*, p. 11.

<sup>37</sup> CORDERO SÁENZ, Néstor. “El diseño experimental”. {En línea}. {07 Octubre de 2012}. Disponible en: ([http://ingenierias.usergioarboleda.edu.co/index.php?option=com\\_k2&view=item&id=205:el-dise%C3%B1o-experimental&Itemid=235](http://ingenierias.usergioarboleda.edu.co/index.php?option=com_k2&view=item&id=205:el-dise%C3%B1o-experimental&Itemid=235))

<sup>38</sup> *Ibíd.*, p. 10.

<sup>39</sup> *Ibíd.*, p. 49.

<sup>40</sup> CHANEY, Joel. Combustion Characteristics of Biomass Briquettes. Universidad de Nottingham. Inglaterra. 2010. 60 p.

<sup>41</sup> *Ibíd.*, p. 10.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

1. ANZIL, Federico. Biocombustibles. {En línea}. {22 de Octubre de 2012}. Disponible en: (<http://www.zonaeconomica.com/biocombustibles>).
2. AQEEL AHMED, Bazmi; GHOLAMREZA, Zahedi y HASLENDHA, Hashim. Progress and challenges in utilization of palm oil biomass as fuel for decentralized electricity generation. 2011. Vol 15. 547 – 583 p.
3. ARANGO GAVIRIA, Martha Lucia y FERNANDEZ PACHECO, Milton Ricardo. Fabricación de una briqueta cilíndrica Carbón-Biomasa. Biobriqueta. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 1993. 114 p.
4. ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. D 3175 – 02. Estados Unidos. 4 p.
5. Austrian Standard. Technical Committee 241. Energy from solid biofuels. Compressed wood and compressed bark in natural state – Pellets and briquettes. ÖNORM M 7135. Edition: 2000-11-01. Austria. 2000. 10 p.
6. BAKKER, Robert. Estado e implicaciones de los residuos de la biomasa de palma de aceite. En: Palmas. 2013. Vol. 34, No. Especial, Tomo II. p 1-9.
7. BASU, Prabir. Biomass Characteristics. En: Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design and Theory. Burlington: Elsevier Inc, 2010. p 27-63
8. CABEZAS ARÉVALO, Ruth. Diseño de un sistema de compactación de biomasa de cascarilla de arroz y aserrín, en la producción de bloques sólidos combustibles (BSC). Tesis de grado Ingeniero Químico. Riobama – Ecuador. Escuela superior politécnica de Chimborazo. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 2009. 135 p.
9. CARONE, María Teresa; PANTALEO, Antonio y PELLERANO, Achille. Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L. En: Biomass and bioenergy. 2011. Vol 35. p. 402-410.

10. CARVAJAL, Christian. *et al.* Densificación de biomasa mediante el uso de pellet con contenido de cáscara de coco y aserrín. Colombia. 6 p.
11. Carvajal, C., Espitia, L., Gordillo, J., y Martínez, C. Densificación de biomasa mediante el uso de pellet con contenido de cáscara de coco y aserrín. Universidad Nacional de Colombia.
12. CHANEY, Joel. Combustion Characteristics of Biomass Briquettes. Universidad de Nottingham. Inglaterra. 2010. 228 p.
13. CHEN, Longjian; XING, Li y HAN, Lujia. Renewable energy from agro-residues in China: Solid biofuels and biomass briquetting technology. China: Elsevier, 2009.
14. COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 697. (03, Octubre, 2001). Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogotá D.C., 2001. No. 44573. 4 p.
15. COLOMBIA. PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA. Decreto 2811. (18, Diciembre, 1974). Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Bogotá D.C.: La Presidencia, 1974. 62 p.
16. CORDERO SÁENZ, Néstor. “El diseño experimental”. {En línea}. {07 Octubre de 2012} disponible en: ([http://ingenierias.usergioarboleda.edu.co/index.php?option=com\\_k2&view=item&id=205:el-dise%C3%B1o-experimental&Itemid=235](http://ingenierias.usergioarboleda.edu.co/index.php?option=com_k2&view=item&id=205:el-dise%C3%B1o-experimental&Itemid=235)).
17. Diana. Almidón de yuca. {En línea}. {10 de Octubre de 2012}. Disponible en: (<http://comercializadoraliz.blogspot.com/2009/02/almidon-de-yuca.html>).
18. ESCALANTE HERNÁNDEZ, Humberto, *et al.* Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. Colombia. 180 p.
19. ESMIOL, Sophie. Aceite de palma: usos, orígenes e impactos. Amigos de la tierra, 2008.
20. FEDEPALMA. Historia de la palma de aceite. {En línea}. {15 de Octubre de 2012}. Disponible en: (<http://portal.fedepalma.org//palma.htm>).



21. FEDERACIÓN NACIONAL DE CULTIVADORES DE PALMA DE ACEITE. FEDEPALMA. La agroindustria de la palma de aceite en Colombia. 2 ed. Colombia. 2006. 36 p.
22. FEDERACIÓN NACIONAL DE CULTIVADORES DE PALMA DE ACEITE FEDEPALMA. Boletín económico - Balance económico del sector palmero colombiano en el tercer trimestre de 2010. Colombia, 2010.
23. FENGMIN, Li y MINGQUAN, Zhang. Technological Parameters of Biomass Briquetting of Macrophytes in Nansi Lake. China: Elsevier: 2011. Vol. 5. p. 2449 – 2454.
24. FINELL, Michael, *et al.* Briquetting of fractionated reed canary-grass for pulp production. Suecia: Elsevier: 2002. Vol. 16. p. 185-192.
25. FONSECA FELFI, Felix, *et al.* Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. Brazil: Elsevier: 2011. Vol. 35. p. 236-242.
26. Forero, C., Jochum, J., Sierra, F. (2012). Characterization and feasibility of biomass fuel pellets made of Colombian timber, coconut and oil palm residues regarding European standards. *Environmental Biotechnology*, 8, 67-76.
27. FORERO NÚÑEZ, Carlos Andrés, *et al.* Estudio preliminar del potencial energético de cuesco de palma y cáscara de coco en Colombia. En: *Revista Ingeniería Solidaria*. 2012. Vol. 8. N° 14. p. 19-25.
28. FORERO NÚÑEZ, Carlos Andrés; GUERRERO FAJARDO, Carlos Alberto y SIERRA VARGAS, Fabio Emiro. Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de gasificación. Colombia. 10 p.
29. FORTALECIMIENTO DE LA CAPACIDAD EN ENERGÍA RENOVABLE PARA AMÉRICA CENTRAL. Manuales sobre energía renovable Biomasa. 1 ed. San José, Costa Rica.: BUN-CA, 2002. 52 p.
30. Fundación Produce de Guerrero, A.C., 2012, Agenda de Innovación-Guerrero. Coco p.305

31. GALLIPOLITI, V. *et al.* Fabricación de briquetas con aserrín blanco de pino. Análisis inmediato y obtención de su poder calorífico. Argentina. 6 p.
32. GÓMEZ, Alexander; KLOSE, Wolfgang y RINCÓN Sonia. Pirólisis de biomasa – Cuesco de palma de aceite. Universidad Nacional de Colombia – Universidad de Kassel Alemania. 2008. p. 15-21.
33. HARIMI, Mohamed, *et al.* Numerical analysis of emission component from incineration of palm oil wastes. En: Biomass and Bioenergy. 2005. Vol. 28. p. 339-345.
34. HERNÁNDEZ J., ORTIS M., MENDEZ A., CAMPILLO L., 2008, Morfodinámica de la línea de costa del estado de Tabasco, México: tendencias desde la segunda mitad del siglo XX hasta el presente. Investigaciones geográficas Instituto de Geografía UNAM, Vol 65.
35. HUSAIN, Z; ZAINAC, Z y ABDULLAH, Z. Briquetting of palm fibre and shell from the processing of palm nuts to palm oil. Malasia: Pergamon, 2002. Vol. 22. p. 505 – 509.
36. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Gestión Ambiental. Residuos Sólidos. Guía para la separación en la fuente y la recolección selectiva. GTC-24. Bogotá D.C.: El Instituto, 2003. 16 p.
37. INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA. Biomasa: Cultivos energéticos. España. 2007. 56 p. ISBN-13: 978-84-96680-17-3.
38. KALIYAN, Nalladurai y VANCE MOREY, R. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. En: Biomass and Bioenergy. 2009. Vol. 33. p. 337-359.
39. KARKANIA, V; FANARA, E y ZABANIOTOU, A. Review of sustainable biomass pellets production – A study for agricultural residues pellets' market in Greece. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Vol.16. p. 1426-1436.
40. KONG, Lingjun, *et al.* Effect of waste wrapping paper fiber as a “solid bridge” on physical characteristics of biomass pellets made from wood sawdust. En: Applied Energy. 2012. Vol. 98. p. 33-39.

41. MAHESWARI C., REDDY O., MUZENDA E., GUDURI B., RAJULU A. (2012). Extraction and characterization of cellulose microfibrils from agricultural residue e Cocos nucifera. *Biomass and bioenergy*, 44, 555-563.
42. MARQUEZ LASSO, Ismael. Gasificación por lecho fijo de fibra obtenida en el proceso de extracción del aceite de palma africana. Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica. Bogotá D.C.: Universidad de Los Andes. Facultad de Ingeniería. 2012. 81 p.
43. MELISSARI, Blas. Evaluación de Tecnologías de Quema de Biomasa en el Uruguay. Uruguay. 2011. 12 p. ISSN 1510-7450.
44. MOHAMED, Harimi, *et al.* Numerical analysis of emission component from incineration of palm oil wastes. *Biomass and Bioenergy*. 2005. Vol. 28. p. 339-345.
45. PUZANOV, A, *et al.* Strength of briquettes in relation to compaction pressure with variable linear dimensions of particles and moisture content. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2007. Vol. 48. p. 31-36.
46. QUALITY STANDARDS for pellets in European countries. [Anónimo]. {En línea}. {07 Octubre de 2012}. Disponible en: <http://www.pelletcentre.info/cms/site.aspx?p=2550>.
47. ROMERO SALVADOR, Arturo. Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. En: Revista Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 2010. Vol. 104. N° 2. p. 331-345.
48. SALAZAR TRUJILLO, Jorge Eduardo. Resistencia de materiales básica para estudiantes de Ingeniería. Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales. 2007. 68 p.
49. SALOMÓN, Marianne; GOMEZ, Maria Fernanda y MARTIN, Andrew. Technical polygeneration potential in palm oil mills in Colombia: A case study. En: Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2013. Vol. 3. p. 40-52.
50. SITI SHAWALLIAH, Idris; NORAZAH ABD Rahman y KHUDZIR Ismail. Combustion characteristics of Malaysian oil palm biomass, sub-


bituminous coal and their respective blends via thermogravimetric analysis (TGA). *Bioresource Technology*. 2012 Vol. 123. p. 581-591.

51. STELTE, Wolfgang, *et al.* A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources. En: *Biomass and Bioenergy*. 2011. Vol.35. p. 910-918.
52. STELTE, Wolfgang, *et al.* Fuel pellets from biomass: The importance of THE pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. En: *Fuel*. 2011. Vol. 90. p. 3285-3290.
53. TABIL, Lope; ADAPA, Phani y KASHANINEJAD, Mahdi. Biomass Feedstock Pre-Processing – Part 2: Densification. En: *Biofuel's Engineering Process Technology*. 2011. Dr. Marco Aurelio Dos Santos Bernardes. p. 439-464.
54. TAPPI TEST METHODS. Technical Association of the Pulp and Paper Industry. TAPPI T 222 os-74. TAPPI Press, Atlanta. 1999.
55. TRIPATHI Arun, IYER P.V.R y KANDPAL Tara. A techno-economic evaluation of biomass briquetting in India. *Biomass and Bioenergy*. 1998. Vol. 14. p. 479–488.
56. UPM; IDEAM; COLCIENCIAS; UIS. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia – Anexo A. Biomasa fuente renovable de energía. Ministerio de minas y energía.
57. XUTAO, Wang y BAILIANG, Zhang. Application and problems of biomass briquetting densification fuel (BBDF) technology in China. China. Proceedings of ISES Solar World Congress 2007: Solar Energy and Human Settlement. 2458 – 2461 p.
58. YAMAN, S, *et al.* Fuel briquettes from biomass–lignite blends. *Turquía: Elsevier*. 2001. vol. 71. 1-8 p.
59. YUMAK, Hasan; UCAR, Tamer y SEYIDBEKIROGLU, Nesim. Briquetting soda weed (*Salsola tragus*) to be used as a rural fuel source. *Turquía. Elsevier*. 2010. Vol. 34. 630-636 p.
60. ZARRINGHALAM-MOGHADDAM A, *et al.* Physical properties of solid fuel briquettes from bituminous coal waste and biomass. *China: Journal of coal Science & Engineering*: 2011. Vol. 17. p. 434-438.

61. ZHAO, Fang., *et al.* Standardized processes of biomass briquetting densification fuel. China. 2012. Vol. 14. 5 p.
62. ZHOU, Sheng y ZHANG, Xiliang. Prospect of briquetting biomass fuel by forest residues in Tibet. China: Korean J. Chem. Eng: 2007. Vol. 24. p. 170-174.

## 12. ANEXOS

### ANEXO A. ANÁLISIS ÚLTIMO BIOMASA DE PALMA DE ACEITE

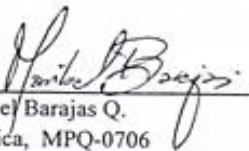
|  |   |   |  |   |
|--|---|---|--|---|
|  <b>SERVICIO GEOLÓGICO<br/>COLOMBIANO</b><br><small>Minerías y Geología<br/>República de Colombia</small> | <b>INFORME DE RESULTADOS<br/>DE ANÁLISIS DE ENSAYOS Y SERVICIOS</b> |   |  | GLQ - 661                                     |
|  | <b>LABORATORIO DE<br/>CARBONES</b>                                  |   |  | 11-12-2012<br>F-LAB-PES-006 V.2<br>pag 1 de 1 |
| <b>SOLICITANTE</b>   |   | <b>SERVICIO GEOLOGICO/UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA:<br/>PROYECTO DE GASIFICACION</b><br>caforeron@gmail.com, sguerra@ingeo Minas.gov.co,<br>brodriguez@ingeo Minas.gov.co |  |   |
| <b>DIRECCION</b>   |   | Diag 53 No. 34-53   |  |   |
| <b>TELEFONO / FAX</b>  |   | 2200252/541   |  |   |
| <b>TIPO DE MUESTRA</b>   |   | Vegetales y polimero  |  |   |
| <b>PROCEDENCIA</b>   |   | No indicada   |  |   |
| <b>SOLICITUD No.</b>   |   | 171-I de 07-03-2012   |  |   |

| ID MUESTRA                                | 41576-I                            | 41577-I                  | 41578-I                  | NORMA ASTM    |
|---|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------|
| <b>REFERENCIA DEL CLIENTE</b>             | Almidón<br>de yuca<br>(18/11/2012) | Polimero<br>(18/11/2012) | Palma AF<br>(18/11/2012) |               |
| <b>Resultados en base como se recibe:</b> |                                    |                          |                          |               |
| Humedad (105°C), % masa                   | 13,28                              | 16,99                    | 8,17                     | D-3173-03(08) |
| Azufre, % masa                            | 0,04                               | 2,87                     | 0,20                     | D-4239-08     |
| Poder calorífico, Btu/lb                  | 6407                               | 7620                     | 7385                     | D-5865-04     |
| Poder calorífico, J/g                     | 14896                              | 17717                    | 17170                    | D-5865-04     |
| Carbono, % masa                           | 38,11                              | 34,63                    | 45,21                    | D - 5373-08   |
| Hidrógeno, % masa                         | 6,89                               | 8,29                     | 6,37                     | D - 5373-08   |
| Nitrógeno, % masa                         | 0,07                               | 10,90                    | 1,14                     | D - 5373-08   |

**Notas**

- Los resultados del presente informe corresponden exclusivamente a las muestras recibidas y no a otros materiales de la misma procedencia.
- El Laboratorio no se hace responsable de las posibles interpretaciones surgidas por la reproducción parcial del informe.

  
 Maribel Barajas Q.  
 Química, MPQ-0706

SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO  
 Diagonal 53 No 34 - 53, Bogotá, D. C. Teléfonos 220 02 52 - 220 02 56  
 www.ingeo Minas.gov.co

## ANEXO B. INVESTIGACIÓN REALIZADA EN EL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA ITSON EN CIUDAD OBREGÓN, SONORA, MÉXICO.

Esta investigación se realizó con el objetivo de determinar la factibilidad de la biomasa residual de palma de coco, en la elaboración de pellets. Se escogió este tipo de biomasa, ya que es un residuo potencial en esta zona, además México tiene 24,945 km de línea costera (HERNÁNDEZ, *et al*) ocupando el noveno lugar a nivel mundial en la producción de palma de coco, con una participación del 1.28% (FUNDACIÓN PRODUCE DE GUERRERO, A.C.)<sup>42</sup>. En este caso se utilizaron los residuos producidos en la Laguna Náinari de Ciudad Obregón (27°29'38"N y 109°56'20"O), Sonora, México (7.48 ton/mes) para la obtención de pellets.

Con base en la experiencia adquirida en Colombia con la biomasa residual de la palma de aceite se realizó un diseño de experimentos por prueba y error, tomando como factor las diferentes combinaciones de porcentaje de fibra y cuesco y su comportamiento ante el proceso de prensado, dando como resultado siete formulaciones adecuadas.

Tabla 28. Tratamientos para la elaboración de pellets de biomasa palma de coco

| No. pellet | Porcentaje de materia prima | Tamaño de partícula | Presión |
|------------|-----------------------------|---------------------|---------|
| 1          | 100% fibra                  | ≤0.30 mm            | 127 Bar |
| 2          | 50% cuesco<br>50% fibra     | ≤0.30 mm            | 127 Bar |
| 3          | 50% cuesco<br>50%fibra      | 0.30 mm - 1.18 mm   | 127 Bar |
| 4          | 70% fibra<br>30% cuesco     | ≤ 0.30 mm           | 127 Bar |
| 5          | 100% fibra                  | 0.30 mm - 1.18 mm   | 127 Bar |
| 6          | 50% cuesco<br>50%fibra      | 0.30 mm - 1.18 mm   | 127 Bar |
| 7          | 70%fibra<br>30% cuesco      | 0.30 mm - 1.18 mm   | 127 Bar |

Fuente. Autores del proyecto

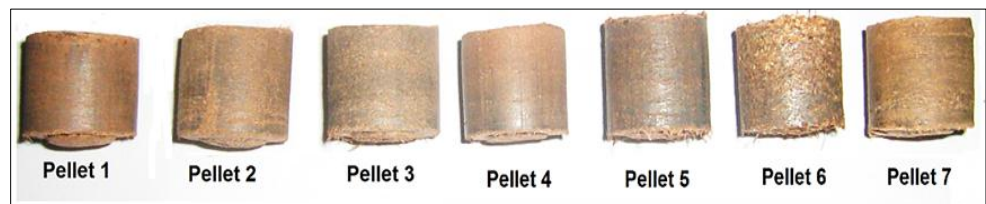
<sup>42</sup> Fundación Produce de Guerrero, A.C. (2012). Agenda de Innovación- Guerrero. Coco, 305.

Inicialmente, la biomasa pasó por un proceso para obtener las características adecuadas para la elaboración del pellet, el cual se muestra a continuación:



Finalmente la biomasa pasó por un proceso de prensado a 127 Bar y se obtuvieron los pellets.

Figura 20. Pellets con biomasa de palma de coco



Fuente. Autores del proyecto

Posterior a esto, fueron analizadas las características físico-químicas y de resistencia mecánica de la biomasa y los pellets, dadas a continuación:

**Porcentaje de lignina:** Se evaluó cuesco y fibra donde el contenido de lignina fue de 64.6% y 59.4% respectivamente. Aunque este no es tan alto, en comparación con la biomasa de palma de aceite (81.80%); tiene la propiedad de ser agente aglutinante, además es considerablemente mejor al obtenido por Maheswari et al. (2012), en



dónde se caracterizó el Cocos nucifera y el contenido de lignina fue de 32.2%.

### Propiedades físico-químicas de los pellets

En la siguiente tabla se presentan los resultados de las pruebas realizadas:

Tabla 29. Resultados de pellets con biomasa de palma de coco

| No. de Pellet | Densidad (kg/dm <sup>3</sup> ) |              | Humedad (%) | Material volátil (%) | Durabilidad (%) | Módulo de elasticidad (Mpa) | Poder calorífico (kJ/kg) |
|---------------|--------------------------------|--------------|-------------|----------------------|-----------------|-----------------------------|--------------------------|
|               | Después de prensado            | 24 h después |             |                      |                 |                             |                          |
| 1             | 0.79                           | 0.79         | 8.38        | 84.49                | 98.71           | 79.96                       | 8,276.01                 |
| 2             | 0.87                           | 0.87         | 6.89        | 87.57                | 80.24           | 122.77                      | 3,912.02                 |
| 3             | 0.86                           | 0.82         | 6.52        | 88.47                | 79.40           | 177.28                      | 6,731.70                 |
| 4             | 0.90                           | 0.88         | 7.50        | 86.90                | 95.79           | 119.62                      | 4,426.70                 |
| 5             | 0.83                           | 0.77         | 8.14        | 86.45                | 99.16           | 176.91                      | 2,469.29                 |
| 6             | 0.79                           | 0.77         | 6.37        | 89.28                | 43.02           | 137.63                      | 1,842.11                 |
| 7             | 0.84                           | 0.84         | 7.26        | 86.55                | 64.04           | 50.93                       | 4,205.39                 |

Fuente. Autores del proyecto

**Densidad:** Los pellets de la tabla 29 no cumplen con lo establecido en la norma, aunque el pellet 4 fue el que mostró un mejor comportamiento con 0.90 kg/dm<sup>3</sup>, siendo esto acorde con lo estudiado por CARVAJAL *et al.*,<sup>43</sup> donde la densidad de los pellets elaborados con 100% fibra de coco (pellet 1) es baja (< 1kg/dm<sup>3</sup>), lo que fortalece el resultado obtenido. Finalmente, se comparó la variación de la densidad de los biocombustibles 24 horas después de su elaboración, demostrando que no hubo un cambio significativo.

**Contenido de humedad:** Se observó, que la biomasa se pudo densificar fácilmente, ya que, en los dos casos (pellets de biomasa de palma de aceite y palma de coco) el porcentaje de humedad fue óptimo. Igualmente, se cumple con la norma ÖNORM M 7135 (Austrian Standard, 2000). Por otra parte, se encuentra una amplia relación entre el contenido de humedad y la composición de cada pellet; en el caso de los pellets con biomasa de palma de aceite se obtuvo un mejor resultado cuando el tamaño de partícula es más

<sup>43</sup> CARVAJAL, C., *et al.* Densificación de biomasa mediante el uso de pellet con contenido de cáscara de coco y aserrín. Universidad Nacional de Colombia.

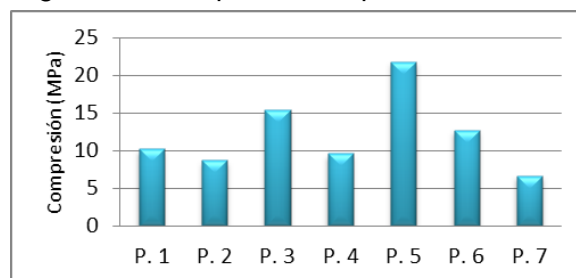
bajo y en el caso de los pellets de palma de coco se presentó un mejor comportamiento cuando existe una combinación 50% - 50% entre fibra y cuesco. Además, este es menor comparado con lo obtenido por FORERO *et al*<sup>44</sup>, en donde elaboraron pellets a partir de coco, cuyo contenido de humedad fue del 12%.

**Material volátil:** En los dos tipos de pellets se obtuvo un buen resultado, demostrando, que la llama en el proceso de combustión será de mayor longitud. Los pellets de palma de coco obtuvieron un resultado acorde con algunas investigaciones realizadas, como la reportada por CARVAJAL *et al.*,<sup>45</sup> cuyo porcentaje se encuentra entre 80 y 85%.

**Resistencia al impacto (porcentaje de durabilidad):** Ambos tipos de pellet (biomasa de palma de aceite y palma de coco) presentan un buen comportamiento al ser sometidos a una fuerte manipulación, indicando que las biomásas tienen una extensa capacidad para absorber golpes sin romperse, ya que este material contiene celulosa (fibras) que actúa como barrera para distribuir la energía provocada al momento de impactar los biocombustibles.

**Esfuerzo de compresión:** Los pellets realizados con biomasa de palma de coco, muestran un resultado ligado con la biomasa (figura 21), ya que la fibra soporta movimientos violentos de una mejor forma.

Figura 21. Compresión de pellets con biomasa de palma de coco



Fuente. Autores del proyecto

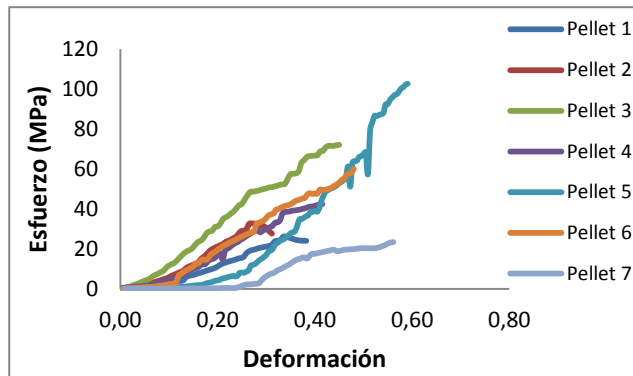
**Módulo de elasticidad:** Se encuentra una similitud entre los pellets de biomasa de palma de aceite y palma de coco, donde la biomasa

<sup>44</sup> FORERO, C., JOCHUM, J., SIERRA, F. (2012). Characterization and feasibility of biomass fuel pellets made of Colombian timber, coconut and oil palm residues regarding European standards. *Environmental Biotechnology*, 8, 67-76.

<sup>45</sup> CARVAJAL. Op. cit., p. 69.

tiene un comportamiento plástico puesto que adquirieron una deformación permanente, pero al mismo tiempo es frágil, ya que la ruptura del pellet ocurrió poco después del límite elástico.

Figura 22. Esfuerzo Vs deformación pellets con biomasa de palma de coco



Fuente. Autores del proyecto

**Poder calorífico:** Se presenta una gran diferencia entre los pellets de palma de aceite y palma de coco, donde el poder calorífico, en el caso de los pellets con biomasa de palma de coco, fue muy bajo al reportado en diversas investigaciones, como la de FORERO *et al* de 18,810.75 kJ/kg. Este valor está sujeto a variaciones ya que en el Instituto Tecnológico de Sonora no había un protocolo estándar del procedimiento.

### Conclusiones

Las biomásas utilizadas presentan las características adecuadas de fuentes energéticas. Los pellets de palma de aceite muestran un alto porcentaje de lignina y un alto poder calorífico, lo que se debe en gran parte a su adecuada densidad y a su bajo contenido de humedad. En el caso de los pellet con biomasa de palma de coco se presenta una baja densidad y un deficiente poder calorífico, debido a las circunstancias antes mencionadas sobre un procedimiento estándar por lo que se puede concluir que esta biomasa no es la adecuada para elaborar pellets. Sin embargo, se resalta que este resultado no implica que no sea una importante fuente energética, por el contrario, existen otros procesos como pirolisis, gasificación, termólisis en las que se puede utilizar este residuo para generar energía.

**Estas investigaciones fueron expuestas en:**

- II Congreso Nacional de Biotecnología y Ciencias Alimentarias. Del 23 al 25 de Octubre de 2013.
- IX Reunión Nacional de Bioenergía. Del 28 al 30 de Octubre de 2013.
- X Semana de Ingeniería Química del Instituto Tecnológico de Sonora ITSON. Del 12 al 15 de Noviembre de 2013.

**Publicadas en:**

- Revista - Tecnologías para la Bioenergía en México. 2013. ISBN: 978-607-609-059-6 (Edición electrónica), con el artículo titulado *“Elaboración de pellets a partir de material lignocelulósico proveniente de palma de aceite”*.

**Se encuentra en proceso de evaluación:**

- Revista Environmental Technology ISSN 0959-3330 (Print), 1479-487X (Online), con el artículo titulado *“Pellets elaboration from residual biomass from coconut palm (cocos nucifera)”*.
- Revista AVANCES Investigación en Ingeniería ISSN 1794-4953, con el artículo titulado *“Características de materiales lignocelulósicos para la fabricación de pellets-estudio de caso residuos de palma de aceite y palma de coco”*.