

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**Estudio de la influencia del porcentaje de arcilla en la calidad  
de las briquetas de hojas de caña de azúcar mediante  
ensayos físicos y térmicos**

**Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico, que presenta el  
bachiller:**

**JAN BRAULIO VICENTE VARGAS**

**ASESOR: Mg. Estela Assureira Espinoza**

**Lima, Enero del 2017**

## RESUMEN

En el presente trabajo se muestran los resultados de la calificación en la calidad de briquetas de hojas de caña de azúcar (HCA) por medio de ensayos físicos y térmicos, para distintas formulaciones elaboradas, siendo la variable el porcentaje de arcilla en un rango de [0-15%].

En primer lugar se procedió a clasificar las HCA dentro de la biomasa, para de esta manera estimar sus características físico-químicas, con el fin de predecir su comportamiento como combustible en un proceso de conversión energética. Luego se identificaron las técnicas y procesos para la elaboración de densificados a baja presión, realizando una breve descripción de los densificados y los factores que intervienen en su proceso. Seguidamente se relaciona la densificación con el proceso de aglomeración, ya que en este se evalúan y se relacionan los enlaces formados por los aglutinantes (arcilla y fécula), con los resultados obtenidos en la caracterización de las distintas formulaciones. Además, se mencionan los ensayos de evaluación de briquetas, los cuales permiten evaluar la calidad de las briquetas elaboradas.

En el desarrollo de la parte experimental, se realizó tanto una caracterización física y química de la HCA, lo que permitió establecer una serie de pre-tratamientos, los cuales consistían en la reducción granulométrica de la HCA y un proceso intermedio de lavado el cual permitió reducir los índices de álcalis de las HCA y evitar problemas operacionales como la corrosión, incrustaciones (*fouling*) y las escorias (*slagging*).

Una vez finalizado los pre-tratamientos, se procedió a realizar las 4 formulaciones de briquetas, siendo la estructura la siguiente: 75% HCA y 25% aglutinante (arcilla y fécula), del cual se varió el porcentaje de arcilla en [0 – 5 – 10 – 15%]. Para ello se realizó el proceso de densificado a baja presión utilizando una briqueteadora manual con una presión de trabajo de 150 bares. Una vez obtenida la briqueta se realizó el secado de la misma durante 4 horas utilizando un horno eléctrico a 90°C.

Por último, se realizaron los ensayos de resistencia a la compresión, impacto, esponjamiento y de combustión. De los cuales se obtuvo como resultado final, un promedio de las características que presentaba cada formulación en los ensayos descritos. A medida que se incrementa el porcentaje de arcilla como aglutinante en la mezcla, la calidad de la briqueta disminuye, obteniéndose como resultado briquetas con menor calidad y resistencia.



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**Estudio de la influencia del porcentaje de arcilla en la calidad de las briquetas de  
hojas de caña de azúcar mediante ensayos físicos y térmicos**

Introducción

1. Las hojas de caña de azúcar en procesos termoquímicos
2. Tecnología de densificación a baja presión
3. Desarrollo de formulaciones teniendo como variable el porcentaje de arcilla
4. Ensayos de evaluación física y térmica de densificados
5. Análisis de resultados

Observaciones y recomendaciones

Conclusiones

Bibliografía

ANEXOS

*Máximo: 100 páginas*

Mg. Estela Assureira E.  
Asesora



**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

TÍTULO : Estudio de la influencia del porcentaje de arcilla en la calidad de las briquetas de hojas de caña de azúcar mediante ensayos físicos y térmicos

ÁREA : Energía # 380

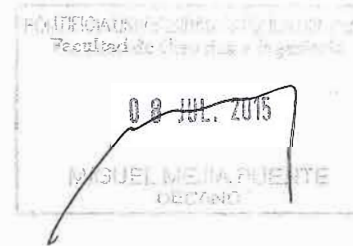
PROPUESTO POR : Mg. Estela Assureira

ASESOR : Mg. Estela Assureira

TESISTA : Jan Braulio Vicente Vargas

CÓDIGO : 2007.0474

FECHA : 7 de julio del 2015



**DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:**

En el Perú, la industria cañera constituida por las empresas dedicadas a la producción de etanol, azúcar y sus derivados, es una importante fuente generadora de residuos (hojas, cogollos, bagazo, médula).

Las investigaciones realizadas por el Grupo de Investigación Carbón Biomasa (GICB), identificó que anualmente se generan 2'000,000 toneladas métricas de hojas de caña (HCA) con un contenido energético de 660,000 toneladas equivalentes de petróleo.

Los procesos de pre-tratamiento aplicados a HCA como parte del trabajo de investigación realizados por el GICB lograron mejoras significativas en las características del residuo al reducir el porcentaje cenizas así como los álcalis. Con la finalidad de incrementar la densidad se está trabajando en el desarrollo de densificados empleando para ello diversos componentes orgánicos como inorgánicos.

Los trabajos de densificación preliminares aplicados a HCA empleando un aglomerante orgánico y "arcilla" como material adición mostraron buenos resultados en la calidad del densificado, por lo que ahora se requiere determinar el porcentaje más adecuado.

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**AVISO**

Se pone en conocimiento de los señores graduados, que el Consejo Universitario, con fecha 04 de noviembre de 1987, a través de la Resolución N° 243/87, y con el fin de facilitar la preparación de catálogos de tesis, ha dispuesto que para tramitar la expedición de grado o título se requiere, además de lo ya establecido, presentar un **“RESUMEN DE TESIS”**, en aproximadamente 30 líneas.

Cada ejemplar de la tesis que se presenta en Secretaría debe tener una copia del citado resumen, inmediatamente después de la carátula interna debidamente engomada y además se presenta dos copias del resumen en hojas separadas que servirán para el archivo de la Facultad y para el trámite del diploma correspondiente.

Esta disposición regirá a partir del 02 de enero de 1988.

San Miguel, 02 de diciembre de 1987

El Decano



*A mí amada esposa e hijos por darme su apoyo y amor en todo momento.*

*A mí tía por sus sabios consejos en el transcurso de mis estudios.*

*A mis suegros por su apoyo constante e incondicional.*

*A mi asesora por su constante apoyo y consejos en el transcurso de mis estudios.*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi esposa Briceida Marrull Gamarra, por sus consejos y comprensión. Además de su constante esfuerzo, apoyo y amor, lo cual ha permitido alcanzar este logro en mi vida.

De igual manera, agradezco a mi tía Nury Vargas Rodriguez, por sus consejos, apoyo y cariño, a lo largo de toda mi vida.

A mis abuelos Humberto Vargas Serpa y Marcela Rodriguez Perez, por su cariño y apoyo, a lo largo de toda mi vida.

A mis suegros Alfonso Marrull Ramirez y María Jesús Gamarra Zarate, por su cariño y apoyo incondicional.

A mis padres Braulio Vicente Santa Cruz y Fanny Vargas Rodriguez por ayudarme en iniciar y finalizar mis estudios.

A mi asesor la Mg. Estela Assureira Espinoza y al investigador Ing. Marco Assureira Espinoza, por haberme guiado, aconsejado y dedicado tiempo a lo largo de todo el proceso de realización del trabajo.

Finalmente, a mis compañeros de trabajo Ing. Gonzalo Aguilar Chumpitaz, Ing. Luis Bastidas Espinoza, Ing. Guillermo Moreno Zavala y Lic. Lesly Lagos Araujo, quienes me apoyaron a lo largo de la realización del trabajo.

# Índice

Introducción .....	1
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos .....	3
Hipótesis.....	4
Capítulo 1 .....	5
Las hojas de caña de azúcar en procesos termoquímicos.....	5
1.1 Biomasa energética.....	5
1.1.1 Clasificación de la biomasa .....	5
1.1.2 Ventajas y Desventajas .....	6
1.1.3 Procesos de conversión energética de la biomasa .....	7
1.2 Caña de azúcar .....	7
1.2.1 Características.....	7
1.2.2 Clima .....	8
1.2.3 Cosecha .....	9
1.2.4 Aprovechamiento.....	13
1.2.5 Residuos Agrícolas Cañeros (RAC).....	14
1.3 Problemas asociados a su empleo en procesos termoquímicos.....	17
Capítulo 2 .....	19
Tecnología de densificación a baja presión .....	19
2.1 Densificación .....	19
2.1.1 ¿Qué es un densificado?.....	19
2.1.2 Tecnologías de densificación.....	21
2.1.3 Caracterización de las briquetas.....	24
2.2 Aglomeración .....	25
2.2.1 Mecanismo de enlace para los aglomerados.....	25
2.2.2 Fuerzas en la aglomeración.....	27



2.2.3	Clasificación de los métodos de aglomeración .....	28
2.3	Variables del proceso de densificación .....	30
2.3.1	Estado de la materia prima .....	30
2.3.2	Presión y Temperatura .....	31
2.3.3	Tiempo de permanencia .....	31
2.3.4	Aglomerantes .....	31
2.4	Evaluación de Briquetas .....	33
2.4.1	Ensayos de Resistencia al impacto .....	34
2.4.2	Ensayos de Compresión.....	35
2.4.3	Ensayos de relajación o esponjamiento.....	35
2.4.4	Ensayos de resistencia a la abrasión.....	35
2.4.5	Resistencia a la absorción de Agua.....	36
2.4.6	Ensayos de combustión.....	36
Capítulo 3	.....	38
Desarrollo de formulaciones teniendo como variable el porcentaje de arcilla.....		38
3.1	Métodos y materiales.....	38
3.1.1	Materiales.....	38
3.1.2	Metodología de trabajo .....	43
3.2	Estadística para validación .....	46
3.3	Elaboración de las briquetas.....	47
3.3.1	Recepción de la materia prima .....	47
3.3.2	Muestreo .....	48
3.3.3	Trozado .....	49
3.3.4	Molienda.....	51
3.3.5	Cribado.....	52
3.3.6	Lavado .....	53
3.3.7	Secado .....	56
3.3.8	Análisis de caracterización química .....	57

3.3.9	Molienda y cribado .....	59
3.3.10	Desarrollo del proceso de densificado .....	61
3.3.11	Secado .....	64
Capítulo 4	.....	67
Ensayos de evaluación física y térmica de densificados	.....	67
4.1	Ensayo de compresión .....	67
4.2	Ensayo de impacto .....	69
4.3	Esponjamiento.....	72
4.4	Ensayo de Combustión.....	73
Capítulo 5	.....	76
Análisis de resultados	.....	76
5.1	Resultados del ensayo de compresión e impacto.....	76
5.2	Resultados de esponjamiento.....	77
5.3	Resultados del análisis químico de las HCA.....	78
5.4	Resultados del ensayo de combustión .....	79
5.5	Selección de la mejor formulación .....	80
Observaciones y recomendaciones	.....	82
Conclusiones	.....	84
Bibliografía	.....	86

## Índice de Tablas

### Capítulo 1

Tabla 1. 1 Composición de la caña de azúcar .....	8
Tabla 1. 2 Principales requerimientos climáticos.....	9
Tabla 1. 3 Producción de caña de azúcar .....	13
Tabla 1. 4 Composición vegetativa de la caña de azúcar en su madurez. ....	14
Tabla 1. 5 Parámetros físicos, químicos y energéticos de la biomasa. ....	16

### Capítulo 3

Tabla 3. 1 Caracterización de las HCA de recepción. ....	41
Tabla 3. 2 Análisis inmediato, elemental y poder calórico de las HCA vírgenes.....	41
Tabla 3. 3 Análisis de ceniza de HCA vírgenes. ....	42
Tabla 3. 4 Formulación general. ....	44
Tabla 3. 5 Cantidad de briquetas por formulación.....	44
Tabla 3. 6 Procesos y equipos utilizados en el laboratorio.....	45
Tabla 3. 7 Criterio de Chauvenet para el rechazo de lecturas.....	47
Tabla 3. 8 Datos y resultados del proceso de trozado. ....	50
Tabla 3. 9 Resultados del proceso de molienda.....	51
Tabla 3. 10 Resultados del proceso de cribado. ....	52
Tabla 3. 11 Datos obtenidos en el ensayo de lavado.....	54
Tabla 3. 12. Variación del peso en los procesos de lavado y secado.....	56
Tabla 3. 13 Análisis inmediato, elemental y poder calórico HCA lavadas.....	58
Tabla 3. 14 Análisis de ceniza HCA lavadas.....	59
Tabla 3. 15 Datos y resultados obtenidos del proceso de molienda.....	60
Tabla 3. 16 Datos y resultados obtenidos del proceso de cribado. ....	60
Tabla 3. 17 Densidad aparente de HCA $X < M50$ . ....	61
Tabla 3. 18 Densidad aparente de HCA $M50 < X < M30$ . ....	61
Tabla 3. 19. Registro de formulaciones elaboradas variando el % de arcilla.....	65

### Capítulo 4

Tabla 4. 1 Resultados medios del ensayo de compresión. ....	69
---	----

Tabla 4. 2 Registro y resultados del índice de resistencia al impacto.....	71
Tabla 4. 3 Valores promedio de las mediciones.....	72
Tabla 4. 4 Datos del ensayo de combustión. ....	75
<b>Capítulo 5</b>	
Tabla 5. 1 Carga formulación B-D.....	77
Tabla 5. 2 Poder Calorífico y % de ceniza de las formulaciones elaboradas.....	79
Tabla 5. 3 Importancia de las características del biocombustible.....	80
Tabla 5. 4 Criterio de calificación de las características del biocombustible.....	81
Tabla 5. 5 Calificación de las formulaciones. ....	81



## Índice de Ilustraciones

### Capítulo 1

Ilustración 1. 1 Clasificación de la Biomasa. ....	6
Ilustración 1. 2 Tipo de extracción de energía de la biomasa.....	7
Ilustración 1. 3 Corte manual de HCA quemada. ....	10
Ilustración 1. 4 Quema de caña de azúcar previa cosecha. ....	11
Ilustración 1. 5 Emisiones de humo y partículas. ....	11
Ilustración 1. 6 Cosechadora Mecánica John Deere .....	12
Ilustración 1. 7 Esquema de aprovechamiento de la caña de azúcar.....	13
Ilustración 1. 8 Principales Rendimientos Promedios Mundiales 1992-2011.....	14

### Capítulo 2

Ilustración 2. 1 Briquetas y pellets. ....	20
Ilustración 2. 2 Sistema de compactación mediante ruedas formadoras.....	21
Ilustración 2. 3 Densificación por extrusión.....	22
Ilustración 2. 4 Densificación por impacto.....	22
Ilustración 2. 5 Briqueteadora con gata hidráulica y tornillo de potencia. ....	23
Ilustración 2. 6 Pelletizadora de matriz anular.....	23
Ilustración 2. 7 Pelletizadora de matriz plana.....	24
Ilustración 2. 8 Disco pelletizador. ....	24
Ilustración 2. 9 Forma de las briquetas. ....	25
Ilustración 2. 10 Mecanismos de aglomeración que actúan sobre las partículas. ....	26

### Capítulo 3

Ilustración 3. 1 Esquema de las capas octaédricas y tetraédricas. ....	39
Ilustración 3. 2 Arcilla utilizada como aglutinante. ....	39
Ilustración 3. 3 Tamaño de recepción de las HCA. ....	48
Ilustración 3. 4 Saco de HCA.....	48
Ilustración 3. 5 Recipiente para el cálculo de la densidad aparente. ....	49
Ilustración 3. 6 (a) Proceso de trozado de las HCA, (b) Tamaño de HCA cortadas.....	50
Ilustración 3. 7 (a) y (b) Recipiente para el cálculo de la densidad aparente.....	50

Ilustración 3. 8 Tamaño de HCA molidas.....	52
Ilustración 3. 9 Granulometrías obtenidas del proceso de cribado. (a) HCA $M9 < X < M6$ , (b) HCA $M16 < X < M9$ , (c) HCA $X < M16$ .....	53
Ilustración 3. 10 Ensayo del lavado de las HCA.....	54
Ilustración 3. 11 Gráfica de Temperatura vs Tiempo en el proceso de lavado. ....	55
Ilustración 3. 12 Proceso secado de las HCA. ....	56
Ilustración 3. 13 Gráfica de masa vs tiempo de HCA desde lavado hasta secado. ....	57
Ilustración 3. 14 Porcentaje de recuperación de las HCA en el cribado. ....	60
Ilustración 3. 17 Arcilla.....	62
Ilustración 3. 16 HCA $M30 < X < M50$ .....	62
Ilustración 3. 15 HCA $M50 > X$ .....	62
Ilustración 3. 18 Aglomeración HCA y arcilla .....	62
Ilustración 3. 19 Gel aglutinante.....	63
Ilustración 3. 20 Fécula.....	63
Ilustración 3. 21 Aglomerado HCA, arcilla y fécula.....	63
Ilustración 3. 22 Matriz de la briqueteadora. ....	64
Ilustración 3. 23 Briquetas de HCA. ....	64
Ilustración 3. 24 Horno de secado de briquetas. ....	65
Ilustración 3. 25 Formulaciones de Briquetas (a) B-A, (b) B-B, (c) B-C y (d) B-D....	66
<b>Capítulo 4</b>	
Ilustración 4. 1 Máquina Universal de Tracción Zwick / Roell Z050.....	68
Ilustración 4. 2 Posición horizontal de la briqueta en el ensayo de compresión. ....	68
Ilustración 4. 3 Resultados del ensayo de compresión.....	69
Ilustración 4. 4 Briqueta B-D1. ....	70
Ilustración 4. 5 Altura de lanzamiento de las briquetas 2m. ....	70
Ilustración 4. 6 Ensayo de impacto Formulación B-D.....	71
Ilustración 4. 7 Relajación vs tiempo.....	73
Ilustración 4. 8 Quemador Eco-Burner.....	74
Ilustración 4. 9 Cenizas de las briquetas (a) B-A, (b) B-B, (c) B-C y (d) B-D. ....	75

## Capítulo 5

Ilustración 5. 1 Expansión de longitud por formulación. ....78



## Introducción

En el mundo se está buscando constantemente utilizar la energía de una manera más eficiente, aprovechando al máximo la capacidad energética de la materia. Al mismo tiempo se requiere que el desperdicio o residuos que se obtengan por la utilización de la energía no sean excesivos y que no afecten el equilibrio de la naturaleza. [1]

En los dos últimos siglos, a causa de la revolución industrial, el consumo de energía a nivel mundial creció exponencialmente a lo largo de los años, realizando un gran cambio en la vida de las personas (confort y avances tecnológicos), pero también en la vida del planeta. El problema más grave que está presente es la contaminación y el efecto invernadero que es causante del calentamiento global en el planeta y por el cual se realizó el protocolo de Kioto con el objetivo de reducir las emisiones de 6 gases de efecto invernadero en un cierto porcentaje [2]. El mayor contribuyente a la emisión de estos gases contaminantes es el combustible fósil, el cual se encuentra dentro de las energías no renovables. Para disminuir en efecto la utilización de las energías no renovables, se desarrolla en la actualidad el aprovechamiento de manera más eficiente de las energías renovables.

En la actualidad, la producción de energía está dominada por energías no renovables, y un pequeño 13% por las energías renovables. Dentro de las energías renovables, la que más se produce es la bioenergía, siendo esta un 10% de los 13%, y esto se debe a que gran parte proviene de materia orgánica e industrial formada en algún proceso biológico o mecánico, generalmente es sacada de los residuos de las sustancias que constituyen los seres vivos. A la vez, esta se puede dividir en distintos tipos de combustibles, siendo el predominante el biocombustible sólido. La aplicación o consumo que se le da mayormente a la bioenergía es la de calor, debido a la forma en la que se extrae la energía de esta materia (mediante la combustión) o por la transformación en otras sustancias que pueden ser aprovechadas más tarde como combustibles. [3]

En el Grupo de Investigación Carbón y Biomasa de la PUCP se está investigando sobre el uso de biomasa residual seca como combustible, ya sea como un densificado o mediante el desarrollo de técnicas que mejoren las propiedades de la biomasa, a partir de hojas de caña de azúcar, bajo la forma de briquetas. Por experimentación, en el desarrollo de las distintas formulaciones para el densificado



a bajas presiones, se observó que el utilizar solo arcilla como aglutinante<sup>1</sup> no es conveniente, debido a que la unión no es muy fuerte; esto quiere decir que al momento del secado de la briqueta esta tiende a desmoronarse fácilmente, mientras que al utilizar solo fécula como aglutinante la briqueta no está muy aglomerada<sup>2</sup> y al secarse se producen agrietamientos grandes que terminan por romperla.

El objetivo principal del trabajo es estudiar la influencia del porcentaje de arcilla en la calidad de briquetas de hojas de caña de azúcar mediante ensayos de: resistencia a la compresión, impacto, esponjamiento y combustión.



---

<sup>1</sup> Aglutinante. Cualquier material que tenga resultados satisfactorios en la compactación bajo menos presión que la necesaria para la compactación correspondiente sin aglomerante.

<sup>2</sup> Aglomeración. Se puede definir en un aspecto científico como la agrupación de partículas pequeñas que debido a fuerzas internas o externas, forman un conjunto de mayor tamaño.

## Objetivo General

- Estudio de la influencia del porcentaje de arcilla (0 – 15%) en la calidad de briquetas de hojas de caña de azúcar para su empleo como combustible.

## Objetivos Específicos

- Definir biomasa residual y clasificación.
- Caracterización de la HCA: caña de azúcar / RAC / HCA.
- Identificar las técnicas y procesos para la densificación a baja presión.
- Estudiar los factores que intervienen e influyen en el proceso de densificación.
- Revisar y analizar las técnicas de evaluación de briquetas.
- Establecer los criterios de calificación para los densificados.
- Definir las formulaciones que se utilizarán en la densificación de las briquetas.
- Desarrollar el proceso de densificación para las condiciones solicitadas y planteadas.
- Evaluar las distintas formulaciones mediante ensayos de compresión, impacto, esponjamiento y combustión.
- Analizar los resultados.

## Hipótesis

Al emplear arcilla como aglutinante en la elaboración de densificados, se espera que ésta tenga las siguientes influencias:

- Mejorar la adhesión entre partículas, y por lo tanto presentar una mejor resistencia a la compresión e impacto.
- Permitir un mejor contacto entre partículas de la mezcla, reduciendo el esponjamiento e incrementando la durabilidad de la briqueta.



# Capítulo 1

## Las hojas de caña de azúcar en procesos termoquímicos

### 1.1 Biomasa energética

La biomasa, según la Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588, se define como: “Todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización.”

Todos los productos que conforman la biomasa, tienen su origen a partir de la energía solar; en el caso de la biomasa vegetal, se ha producido a partir de la captación y transformación de la radiación solar en energía del enlace químico mediante el proceso de fotosíntesis. Esta energía captada ha quedado acumulada en los materiales biológicos y se puede liberar en forma de calor en la oxidación de la materia orgánica que compone la biomasa y que tiene lugar en los procesos de conversión energética de la misma o transformándola en combustible.

Se debe tener en cuenta que según la definición anterior, no se considera biomasa a los combustibles fósiles o sus productos orgánicos derivados, ya que estos se generaron a partir de biomasa vegetal o animal que se enterró en ciertos periodos geológicos y que por la intervención de determinados mecanismos y condiciones se transformó en biomasa fósil.

#### 1.1.1 Clasificación de la biomasa

De lo mencionado anteriormente, se puede clasificar la biomasa como se muestra en la Ilustración 1. 1.

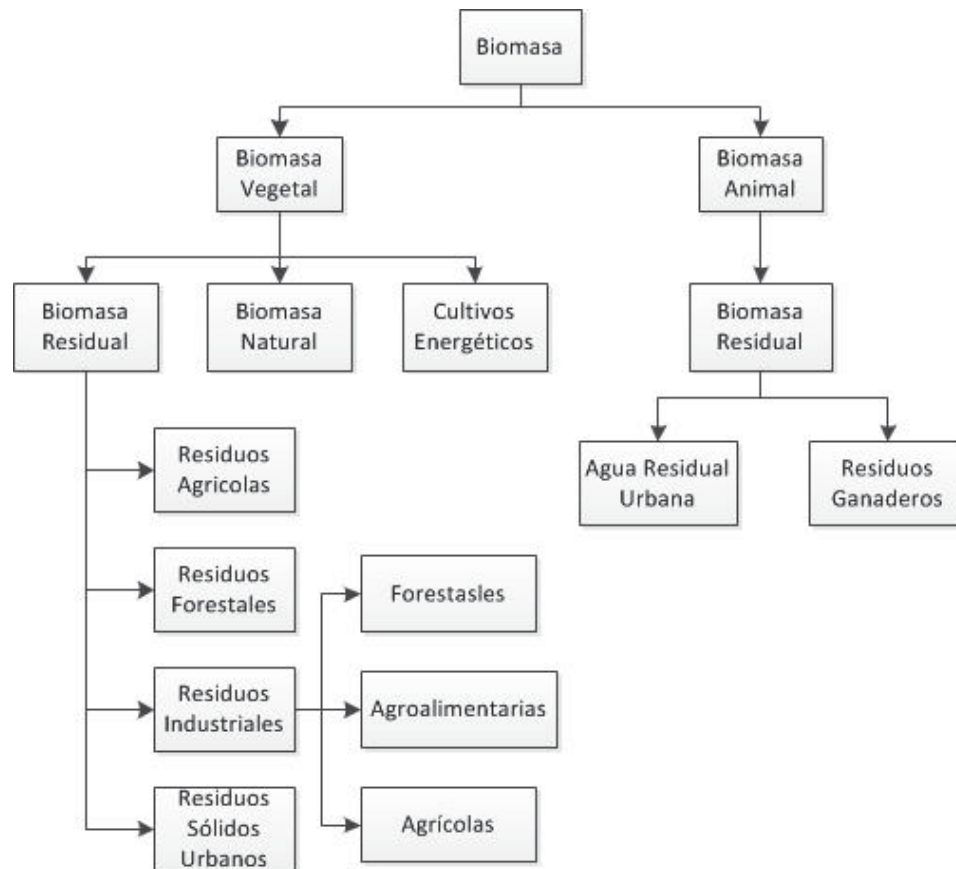


Ilustración 1. 1 Clasificación de la Biomasa. [4]

**Biomasa Residual:** Son los subproductos de determinadas actividades, tales como: ganaderas, agrícolas, forestales, industriales y domésticas.

**Biomasa Natural:** Es la que se genera en ecosistemas sin la intervención del hombre. Este tipo de biomasa no constituye una fuente de energía renovable debido a que si la velocidad de consumo supera a la velocidad de generación, se puede agotar y ocasionar un daño irreparable en el planeta.

**Cultivos Energéticos:** Son los que se llevan a cabo con el único objetivo de su valoración energética.

### 1.1.2 Ventajas y Desventajas

- La biomasa es una fuente de energía renovable y su uso no contribuye a acelerar el calentamiento global.
- La biomasa es una fuente de energía inagotable, siempre que se gestione de manera sostenible.
- Las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de la biomasa son neutras.

- Al ser la biomasa procedente de residuos, ayuda al reciclaje.
- Es una energía constante y almacenable.
- En caso se utilicen residuos forestales, la biomasa conlleva a la limpieza de los bosques, lo que ayuda a prevenir el riesgo de incendios forestales.
- Se debe evaluar la cantidad de biomasa que se genera para que el aprovechamiento resulte beneficioso como proceso y no se generen pérdidas

### 1.1.3 Procesos de conversión energética de la biomasa

La biomasa, se presenta en variedad de materiales diferentes. Las características de algunos materiales (como la leña), permiten que se puedan utilizar como combustible directamente; sin embargo, otros materiales requieren de procesos previos para su aprovechamiento. En la Ilustración 1. 2 se muestran los tipos de extracción de energía que tiene la biomasa, según el tratamiento específico.

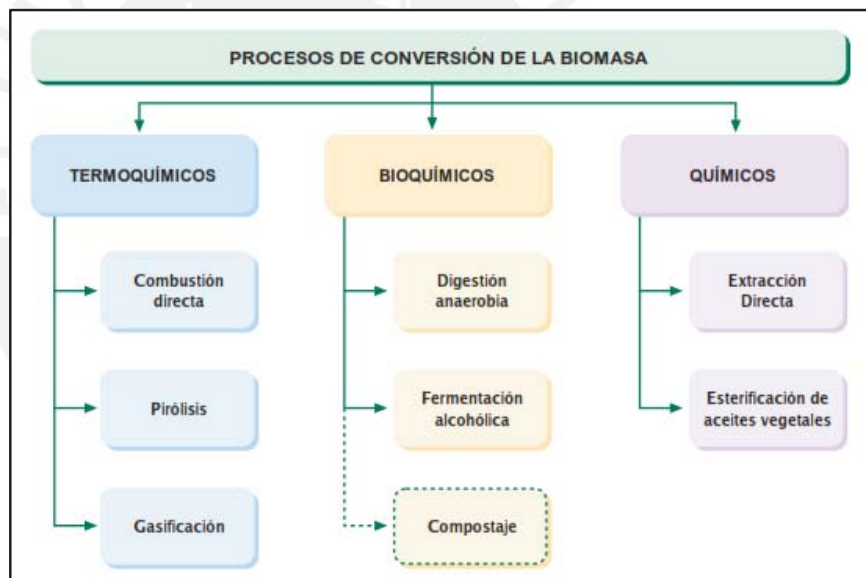


Ilustración 1. 2 Tipo de extracción de energía de la biomasa. [4]

Para mayor información sobre los procesos de conversión energética ver Anexo A.1.

## 1.2 Caña de azúcar

### 1.2.1 Características

La *Saccharum officinarum*, más conocida como caña de azúcar, pertenece a la familia de las Gramíneas, provenientes del sureste asiático. Se cultiva principalmente en Brasil, India, China, Pakistán, México y Tailandia. Tiene un tallo

macizo de 2 a 5 metros de altura con 5 ó 6 cm de diámetro. La planta de caña es el organismo que tiene más perfeccionados los procesos fisiológicos asociados a la biosíntesis, traslocación y acumulación de sacarosa. El jugo de su tronco es la principal fuente de azúcar. Prácticamente el 70% del azúcar del mundo se produce a partir de la caña. Mediante la fotosíntesis puede absorber hasta el 2% de la energía solar que recibe, para convertirla en un 14% a 17% de sacarosa y 14% a 16% de fibra. [5]

Actualmente, la caña de azúcar que se cultiva es un híbrido de dos o más de las cinco especies del género *Saccharum*: *S. barberi* Jeswiet, *S. officinarum* L., *S. robustum* Brandes & Jesw. Ex Grassl, *S. sinense* Roxb. y *S. spontaneum*. A continuación en la Tabla 1. 1 se observa la composición de la caña de azúcar.

**Tabla 1. 1 Composición de la caña de azúcar. [6]**

<b>Componentes</b>	<b>Tallos %</b>	<b>Cogollos y hojas %</b>
Materia Seca	29.00	26.00
Azúcares	15.43	2.18
Lignocelulosa	12.21	19.80
Materia a bioetanol	27.64	21.98
Cenizas y otros comp.	1.36	4.02
Agua	71.00	74.00
Total:	100.00	100.00

### 1.2.2 Clima

La caña de azúcar es cultivada en zonas de clima tropical y subtropical, entre alturas que van desde el nivel del mar hasta 1000 msnm. Las principales variables que determinan su crecimiento, calidad y rendimiento son: la temperatura, la luz y la humedad. Requiriéndose de un clima húmedo, caliente y alternando con periodos secos y temperaturas entre los 16 y 30° centígrados.

En la Tabla 1. 2, se muestran los principales requerimientos climáticos de la caña de azúcar.

Tabla 1. 2 Principales requerimientos climáticos. [6]

Lluvia-Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Luz (MJ/m <sup>2</sup> )
1,100 - 1,150	32 - 38 (Germinación)	80 - 85 (Crecimiento)	18-36
	12 - 14 (maduración)	45 - 65 (Crecimiento)	

### 1.2.3 Cosecha

La cosecha de la caña de azúcar realizada en el tiempo adecuado, o sea, en la fase de máxima maduración, mediante el empleo de una técnica adecuada, es necesaria para alcanzar el peso máximo de las cañas procesables (y por lo tanto, de azúcar) con pérdidas de campo mínimas, para las condiciones de crecimiento existentes. Una cosecha adecuada debe asegurar que:

- La caña sea cosechada en su máximo estado de madurez, evitando cortar caña sobre madura o inmadura.
- El corte de la caña debe ser hasta el suelo, para cosechar los entrenudos inferiores ricos en azúcar, aumentando la producción y el rendimiento de azúcar.
- El despunte o desmoche debe hacerse a una altura adecuada para eliminar los entrenudos superiores inmaduros.
- La caña debe estar limpia, removiendo los cuerpos extraños, tales como hojas, basura, raíces, etc.
- La caña cosechada debe enviarse rápidamente al ingenio.

#### Cosecha Manual

En muchos países la cosecha todavía se realiza en forma manual, utilizando diversos tipos de cuchillos o hachas manuales. Entre las diversas herramientas disponibles la lámina del cuchillo es la más pesada, lográndose un corte más eficiente de la caña.

La cosecha manual requiere de operarios hábiles, pues una cosecha inadecuada de la caña causa pérdidas de caña y de azúcar, dando una jugo de mala calidad y causando problemas en la planta procesadora para retirar los cuerpos extraños de la caña. [7]



Existen dos tipos de corte manual de caña de azúcar: **corte quemado y corte en verde**.

- **El corte de caña quemada** es realizado por los corteros que utilizan dos pases como se aprecia en la Ilustración 1. 3, uno para cortar la base de la caña y otro para cortar el cogollo. La caña es luego apilada para que finalmente sea alzada con uñas mecánicas. Un cortero en promedio puede procesar del orden de 5 a 6 t/día. [8]
- **El corte de caña en verde** puede ser sucio o limpio. El corte verde sucio utiliza tres pases, donde el adicional se encarga de quitar algo de hojas. Se arruma de igual forma a la caña quemada. El corte verde limpio, posee al menos dos pases de limpieza para garantizar que se remuevan todas las hojas. Por lo adicional del proceso, el rendimiento disminuye de 2 a 3 t/día. [8]



Ilustración 1. 3 Corte manual de HCA quemada. [8]

En la Ilustración 1. 4, se puede observar la forma en la que se procede a realizar la quema de la caña de azúcar previa a la cosecha.

- **Razones para la quema de las hojas de caña de azúcar:**
  - Disminuye el costo de mano de obra de la recolección
  - La eliminación de la paja facilita el riego por gravedad, la expansión de los abonos y los trabajos de cultivo
  - Incrementa la concentración de sacarosa en los tallos
  - Deja el campo limpio
  - Reducción de plagas
  - Facilita el manejo de cultivo

- Se reduce el contenido de materia extraña que se transporta y procesa



Ilustración 1. 4 Quema de caña de azúcar previa cosecha. [8]

- **Inconvenientes que ocasiona la quema en los campos de caña de azúcar:**
  - El efecto invernadero y el cambio climático estarían favoreciéndose con el aumento de  $\text{CO}_2$  producido por la quema nocturna de los RAC.
  - Contribuye al deterioro de la calidad de aire; ya que, la cantidad de partículas emanadas podrían explicar la relación entre las quemas y las enfermedades respiratorias.

La Ilustración 1. 5, se puede observar la gran cantidad de emisiones de humo y partículas suspendidas que pueden ser ocasionadas por la quema de los campos de cultivo de HCA.



Ilustración 1. 5 Emisiones de humo y partículas. [8]

### **Cosecha Mecánica**

La mano de obra disponible para la cosecha se hace cada vez más escasa y cara, debido a la migración de los operarios a otras actividades remunerativas, como la industria, construcción, negocios, etc. El cese del funcionamiento de los ingenios

debido a la ausencia de cosechadores en el campo, no es tan inusual. Muchas de los ingenios tienen una alta capacidad de molienda y muchas plantas están expandiendo su capacidad. Por lo tanto, el requerimiento diario de caña está aumentando y existe una mayor demanda por mano de obra. Adicionalmente, la mayoría de los operarios agrícolas no quieren realizar labores demasiado pesadas. De este modo, en los próximos años la colocación de la mano de obra empeorará aún más. Por esta razón, la adopción de mecanización en la cosecha de caña de azúcar será inevitable [9] (Ilustración 1. 6). Además se tiene a favor el hecho de realizar una cosecha de caña en verde lo que permitirá la recolección de los RAC y evitará la contaminación consecuencia de las quema de los RAC.



Ilustración 1. 6 Cosechadora Mecánica John Deere. [10]

### Ventajas

- En caña sin quemar se reduce el tiempo entre el corte y el transporte de la misma al ingenio.
- Se minimizan las pérdidas de sacarosa ya que la caña no se degrada tan rápidamente.
- En caña quemada se reduce también el tiempo entre la quema y el arribo de la caña al ingenio.
- En el corte manual es necesario esperar que termine el corte del campo asignado de la caña para iniciar la carga y transporte de la misma.
- La cosecha mecanizada permite cosechar las 24 horas del día.
- En algunos ingenios han reducido el costo por tonelada cosechada mecánicamente hasta un 20% respecto al costo por tonelada cosechada de forma manual.

- Se reduce el costo de administración de personal, ya que dos operadores y un encargado de la cosechadora hacen el trabajo equivalente a 100 corteros de caña.
- Eliminación del rebote (quitar el tronco de la caña que deja el cortador).
- Se eliminan todos los gastos relacionados con el manejo de 100 cortadores.

## 1.2.4 Aprovechamiento

Superficie cosechada (ha)

En el Perú existen unas 81,149 hectáreas cosechadas a diciembre del año 2012, superior en un 1.3% con respecto al mismo periodo del año anterior. Esta es la mayor superficie registrada en los últimos 30 años en el Perú. Este crecimiento en la superficie cosechada se debe fundamentalmente por el mayor consumo de los derivados de este cultivo (Ilustración 1. 7), azúcar rubia como blanca, así como en la producción de alcohol y etanol. [6]

La producción de caña de azúcar (Tabla 1. 3) viene creciendo a una tasa promedio de 1.8% en los últimos diez años entre el periodo 2002-2011. La mayor producción histórica de caña de azúcar se dio en el año 2012 con 10, 368,866 toneladas producidas.

Tabla 1. 3 Producción de caña de azúcar. [6]

Departamentos	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Lambayeque	1,274,400	1,689,427	2,111,538	2,689,532	2,982,819	2,824,848	2,748,163	2,767,051
La Libertad	2,888,892	3,284,025	3,760,283	4,345,865	4,807,415	4,911,755	4,977,202	5,234,476
Ancash	512,587	585,778	613,892	628,015	519,197	578,284	663,722	722,001
Lima	1,545,207	1,591,248	1,681,884	1,641,862	1,560,444	1,293,061	1,445,758	1,582,958
Arequipa	82,979	95,354	116,090	90,685	67,069	52,947	50,091	62,380
TOTAL	6,304,065	7,245,833	8,283,686	9,395,959	9,936,945	9,660,895	9,884,936	10,368,866



Ilustración 1. 7 Esquema de aprovechamiento de la caña de azúcar. [6]

Los rendimientos promedio de caña de azúcar (Ilustración 1. 8) a diciembre del año 2012 son cercanos a los 127, 775 kg/ha como promedio nacional. Existe un crecimiento promedio anual sostenido entre los últimos once años de 0.4%.

Según la FAO, el rendimiento promedio entre los años 1992-2011, lo lidera Perú con un rendimiento promedio de 119, 369 kg/ha, le sigue Egipto con 115, 553 kg/ha y Senegal con 112, 522 kg/ha como los tres principales países con la mejor productividad a nivel mundial.

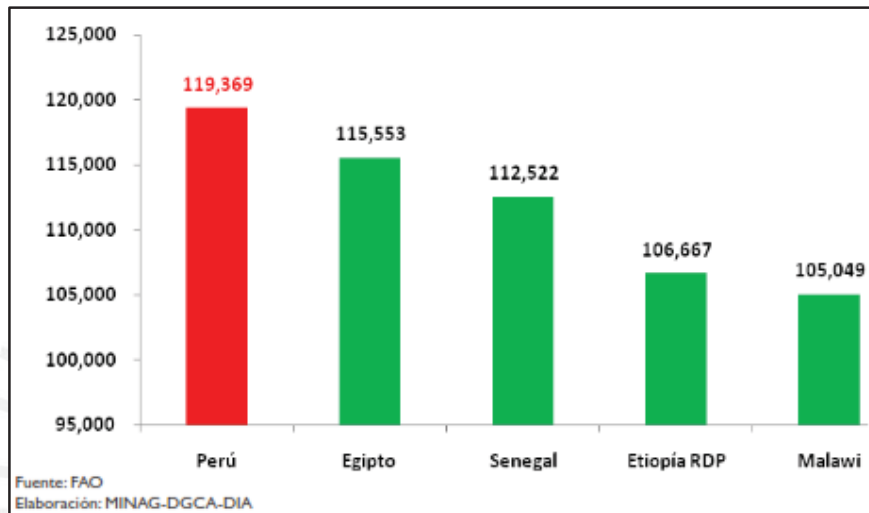


Ilustración 1. 8 Principales Rendimientos Promedios Mundiales 1992-2011 (kg/ha) [6]

### 1.2.5 Residuos Agrícolas Cañeros (RAC)

La caña de azúcar en su madurez, está compuesta aproximadamente por un 72% de tallos molibles, 7% de tallos jóvenes, 12% de cogollo y 9% de hojas (Tabla 1. 4).

Tabla 1. 4 Composición vegetativa de la caña de azúcar en su madurez. [11]

Componentes	%
Tallos molibles	72
Tallos jóvenes	7
Cogollo	12
Hojas	9

Los RAC se componen principalmente de hojas de caña de azúcar (HCA). Estos son obtenidos luego de realizada la cosecha ya sea de forma manual o mecanizada, quedando residuos agrícolas de cosecha o RAC, que en la mayoría de los casos es quemada por los productores, ya que tiene los siguientes efectos negativos:

- Dificulta el cultivo mecánico, la fertilización y el control selectivo de malezas a través del colchón de residuo.
- Demora el brotado y genera discontinuidad del mismo, produciendo una disminución del rendimiento cuando las temperaturas son bajas y/o el suelo está muy húmedo luego de cosechar.
- Incrementa las poblaciones de plagas que se refugian y multiplican debajo del RAC.

Al quemar la caña se genera la pérdida del 48% del RAC, presentando una serie de inconvenientes como: [12]

- Incremento de la necesidad de herbicidas.
- Pérdida de nutrientes del suelo y afectaciones a los microorganismos.
- Disminución de la porosidad del suelo y como consecuencia de esto menor infiltración del agua.
- Eliminación de los enemigos naturales de las plagas.

Además de esto, produce contaminación ambiental por la emisión de gases como CO, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub>, generando como consecuencia, efectos adversos en la salud aumentando en gran medida las afecciones del aparato respiratorio (asma, neumonía y bronquitis), problemas en la vista y daños a la vestimenta y suciedad en las ciudades cercanas.

Como alternativa a la quema de los RAC se encuentra su uso como biomasa, ya que presenta características que permiten aprovecharla como una fuente de energía renovable, permitiendo diversificar así la matriz energética de la provincia, el país y reduciendo los problemas mencionados anteriormente. De esta manera, según la Ilustración 1. 1, los RAC se encontrarían ubicados dentro del grupo de Biomasa vegetal, la cual posee una clasificación más específica perteneciendo a la Biomasa residual proveniente de la agricultura.

### **Características de los RAC**

La caña de azúcar es uno de los cultivos con mayor capacidad de convertir la energía solar en biomasa. Si se toman en cuenta solo el bagazo y la paja, en los cañaverales se almacenan alrededor del equivalente a una tonelada de petróleo por cada tonelada de azúcar que puede producirse [12]. La combustión de la biomasa no incrementa la concentración atmosférica de carbono, porque solo devuelve a la atmosfera el carbono que fijo la planta durante su crecimiento. La biomasa aprovechable energéticamente son el bagazo y los RAC. El bagazo representa el 30% de los tallos verdes molidos y es el residuo fibroso de la molienda; se obtiene

con un 50% de humedad, esto significa que por cada hectárea cosechada es posible obtener anualmente 13.5 ton de bagazo equivalentes a 2.7 tce (tonelada de combustible equivalente: 37.5 MJ/Kg).

### Caracterización de los RAC

Debido a que las fuentes de biomasa son tan diversas, la caracterización de esta sirve para obtener una previsión de su comportamiento ante las diferentes etapas en su uso como fuente de energía como son: Obtención, transporte, tratamientos y conversión en energía. Para esto analizamos sus propiedades físicas, químicas y térmicas; las cuales se pueden realizar de diferentes formas (Tabla 1. 5)

**Tabla 1. 5 Parámetros físicos, químicos y energéticos de la biomasa. [13]**

Parámetros físicos	Densidades real y aparente Humedad Distribución granulométrica	Influyen en la selección y el diseño de los equipos de manejo del material y la necesidad de pretratamiento.
Parámetros químicos	Análisis elemental Análisis inmediato Componentes estructurales Composición de cenizas Fusibilidad de cenizas	Determinan el comportamiento de la biomasa durante los procesos de transformación química y termoquímica
Parámetros energéticos	Poder Calorífico	Determina la cantidad de energía aprovechable

**Principales propiedades físicas:** En esta se encuentran la densidad, la humedad y la distribución granulométrica. No se tratan de propiedades inherentes a la materia sino más bien al formato como se presenta.

**Principales propiedades químicas:** Son las que se refieren a la composición de los elementos que constituyen la biomasa y a los componentes moleculares principales.

- **Análisis elemental:**

El análisis elemental permite establecer el porcentaje en peso de los principales elementos con mayor presencia en la estructura molecular de la misma materia orgánica: carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), oxígeno (O) y azufre (S). Se utiliza en combustibles sólidos y líquidos, y se puede utilizar para determinar el aire preciso para la combustión.

- **Análisis inmediato:**

El análisis inmediato proporciona los contenidos de humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo de la biomasa, expresados como porcentajes en peso. Este análisis permite estimar de manera sencilla el comportamiento de un combustible.

- **Composición y fusibilidad de las cenizas:**

Se analizan debido a que la biomasa a lo largo de los procesos de recolección, transporte y almacenamiento; absorben una serie de elementos inorgánicos: calcio, sodio, potasio, hierro, silicio, etc. Lo que genera en el proceso de combustión materia inorgánica extrínseca a la de la propia biomasa en ceniza sólida. Las cuales pueden causar la obstrucción de los pasos de gases o sintetizar en forma de fundidos en paredes y sistemas de evacuación de cenizas; perjudicando el proceso y el quemador utilizado.

- **Poder calorífico:**

Es la energía química del combustible que puede ser transformada directamente en energía térmica mediante un proceso térmico de oxidación. Existen dos formas de expresar el poder calorífico de un combustible. Si tras la combustión el agua formada en los gases de combustión se encuentra en forma líquida (PCS). Si permanece en forma de vapor (PCI).

### **1.3 Problemas asociados a su empleo en procesos termoquímicos**

#### **Baja densidad:**

Lo que se requiere y se obtiene con el aumento de la densidad del biocombustible es que sea homogéneo y con baja humedad. Además que pueda ser manipulado fácilmente tanto en el sector doméstico como en el industrial, reduciéndose el espacio necesario para su transporte y almacenamiento, aumentando su limpieza y reduciendo las pérdidas por degradación durante el almacenamiento, incrementando su poder calorífico por unidad de volumen y favoreciendo el empleo de sistemas automatizados para la alimentación de los biocombustibles en los sistemas de aprovechamiento térmico.

#### **Alto contenido de humedad:**

Residuos con alto contenido de humedad antes del proceso de conversión energética necesitan la implementación de operaciones de secado, lo cual involucra un incremento del costo para su aprovechamiento.



**El contenido de azufre:**

Una elevada concentración de azufre puede formar escorias y óxidos muy contaminantes, el nitrógeno no aporta energía pero podría generar gases tipo  $\text{NO}_x$  si la cantidad es importante y la temperatura del proceso es alta.

**Cantidad de cenizas y composición:**

Se refiere a la cantidad sólida no combustible presente en los RAC. El poder calorífico de un material se obtiene de acuerdo al contenido de cenizas. Al poseer un alto contenido de cenizas se reduce el poder calorífico; asimismo, estas se pueden depositar en las calderas o intercambiadores de calor y dificultar la transmisión de calor. La eliminación de cenizas implica el uso de equipos y tecnologías complejas y considerablemente costosas.



## Capítulo 2

### Tecnología de densificación a baja presión

La compactación, densificación o briqueteación de biomasa representa a todo un conjunto de tecnologías para la conversión de la materia prima en bio-combustible, presenta ventajas de manejo, transporte, almacenamiento producto final, etc. La compactación de la biomasa mejora sus características como combustible, por ejemplo aumenta su poder calorífico, reduce el costo de transporte y puede ser fuente fundamental de uso en las zonas rurales en donde no se tiene acceso a otros tipos de combustibles.

#### 2.1 Densificación

##### 2.1.1 ¿Qué es un densificado?

Es un proceso de compactación de la biomasa, en la que esta es sometida a elevadas presiones y temperaturas que provocan la auto aglomeración de sus partículas (los componentes hemicelulosa y lignina de la biomasa se funden y actúan como aglomerantes naturales, permitiendo de esta manera una mejor unión entre las partículas), o mediante bajas y medianas presiones con ayuda de una sustancia aglomerante para lograr su compactación, con el objetivo de disminuir los espacios entre partículas y dentro de las partículas, produciéndose de esta forma una unión más íntima entre ellas. Este proceso se puede realizar de modo manual o a través de equipos mecánicos.

De esta manera se obtienen los biocombustibles sólidos llamados pellets y briquetas. Estos productos compactados se pueden diferenciar de la siguiente manera: Los densificados con menos de 30 mm de diámetro son considerados convencionalmente como pellets y con diámetros mayores, briquetas (Ilustración 2. 1). Por último si los productos compactados son no aglutinados son conocidos como bultos o pacas.



Ilustración 2. 1 Briquetas y pellets. [14]

### Ventajas

- Al tener alta densidad y estar en formato granulado ocupan muy poco espacio y se pueden transportar fácilmente.
- Mejora las propiedades de la biomasa para su uso como combustible.
- Aumenta la capacidad de almacenamiento y facilita su manipulación, ya que se obtienen piezas de tamaño y forma similar.
- Se obtiene un mejor control del contenido de humedad de la biomasa.
- La forma y tamaño se pueden modificar para una optimización dependiendo del quemador a utilizar.
- Al existir normativas en su tamaño y forma, se facilita su producción ya que se tienen equipos automatizados para su producción y aplicación.

### Desventajas

- Se necesitará equipos adicionales para la densificación lo que incrementará la inversión.
- Capacitación de personal para la manipulación de los equipos de densificado.
- En algunos casos se necesitará realizar pre-tratamientos a la biomasa antes del densificado.
- Para su aprovechamiento energético se necesitan quemadores especiales.

## 2.1.2 Tecnologías de densificación

En la producción de biomasa densificada se utilizan máquinas compactadoras que en la actualidad se distinguen según el tipo de densificado que se desea obtener, a continuación se mencionarán algunos ejemplos:

### a) Briqueteado con ruedas formadoras:

El sistema básico se muestra en la Ilustración 2. 2, en este se puede observar como la materia prima es obligada a pasar entre dos ruedas que giran en sentidos opuestos. A medida que estos giran, el material situado en el área de deslizamiento se desplaza en forma descendente a una velocidad menor que la existente en la superficie de las ruedas. En el área de retención, el material es atrapado por las ruedas, desplazándose a la misma velocidad que la existente en la superficie de los ruedas. Esto obliga a que el material pase por el área de presión máxima, que se encuentra en una línea entre los centros de ambas ruedas y al mismo tiempo le dé forma a la materia. [15]

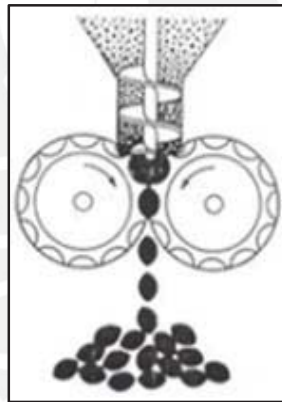


Ilustración 2. 2 Sistema de compactación mediante ruedas formadoras. [16]

### b) Briqueteado por extrusión:

Es un sistema basado en la presión ejercida por un tornillo sin fin especial, que hace avanzar el material hasta un dado de extrusión, el cual se encarga de darle la forma final a la briqueta (Ilustración 2. 3). Este sistema permite obtener briquetas con orificios interiores los cuales van a favorecer la combustión. Además se llegan a obtener briquetas con una densidad entre 1300 – 1400  $kg/m^3$ . [17]

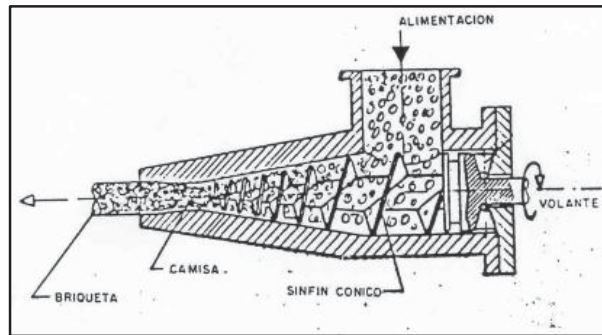


Ilustración 2. 3 Densificación por extrusión. [17]

**c) Briquetado por impacto:**

En este sistema, como su nombre lo indica, la compactación se consigue por golpes consecutivos producidos sobre la biomasa, por un pistón accionado a través de una volante de inercia, el cual va llevando la biomasa hacia un dado de extrusión el cual se encarga de darle la forma final a la briqueta (Ilustración 2. 4). Las densidades que se obtienen suelen ser de  $1000 - 1200 \text{ kg/m}^3$ . [17]

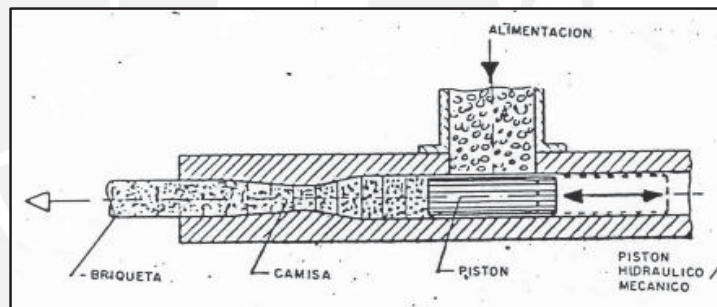


Ilustración 2. 4 Densificación por impacto. [17]

**d) Briquetadoras hidráulicas o neumáticas:**

En estos sistemas, la presión es producida por cilindros accionados por sistemas hidráulicos o neumáticos (Ilustración 2. 5). Estos equipos son de muy poco consumo y requieren poco mantenimiento. Las densidades que se obtienen suelen ser de  $700 - 800 \text{ kg/m}^3$ . [17]



Ilustración 2. 5 Briqueteadora con gata hidráulica y tornillo de potencia.  
Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio Carbón-Biomasa PUCP 2014.

**e) Pelletizadora de matriz anular:**

“En este equipo la forma de la matriz es anular o en anillo. Dentro de este tipos de prensa existen dos variantes, en el primero la matriz anular es fija y los rodillos, también llamados discos, animados de un movimiento giratorio, empujan la materia a través de las numerosas hileras; en el segundo los rodillos son fijos y es la matriz la que gira a alta velocidad.” (Ilustración 2. 6). Las densidades que se obtienen suelen ser de  $850 \text{ kg/m}^3$  [17]

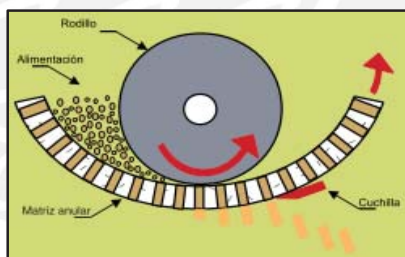


Ilustración 2. 6 Pelletizadora de matriz anular. [17]

**f) Pelletizadora de matriz plana:**

“En este caso, la matriz es fija y tiene la forma de un disco horizontal, mientras que los rodillos recorren la cara superior.” (Ilustración 2. 7). Las densidades que se obtienen suelen ser de  $850 \text{ kg/m}^3$  [17]

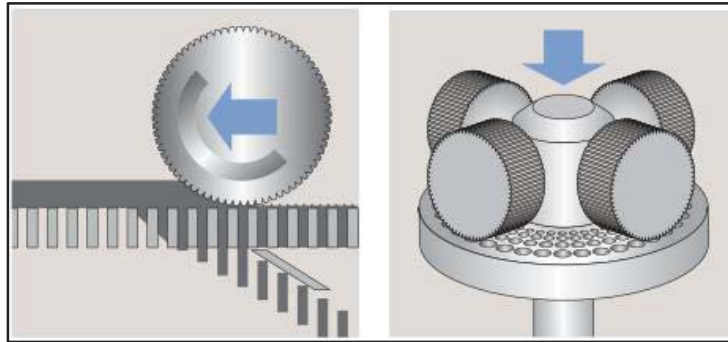


Ilustración 2. 7 Pelletizadora de matriz plana. [15]

#### g) Pelletizadora de disco:

Es un proceso de granulación por volteo con agitación mecánica, en el que se introducen los reactivos (partículas, ligantes, aditivos, etc) para que sean transformados y lograr formar un producto densificado (Ilustración 2. 8).

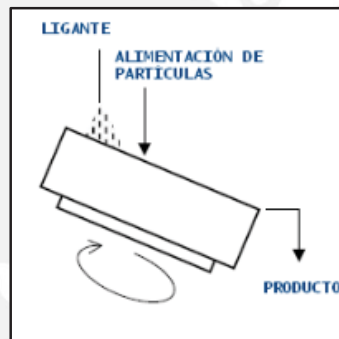


Ilustración 2. 8 Disco pelletizador. [18]

### 2.1.3 Caracterización de las briquetas

La característica común de todas las briquetas es su alta densidad. Su forma suele ser cilíndrica; pero no siempre es así, ver Ilustración 2. 9. La forma de las briquetas puede ser muy variable, y depende de la maquinaria utilizada en su obtención. Cuando las briquetas se fabrican con una prensa de tipo tornillo sinfín, dejan un hueco en su interior con las que la relación superficie–volumen es mayor.

En la actualidad, casi todas las briquetas son de forma cilíndrica, cuyo diámetro supera los 5 cm, siendo el diámetro más usual comprendido entre los 7,5 cm y los 9,0 cm [19]. La longitud es variable entre los 50 y 80 cm. normalmente, a mayor diámetro mayor es la longitud. Los agujeros internos de las briquetas presentan ventajas y desventajas, entre ellas se consigue una ignición más rápida, se reduce el tiempo de secado; esto puede resultar ventajoso o perjudicial (dependiendo del objetivo buscado). Las formas cilíndricas o de sección rectangular, redondeada en

las esquinas ayudan a que la briqueta no se desintegre por golpes. Estas últimas arden más despacio y se almacenan mucho mejor pues ocupan menos volumen a igualdad de peso que el tipo cilíndrico o el de prisma octogonal hueco.

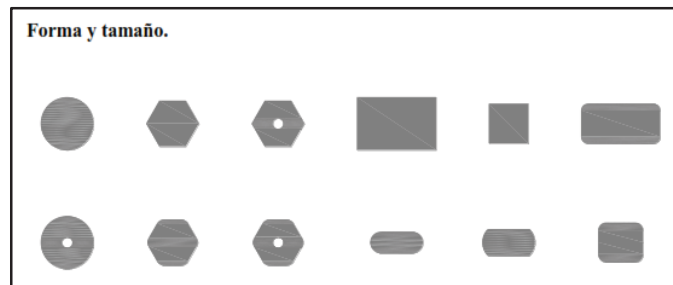


Ilustración 2. 9 Forma de las briquetas. [19]

## 2.2 Aglomeración

Según Rumpf (1975), la aglomeración es un término genérico que indica la combinación de partículas con modificación de tamaño. Según Pietsch (1991), la aglomeración consiste en la unión de partículas de tamaño pequeño debido a fuerzas físicas que actúan a distancias cortas. En resumen, se puede definir la aglomeración en un aspecto científico como la agrupación de partículas pequeñas que debido a fuerzas internas o externas, forman un conjunto de mayor tamaño.

### 2.2.1 Mecanismo de enlace para los aglomerados

Los mecanismos enlazantes para el aumento de tamaño por aglomeración fueron definidos y clasificados por Rumpf (1962) y posteriormente fueron recogidos por Pietsch (1991). Durante una operación particular de aumento de tamaño se pueden aplicar más de un mecanismo. Se dividen en cinco grupos y varios subgrupos (Ilustración 2. 10).



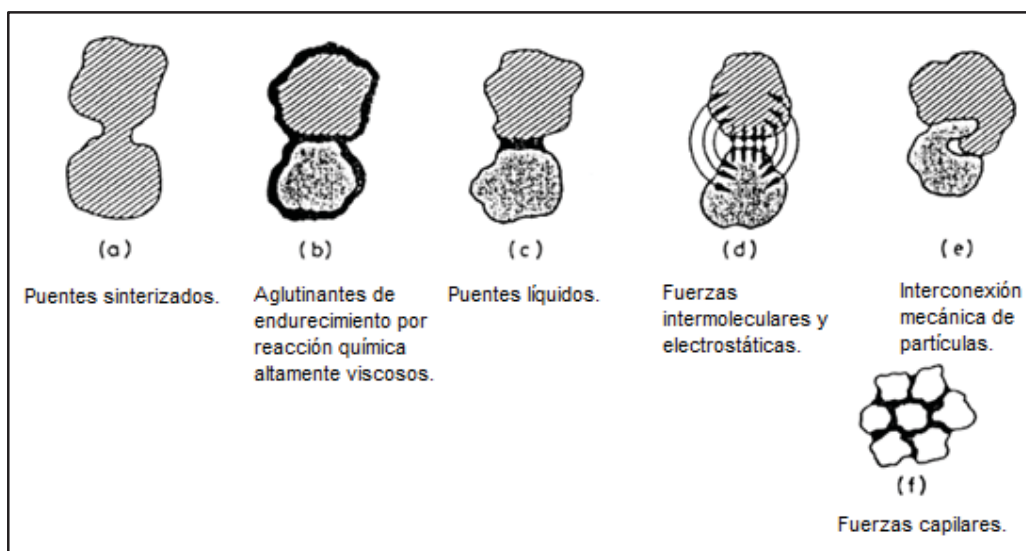


Ilustración 2. 10 Mecanismos de aglomeración que actúan sobre las partículas. [19]

### I. Los puentes sólidos

Se forman entre partículas por medio de la sinterización de minerales, la cristalización de sustancias disueltas durante el secado, como sucede en la granulación de fertilizantes y endurecimiento de los agentes de enlace tales como las gomas y resinas y solidificación de componentes fundidos. También se presentan a elevadas temperaturas desarrollándose por difusión de moléculas desde una partícula a otra en sus puntos de contacto. Entre los subgrupos se tiene: puentes minerales, puentes sinterizados, reacción química, fusión parcial, endurecimiento de ligantes, etc. Los puentes sólidos se forman principalmente después del secado de los productos densificados.

### II. Fuerzas superficiales y presión capilar en superficies líquidas libremente móviles.

Presión capilar y las fuerzas superficiales en puentes líquidos pueden crear fuertes lazos que desaparecen si el líquido se evapora y no hay otros mecanismos vinculantes tomar su lugar.

### III. Fuerzas de Adhesión y cohesión en puentes de aglutinante que no se mueven libremente.

Medios de unión altamente viscosos, tales como alquitrán y otros líquidos orgánicos pueden formar enlaces moleculares muy similares a los de puentes sólidos. Delgadas capas de adsorción son inmóviles y pueden contribuir a la unión de las partículas finas en determinadas circunstancias.

#### IV. Fuerzas intermoleculares y electrostáticas

Unen partículas muy finas sin la presencia de puentes materiales, es decir actúan fuerzas de atracción entre partículas sólidas. Este tipo de formación de enlaces es al que se debe la tendencia de las partículas menores que una micra de diámetro, a formar espontáneamente conglomerados durante un proceso de agitación, por tal motivo la reducción del tamaño de partícula es favorable para este tipo de mecanismos. No obstante, cuando se trata de partículas de mayor tamaño, estas fuerzas de corto alcance son suficientes para contrarrestar su peso y no se produce cohesión. Entre los subgrupos se tiene: Fuerzas moleculares (Van der Waals, químicas de enlace), fuerzas electrostáticas, fuerzas magnéticas.

#### V. La interconexión mecánica de las partículas

Ocurre durante la agitación o compresión de partículas fibrosas, que pueden entrelazarse o doblarse entre ellas; pero es probablemente sólo un contribuyente menos de la fuerza de conglomeración en la mayoría de los casos.

##### 2.2.2 Fuerzas en la aglomeración

La unión de partículas individuales entre sí a una superficie sólida está relacionada con las fuerzas de volumen y de superficie. Para que se presente la adhesión entre las partículas, es importante que esta fuerza sea mayor a las fuerzas que se le oponen, como son las de gravedad e inercia.

Por lo tanto, para que se presente la adhesión se debe tener un valor del cociente

de la  $T_a = \frac{\sum B_a(x)}{\sum F_0(x)} > 1$  Ecuación 2. 1 mayor que la unidad.

$$T_a = \frac{\sum B_a(x)}{\sum F_0(x)} > 1 \quad \text{Ecuación 2. 1}$$

*B<sub>a</sub>: Fuerzas de adhesión ; F<sub>0</sub>: Fuerzas que se oponen ; x: Tamaño de las partículas*

La adhesión se da con mayor eficacia en distancias muy cortas, mientras que a distancias mayores disminuye su magnitud. Esto se debe a que las superficies de la materia particulada son rugosas, lo que aumenta la tendencia a la adhesión cuando el tamaño de la partícula disminuye, facilitando de esta manera los puntos de contacto. [20]

### **2.2.3 Clasificación de los métodos de aglomeración**

La clasificación de los procesos de aglomeración se realiza teniendo en cuenta el mecanismo principal por el que las partículas son preparadas para su unión. [21]

#### **I. Aglomeración por agitación o crecimiento.**

Este proceso consiste en facilitar el contacto de partículas para que se adhieran en un sistema en movimiento o en aire cuando la concentración de estas partículas es alta. Se realiza en presencia de líquidos o ligantes, presentándose el aumento de tamaño por coalescencia o crecimiento, basado en fuerzas capilares. Normalmente los aglomerados son esféricos con diámetros entre 0,5 - 20 mm y los equipos utilizados son mezcladores inclinados tipo tambor, cono, disco o paletas. Suelen utilizarse mayormente en la preparación de minerales de hierro, fertilizantes y productos farmacéuticos.

#### **II. Aglomeración por atomización o pulverización.**

La base de este proceso es la atomización de suspensiones mediante la evaporación del líquido por aire caliente. Las fuerzas de adhesión son de tipo capilar, a las que sigue la formación de puentes cristalinos en los puntos de contacto. Los aglomerados tienen entre 20-500  $\mu\text{m}$ , y es un método muy utilizado en la industria farmacéutica, química y de alimentación.

#### **III. Aglomeración a presión.**

Las partículas con contenidos de humedad bajos o en presencia de ligantes, forman briquetas o tabletas mediante la presión ejercida sobre ellas en prensas de tipo pistón, rodillo o extrusión. Siendo la principal fuerza enlazante la de Van der Waals, aunque la adición de ligantes amplía los mecanismos de adhesión. Es el método más utilizado en la producción de briquetas o pellets a partir de carbón o biomásas y en la de productos farmacéuticos.

#### **IV. Aglomeración selectiva.**

Es uno de los procesos de aglomeración más recientes. Consiste en añadir a una suspensión una fase no miscible. Así se humedece la fase sólida y une las partículas por medio de fuerzas capilares. Se forman aglomerados redondeados con diámetros hasta de 5 mm.

## V. Aglomeración por sinterizado.

Este proceso consiste en la formación de una pasta con partículas finas y aumentando el contenido de humedad, para luego ser procesada en un horno horizontal de sinterizado. Se utiliza con minerales metálicos y en industrias de transformación, siendo el producto final de forma irregular y de mayor tamaño que los aglomerados obtenidos por otros métodos. El mecanismo de enlace es la formación de puentes sólidos en los puntos de contacto.

De todos los métodos de aglomeración, en el presente trabajo se desarrollará la aglomeración a presión. La cual es una técnica muy utilizada para la elaboración de briquetas, requiriendo de fuerzas muy elevadas que actúan sobre partículas sólidas que están situadas en un volumen definido. Cuando las partículas sólidas no tienen características enlazantes naturales o no se presentan en las condiciones de operación, debe añadirse un aglutinante para asegurar la adhesión de la mezcla. Los mecanismos que se presentan en esta mezcla son: puentes de medios muy viscosos, presión capilar y puentes líquidos. Como resultado se obtienen aglomerados que inicialmente tienen baja resistencia, para mejorar esto y obtener enlaces más fuertes, se someten los aglomerados a un proceso de secado, ampliándose de esta manera los mecanismos enlazantes tales como: puentes sólidos por sinterizado, reacción química, fusión parcial, cristalización y endurecimiento de aglutinantes.

El objetivo de la compactación del aglomerado es poner en contacto las partículas, para que las fuerzas que actúen entre ellas sean lo bastante fuertes como para producir un aglomerado que resista las manipulaciones posteriores del producto.

La briquetación es una de varias técnicas de aglomeración que existen, cuyo propósito es obtener combustibles con mayor densidad que la materia prima original con finalidad energética. Son considerados como materia prima para la fabricación de briquetas los residuos mayormente provenientes de la industria forestal, desperdicios agrícolas y otros desechos con características futuras de combustible. [19]

Teniendo como base la compactación de la biomasa, las tecnologías empleadas para fabricación de briquetas se pueden clasificar en: [22]

- Altas presiones de compactación (>100 MPa).
- Medianas presiones de compactación con dispositivos de calentamiento (5–100 MPa).
- Bajas presiones de compactación con el uso de aglomerantes (<5 MPa).

## **2.3 Variables del proceso de densificación**

Los densificados deben tener una mezcla cuyas características sean las siguientes:

- Porcentaje de aglomerantes mínimos en función de la cantidad de materia prima (combustible) granulada.
- Bajo costo de fabricación.
- Amigable con el medio ambiente.

Asimismo, la materia prima apropiada debe tener condiciones dentro de parámetros importantes como:

### **2.3.1 Estado de la materia prima**

La materia prima es el factor más importante debido a que determinará los parámetros que se tendrán en cuenta para el proceso de densificado dependiendo de sus características físicas y químicas.

#### **2.3.1.1 Humedad**

La mezcla debe tener humedades que sean mayores al 20% en el caso del proceso artesanal, del 15 al 20% en el semi-industrial y del 5 al 15% para el industrial, basándose además en la técnica tradicional empleada en los ensayos para arenas de fundición, que consiste en dar a la mezcla el agua necesaria para que esta obtenga una consistencia útil para ser moldeada. Esta mezcla ya húmeda no debe pegarse al recipiente que la contiene ni tampoco debe desprenderse luego de someterle a una ligera presión con la mano, si esto se da, es una consecuencia de que la mezcla está muy húmeda o muy seca refiriéndose para el método artesanal y semi-industrial; para el industrial, no se necesita de aglomerante. [19]

#### **2.3.1.2 Características químicas y físicas**

Las características químicas y físicas de las partículas comprenden tanto la posibilidad de establecer uniones químicas entre ellas o entre ellas y los ligantes. En ocasiones, se puede aprovechar el potencial ligante inherente al material cuando se presentan las condiciones adecuadas. Por otra parte, la densidad de partícula, la porosidad, elasticidad, plasticidad, fragilidad y abrasividad influyen también en la elección del proceso de densificado. La densidad y porosidad determinan el peso y algunas propiedades del aglomerado, la elasticidad y plasticidad pueden indicar las presiones del densificado a utilizar, especialmente en aquellos materiales que manifiestan propiedades plásticas y que por tanto facilitan la unión entre partículas, como es el caso de algunas biomásas fibrosas. [13]

### **2.3.1.3 Tamaño de partículas**

Puesto que en la mayor parte de materia orgánica se dificulta su compactación de forma directa, es necesario que las partículas del material orgánico posean un tamaño adecuado, que permita una adecuada ubicación de las partículas entre los intersticios de la estructura, lo cual ayuda a obtener una mejor compactación y acabado de la briqueta. El mejor aspecto de las briquetas se obtiene cuando las fracciones de las partículas de los productos agrícolas, son inferiores a 3 mm [23].

### **2.3.2 Presión y Temperatura**

La presión y la temperatura son factores muy importantes sobre todo cuando se trata de compactar material orgánico sin añadir aglomerante; por lo tanto, la compactación envuelve lo que es: presión, fricción entre partículas, deformación, rompimientos celulares y aglutinamientos entre las partículas vecinas. Como las biomásas son compuestos lignocelulósicos, la lignina se puede definir como un polímero termoplástico al igual que otros fenoles, gomas y ceras que se reblandecen a temperaturas elevadas. Estos materiales aportan así mismo lignina propia como aglutinante; el reblandecimiento de lignina y su endurecimiento posterior a causa de su enfriamiento mientras se mantiene el material bajo presión es un factor muy importante para la formación de la briqueta. Por la presión las superficies de las partículas de la biomasa entran en contacto interno y la lignina, cera u otros, reblandecidos térmicamente permitiéndose la adherencia entre las mismas. La temperatura, dependiendo de la briqueteadora, se relaciona con la presión debido a la fricción interna entre las partículas y con la pared del dado, algunas veces se usan fuentes externas de calor (se calienta el dado en su sección de entrada) para conformar las briquetas.

### **2.3.3 Tiempo de permanencia**

Representa el tiempo que la biomasa es compactada a la máxima presión. Lo que permite una mejora en sus propiedades tales como el esponjamiento, ya que este se reduce para cierto tiempo de permanencia; y para la resistencia al cizallamiento. [24]

### **2.3.4 Aglomerantes**

Aglutinantes (aglomerantes) son aditivos que aumentan la fuerza del aglomerado, siendo capaces de generar fuerzas para unir fragmentos, partículas de una o varias sustancias o materiales y dar cohesión al conjunto por métodos físicos, químicos o

térmicos. Puede ser definido como cualquier material que tenga resultados satisfactorios en la compactación bajo menos presión que la necesaria para la compactación correspondiente sin aglomerante.

Tienen importancia particularmente especial en la fabricación de briquetas de material orgánico (biomasa) como cascarilla de arroz, aserrín, cáscara de café, HCA, entre otros; es muy importante su empleo, en pinturas y en carpintería.

El aglomerante para la preparación de briquetas orgánicas debe cumplir los siguientes aspectos:

- Fácil preparación
- Fácil aplicación
- Fácil obtención
- Costo relativamente bajo
- No significar un agente contaminante durante su combustión
- No debe ser nocivo al estar en contacto con la piel de la persona encargada de la preparación de las briquetas.
- Dar facilidad de mezclado con la materia prima (HCA)
- Debe poseer óptimas propiedades de adhesión
- Presentar una considerable resistencia mecánica

Los aglutinantes se pueden clasificar en:

- Aglutinantes tipo matriz, que incrustan partículas en una matriz más o menos continua.
- Aglutinantes de tipo película, que normalmente se derivan a partir de soluciones o dispersiones.
- Aglutinantes de tipo químico, que se basan en algún tipo de reacción química que sea efectiva. Tal reacción puede tener lugar entre la partícula sólida y el aglutinante o entre componentes aglutinantes.
- Aglutinantes tipo lubricante, que funcionan al reducir la fricción entre partículas sólidas, pueden ser sólidos o líquidos.

Otra clasificación común en los aglutinantes es designarlos como aglutinantes orgánicos e inorgánicos en el ámbito químico. Los materiales orgánicos que han servido como aglutinantes incluyen los productos vegetales, productos animales, materia bituminosa y productos sintéticos. Por otro lado, los materiales inorgánicos son menos costosos que los orgánicos, suelen ser hidrófilos y con poca pegajosidad.

De vez en cuando, los materiales orgánicos e inorgánicos son combinados en los sistemas de aglomerados.

### **Tipos de aglomerantes utilizados en la elaboración de briquetas**

Los aglutinantes se elaboran a partir de resinas fenólicas, de los almidones provenientes de los vegetales, en algunos casos modificados, y de las arcillas. Los aglomerantes como las resinas presentan mejores propiedades de flexibilidad y resistencia en las operaciones de corte o desbaste, que los aglomerantes vitrificados, los aglomerantes que provienen de vegetales presentan mejores propiedades de cohesión para compactar biomasa. [25]

De la cantidad de aglomerantes que existen, no todos son adecuados para la preparación de las briquetas. Generalmente los más comunes para este fin son los siguientes:

- **Almidones de yuca, maíz y arroz:**

Como aglutinante en briquetas de materiales orgánicos, es considerado uno de los mejores almidones utilizado principalmente para carbón vegetal o cascarilla de arroz, se usa en este campo por presentar muy buenas propiedades de cohesión para este tipo de material, y además de bajo costo respecto a otros aglutinantes. La cantidad adecuada de adición de esta sustancia bordea desde el 4 al 20% dependiendo del tipo de materia orgánica, siendo ideal para biomasa entre 4 al 8%, amasando una pasta con agua caliente. [26]

- Melaza
- Parafina
- Arcillas
- Alquitrán
- Resinas(cola blanca)

## **2.4 Evaluación de Briquetas**

Una de las características más importantes de los aglomerados es su resistencia. Tanto en su fabricación como en su transporte, almacenamiento y uso final, el aglomerado tiene que soportar una serie de tensiones y condiciones atmosféricas cuya investigación, trata de simular lo que ocurre en la realidad mediante ensayos experimentales tales como: Ensayos de compresión, impacto, pruebas de abrasión, resistencia al corte, etc. Los valores que se obtengan por estos métodos son



empíricos y resulta difícil predecirlos teóricamente ya que no se conocen con exactitud los motivos que producen el fallo del aglomerado. Incluso la comparación de resultados de ensayos debe realizarse cuidadosamente, a menos que se hayan establecido protocolos normalizados de uso común. “Las briquetas de carbón, carbón-biomasa y biomasa están llamadas a reemplazar el uso de madera y carbón vegetal en áreas densamente pobladas, principalmente en los países en desarrollo, esto hará necesario establecer ensayos y normas, nacionales e internacionales que indiquen, lo más inequívocamente posible, la calidad comercial de estas briquetas basadas en sus propiedades físicas y de combustión. Hasta ahora no se han obtenido resultados destacables en este sentido. Existen una serie de ensayos que sin tener un carácter internacional son ampliamente aceptadas dentro de las limitaciones anteriormente señaladas”. [21]

#### **2.4.1 Ensayos de Resistencia al impacto**

Estos ensayos permiten fijar la resistencia de las briquetas a la caída entre cintas transportadoras, tanto en los procesos de fabricación como en el transporte del producto terminado. Uno de los ensayos más utilizados consiste en determinar la máxima altura de caída, sobre una superficie plana y dura, de un grupo de cinco briquetas que se dejan caer individualmente. La resistencia se define como la altura desde que las cinco briquetas caen sin romperse. Otro ensayo análogo y muy utilizado es el llamado índice de resistencia al impacto (IRI), el cual consiste en dejar caer repetidas veces desde una altura determinada, 2 m o 1,8 m, las briquetas. El cociente entre el promedio del número de caídas y el promedio del número de trozos formados, si hay rupturas, da una idea bastante aproximada de la resistencia de las briquetas. Este ensayo se considera como el más útil para predecir la resistencia global de una briqueta. [27]

La norma utilizada como base para la realización de este ensayo es la ASTM D440-86. [28]

Se ensayan briquetas preparadas en las mismas condiciones de tamaño de partícula, naturaleza de material, aglomerante, aditivos y condiciones de secado (misma formulación). Se toma como índice de resistencia al impacto (IRI) de cada tipo de briqueta el promedio de los valores calculados para cada grupo de briquetas.

El índice de friabilidad FR está dado por:

$$IFR = \sum_{i=1}^n \frac{NL}{NP} \times 100 \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Dónde:

NL = Número de Lanzamientos

NP = Número de pedazos (briquetas fraccionadas)

El mínimo valor para que las briquetas (biocombustible) sean aceptables comercialmente es 50.

#### **2.4.2 Ensayos de Compresión**

Como ya se ha indicado las briquetas tienen que ser capaces de soportar cargas de compresión deformante que se producen en su manejo, transporte, almacenamiento y alimentación en la combustión (tolvas). El ensayo se realiza colocando una sola briqueta entre dos superficies planas paralelas, cargando la cara superior con una fuerza determinada que aumenta uniformemente hasta que ocurre la ruptura (rajadura de la briqueta). La resistencia es calculada mediante el cociente de la carga, en el punto de fractura, y la superficie transversal del plano de fractura. Esto permite hacer algunas comparaciones entre formulaciones. [21] Para realizar este ensayo se utiliza la norma ASTM C39-96, la cual se ha desarrollado para probetas cilíndricas de hormigón, siendo utilizada de la misma forma para briquetas. [28]

#### **2.4.3 Ensayos de relajación o esponjamiento**

Después de que la briqueta se retira de la matriz en la que esta ha sido compactada, ocurre un fenómeno de relajación, que consiste en la expansión de la longitud de la briqueta. Por ello es necesario realizar un registro, con las mediciones de la longitud de la briqueta desde que se encuentra en la matriz hasta terminado el secado de la misma, cuando la longitud permanece constante en el tiempo [29]. Esto permite conocer la longitud de relajación y relacionarla con los enlaces formados por los aglutinantes; determinando en qué porcentaje de aglutinante, se presenta la menor expansión de la briqueta.

#### **2.4.4 Ensayos de resistencia a la abrasión**

En este ensayo se trata de simular los rozamientos que se darían entre las briquetas y verificar su resistencia a perder su forma y peso inicial. Con esta premisa se deduce que las briquetas que tengan una forma redonda presentarán una mejor resistencia a la abrasión que las que tengan forma aguda.

Para realizar el ensayo se utiliza un tambor giratorio en el cual se colocarán las briquetas, la cantidad a colocar depende del volumen ocupado por la muestra y el volumen de huecos. Una vez colocada la muestra en el tambor, se hace girar este a una velocidad entre 40 – 50 rpm durante un tiempo determinado. Transcurrido este tiempo, se pesan los fragmentos desprendidos de las briquetas, estos son separados previamente en tamices, y se expresa el valor de la resistencia a la abrasión como un porcentaje de la masa de estas partículas sobre la masa inicial de las briquetas introducidas en el equipo.

#### **2.4.5 Resistencia a la absorción de Agua**

Los ensayos frente al agua evalúan la resistencia a la absorción de agua y a la desintegración de las briquetas, simulando su exposición a la lluvia y a la humedad durante cortos periodos de almacenamiento. Uno de los ensayos consiste en la inmersión en agua fría de una briketa previamente pesada y observar su comportamiento a la desintegración aplicando la presión de los dedos a intervalos de 10 min. Si resiste las presiones durante 30 min la briketa es retirada, se seca y se vuelve a pesar. La diferencia a 100 del porcentaje de agua absorbida proporciona una comparación cuantitativa de la resistencia al agua de la briketa (WRI). [19]

#### **2.4.6 Ensayos de combustión**

En este ensayo se obtiene información del proceso de conversión energética del biocombustible, mediante la combustión del mismo. Para ello, el ensayo se realiza registrando las características más importantes a tenerse en cuenta para la comparación entre biocombustibles sólidos tales como:

- Tiempo para el encendido del biocombustible.
- Perfil de temperaturas durante el proceso.
- Duración de la llama
- Duración del proceso de combustión
- Cantidad de cenizas

Para el tiempo de encendido se considera una temperatura de 300 °C, debido a que inicialmente el combustible se calienta y se seca al ser introducido a la cámara de combustión. Cuando la temperatura del combustible supera los 150°C comienza la descomposición térmica, o pirolisis, de forma lenta hasta los 200°C, y aproximadamente a los 275°C esa termo-reacción se acelera y la partícula de combustible libera de forma rápida todos sus volátiles, que al ser liberados durante

la pirolisis entran en contacto con los agentes oxidantes en la fase gaseosa y se queman rápidamente formando una llama. [13]

Para dar inicio a la combustión de la briqueta y llegar a la temperatura de encendido se utilizará un iniciador, el cual se mantendrá encendido hasta que el biocombustible se encienda. A partir de ese momento se registrará la duración de la combustión del biocombustible.



## Capítulo 3

### Desarrollo de formulaciones teniendo como variable el porcentaje de arcilla

En el presente capítulo se describirá la metodología utilizada para la elaboración de las briquetas de HCA, siguiendo el procedimiento utilizado por el Grupo de Investigación Carbón y Biomasa. Además se hará una descripción de los materiales a utilizar, las formulaciones a realizar y el método estadístico de validación de datos que se utilizó para el procesamiento de datos.

#### 3.1 Métodos y materiales

##### 3.1.1 Materiales

Con el objetivo de obtener una briqueta como biocombustible sólido, en muchas ocasiones la biomasa debe pasar por una serie de pre-tratamientos antes de su aprovechamiento como fuente energía. Uno de estos pre-tratamientos es la aglomeración, en el cual se realiza una mezcla entre la biomasa (HCA con ciertas características) y los aglutinantes (arcilla y fécula). A cada mezcla conformada por distintas proporciones de aglutinante y distinta característica de HCA, la denominamos formulación.

Los aglutinantes, los cuales fueron las variables en el proceso de aglomeración, son los siguientes:

- **Arcilla:** Las arcillas y sus minerales relacionados son materiales industriales muy importantes, utilizados en soluciones tecnológicas agrícolas, de ingeniería y construcción, en corrección ambiental, geología, así como en muchas otras aplicaciones misceláneas. El mineral arcilloso se puede definir como “materiales cristalinos con tamaño de partícula menor a 2  $\mu\text{m}$ , formados por aluminosilicatos o silicatos de aluminio y/o magnesio hidratados, que pueden contener cantidades variables de hierro, potasio, sodio y otros elementos. Pertenecen a la familia de los filosilicatos y aunque existe una gran variedad de estos minerales, todos conservan en común una estructura constituida por capas orientadas paralelamente, subdivididas en dos simetrías principales: Octaedros (O) y tetraedros (T)” [30] (Ilustración 3. 1). En nuestro estudio, se utilizó como aglutinante inorgánico en el proceso de aglomeración de la biomasa de HCA. La arcilla utilizada fue la

“Arcilla PC 325” de la marca COMACSA (Ilustración 3. 2). Este producto presenta buena plasticidad, lo que le da la capacidad de deformarse sin agrietarse ante un esfuerzo mecánico conservando la deformación al retirarse la carga (no se produce rebote elástico), lo que permite un buen desempeño al elaborar las briquetas sometiendo el aglomerado en un proceso de densificado bajo presión, esta propiedad se debe a que el agua forma una envoltura sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. Presenta una coloración gris clara, lo que indica el grado de pureza de la misma ya que se pueden encontrar coloraciones desde rojo anaranjado hasta blanco cuando son puras. Físicamente, sus partículas son extremadamente pequeñas y de superficie lisa, siendo el diámetro de las partículas inferior a 0,002 mm, permitiendo una mejor unión entre los intersticios de la estructura.

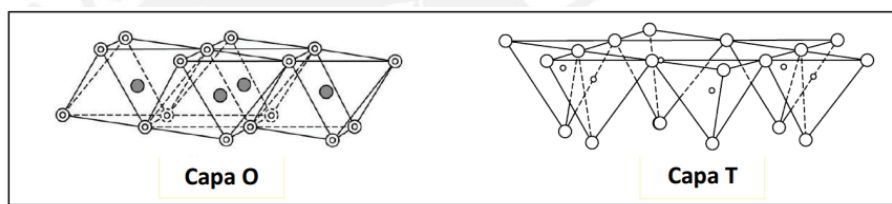


Ilustración 3. 1 Esquema de las capas octaédricas y tetraédricas. [30]



Ilustración 3. 2 Arcilla utilizada como aglutinante.

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2014.

- **Fécula de maíz:** Es conocida como harina fina de maíz, almidón de maíz o maicena. Es un polisacárido que se encuentra en las plantas en forma de reserva alimenticia, el cual se encuentra constituido por amilosa y amilopectina. Tiene un PC de 16,7 MJ/kg [31].

En las últimas décadas, la investigación realizada a este carbohidrato es con la finalidad de encontrarle nuevos usos. Básicamente puede ser usado para cuatro propósitos generales: [32]

- 1) Otorgar ciertas características organolépticas a los alimentos como textura y consistencia, la cual es dada por sus componentes poliméricos de alto peso molecular.
- 2) Para la nutrición humana y/o animal, ya que es la fuente de energía más importante, representando el 80% de la ingesta calórica mundial.
- 3) Para ciertas aplicaciones industriales como la fabricación de pegamentos, pinturas, espesantes y texturizantes en las industrias de papel y textil.
- 4) En la producción de bioenergéticos (etanol).

La fécula de maíz cuenta con diversas características como son:

**Gelatinización:** Es el proceso mediante el cual las partículas de almidón se hidratan al calentarse formando un medio acuoso. Esto origina la pérdida del orden molecular que se manifiesta dentro del gránulo, cambiando de una forma semicristalina a una forma eventualmente amorfa.

**Retrogradación:** El término retrogradación, ha sido utilizado para describir los cambios que ocurren cuando las moléculas de almidón gelatinizado empiezan a reorganizarse, formando una o más estructuras ordenadas, es decir pasan de un estado inicial amorfo a un estado final más cristalino, se puede ver como el fenómeno opuesto a la gelatinización.

La HCA que se utilizaron para la elaboración de las briquetas, son procedentes del fundo Montelima, perteneciente al ingenio azucarero Caña Brava. A continuación se presenta la caracterización física y química de las HCA recibidas:

- **Propiedades físicas:**

Como se describió en el capítulo anterior, es muy importante realizar la caracterización física de la materia a tratar, debido a que permite determinar los procesos físicos a los que debe someterse la materia además de seleccionar de manera adecuada los equipos a utilizar en cada uno de los procesos. A continuación se presentan los resultados de su caracterización:

**Tabla 3. 1 Caracterización de las HCA de recepción.**

Fuente: Elaboración propia

Hoja de caña de azúcar		
Largo [mm]	Ancho [mm]	Densidad Aparente [kg/m <sup>3</sup> ]
166.4 ± 2.48	13.3 ± 4.79	15.4 ± 0.27

De la tabla anterior se logró determinar que las HCA necesitan tratamientos físicos para la reducción tanto de tamaño de partícula y su consecuente aumento en la densidad aparente. Con el objetivo de mejorar sus características antes de los procesos de densificación y su posterior aprovechamiento energético en procesos de combustión.

- **Propiedades químicas:**

Además de realizar la caracterización física de la materia prima a tratar, a esta se le realizan análisis químicos, los cuales detallarán en sus resultados valores muy importantes que permitirán evaluar y predecir su comportamiento como combustible, además de la posibilidad de realizar tratamientos que mejoren propiedades que beneficien su aprovechamiento energético.

**Tabla 3. 2 Análisis inmediato, elemental y poder calórico de las HCA vírgenes.**

Fuente: Laboratorio ARPL.

ENSAYOS		M2014 FY-HC1			MÉTODO
		Base de análisis	Base seca	Base recibida	
Humedad recepción ADL	%			3.4	ASTM D 2013
Análisis Inmediato					
Humedad	%	10.2	--	13.3	ASTM D 3173
Cenizas	%	8.2	9.1	7.9	ASTM D 3174
Materia Volátil	%	67.5	75.1	65.1	ASTM D 3175
Carbono fijo	%	14.2	15.8	13.7	ASTM D 3172
TOTAL	%	100	100	100	
Poder Calórico					
Poder calorífico bruto	Cal/g	3730	4155	3602	ASTM D 5865
Poder calorífico neto	Cal/g	--	--	3279	Cálculo ASTM D3286
Análisis Elemental					
Carbono	%	39.4	43.9	38.1	ASTM D 3178
Hidrógeno	%	6.1	5.52	6.27	ASTM D 3178
Azufre	%	0.25	0.28	0.24	ASTM D 3177, met B
Nitrógeno	%	0.3	0.33	0.29	ASTM D 3179
Cenizas	%	8.2	9.1	7.9	ASTM D 3174
Oxígeno, por diferencia	%	45.8	40.9	47.2	ASTM D 3174
Cloro	%	0.62	0.69	0.60	ASTM D 2361



**Tabla 3. 3 Análisis de ceniza de HCA vírgenes.**

Fuente: Laboratorio ARPL.

ENSAYOS		M2014 FY-HC1 (Ceniza)	MÉTODO
SiO <sub>2</sub> (dióxido de silicio)	%	49.9	ASTM D4326-04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (óxido de aluminio)	%	6.65	ASTM D4326-04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (óxido férrico)	%	3.02	ASTM D4326-04
CaO (óxido de calcio)	%	10.1	ASTM D4326-04
MgO (óxido de magnesio)	%	4.08	ASTM D4326-04
SO <sub>3</sub> (trióxido de azufre)	%	8.68	ASTM D4326-04
Na <sub>2</sub> O (óxido de sodio)	%	2.25	ASTM D4326-04
K <sub>2</sub> O (óxido de potasio)	%	12.16	ASTM D4326-04
TiO <sub>2</sub> (dióxido de titanio)	%	0.41	ASTM D4326-04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (pentóxido de fósforo)	%	1.47	ASTM D4326-04
MnO (óxido de manganeso)	%	0.09	ASTM D4326-04
SrO (óxido de estroncio)	%	0.05	ASTM D4326-04
Pérdida al fuego	%	1.0	ASTM C25 - 11
TOTAL	%	99.9	

De los resultados obtenidos en la Tabla 3. 2, se logró determinar la cantidad de aire estequiométrico que se necesita para tener una buena combustión. Además, con los resultados del poder calorífico se determina el calor que puede entregar la HCA y de esta manera hallar la eficiencia en la combustión.

De la Tabla 3. 3, se observó la presencia de alcalinos, como el potasio y sodio; ya sea en forma de óxidos, hidróxidos o compuestos organometálicos, que tienden a bajar el punto de fusión de cenizas, dando lugar a la formación de escoria en las superficies sometidas a radiación, ya sea en la rejilla de la caldera o en el lecho (slagging), y el ensuciamiento de las superficies de transferencia de calor convectivas (fouling) por medio de incrustaciones [33] [34]. Por lo que fue necesario realizar un tratamiento a las HCA para disminuir estos compuestos y evitar problemas como: cenizas reducidas y bajo punto de fusión; en el quemador: ensuciamiento, corrosión o presentarse como cenizas volantes. Para esto se implementó el proceso de lavado de las HCA en los pre-tratamientos, debido a que mediante el proceso de lavado del bio-combustible con agua, se logró disminuir en un porcentaje importante la presencia de metales alcalinos y cloro, mejorando significativamente los problemas de corrosión y de formación de depósitos y provocando un aumento de la temperatura de fusibilidad de las cenizas. [13]

### 3.1.2 Metodología de trabajo

Para elaborar las briquetas a ensayar, se utilizó el siguiente plan de trabajo que se realizó en el laboratorio del Grupo de Investigación Carbón y Biomasa, el cual consiste en lo siguiente:

#### I. Definir las formulaciones que se utilizaran en la densificación de las briquetas.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la influencia del porcentaje de arcilla en la calidad de briquetas de hojas de caña de azúcar para su empleo como combustible, debido a que al utilizar la arcilla como aglutinante en el densificado se espera obtener una mejor calidad en la briqueta, aportando lo siguiente:

- La arcilla se caracteriza por formar enlaces de Van der Waals, al ser sus partículas muy pequeñas uniéndose entre los intersticios de la estructura.
- Al utilizar la aglomeración por presión, estos enlaces de Van der Waals son reforzados por lo que se espera una mejor adhesión de las partículas y una mejor resistencia de la briqueta.
- La arcilla almacena calor, por lo que se espera que el tiempo que tarda el proceso de combustión de la briqueta se prolongue.

Por otro lado, se fijó un límite de 15% debido a que al ser material inerte, no aporta energía a la briqueta reduciendo su poder calorífico, por lo que la energía producida por unidad de masa disminuiría. Además experiencias previas en el Grupo de Investigación Carbón y Biomasa, determinaron que al aumentar el porcentaje de arcilla la briqueta presentaba poca resistencia.

El segundo aglutinante a utilizar es la fécula; se optó por utilizar este aglutinante por la forma en la que se aglomera convirtiéndose en un gel al mezclarse con agua caliente y formando en el aglomerado enlaces más fuertes que permiten una mejor unión de sus partículas, siendo estos los puentes líquidos que luego del proceso de secado de la briqueta se convierten en puentes sólidos. Además, como se puede observar en la Tabla 3. 4 las granulometrías de las HCA no son las mismas, debido a que para tener el tamaño de partícula tan fino, se debe emplear energía en el proceso de molienda del material, por lo que se optó por combinarlo en 50% con material de granulometría mayor y utilizar un aglutinante tipo gel que se encargue de asegurar la buena aglomeración de la mezcla.

**Tabla 3. 4 Formulación general.**

**Fuente: Elaboración Propia.**

<b>Fórmula X [B-?]</b>		
Granulometría HCA	50% [M50 < X < M30]	50% [M50 < X]
HCA	75% peso seco	
Arcilla y Fécula	25% peso seco	
Presión de trabajo	150 bar	

Ambos, arcilla y fécula irán variando en la mezcla ya que se ha fijado un 25% de aglutinante para la elaboración de las briquetas, debido a que experiencias previas determinaron que las HCA se aglomeraban mejor cuando se tenía 75% de ellas en peso seco.

La presión de trabajo fue de 150 bares debido a las limitaciones de la briqueteadora disponible en el laboratorio. Si se elevaba más la presión, el aglomerado comenzaba a escurrirse de la matriz generando pérdidas de material, por lo que se optó por trabajar a la mayor presión posible antes de que el material se empiece a escurrir.

Por último, se estableció la elaboración de 4 formulaciones de briquetas con una cantidad de 32 briquetas por formulación, esto debido a las limitaciones del material disponible para la elaboración de las briquetas y a que la máquina briqueteadora, tiene una producción mínima de 4 briquetas.

Se puede observar en la Tabla 3. 5 que se necesitan en total 30 briquetas para realizar los ensayos correspondientes, siendo estos:

**Tabla 3. 5 Cantidad de briquetas por formulación**

**Fuente: Elaboración Propia.**

<b>Ensayos</b>	<b>Cantidad de briquetas</b>
Esponjamiento	0
Compresión	5
Impacto	5
Combustión	20

- a. **Esponjamiento:** Se consideran “0” debido a que no es un ensayo destructivo por lo que no es necesario realizar briquetas solo para este ensayo, se utilizan las briquetas que serán utilizadas para los otros ensayos.
- b. **Compresión:** Se fijó una cantidad de 5 briquetas, para tener un valor representativo en el ensayo a realizar, teniendo como referencia las “Pruebas Físicas de Briquetas de Combustible” [27].

- c. **Impacto:** Se fijó una cantidad de 5 briquetas, para tener un valor representativo en el ensayo a realizar, teniendo como referencia las “Pruebas Físicas de Briquetas de Combustible” [27].
- d. **Combustión:** Teniendo como referencia el protocolo del ensayo de combustión de briquetas del Grupo de Investigación Carbón y Biomasa, se utilizaron 20 briquetas para realizar este ensayo.

**II. Desarrollar el proceso de densificación para las condiciones solicitadas y planteadas.**

Como se mencionó en el subcapítulo 3.1.1, de la caracterización física y química se determinan los procesos por los que debe someterse las HCA antes de su densificado. Siguiendo la metodología desarrollada por el Grupo de Investigación Carbón y Biomasa se procedieron a realizar los siguientes pre-tratamientos:

**Tabla 3. 6 Procesos y equipos utilizados en el laboratorio.**

**Fuente: Elaboración Propia.**

Procesos	Equipos y accesorios
Muestreo	Sacamuestra de suelos
Trozado	Guillotina manual de oficina
Molienda	Molino de cuchillas y licuadoras
Cribado	Criba vibratoria
Lavado	Ollas, hornillas eléctricas y termómetros digitales
Secado	Al ambiente, hornos eléctricos
Análisis químico	Laboratorio
Molienda	Molino de cuchillas y licuadoras
Aglomeración	Ollas, hornillas eléctricas y básculas
Densificado	Briqueteadora hidráulica
Secado	Al ambiente, hornos eléctricos

Como se puede observar en la Tabla 3. 6, los procesos básicamente son utilizados para la reducción del tamaño de partícula de la HCA, adicionalmente se realizará el proceso de lavado para disminuir los álcalis y mejorar la calidad de las cenizas.

**III. Evaluar las distintas formulaciones mediante ensayos de compresión, impacto, esponjamiento y combustión.**

Los ensayos de evaluación de briquetas fueron realizados en las instalaciones del Laboratorio del Grupo de Investigación Carbón Biomasa, del Laboratorio de Materiales y del Laboratorio de Energía, donde se trabajó con la briqueta para cumplir con el plan de trabajo. Estos serán descritos en el Capítulo 4.

#### IV. Analizar los resultados obtenidos de cada ensayo.

En el análisis de resultados se realizó una comparación de todas las formulaciones y sus resultados en cada ensayo, relacionándolos con las características que presenta cada una de las formulaciones. Estos serán descritos en el Capítulo 5.

### 3.2 Estadística para validación

Cuando se registran los datos de un conjunto de lecturas de un instrumento, estas sufren alguna variación de una a otra y para tener un único valor representativo del ensayo tomaremos la media aritmética de todas las lecturas. Siendo la media aritmética:

$$x_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

La desviación  $d_i$  para cada lectura está definida por:

$$d_i = x_i - x_m$$

La desviación estándar representa el grado de dispersión de los datos con respecto a la media aritmética. Dicho de otra manera, la desviación estándar es el "promedio" o variación esperada con respecto a la media aritmética. La desviación estándar está definida por:

$$\sigma = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

En el caso de tener un conjunto menor a 20 mediciones, se recomienda utilizar la siguiente relación para una mejor estimación de la desviación estándar. [35]

$$\sigma = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2]^{\frac{1}{2}}}{n - 1}$$

El criterio de Chauvenet especifica que una lectura puede rechazarse si la probabilidad de obtener la desviación particular de la media es menor que  $1/2n$ . Para aplicar el criterio de Chauvenet, primero se calcula el valor medio y desviación estándar, usando la totalidad de los datos; posteriormente se compara la desviación estándar, de acuerdo con la información dada en la Tabla 3. 7 y entonces se eliminan los datos inciertos. Luego se calcula un nuevo valor medio y una nueva desviación estándar eliminando al punto incierto de los cálculos. [35]

**Tabla 3. 7 Criterio de Chauvenet para el rechazo de lecturas. [35]**

Número de lecturas	Relación de la máxima desviación aceptable a la desviación estándar, $d_{m\acute{a}x}/\sigma$
2	1.15
3	1.38
4	1.54
5	1.65
6	1.73
7	1.8
10	1.96
15	2.13
25	2.33
50	2.57
100	2.81
300	3.14
500	3.29
1000	3.48

Este criterio permitió evaluar los datos tomados en los ensayos y eliminar aquellos que sean inciertos y perjudiquen el promedio del mismo, permitiendo obtener resultados más precisos y representativos. Por lo que es utilizado en el procesamiento y análisis de resultados.

### **3.3 Elaboración de las briquetas**

#### **3.3.1 Recepción de la materia prima**

Se recibieron 20 costales de HCA con un peso promedio de 6 kg (Ilustración 3. 4), procedentes del fundo Montelima, perteneciente al ingenio azucarero Caña Brava, los cuales fueron etiquetados, pesados y almacenados para su posterior tratamiento. Estas hojas recibidas presentaban diferentes tamaños de corte (Ilustración 3. 3), por lo que se procedió a caracterizarlas tomando pequeñas muestras de diferentes costales. Los resultados de la caracterización se muestran en la Tabla 3. 1.



Ilustración 3. 3 Tamaño de recepción de las HCA.



Ilustración 3. 4 Saco de HCA.

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2014.

### 3.3.2 Muestreo

Consiste en el proceso de combinar las HCA de los sacos que se tienen previstos para los ensayos, ya que se requiere homogenizar la muestra con la que se trabajará, debido a que la recolección de las HCA se realizó en distintos puntos del mismo fundo. Para esto se extrajo 0,5 kg de 5 sacos (1, 5, 10, 15 y 20) para de esta manera obtener 2,5 kg de materia prima (HCA), la cual será una muestra representativa de las HCA recibidas.

**Densidad real y aparente:** La densidad real es aquella propia de la materia, mientras que la densidad aparente está relacionada en la manera en la que cada tipo de biocombustible sólido tiende a llenar un volumen. Por lo que la densidad aparente es la cantidad de peso de biocombustible sólido que se puede acumular en un volumen dado.

$$\rho_{real} = \frac{\text{masa de materia}}{\text{volumen de materia}}$$

$$\rho_{aparente} = \frac{\text{masa de materia}}{(\text{volumen de materia} + \text{volumen de aire en huecos})}$$

La densidad aparente de un material varía, fundamentalmente, con el grado de compactación que haya sufrido, así como con el contenido de humedad que presente. Es importante conocer la densidad aparente que presenta los residuos ya que el pre-tratamiento que reciben es precisamente con el objetivo de aumentar esta, y facilitar su almacenamiento (Tabla 3. 1). Para esto se utilizó un recipiente con capacidad de almacenar 61L, en el que se vertieron las HCA (Ilustración 3. 5).



**Ilustración 3. 5 Recipiente para el cálculo de la densidad aparente.**

**Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2014.**

### **3.3.3 Trozado**

Los procesos de reducción granulométrica consisten en la disminución del tamaño de un cuerpo o partícula mediante la división o fractura de esta, cuyo objetivo fundamental es aumentar la superficie específica de la partícula. En el ámbito energético, los combustibles sólidos requieren de estos procesos en los cuales se adecua el tamaño final de las partículas a los requerimientos técnicos especificados por cada sistema de conversión energética.

Además de la viabilidad técnica de la transformación energética, los procesos de reducción de tamaño dotan al combustible de mayor valor añadido mediante la mejora de sus características:

- Aumento de la relación superficie-volumen de la partícula.
- Importante aumento generalizado de la densidad aparente del recurso biomásico.
- Mayor facilidad en su manejo.
- Disminución de los costes de transporte asociados a la disminución de la densidad aparente.

Particularmente en nuestro caso, el trozado corresponde a un primer recorte de la materia en el cual se disminuyó el tamaño de la HCA (aprox. 3cm de largo), para que posteriormente pueda ser molida en el molino de cuchillas y en las licuadoras. Este proceso se realizó de manera manual utilizando una guillotina y un recipiente de almacenamiento de las HCA (Ilustración 3. 6). A continuación en la Tabla 3. 8 se presentan datos promedios recogidos del laboratorio:



Tabla 3. 8 Datos y resultados del proceso de trozado.

Fuente: Elaboración Propia.

Trozado	
Peso HCA inicial [g]	500
Peso HCA no utilizable [g]	33.63 ± 4.21
Peso después del corte [g]	466.38 ± 4.21
Porcentaje recuperado [%]	93.33 ± 0.76
Capacidad de recipiente [m <sup>3</sup> ]	0.061
Peso de HCA que ocupa el Vol. Del recipiente [kg]	3.17 ± 0.04
Densidad Aparente [kg / m <sup>3</sup> ]	51.99 ± 0.73



Ilustración 3. 6 (a) Proceso de trozado de las HCA, (b) Tamaño de HCA cortadas.

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2014.

Como se puede observar en la Tabla 3. 8, la densidad aparente aumenta con respecto al de recepción, sin embargo aún sigue siendo muy baja (Ilustración 3. 7).



Ilustración 3. 7 (a) y (b) Recipiente para el cálculo de la densidad aparente.

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2014.

Por otro lado el objetivo de este proceso es disminuir lo suficiente el tamaño de las HCA para que puedan ser introducidas al siguiente proceso de molienda. Además se pierde aproximadamente el 7% del material trozado, debido a que se encuentran partes de cogollo, raíces y tallos, los cuales son descartados en el proceso de trozado.

### 3.3.4 Molienda

Generalmente, la tecnología de conversión energética fija el tamaño máximo de las partículas. Sin embargo, en alguna de las tecnologías indicadas, no solo es importante en límite superior del tamaño, sino también fracciones intermedias o límites inferiores, ya que un proceso de reducción de tamaño genera partículas de tamaños muy heterogéneos. El objetivo de la reducción de tamaño es conseguir una distribución sin partículas gruesas que puedan ser problemáticas pero sin grandes fracciones de partículas excesivamente finas.

Este proceso se le denomina reducción intermedia de tamaño, ya que la reducción de tamaño obtenida no es la requerida para el proceso de conversión energética [13], sino utilizada para la realización de un pre-tratamiento físico adicional, con miras a mejorar la eficiencia del aprovechamiento energético de la biomasa. Este proceso se realizó utilizando licuadoras como equipo de molienda (Ilustración C. 5) en el que se colocaron aprox. 30g de las HCA y se procesó durante 25 segundos.

Como resultado del proceso de molienda (Tabla 3. 9) se obtienen partículas más pequeñas (Ilustración 3. 8), las cuales se tamizaron en el siguiente proceso.

**Tabla 3. 9 Resultados del proceso de molienda.**

**Fuente: Elaboración Propia.**

<b>Molienda</b>	
Peso HCA pos-trozado [g]	469.25 ± 1.91
Peso HCA pos-molienda [g]	459.6 ± 1.35
Porcentaje recuperado [%]	97.89 ± 0.25



**Ilustración 3. 8 Tamaño de HCA molidas.**

**Fuente:** Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2014.

### 3.3.5 Cribado

Para este proceso se utilizó una criba vibratoria en la que se colocaron las mallas M6 (3,36 mm), M9 (2 mm) y M16 (1 mm) ver Ilustración C. 7; para posteriormente realizar la clasificación granulométrica, encendiendo el equipo, vertiendo 80 gr. De HCA aproximadamente en la malla superior y removiéndolas cada 30 segundos hasta que la malla M9 esté totalmente cubierta. Seguidamente se retiraron las HCA de la malla M9, se colocaron en un recipiente separado y se realizó la operación nuevamente. Por último, se repitió el procedimiento nuevamente con la malla M16, con la diferencia que el material menor a M16 no será apto para el proceso de lavado debido a que la HCA es tan pequeña que dificulta el proceso de secado y que la HCA mayor a M6 se volverá a moler con el objetivo de disminuir el material mayor a M6. Terminado el proceso de cribado se procedió a apagar el equipo.

Como se observa en la Ilustración 3. 9, se obtienen distintas granulometrías luego del cribado de las HCA (Tabla 3. 10), siendo la menor descartada para el proceso de lavado, además el proceso de cribado permite limpiar las partículas y reducir la cantidad de polvo adherido a la materia por la fricción producida en el proceso de cribado, retirándose el mismo junto a las HCA  $X < M16$ .

**Tabla 3. 10 Resultados del proceso de cribado.**

**Fuente:** Elaboración Propia.

Cribado	
Peso HCA pos-molienda [g]	459.6 ± 1.35
Peso HCA pos-cribado [g]	421.33 ± 1.94
Peso de HCA $X < M16$ [g]	38.11 ± 1.27
Porcentaje recuperado [%]	91.70 ± 0.27

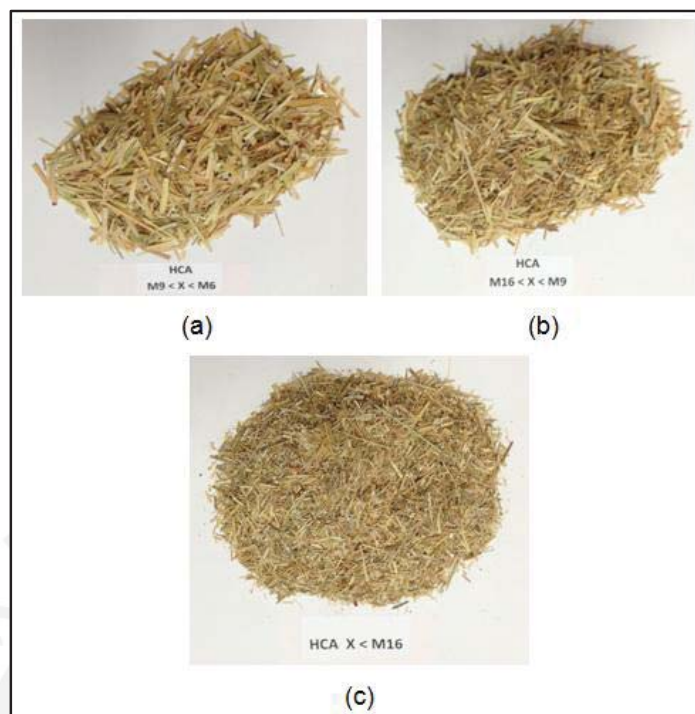


Ilustración 3. 9 Granulometrías obtenidas del proceso de cribado. (a) HCA  $M9 < X < M6$ , (b) HCA  $M16 < X < M9$ , (c) HCA  $X < M16$

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2014.

### 3.3.6 Lavado

Es el proceso que permite remover los sólidos superficiales, disminuir los compuestos con cenizas reducidas y bajo punto de fusión, como los álcalis que pueden ocasionar problemas en los equipos de combustión al producir efectos indeseados como: ensuciamiento, corrosión o presentarse como cenizas volantes.

Este proceso consistió en colocar sobre la hornilla eléctrica una olla, a la cual se le agregó 3L de agua destilada y 100 g de HCA ( $X > M6$ ,  $M6 > X > M9$ ,  $M9 > X > M16$ ), luego se colocó el termómetro digital y se encendió la hornilla para empezar a tomar las temperaturas cada 5 minutos hasta llegar a los  $80^{\circ}\text{C}$  (Ilustración 3. 100), alcanzada esta temperatura se mantuvo la misma durante 30 minutos. Una vez culminados los 30 minutos, se tomó los datos del peso de la HCA húmeda y luego se colocó en un recipiente para que el material pueda secarse.



Ilustración 3. 100 Ensayo del lavado de las HCA.

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2015.

Los datos obtenidos en cada ensayo se tomaron siguiendo el formato descrito en la Tabla 3. 11.

Tabla 3. 11 Datos obtenidos en el ensayo de lavado.

Fuente: Elaboración Propia.

Miércoles 8 de Enero del 2014				Miércoles 8 de Enero del 2014			
Ensayo 6: Granulometría X > M 6				Ensayo 7: Granulometría X > M 6 y M9 < X < M 6			
Olla pequeña		Olla grande		Olla pequeña		Olla grande	
Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
0	23.4	0	23.5	0	27.1	0	25.0
5	33.7	5	33.0	5	36.5	5	34.7
10	54.7	10	50.4	10	62.5	10	55.5
15	80.5	15	64.3	15	81.0	15	64.4
20	82.6	20	75.2	20	80.3	20	77.2
25	79.8	25	81.4	25	80.4	25	83.5
30	81.1	30	82.5	30	77.8	30	78.9
35	80.6	35	82.0	35	81.8	35	82.4
40	79.4	40	80.6	40	79.2	40	79.5
45	77.8	45	78.4	45	81.3	45	80.8
		50	81.1			50	81.3

De la Ilustración 3. 111, se puede observar que las curvas trazadas por la “OP”, tienen un menor tiempo en el proceso de lavado debido a que llegan más rápido a la temperatura de 80°C. Esto se debe al espesor del material de la olla, el cual al ser menor, permite una mejor transferencia de calor al fluido.

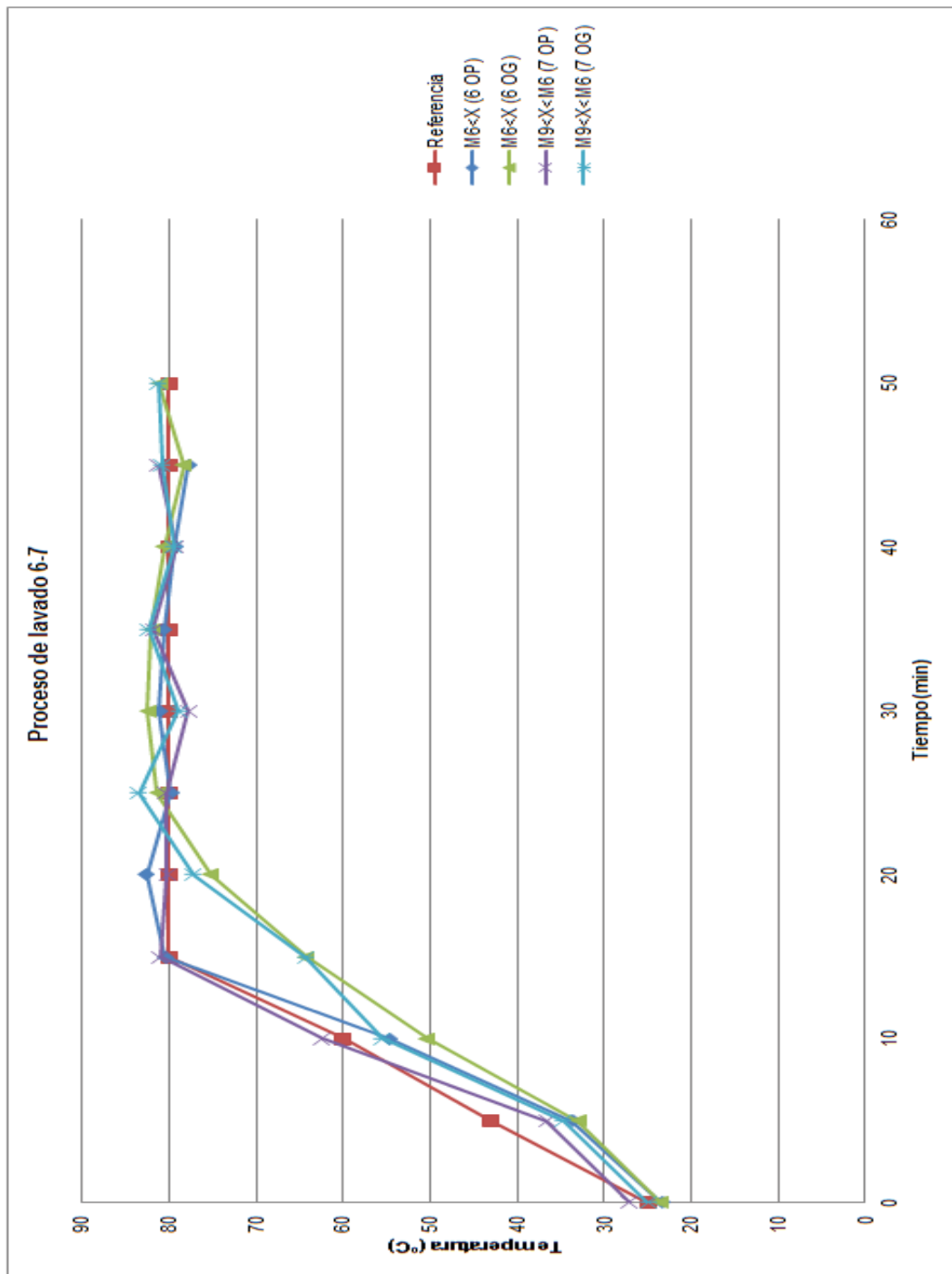


Ilustración 3. 111 Gráfica de Temperatura vs Tiempo en el proceso de lavado.

Fuente: Elaboración Propia.

### 3.3.7 Secado

Este proceso consiste en colocar los recipientes con las HCA húmedas en un lugar donde estén expuestas al sol para su secado al ambiente, este proceso tiene una duración aproximada de 2 días a una temperatura 30°C, además antes del siguiente proceso correspondiente al de molienda, pasa por un secado en el horno (Ilustración 3. 12) a una temperatura aproximada de 90°C, con el objetivo de disminuir la humedad contenida en las HCA y aumentando su friabilidad lo que aumenta el rendimiento del siguiente proceso, debido a que se obtendrán más partículas finas, las cuales se utilizaran en el proceso de aglomeración para el desarrollo de las distintas formulaciones.



**Ilustración 3. 12 Proceso secado de las HCA.**

**Fuente:** Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2015.

Los datos promedios obtenidos en los ensayos se muestran en la Tabla 3. 12, además se tiene el cambio de la masa a través del tiempo en los procesos de lavado y secado (Ilustración 3. 13).

**Tabla 3. 12. Variación del peso en los procesos de lavado y secado.**

**Fuente:** Elaboración Propia.

Secado	
Peso HCApre-lavado [g]	100
Peso HCA pos-lavado [g]	358 ± 37.4
Peso después del secado T=30°C [g]	82.2 ± 3.9
Peso después del secado T=90°C [g]	71.78 ± 3.42
Porcentaje recuperado [%]	71.78 ± 3.42
Densidad Aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	52 ± 0.73

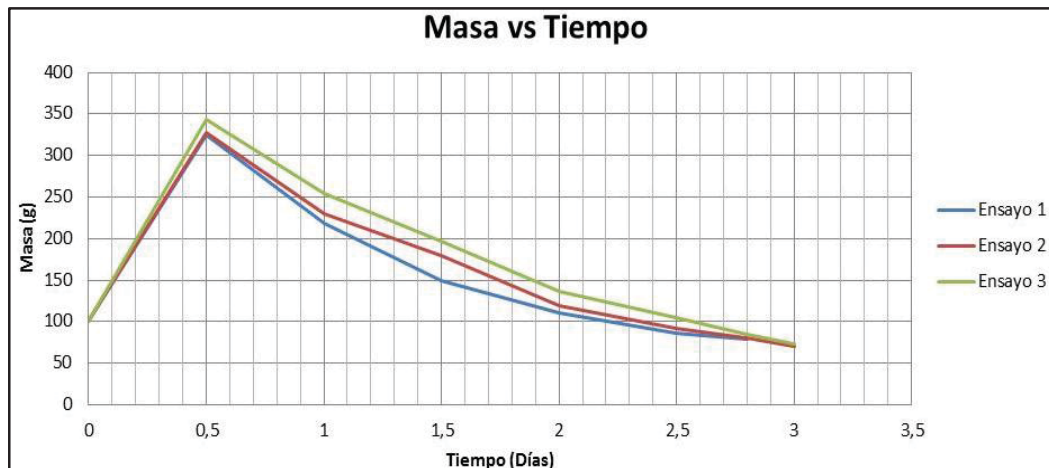


Ilustración 3. 13 Gráfica de masa vs tiempo de HCA desde lavado hasta secado.

Fuente: Elaboración Propia.

De la Ilustración 3. 13 y Tabla 3. 12 se pudo observar la disminución de la humedad presente en la materia durante el proceso de secado, es 28 % aproximadamente, lo que permitirá obtener un mayor rendimiento en la molienda del material al tener partículas más friables.

### 3.3.8 Análisis de caracterización química

Estos análisis de caracterización química permiten conocer las propiedades de la materia prima como combustible. Luego del proceso de mejora de las HCA. Para ello fue necesario contar con una muestra de 300 g de HCA lavadas y molidas hasta obtener una granulometría menor a la malla M60, para que puedan ser analizadas en un laboratorio externo.

Del análisis inmediato, elemental y poder calorífico (Tabla 3. 13 y 3.14). Realizando la comparación entre las HCA vírgenes y las lavadas, se destacan las variaciones en las siguientes propiedades:

- Disminución del % de cenizas, carbono fijo y azufre.
- Aumento del Poder Calorífico, % de material volátil.

Esto beneficia el proceso de conversión energética de la biomasa, ya que al disminuir las cenizas, se tiene menos residuo que remover del quemador; al disminuir el azufre, se producirá menor cantidad de dióxido de azufre. Por otro lado, el aumento del poder calorífico, indica que la biomasa será capaz de entregar más energía por unidad de masa; mientras que el aumento de la materia volátil facilitará el encendido de la biomasa.



Del análisis de ceniza, se observa una variación importante en los álcalis, lo que permite tener un mayor punto de fusión de las cenizas y evitar ensuciamiento, corrosión o presencia de cenizas volantes.

**Tabla 3. 13 Análisis inmediato, elemental y poder calorífico HCA lavadas.**

Fuente: Laboratorio ARPL.

ENSAYOS		M2014 FY-HC2			MÉTODO
		Base de análisis	Base seca	Base recibida	
Humedad recepción ADL	%			3.4	ASTM D 2013
Análisis Inmediato					
Humedad	%	10	--	13.1	ASTM D 3173
Cenizas	%	5	5.6	4.9	ASTM D 3174
Materia Volátil	%	73.6	81.8	71.1	ASTM D 3175
Carbono fijo	%	11.3	12.6	10.9	ASTM D 3172
TOTAL	%	100	100	100	
Poder Calórico					
Poder calorífico bruto	Cal/g	3955	4396	3821	ASTM D 5865
Poder calorífico neto	Cal/g	--	--	3509	Cálculo ASTM D3286
Análisis Elemental					
Carbono	%	47	52.2	45.4	ASTM D 3178
Hidrógeno	%	5.88	5.29	6.06	ASTM D 3178
Azufre	%	0.11	0.12	0.11	ASTM D 3177, met B
Nitrógeno	%	0.27	0.3	0.26	ASTM D 3179
Cenizas	%	5	5.6	4.9	ASTM D 3174
Oxígeno, por diferencia	%	41.7	36.5	43.3	ASTM D 3174
Cloro	%	0.14	0.16	0.14	ASTM D 2361

**Tabla 3. 14 Análisis de ceniza HCA lavadas.**

Fuente: Laboratorio ARPL.

ENSAYOS		M2014 FY-HC2 (Ceniza)	MÉTODO
SiO <sub>2</sub> (dióxido de silicio)	%	63.5	ASTM D4326-04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (óxido de aluminio)	%	4.70	ASTM D4326-04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (óxido férrico)	%	2.64	ASTM D4326-04
CaO (óxido de calcio)	%	11.1	ASTM D4326-04
MgO (óxido de magnesio)	%	2.93	ASTM D4326-04
SO <sub>3</sub> (trióxido de azufre)	%	3.98	ASTM D4326-04
Na <sub>2</sub> O (óxido de sodio)	%	0.94	ASTM D4326-04
K <sub>2</sub> O (óxido de potasio)	%	5.52	ASTM D4326-04
TiO <sub>2</sub> (dióxido de titanio)	%	0.25	ASTM D4326-04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (pentóxido de fósforo)	%	1.21	ASTM D4326-04
MnO (óxido de manganeso)	%	0.08	ASTM D4326-04
SrO (óxido de estroncio)	%	0.05	ASTM D4326-04
Pérdida al fuego	%	2.5	ASTM C25 - 11
TOTAL	%	99.9	

### 3.3.9 Molienda y cribado

La molienda es el último de los procesos mecánicos de reducción de granulométrica en el que se producen partículas cuyo tamaño es inferior a 8 mm. La molienda permite alcanzar el mayor ratio de reducción de tamaño entre partícula inicial y final, suponiendo también el mayor consumo energético de los procesos de reducción granulométrica. (Tabla 3. 135)

Con el objetivo de tener una materia prima que sea adecuada para la compactación fue necesario obtener una granulometría menor a la alcanzada en un paso anterior. Para este proceso se utilizó un molino de cuchillas y una criba vibratoria con mallas M16 (1.18mm), M30 (600µm) y M50 (300µm). (Tabla 3. 136)

En primer lugar se colocó en el molino de cuchillas 30g de HCA pos-lavado y se configuró para que funcionara por 3 minutos, dos veces consecutivas. Luego se disponen las mallas según la (Ilustración C. 8), una vez armado se vertió todo el material molido, se sellaron las mallas, se colocó en la criba y se encendió durante 4 minutos. Una vez cribado, el material se dispuso en recipientes según clasificación granulométrica para posteriormente realizar el aglomerado y densificado del material. Para la formulación desarrollada solo se utilizó las HCA: X < M50 y M50 < X < M30.

**Tabla 3. 15 Datos y resultados obtenidos del proceso de molienda.**

Fuente: Elaboración Propia.

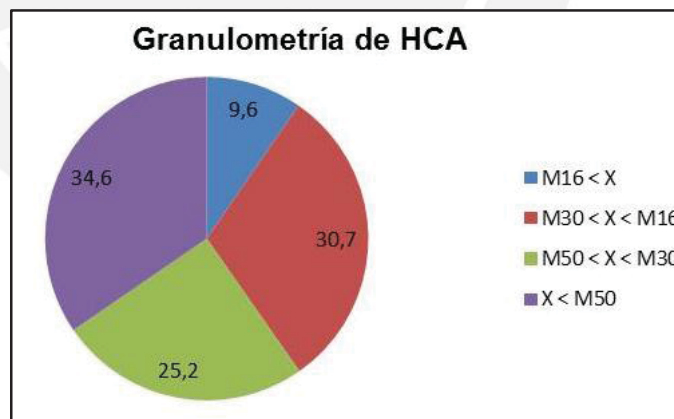
Molienda	
Peso HCA pos-secado [g]	500
Peso HCA pos-molienda [g]	496 ± 0.82
Porcentaje recuperado [%]	99.2 ± 0.16

**Tabla 3. 16 Datos y resultados obtenidos del proceso de cribado.**

Fuente: Elaboración Propia.

Cribado	
Peso HCA pos-molienda [g]	496 ± 0.82
Peso HCA pos-cribado [g]	495.8 ± 0.92
Peso de HCA X > M16 [g]	47.7 ± 0.95
Peso de HCA M30 < X < M16 [g]	152 ± 3.16
Peso de HCA M50 < X < M30 [g]	125 ± 0.87
Peso de HCA X < M50 [g]	172.11 ± 1.96
Porcentaje recuperado [%]	99.96 ± 0.08

De la Ilustración 3. 14, se observa que el 40 % de HCA no es utilizada en el proceso de densificado, esto debido a que la granulometría mayor a M30 no es adecuada para la densificación, por lo que estos deberían ser tratados nuevamente o utilizar un equipo que permita obtener partículas más finas.



**Ilustración 3. 14 Porcentaje de recuperación de las HCA en el cribado.**

Fuente: Elaboración Propia.

De las tablas Tabla 3. 137 y 3.18, se obtienen valores mucho mayores de densidad aparente de las HCA con respecto a los de recepción y trozado, aproximadamente entre 5 a 6 veces más, por lo que se puede decir que los procesos fueron los adecuados, salvo el rendimiento de los mismos que no fueron muy altos siendo en general 35 % el porcentaje de material útil para el proceso de densificado.

**Tabla 3. 17 Densidad aparente de HCA X < M50.**

Fuente: Elaboración Propia.

HCA secas $\rho_{\text{aparente}}$	
Peso de las HCA X < M50 (kg)	0.2952 $\pm$ 0.0011
Volumen del recipiente (ml)	1070
$\rho_{\text{aparente}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	275.89 $\pm$ 0.95

**Tabla 3. 18 Densidad aparente de HCA M50 < X < M30.**

Fuente: Elaboración Propia.

HCA secas $\rho_{\text{aparente}}$	
Peso de HCA M50 < X < M30 (kg)	0.2349 $\pm$ 0.0007
Volumen del recipiente (ml)	1070
$\rho_{\text{aparente}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	219.53 $\pm$ 0.7

### 3.3.10 Desarrollo del proceso de densificado

El proceso de densificado se llevó a cabo para 4 formulaciones en las que se mantuvo constante el porcentaje en seco de las HCA que corresponde al 75%, y se varió los porcentajes correspondientes a los aglutinantes (arcilla y fécula), evaluando el comportamiento de las briquetas bajo los ensayos mencionados en el capítulo anterior y determinando bajo qué porcentaje de arcilla, la briqueta presenta mejores características.

#### 3.3.10.1 Aglomeración

El objetivo de este proceso es la agrupación de partículas, mediante fuerzas internas y externas para formar un conjunto de mayor tamaño. Para ello se utilizó arcilla y fécula como aglutinantes. La arcilla proporcionará una unión mediante fuerzas intermoleculares debido a que sus partículas son extremadamente pequeñas y de superficie lisa, siendo el diámetro de las partículas inferior a 0,002 mm, permitiendo una mejor unión entre los intersticios de la estructura. La fécula por otro lado, necesita mezclarse con agua caliente para que se gelatinice y se convierta en un tipo de gel aglutinante, el cual proporcionará inicialmente una unión por puentes líquidos, los cuales al secarse se convierten en puentes sólidos debido al fenómeno de retrogradación del aglutinante al reorganizar las moléculas de almidón y formar estructuras cristalinas.

- **Preparación del aglomerado**

Consiste en mezclar en un solo recipiente 75g de HCA, de las cuales el 50%  $X < M50$  (ver Ilustración 3. 175) y 50%  $M50 < X < M30$  (ver Ilustración 3. 16), con cierto porcentaje de arcilla (ver Ilustración 3. 157), el cual varía según la formulación a elaborar. Luego se procede a homogenizar la mezcla sellando el recipiente y agitándolo durante 1 minuto. Al finalizar la homogenización se vierte la mezcla en un recipiente y se le añade 50 g de agua para obtener una consistencia apropiada, formándose de esta manera el primer aglomerado (ver Ilustración 3. 18). De forma paralela, se prepara el gel aglutinante (ver Ilustración 3. 19), mezclando la fécula (ver Ilustración 3. 19) con agua caliente en proporción de 1/10, para luego ser mezclado en un recipiente junto a la mezcla HCA con arcilla, formándose de esta manera el aglomerado final (ver Ilustración 3. 21) el cual se compactará en el proceso de densificado.



Ilustración 3. 175 HCA M50 > X.



Ilustración 3. 16 HCA M 30 < X < M 50.



Ilustración 3. 157 Arcilla.



Ilustración 3. 18 Aglomeración HCA y arcilla



Ilustración 3. 20 Fécula.



Ilustración 3. 19 Gel aglutinante.



Ilustración 3. 21 Aglomerado HCA, arcilla y fécula.

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2015.

### 3.3.10.2 Densificado

El objetivo de la compactación del aglomerado es disminuir los espacios entre partículas y dentro de ellas, para que las fuerzas que actúen entre ellas sean lo bastante fuertes como para producir un aglomerado que resista las manipulaciones posteriores del producto.

Luego de tener listo el aglomerado, este se divide en 8 masas del mismo peso, las cuales son introducidas en la matriz de la máquina de densificado en grupos de 4 (ver Ilustración 3. 22) y se compactan mediante el sellado de la matriz por un tornillo de potencia y el accionamiento manual de un pistón hidráulico hasta llegar a una presión de 150 bares, una vez alcanzada la presión de trabajo, esta se mantiene durante un tiempo de residencia de 1 minuto, regulando la presión en 150 bares. Una vez finalizado el tiempo se procede a bajar el pistón, quitar la tapa de la matriz con el tornillo de potencia y expulsar las briquetas de HCA mediante el pistón hidráulico (ver Ilustración 3. 23).



**Ilustración 3. 22 Matriz de la briqueteadora.**

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2015.



**Ilustración 3. 23 Briquetas de HCA.**

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2015.

### **3.3.11 Secado**

Como resultado de la densificación, se obtienen aglomerados que inicialmente tienen baja resistencia, por lo tanto para mejorar esto y obtener enlaces más fuertes, se procede a realizar un proceso de secado, el cual permitió obtener mecanismos enlazantes tales como: puentes sólidos por sinterizado, cristalización y endurecimiento de aglutinantes.

Para este proceso se utilizó un horno adaptado el cual cuenta con: resistencias eléctricas para generar calor en la parte superior e inferior, cuenta con un ventilador para renovar el aire y expulsar el vapor generado, además cuenta con un sensor de temperatura, el cual enciende y apaga las resistencias según la temperatura indicada. Las briquetas se colocan dentro del horno a una temperatura de 100°C durante 4 horas o hasta que su peso sea constante (Ilustración 3. 24).



Ilustración 3. 24 Horno de secado de briquetas.

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2015.

A continuación, en la Tabla 3.19, se presenta un registro de las formulaciones elaboradas y las dimensiones promedio de cada una de ellas luego del secado de las briquetas (Ilustración 3. 245).

Tabla 3. 19. Registro de formulaciones elaboradas variando el % de arcilla.

Fuente: Elaboración Propia.

Registro de formulaciones			
Fórmula 1 [B-A]		Briqueta	
Granulometría HCA	50% M50 < X < M30 y 50% M50 < X	Altura [mm]	37.3
HCA	75% peso seco	Diámetro interior [mm]	12.0
Arcilla	0% peso seco	Diámetro exterior [mm]	35.6
Fécula	25% peso seco	Volumen [mm <sup>3</sup> ]	32909.2
Agua	75% peso húmedo	Peso [g]	11.4
Presión de trabajo	150 bar	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	346.4
Fórmula 2 [B-B]		Briqueta	
Granulometría HCA	50% M50 < X < M30 y 50% M50 < X	Altura [mm]	35.8
HCA	75% peso seco	Diámetro interior [mm]	12.0
Arcilla	5% peso seco	Diámetro exterior [mm]	35.6
Fécula	20% peso seco	Volumen [mm <sup>3</sup> ]	31585.8
Agua	70% peso húmedo	Peso [g]	10.9
Presión de trabajo	150 bar	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	345.1
Fórmula 4 [B-D]		Briqueta	
Granulometría HCA	50% M50 < X < M30 y 50% M50 < X	Altura [mm]	37.3
HCA	75% peso seco	Diámetro interior [mm]	12.0
Arcilla	15% peso seco	Diámetro exterior [mm]	37.5
Fécula	10% peso seco	Volumen [mm <sup>3</sup> ]	36978.1
Agua	60% peso húmedo	Peso [g]	13.4
Presión de trabajo	150 bar	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	362.4
Fórmula 3 [B-C]		Briqueta	
Granulometría HCA	50% M50 < X < M30 y 50% M50 < X	Altura [mm]	38.1
HCA	75% peso seco	Diámetro interior [mm]	12.0
Arcilla	10% peso seco	Diámetro exterior [mm]	36.0
Fécula	15% peso seco	Volumen [mm <sup>3</sup> ]	34472.1
Agua	66% peso húmedo	Peso [g]	12.1
Presión de trabajo	150 bar	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	351.0





(a)



(b)



(c)



(d)

Ilustración 3. 25 Formulaciones de Briquetas (a) B-A, (b) B-B, (c) B-C y (d) B-D.

Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio Carbón Biomasa PUCP, 2015.

## Capítulo 4

### Ensayos de evaluación física y térmica de densificados

El presente capítulo, trata de simular mediante ensayos los distintos procesos por los que será sometido el biocombustible tanto en su fabricación, transporte, almacenamiento y uso final. Para ello, se evaluaron las briquetas mediante ensayos de resistencia a la compresión, impacto, esponjamiento y combustión; ya que con ello se podrá determinar la calidad de las briquetas de HCA y relacionarlas con el % de aglutinante utilizado en cada formulación.

#### 4.1 Ensayo de compresión

Las briquetas deben ser capaces de soportar cargas aplastantes ya que en la manipulación del combustible este se someterá a cargas por almacenamiento, transporte y alimentación a la tolva. Debido a esto, debemos considerar en la calidad de la briketa y su caracterización, la máxima carga que es capaz de soportar antes de la rotura. Entonces, se define la resistencia a la compresión como el aplastamiento máximo que puede soportar la briketa antes de agrietarse o romperse. La cual nos permitirá realizar una comparación entre las formulaciones realizadas y determinar cuál soporta mayor carga, además de evaluar los enlaces formados y relacionarlos con la fuerza máxima que pueden soportar.

El ensayo se realizó de la forma descrita en el capítulo 2, colocando la briketa en posición horizontal, ya que esta posición es la más crítica al presentar menor resistencia a la compresión.

#### Experimentación:

El ensayo de compresión se realizó en el Laboratorio de Materiales de la Sección de Ingeniería Mecánica de la PUCP. Se utilizó una máquina universal de tracción Zwick / Roell Z050 (ver Ilustración 4. 1), operando en modo de compresión y utilizando utillajes para fijar la probeta a ensayar. Se ensayaron 5 briquetas por formulación, en posición horizontal y 1 briketa perteneciente a la formulación B-C en posición vertical, para contrastar la diferencia entre ambas posiciones de ensayo. En la Ilustración 4. 2, se puede observar la posición horizontal de la briketa en los ensayos de compresión, además se visualizan los marcadores de la base, la cual se utilizó como referencia para ubicar la briketa a ensayar.

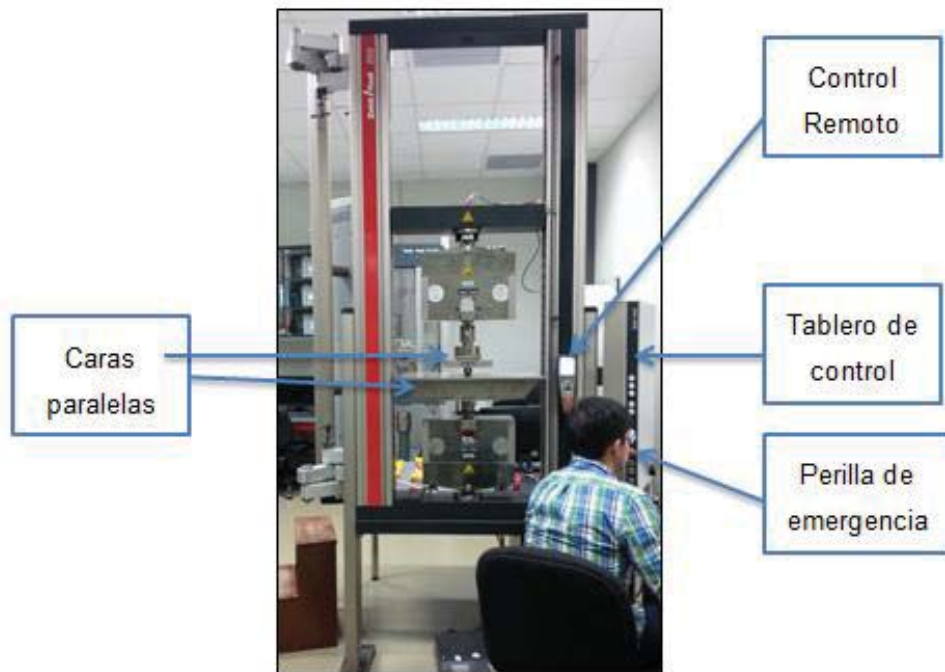


Ilustración 4. 1 Máquina Universal de Tracción Zwick / Roell Z050.

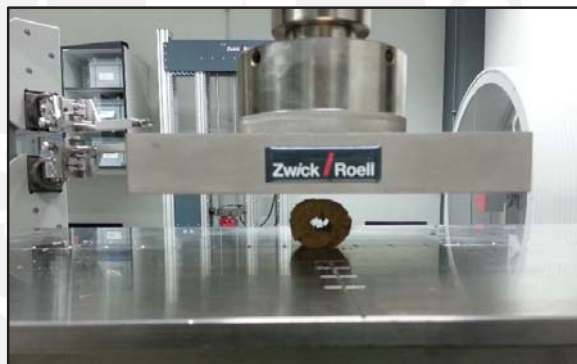


Ilustración 4. 2 Posición horizontal de la briqueita en el ensayo de compresión.

Para operar la máquina, se utilizó el control remoto para desplazamientos rápidos, básicamente para el intercambio de briqueitas para cada ensayo; y el software TestXpert II, en el cual se colocaron los parámetros del ensayo tales como:

- Diámetro exterior
- Diámetro interior
- Altura
- Velocidad de desplazamiento
- Codificación de la probeta
- Precarga

Además este software se encargaba del registro, almacenamiento de datos, del inicio y la parada del ensayo.

La Ilustración 4. 3 muestra el comportamiento de las distintas formulaciones al someterse a una fuerza de compresión hasta que se produzca la fractura. Además, permite obtener la máxima fuerza a la compresión a la que pueden estar sometidas las briquetas antes de su ruptura y la deformación máxima antes de la ruptura.

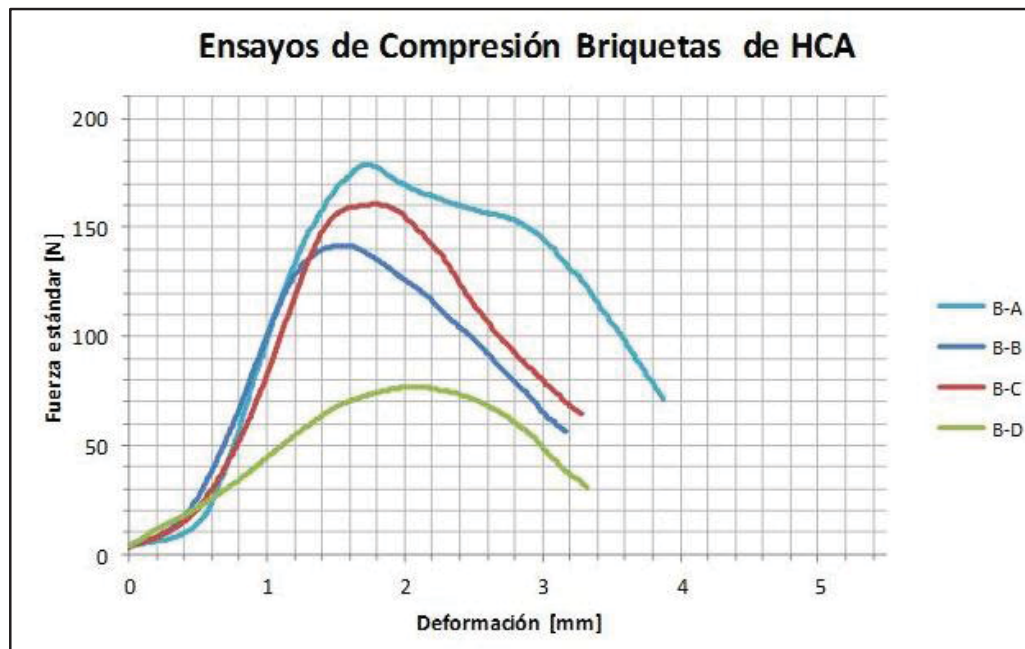


Ilustración 4. 3 Resultados del ensayo de compresión.

Por otro lado, la Tabla 4. 1 muestra los valores medios del ensayo de compresión, con los valores de  $F_{m\acute{a}x}$  ordenados de mayor a menor. Se observa que la tendencia general de la  $F_{m\acute{a}x}$  es a disminuir cuando se le añade mayor porcentaje de arcilla a la mezcla, salvo el caso de la formulación B-C, en la que la fuerza aumenta.

Tabla 4. 1 Resultados medios del ensayo de compresión.

Codificación de Formulación	Fuerza Media Máx [N]	Desv. Estándar	Deformación [mm]
B-A	177.38	± 20.24	1.58
B-C	164.55	± 14.06	1.63
B-B	138.47	± 12.5	1.59
B-D	79.78	± 12.5	2.08

## 4.2 Ensayo de impacto

Las briquetas están sometidas a distintos tipos de carga, por lo que resulta importante analizar la resistencia al impacto, ya que este simula situaciones por las

que será sometida el combustible como son: el traslado y caída entre cintas transportadoras, la alimentación a tolvas, etc. El ensayo se realizó de la forma descrita en el capítulo 2, soltando la briqueta en posición horizontal, ya que esta posición es la más crítica.

Las pruebas realizadas a briquetas comerciales, han fijado un valor mínimo de IFR 50. [36] Por lo que este valor será el valor base para la aceptación de las briquetas elaboradas.

### Experimentación:

El ensayo de impacto se realizó en el Laboratorio del Grupo de Investigación Carbón y Biomasa de la Sección de Ingeniería Mecánica de la PUCP. Para ello se separó un espacio en el piso de concreto, con una superficie plana y sin irregularidades, además se utilizó una cinta métrica, con la cual se midió la altura a la que se realiza el ensayo con respecto al piso, siendo esta de 2 m de alto (ver Ilustración 4. 5). Seguidamente se procedió a soltar las briquetas 5 veces consecutivas, registrando el número de pedazos obtenido por lanzamiento (ver Ilustración 4. 4), ensayándose 5 briquetas por cada formulación.



Ilustración 4. 4 Briqueta B-D1.



Ilustración 4. 5 Altura de lanzamiento de las briquetas 2m.

A continuación se presenta la tabla de registro de mediciones y resultados.

Tabla 4. 2 Registro y resultados del índice de resistencia al impacto.

	Número de Lanzamientos	Número de pedazos	IFR
<b>Ensayo de Impacto Formulación B-A</b>			
Test 1	5	1	500
Test 2	5	1	500
Test 3	5	1	500
Test 4	5	1	500
Test 5	5	1	500
<b>Ensayo de Impacto Formulación B-B</b>			
Test 1	5	1	500
Test 2	5	1	500
Test 3	5	1	500
Test 4	5	1	500
Test 5	5	1	500
<b>Ensayo de Impacto Formulación B-C</b>			
Test 1	5	1	500
Test 2	5	1	500
Test 3	5	1	500
Test 4	5	1	500
Test 5	5	1	500
<b>Ensayo de Impacto Formulación B-D</b>			
Test 1	5	4	125,0
Test 2	5	3	166,7
Test 3	5	4	125,0
Test 4	5	3	166,7
Test 5	5	2	250,0

Como se observa en la Tabla 4. 2, solo la formulación B-D se partió en pedazos en los ensayos, aun así si comparamos el IFR con el mínimo aceptable resulta satisfactorio por lo que se aceptarían todas las formulaciones. En la Ilustración 4. 6 se observa las briquetas ensayadas de la formulación B-D.



Ilustración 4. 6 Ensayo de impacto Formulación B-D.

### 4.3 Esponjamiento

Cuando la briqueta deja de estar sometida a presión, esta se comienza a expandir hasta alcanzar su equilibrio con las fuerzas enlazantes. Al expandirse, si la briqueta no presenta mecanismos de enlaces suficientemente fuertes, pueden generarse grietas, las cuales perjudican la resistencia de la briqueta ya que es más susceptible a fallar en esos puntos.

#### Experimentación:

El registro de mediciones se realizó en el Laboratorio del Grupo de Investigación Carbón y Biomasa, utilizando un Vernier para medir la longitud de cada briqueta. Se elaboró un registro de 10 briquetas por formulación, y se realizaron las mediciones en 6 oportunidades:

- Dentro de la matriz, cuando se encuentra sometida a la presión de trabajo.
- Al salir de la matriz.
- 1 h de secado.
- 2 h de secado.
- 3 h de secado.
- 4 h de secado.

En la Tabla 4. 3, se puede observar los valores medios de cada formulación, hasta el secado completo de la briqueta, cuando su longitud permanece constante en el tiempo. Se ha agregado un tiempo “-1” que representa el tiempo en el que la briqueta se encuentra dentro de la matriz a la presión de trabajo (150 bar).

Tabla 4. 3 Valores promedio de las mediciones.

Formulación	B-A	B-B	B-C	B-D
Tiempo [h]	Longitud [mm]			
-1	36	33	34	30
0	37.1	34.7	36.6	35.8
1	37.1	35.4	37.5	39.1
2	37.6	35.5	37.9	39.5
3	37.8	35.6	37.7	39.6
4	37.9	35.7	38.1	39.8
$\Delta$ [mm]	1.9	2.7	4.1	9.8

La Ilustración 4. 7 muestra la relajación de la briqueta durante el secado de la misma, siendo las pendientes de cada curva la expansión de la briqueta a lo largo del proceso.

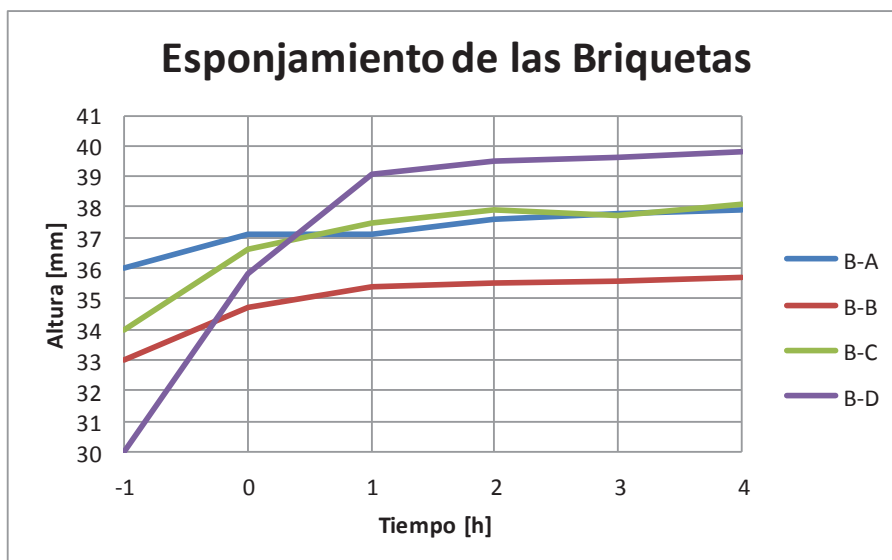


Ilustración 4. 7 Relajación vs tiempo.

#### 4.4 Ensayo de Combustión

El objetivo final de elaborar las briquetas es su aprovechamiento energético, siendo este el proceso de combustión, por lo que resulta de gran importancia conocer su comportamiento en dicho proceso. Para evaluar este proceso se elaboró un registro, con las características más importantes que deberían de tenerse en cuenta para la comparación entre biocombustibles sólidos. Para realizar el ensayo y la toma de datos, se tendrá en cuenta lo descrito en el capítulo 2.

##### Experimentación:

El ensayo de combustión se realizó en el Laboratorio de Energía de la Sección de Ingeniería Mecánica de la PUCP. Se utilizó el Eco-Burner, un quemador de biomasa diseñado por el Grupo de Investigación Carbón y Biomasa (ver Ilustración 4. 8), el quemador cuenta con 8 termocuplas tipo K instaladas en el hogar (5) y en la chimenea (3), con el objetivo de tener un perfil de temperaturas, de la llama y de los gases de escape. Además, cuenta con un ducto en el que se tiene acoplado un ventilador conectado a un variador de voltaje, que permite regular el aire de ingreso.





**Ilustración 4. 8 Quemador Eco-Burner.**

El ensayo se inicia con el registro del peso de las briquetas, siendo 20 la cantidad a ensayar por formulación, luego se procede a introducirlas en el reactor y colocar la chimenea del mismo. Seguidamente se pesa el iniciador el cual será utilizado para el encendido de la briqueta siendo este 10 g. Se coloca el iniciador por debajo de la parrilla en la que se encuentran las briquetas, aproximadamente a 5 cm de estas. Antes de encender los iniciadores, se inicia el registro de temperaturas, el cual se repite cada minuto durante todo el ensayo. Se procede a encender el iniciador y contabilizar el tiempo transcurrido mediante un cronómetro, se verifica el encendido de la briqueta con el uso de los registradores de temperatura, una vez alcanzada la temperatura de encendido, se procede a retirar el iniciador y colocar el contador nuevamente en 0. Por último se enciende el ventilador instalado en el ducto del Eco-Burner. Se registran las temperaturas hasta el final del proceso, para ello se considera una temperatura final de 40°C en el hogar. Terminado el ensayo se procede a apagar el ventilador, a retirar la chimenea utilizando guantes térmicos, para luego retirar con cuidado la parrilla donde ahora se ubican las cenizas y pesar las mismas.

De la Tabla 4. 4, se pueden observar los valores más importantes para realizar la comparación de las formulaciones, ya que la variación del aglutinante aportará propiedades a la briqueta que le permitirán mejorar su calidad como combustible. Además en la Ilustración 4. 9, se pueden observar las distintas formas que presenta la ceniza para cada formulación.

Tabla 4. 4 Datos del ensayo de combustión.

Formulación	Peso [gr]	$t_{Enc}$ [min]	$t_{llama}$ [min]	$t_{5>200^{\circ}C}$ [min]	$T_{m\acute{a}x}$ [°C]	Ceniza [gr]
B-A	218	0:01:00	0:04:40	0:07:27	858	8
B-B	215	0:01:23	0:06:19	0:09:20	675	15
B-C	242	0:01:15	0:03:53	0:07:14	909	30
B-D	245	0:01:32	0:03:08	0:07:18	894	42



(a)



(b)



(c)



(d)

Ilustración 4. 9 Cenizas de las briquetas (a) B-A, (b) B-B, (c) B-C y (d) B-D.

## Capítulo 5

### Análisis de resultados

En el presente capítulo se analizarán los resultados obtenidos en los diferentes ensayos para la caracterización de la briqueta, se relacionará la variación del porcentaje de arcilla con la calidad de la briqueta tanto física como químicamente. Además, se realizarán comparaciones entre los resultados esperados mediante el análisis teórico y los resultados obtenidos por medio de los ensayos experimentales.

#### 5.1 Resultados del ensayo de compresión e impacto.

De los resultados obtenidos en el ensayo de compresión, las formulaciones que presentan mayor fuerza a la rotura son la B-A y la B-C, siendo la formulación B-C la que resalta más; debido a que se esperaba una menor resistencia que la obtenida por la formulación B-B, sin embargo esta fue mayor en 26 N aproximadamente. Si relacionamos los resultados obtenidos con los enlaces formados en cada formulación, el resultado es el siguiente:

- Los enlaces formados por las fuerzas moleculares de Van der Waals no son lo suficientemente fuertes, aun siendo reforzados con la aglomeración a baja presión, por lo que al ir aumentando el porcentaje de arcilla en la briqueta, el mismo deteriora su calidad y resistencia. Por lo tanto, es necesaria la aglomeración con fécula ya que al formar puentes sólidos como fuerzas enlazantes, se obtiene un densificado más resistente.
- En el caso de la formulación B-C en el cual la resistencia aumenta, se debe a que al aumentar el porcentaje de arcilla en el aglomerado, este presenta una mejor plasticidad, dándole la capacidad de deformarse sin agrietarse ante un esfuerzo mecánico, lo cual es reflejado en los gráficos de Fuerza vs Deformación del capítulo anterior, siendo la formulación B-D y B-C, las que presentan una mayor deformación antes de la rotura. Esta capacidad añadida a los enlaces de Van der Waals reforzados con la aglomeración a presión además de los enlaces de puentes sólidos aportados por la fécula, le dan una mejor resistencia a la briqueta.

Analizando los resultados obtenidos, la formulación con menor resistencia a la compresión se tiene:

**Tabla 5. 1 Carga formulación B-D.**

Identificación de probeta	F <sub>max</sub>	
	[N]	
B-D	79.78	± 12.5
Masa capaz de soportar [kg]	8.1	
# de briquetas	677.7	
Altura [m]	25.8	

La máxima carga en masa (kg) que soportaría la briqueta en esa posición es de 8.1 kg, lo que aproximadamente pesan 678 briquetas y que apiladas una encima de otra tendrían una altura de 25 m. También debemos considerar que el ensayo se realizó con la briqueta en posición horizontal, por lo que si se encuentra soportando carga en posición vertical, su capacidad es mucho mayor. (Ver Ilustración E. 5, Anexo E)

Del ensayo de impacto, solo la formulación B-D se partió en pedazos, aun así al comparar el IFR con el mínimo aceptable resulta siendo satisfactorio por lo que todas las formulaciones se aceptan. Por otro lado debemos tomar en cuenta que la formulación B-D es la única que presenta agrietamientos, siendo estos los puntos más susceptibles a producirse la ruptura de la briqueta.

## 5.2 Resultados de esponjamiento

De la Ilustración 4. 7 y la Tabla 4. 3, obtenemos la relajación media de cada una de las formulaciones, siendo la tendencia a aumentar la relajación en función del incremento de la arcilla como aglutinante en la mezcla (ver Ilustración 5. 1). Esto se debe a que la arcilla solo permite un mejor enlace del aglomerado si este se somete a elevadas presiones ya que de esta forma los enlaces de Van der Waals son los que se refuerzan, en cambio al estar sometido a bajas presiones estos enlaces no son suficientemente reforzados, por lo que se debe añadir la fécula, que presenta puentes líquidos y que al secado de la briqueta se solidifican convirtiéndose en puentes sólidos los cuales tienen mayor fuerza. Por lo tanto, al ir aumentando el porcentaje de arcilla se va disminuyendo los enlaces por puentes sólidos y aumentando las fuerzas moleculares, lo que resulta en un aumento de la relajación en la briqueta.

En la Ilustración 3. 25, se puede observar las distintas formulaciones luego del secado, en ella se observa que en el caso de la formulación B-D, las fuerzas generadas por el esponjamiento de la briqueta, fueron mayores a los enlaces de los aglutinantes, produciendo el agrietamiento de la briqueta, lo cual la perjudica al ser estos puntos susceptibles falla ante esfuerzos a los que se pueda someter la briqueta.

Por otro lado, las formulaciones B-A, B-B y B-C fueron las que no presentaron agrietamientos en la relajación de la briqueta.

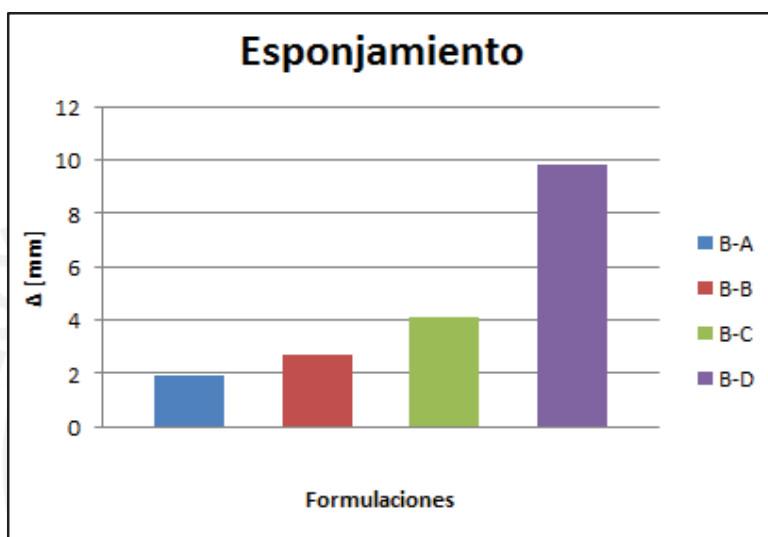


Ilustración 5. 1 Expansión de longitud por formulación.

### 5.3 Resultados del análisis químico de las HCA

Los análisis químicos elaborados a las HCA permitirán predecir el comportamiento del biocombustible en su aprovechamiento energético, además de conocer el calor entregado teórico en el proceso de combustión para cada una de las formulaciones elaboradas.

Del análisis del poder calorífico se tiene:

$$PC_{HCA} = 3955 \frac{\text{cal}}{\text{gr}} = 16,56 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

$$PC_{Fécula} = 16,7 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Utilizando el PC y la composición de cada formulación, se puede estimar la energía teórica disponible en las distintas formulaciones:

**B-A:**

$$(0,75 \times 16,56) + (0,25 \times 16,7) = 16,595 \text{ MJ/kg}$$

Resumiendo en la siguiente tabla:

**Tabla 5. 2 Poder Calorífico y % de ceniza de las formulaciones elaboradas.**

Formulación	PC [MJ/kg]	Cantidad de ceniza [%]
B-A	16.595	3.75
B-B	15.76	8.75
B-C	14.925	13.75
B-D	14.09	18.75

Al aumentar el porcentaje de arcilla en el aglomerado, se va reduciendo el poder calorífico del biocombustible debido a que la arcilla no aporta energía al conjunto. Además este mismo al ser material inerte, no participa en la combustión de la briqueta aumentando el porcentaje de ceniza del conjunto. Por tal motivo desde el punto de vista de combustible, la mejor formulación será la que presente mayor poder calorífico y menor cantidad de cenizas, siendo esta la formulación B-A.

#### **5.4 Resultados del ensayo de combustión**

De la Tabla 4. 4, se analizará cada una de las variables medidas.

- **Tiempo de encendido:**

El tiempo de encendido de la briqueta aumenta a medida que a la formulación se le aumenta arcilla, debido a que este parámetro está relacionado directamente con la cantidad de materia volátil presente en el biocombustible, y al tener en él materia inerte, esta misma retrasa el tiempo de encendido.

- **Duración de la llama:**

Relacionada a la materia volátil presente en el biocombustible, debido a que al ser liberados los volátiles durante la pirolisis, estos entran en contacto con agentes oxidantes en la fase gaseosa y se queman rápidamente formando una llama. Por lo que al aumentar el porcentaje de arcilla, también se espera que disminuya la duración de la llama.

- **t<sub>chimenea</sub> > 200°C:**

Se toma como referencia la temperatura útil que se tiene en la chimenea, estableciéndose una temperatura mínima de 200 °C. Debido a la presencia de

arcilla en el aglomerado, se espera que al aumentar el % de arcilla, este prolongue la duración de temperaturas altas, al ser capaz de almacenar el calor y no dejar que se libere.

- **Temperatura máxima:**

Se tiene como referencia del ensayo.

- **Ceniza:**

La cantidad de ceniza es una variable muy importante a tomar en cuenta, debido a que esta representa material que se debe sacar del quemador cada cierto tiempo, además se debe evitar que estas lleguen a su punto de fusión, porque producirían ensuciamiento, corrosión o cenizas volantes. Otro factor muy importante es la forma en la que estas se presentan, en la Ilustración 4. 9 se distinguen las formas en la que se presenta la ceniza para cada una de las formulaciones.

## 5.5 Selección de la mejor formulación

Para determinar la selección de la mejor formulación, se elaboró la Tabla 5. 3, en la que se le dio una determinada importancia a cada característica del biocombustible. Además sobre las mismas características se elaboró la Tabla 5. 4, en la que se designa un rango para cada puntuación, obteniéndose de esta manera una puntuación para cada característica del biocombustible, considerando lo siguiente:

- 4: Muy bueno
- 3: Bueno
- 2: Regular
- 1: Malo

**Tabla 5. 3 Importancia de las características del biocombustible.**

Combustible (65%)	Poder Calorífico (25%)
	Resistencia a la compresión (20%)
	Resistencia al impacto (10%)
	Resistencia al esponjamiento (15%)
	Tiempo de encendido (10%)
	Cantidad de ceniza (20%)
Proceso de Densificado (35%)	Preparación del aglomerante (35%)
	Mezcla de los componentes (65%)

**Tabla 5. 4 Criterio de calificación de las características del biocombustible.**

Criterio de Calificación				
	1	2	3	4
Poder Calorífico [MJ/kg]	[14 - 14.7]	[14.7 - 15.3]	[15.3 - 16]	[16 - 16.6]
Resistencia a la compresión [N]	[75 - 101.3]	[101.3 - 127.5]	[127.5 - 153.8]	[153.8 - 180]
Resistencia al impacto	[150 - 237.5]	[237.5 - 325]	[325 - 412.5]	[412.5 - 500]
Resistencia al esponjamiento [mm]	[7.9 - 10]	[5.8 - 7.9]	[3.6 - 5.8]	[1.5 - 3.6]
Tiempo de encendido [min]	[1:30 - 1:40]	[1:20 - 1:30]	[1:10 - 1:20]	[1:00 - 1:10]
Cantidad de ceniza [g]	[35 - 45]	[25 - 35]	[15 - 25]	[5 - 15]
Preparación del aglomerante [cant. Agua en g]	[212.5 - 250]	[175 - 212.5]	[137.5 - 175]	[100 - 137.5]
Mezcla de los componentes [cant. arcilla en g]	[11.3 - 15]	[7.5 - 11.3]	[3.8 - 7.5]	[0 - 3.8]

Finalmente de la Tabla 5. 5, se obtiene tanto la calificación por característica como la calificación promedio de cada formulación, siendo la que presenta una mejor calidad como briqueta la que no presenta arcilla como aglutinante. Además se puede concluir que la calidad de la briqueta disminuye a medida que aumenta el porcentaje de arcilla en el biocombustible sólido.

**Tabla 5. 5 Calificación de las formulaciones.**

Puntuación				
	B - A	B - B	B - C	B - D
Poder Calorífico [MJ/kg]	4	3	2	1
Resistencia a la compresión [N]	4	3	4	1
Resistencia al impacto	4	4	4	1
Resistencia al esponjamiento [mm]	4	4	3	1
Tiempo de encendido [min]	4	2	3	1
Cantidad de ceniza [g]	4	4	2	1
Preparación del aglomerante [cant. Agua en g]	1	2	3	4
Mezcla de los componentes [cant. arcilla en g]	4	3	2	1
<b>Promedio</b>	3.6	3.1	2.9	1.4



## Observaciones y recomendaciones

- Los procesos están bien determinados, siendo el único problema el bajo rendimiento de todo el proceso. Por lo que para aumentar el % de material útil, se podría utilizar máquinas más adecuadas que permitan aumentar este rendimiento.
- En el proceso de lavado se puede reducir el tiempo transcurrido para que el agua llegue a 80°C, utilizando ollas de material más delgado, permitiendo de esta manera una mejor transferencia de calor y aumentando la producción del mismo.
- Los procedimientos utilizados en la evaluación de las briquetas, son normas equivalentes aplicadas a otros combustibles o probetas, por lo que se ha de tener mucho cuidado en la experimentación del mismo para los estudios de investigación.
- La compactación del aglomerado en la briqueteadora, se debe realizar lo más rápido posible, debido a que si se prolonga el tiempo, el aglomerado empezará a perder plasticidad lo que dificultará el ingreso del mismo a la matriz de compactación.
- La matriz en la que se realizó la densificación de la biomasa, presentaba desgaste por el uso continuo del mismo, por lo que se encontraba pequeñas aberturas en las que el material se escurría, disminuyendo ligeramente la masa de la briqueta.
- El registro de las mediciones de longitud de las briquetas cuando salen de la matriz, resulta difícil ya que al estar las briquetas húmedas, se puede estar ejerciendo mayor presión de la necesaria con el instrumento de medición, lo que nos incide al error o incluso a la deformación de la briqueta.
- Las briquetas elaboradas, presentaban irregularidades en sus caras, por lo que se optó por realizar 3 mediciones por cada briqueta.

- En el ensayo de compresión se debe de tener cuidado al momento de manipular el control remoto para realizar movimientos rápidos y fijar una distancia mínima a la base con el fin de no someter a compresión la probeta antes de que empiece el ensayo.
- Se debe tener precisión al momento de colocar la briqueta en el lugar referencial para el ensayo de compresión, debido a que al estar en posición horizontal, esta puede rodar.
- Al no tener referencia de la velocidad de desplazamiento de la carga, al realizar el ensayo de compresión, se fijó un valor de 10 mm/min.
- El ensayo de combustión se realizó en un quemador diseñado específicamente para combustionar briquetas de biomasa.
- En el ensayo de combustión de la formulación B-B, se retiró antes de lo previsto el iniciador, por lo que el encendido de las briquetas no fue de manera uniforme, aumentando de esta manera los tiempos a medir y bajando la temperatura en el equipo.

## Conclusiones

- Los enlaces formados por las fuerzas moleculares de Van der Waals no son lo suficientemente fuertes, aun siendo reforzados con la aglomeración a baja presión, por lo que al ir aumentando el porcentaje de arcilla en la briqueta, el mismo deteriora su calidad y resistencia. Por lo tanto es necesaria la aglomeración con fécula ya que al formar puentes sólidos como fuerzas enlazantes, se obtiene un densificado más resistente.
- El aporte que tiene la arcilla como aglutinante en la evaluación y caracterización física de la briqueta básicamente es la de darle mayor plasticidad al aglomerado permitiendo que este tenga una mayor deformación antes de la rotura. Esto se da solo en un pequeño rango de % de arcilla, aproximadamente al 10% de arcilla, ya que al disminuir o aumentar este porcentaje, las propiedades físicas disminuyen notablemente.
- El aporte que tiene la arcilla como aglutinante en la evaluación de combustión de la briqueta es el de mantener los enlaces formados de la briqueta cuando esta se vuelve ceniza, los cuales le permiten a la ceniza, mantener la forma de briqueta facilitando la extracción de las mismas.
- De la caracterización física y la evaluación por combustión de las briquetas elaboradas, el orden por mejor calidad de las formulaciones es el siguiente: B-A, B-B, B-C y B-D. Teniendo como resultado la disminución de la calidad de la briqueta a medida que aumenta la arcilla como aglutinante en la mezcla.
- En el ensayo de esponjamiento de la briqueta, la tendencia es a aumentar la relajación en función del incremento de la arcilla como aglutinante en la mezcla. Debido a que al ir aumentando el porcentaje de arcilla se va disminuyendo los enlaces por puentes sólidos y aumentando las fuerzas moleculares, lo que resulta en un aumento de la relajación en la briqueta.

- Al trabajar con nuevas materias primas en la elaboración de densificados resulta muy importante realizar la caracterización física y química del mismo ya que con estos se puede conocer y predecir el comportamiento que tendrá el mismo en las distintas etapas de tratamiento, además se puede aplicar procesos adicionales para su mejoramiento y seleccionar equipos adecuados que mejoren y faciliten su tratamiento.
- El densificado requiere pre-tratamientos con el fin de mejorar su calidad como producto. Es por ello que la reducción y separación granulométrica resultan fundamentales para su desarrollo de una manera óptima.
- Se comprobó que mediante el proceso de lavado, se disminuyó notablemente el porcentaje de álcalis, el cual perjudicaba el estado de las cenizas, bajando su punto de fusión y provocando en el quemador ensuciamiento, corrosión e incrustaciones. Además de disminuir el porcentaje de azufre, reduciendo de esta manera las emisiones de óxidos de azufre; el contenido de ceniza, reduciendo la cantidad de residuos generados luego de la combustión; y aumentando el poder calorífico de la HCA.
- Los tratamientos realizados a la HCA de azúcar, permitieron aumentar su densidad aparente de  $15 \text{ kg/m}^3$  a  $275 \text{ kg/m}^3$  de las HCA ( $X < M50$ ) y a  $219 \text{ kg/m}^3$  de las HCA ( $M50 < X < M30$ ). Además el proceso de densificado a bajas presiones, elevó la densidad de la briqueta hasta  $350 \text{ kg/m}^3$  aproximadamente.
- El rendimiento total de todos los procesos de fabricación del densificado de HCA, es de 35% aproximadamente. Debido a que en los procesos de molienda de la HCA no se utilizaron equipos adecuados, lo que no permitió llegar a rendimientos más altos.

## Bibliografía

- [1] S. J. Sánchez Miño , «Uni-Oldenburg,» Junio 2003. [En línea]. Available: [http://www.uni-oldenburg.de/fileadmin/user\\_upload/physik-ppre/download/Downloads/ENERG%CDAS\\_RENOVABLES.pdf](http://www.uni-oldenburg.de/fileadmin/user_upload/physik-ppre/download/Downloads/ENERG%CDAS_RENOVABLES.pdf). [Último acceso: 19 Septiembre 2014].
- [2] «Cambio Climático,» [En línea]. Available: <http://www.cambioclimatico.org/content/resumen-del-protocolo-de-kyoto>. [Último acceso: 19 Septiembre 2014].
- [3] E. Assureira Espinoza, Interviewee, *Energías Renovables. Biomasa*. [Entrevista]. 23 Septiembre 2014.
- [4] «Programas y Actividades de Educación Ambiental,» [En línea]. Available: <http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/docpdf/capitulo18.pdf>. [Último acceso: Abril 2014].
- [5] [En línea]. Available: <http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/bioetanol/prouccion-a-partir-de-cana-de-azucar.html>.
- [6] Ministerio de Agricultura y Riego, «Ministerio de Agricultura y Riego,» [En línea]. Available: <http://www.minagri.gob.pe/portal/sector-agrario/agricola/cultivos-de-importancia-nacional/azúcar>. [Último acceso: 24 Noviembre 2014].
- [7] Netafim, «Netafim,» [En línea]. Available: [http://www.sugarcane crops.com/s/agronomic\\_practices/harvesting\\_management/](http://www.sugarcane crops.com/s/agronomic_practices/harvesting_management/). [Último acceso: 17 Febreeo 2015].
- [8] C. Madriñan, *Compilación y Análisis sobre contaminación del aire producida por la quema y la requema de la caña de azúcar ; Saccharum officinarum L, en el valle del Río Cauca, 2002*.
- [9] D. Galvis, «Cenicana,» 2006. [En línea]. Available: [http://www.cenicana.org/pdf/otros/foro\\_cosecha\\_transporte\\_2006/3\\_cosecha\\_](http://www.cenicana.org/pdf/otros/foro_cosecha_transporte_2006/3_cosecha_)

mecanica\_colombia\_texto\_may9-2006.pdf.

- [10] John Deere, «John Deere,» Deere & Company, 2015. [En línea]. Available: [https://www.deere.com/es\\_LA/products/equipment/sugarcane\\_harvester/harvester\\_3520/harvester\\_3520.page](https://www.deere.com/es_LA/products/equipment/sugarcane_harvester/harvester_3520/harvester_3520.page). [Último acceso: 17 Febrero 2015].
- [11] F. Subirós Ruiz, «Subproductos de la Caña de Azúcar,» de *El Cultivo de la Caña de Azúcar*, San José, Universidad Estatal a Distancia San José, 1995, pp. 353-356.
- [12] M. Diego, P. Saleme, M. Bragachini, F. Sánchez, M. Bragachini y J. Méndez, «Precop,» [En línea]. Available: <http://www.cosechaypostcosecha.org/data/articulos/agoindustrializacion/La-Cana-De-Azucar-Como-Cultivo-Energetico.pdf>. [Último acceso: 29 05 2015].
- [13] F. Sebastián Nogues, D. García Galindo y A. Rezeau, *Energía de la Biomasa*, Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza, 2010.
- [14] «Natur Holz,» [En línea]. Available: <http://www.xn--natrlichholz-flb.ch/heizpellets.html>. [Último acceso: 21 Noviembre 2014].
- [15] «KAHL,» AMANDUS KAHL , [En línea]. Available: [http://www.akahl.de/akahl/es/Prensa/Nota\\_de\\_prensa/Holzpelletierung\\_es/](http://www.akahl.de/akahl/es/Prensa/Nota_de_prensa/Holzpelletierung_es/). [Último acceso: 6 Noviembre 2014].
- [16] «INTI,» [En línea]. Available: [http://www.inti.gob.ar/ereno/erBI/pdf/Informe\\_pellets2011.pdf](http://www.inti.gob.ar/ereno/erBI/pdf/Informe_pellets2011.pdf). [Último acceso: 8 Diciembre 2014].
- [17] L. Ortiz, A. Tejada, A. Vásquez y G. Piñeiro Veiras, *Aprovechamiento de la Biomasa Forestal*, Galicia: CIS-Madera.
- [18] P. García Triñanes, *Avances en Aglomeración y Compactación de Partículas*, Santiago de Compostela, 2010.
- [19] E. Fonseca, *Desarrollo de un proceso tecnológico para la obtención de briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz, y pruebas de producción de gas pobre*, Riobamba, 2011.

- [20] The Institute for Briquetting and Agglomeration, Elements II Briquetting and agglomeration, R. M. Koerner y J. A. MacDougall, Edits., Pennsylvania, 1983.
- [21] J. Blesa Moreno, Zaragoza, 2002.
- [22] «CubaSolar,» [En línea]. Available:  
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia13/HTML/articulo03.htm>.  
[Último acceso: 6 Noviembre 2014].
- [23] UMP technika, «Briquette,» 2004. [En línea]. Available:  
<http://www.briquette.lt/index.php/pageid/827>. [Último acceso: 11 Abril 2014].
- [24] K. M. Siddiqui y O. Chin Chin, «Characteristics of some biomass briquettes prepared under modest die pressures,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 18, pp. 223-228, 1 November 1999.
- [25] J. Calderón, *Estudio de aglomerantes para obtención de briquetas de carbón vegetal*, 1997.
- [26] FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, «Depósito de documentos de la FAO,» 1983. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/docrep/X5328S/X5328S00.htm>. [Último acceso: 11 Abril 2014].
- [27] S. Richards, *Physical Testing of Fuel Briquettes*, Elsevier, 1990.
- [28] N. K. y R. Vance Morey, «Factors affecting strength and durability of densified biomass products,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, pp. 337-359, 2009.
- [29] O. Chin Chin y K. M. Siddiqui, «Characteristics of some biomass briquettes prepared under modest die pressures,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 18, pp. 223-228, 2000.
- [30] L. A. Galeano, *Peroxidación catalítica de contaminantes orgánicos en medio acuoso utilizando una bentonita modificada con Al y Fe, Cu o Mn*, Salamanca, 2011.
- [31] Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, «Instituto Nacional de Seguridad e

Higiene en el Trabajo,» [En línea]. Available:  
[http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/TextosLegales/RD/2004/267\\_04/Ficheros/tabla1\\_4.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/TextosLegales/RD/2004/267_04/Ficheros/tabla1_4.pdf). [Último acceso: 25 Mayo 2015].

- [32] T. Tovar Benitez, Caracterización morfológica y térmica del almidón de maíz obtenido por diferentes métodos de aislamiento, Pachuca de Soto: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2008.
- [33] T. Blomberg, «Free alkali-index for optimizing the fuel mixture in biomass co-firing,» *Heat Exchanger Fouling and cleaning*, vol. RP5, nº 14.
- [34] P. Hald, «The behaviour of alkali metals in biomass conversion systems,» *Department of Combustion Research*, 1999.
- [35] J. P. Holman, Métodos Experimentales para Ingenieros.
- [36] S. Richards, «Physical Testing of Fuel Briquettes,» *Fuel Processing Technology*, vol. 25, pp. 89-100, 1990.
- [37] P. Canalís y S. J., «Universidad de Zaragoza,» 9 Mayo 2014. [En línea]. Available: [http://circe.cps.unizar.es/acvcoco/es/pdf/6doc\\_4.pdf](http://circe.cps.unizar.es/acvcoco/es/pdf/6doc_4.pdf).
- [38] Fundación Asturiana de la Energía, *Guía de co-combustión*, Fundación Asturiana de la Energía, 2010.
- [39] «LIPPEL,» [En línea]. Available: <http://www.lippel.com.br/es/briquetaje-de-carbon/briquetadora-de-extruccion-por-rodillos-para-carbon/briquetadoras-de-extruccion-por-rodillos-brl-600.html#.VIXhC9KG91Z>. [Último acceso: 6 Noviembre 2014].
- [40] «LIPPEL,» KSI Informática, [En línea]. Available: <http://www.lippel.com.br/es/briquetaje-y-peletizacion/briquetadoras-de-extruccion-por-tornillo/briquetadora-de-extruccion-por-tornillo-para-biomasa-bep-300.html#.VIXiZ9KG91Z>. [Último acceso: 6 Noviembre 2014].
- [41] «LIPPEL,» KSI Informática, [En línea]. Available: <http://www.lippel.com.br/es/briquetaje-y-peletizacion/briquetadoras-de-piston-hidraulicas/briquetadora-de-piston-hidraulica-para-biomasa-bh->



100.html#.VIXkLNKG91Z. [Último acceso: 6 Noviembre 2014].

- [42] «Ostargi Energías Alternativas,» DFAD, [En línea]. Available: <http://ostargi.biz/briquetadoras/>. [Último acceso: 6 Noviembre 2014].
- [43] «Todobiomasa.com,» [En línea]. Available: <http://www.todosbiomasa.com/escaparate/verpagina.cgi?idpagina=20637768&refcompra>. [Último acceso: 19 Septiembre 2014].
- [44] W. Pietsch, «An interdisciplinary approach to size enlargement by agglomeration,» *Powder Technology*, vol. 130, pp. 8-13, 2003.
- [45] A. Castagnaro, E. Feijoo, M. Golato y D. Paz, «EEAOC,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.eeaoc.org.ar/publicaciones/categoria/14/115/Avance-Agroindustrial-32-2-Ano-2011-Notas-on-line.html>. [Último acceso: 28 Septiembre 2013].

