



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Maestría en Arte en Energía y Ambiente

**PROYECTO PARA ALIMENTACIÓN DE CALDERAS CON BRIQUETAS DE RESIDUOS  
SÓLIDOS DE UNA PLANTA DE BENEFICIO DE ARROZ EN PALENCIA, GUATEMALA**

**Ing. Pablo Ovidio García Morales**

Asesorado por el MA Carlos Alejandro Alegre Ordóñez

Guatemala, abril de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROYECTO PARA ALIMENTACIÓN DE CALDERAS CON BRIQUETAS DE RESIDUOS  
SÓLIDOS DE UNA PLANTA DE BENEFICIO DE ARROZ EN PALENCIA, GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ING. PABLO OVIDIO GARCÍA MORALES**

ASESORADO POR EL MA CARLOS ALEJANDRO ALEGRE ORDÓÑEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN ENERGÍA Y AMBIENTE**

GUATEMALA, ABRIL DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRÁCTICO EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova estrada
DIRECTOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
COORDINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. César Ariel Villela Rodas
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**PROYECTO PARA ALIMENTACIÓN DE CALDERAS CON BRIQUETAS DE RESIDUOS SÓLIDOS DE UNA PLANTA DE BENEFICIO DE ARROZ EN PALENCIA, GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado de Ingeniería, con fecha 18 de febrero de 2021.

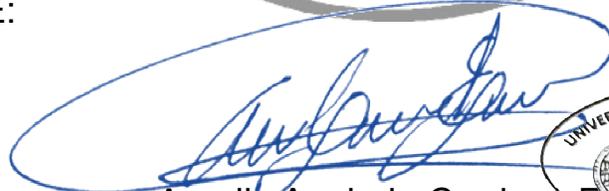
**Ing. Pablo Ovidio García Morales**

Decanato  
Facultad de Ingeniería  
24189101- 24189102  
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.290.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **PROYECTO PARA ALIMENTACIÓN DE CALDERAS CON BRIQUETAS DE RESIDUOS SÓLIDOS DE UNA PLANTA DE BENEFICIO DE ARROZ EN PALENCIA, GUATEMALA**, presentado por: **Pablo Ovidio García Morales**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Energía y ambiente después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada ★

Decana

Guatemala, abril de 2022

AACE/gaoc



**Guatemala, abril de 2022**

LNG.EEP.OI.290.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

**“PROYECTO PARA ALIMENTACIÓN DE CALDERAS CON BRIQUETAS DE RESIDUOS SÓLIDOS DE UNA PLANTA DE BENEFICIO DE ARROZ EN PALENCIA, GUATEMALA”**

presentado por **Pablo Ovidio García Morales** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Energía y ambiente**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*

**Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Colí**  
Director

**Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería**





Guatemala, 19 de octubre 2021

Como coordinador de la **Maestría en Artes en Energía y Ambiente** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“PROYECTO PARA ALIMENTACIÓN DE CALDERAS CON BRIQUETAS DE RESIDUOS SÓLIDOS DE UNA PLANTA DE BENEFICIO DE ARROZ EN PALENCIA, GUATEMALA”** presentado por el Ingeniero **Pablo Ovidio García Morales** quien se identifica con carné **8110500**.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*

**Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepéque**  
Coordinador de Maestría  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería



Guatemala, 18 de octubre 2021.

**Ingeniero M.Sc.  
Edgar Álvarez Cotí  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería USAC  
Ciudad Universitaria, Zona 12**

**Distinguido Ingeniero Álvarez:**

Atentamente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que como asesor del trabajo de graduación del estudiante Pablo Ovidio García Morales, Carné número 8110500, cuyo título es "**PROYECTO PARA ALIMENTACIÓN DE CALDERAS CON BRIQUETAS DE RESIDUOS SÓLIDOS DE UNA PLANTA DE BENEFICIO DE ARROZ EN PALENCIA, GUATEMALA**", para optar al grado académico de Maestro en Energía y Ambiente, he procedido a la revisión del INFORME FINAL y del ARTÍCULO.

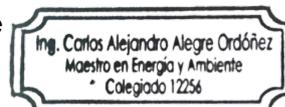
En tal sentido, en calidad de asesor doy mi anuencia y aprobación para que el estudiante García Morales, continúe con los trámites correspondientes.

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.

Atentamente,

**Ing. Carlos Alejandro Alegre Ordóñez**

Mtro. en Energía y Ambiente  
Asesor



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Mi madre** Hilda Morales Chúa (q.e.p.d.) porque supo brindarme su amor, comprensión, consejos y apoyo incondicional en todo momento y siempre fue mi ejemplo a seguir para alcanzar mis metas.
- Mi esposa** Vilma Arango, amiga y compañera por brindarme su apoyo y solidaridad en todo momento para que culminara esta fase de mi vida.
- Mis hijos** Pablo y Andrea García, que son el mejor regalo que la vida me brindó, mi mayor tesoro y también la fuente más pura de mi inspiración.
- Mis hermanos** Patricia y Vinicio García, con quienes he compartido alegrías y tristezas en el transcurso de nuestras vidas y siempre han estado a mi lado.
- Mi nieta** Valentina Ochoa, que es un rayito de luz y alegría en mi vida.
- Mi familia** Por ser parte importante en mi desarrollo personal y profesional, en especial a mi tío Rufino Morales (q.e.p.d.) por sus sabios consejos.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Gloriosa y tricentenaria, por ser mi alma <i>máter</i> en donde logre el desarrollo de mi formación académica como profesional.
<b>Escuela de Estudios de Postgrado de Ingeniería</b>	Sede de todo el conocimiento adquirido en estos años, que permitió desarrollar mis actitudes técnicas y científicas, que permitieron alcanzar esta meta.
<b>Mi asesor</b>	MA Ing. Carlos Alegre por haberme acompañado con su experiencia y profesionalismo en la realización de este trabajo.
<b>Dr. José A. Rosal</b>	Por su orientación académica, por su apoyo y dedicación constante en la revisión de este proyecto de tesis.
<b>Pueblo de Guatemala</b>	Por ser un pilar importante en el sostenimiento de esta casa de estudio.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIII
OBJETIVOS .....	XVII
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO .....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 Antecedentes de la investigación.....	1
1.2 El cultivo del arroz .....	5
1.2.1 Aspectos botánicos.....	6
1.2.1.1 La planta de arroz .....	6
1.2.1.2 Grano de arroz o semilla .....	8
1.2.2 Cosecha.....	9
1.2.3 Proceso en planta de beneficio .....	9
1.2.4 Recepción.....	10
1.2.4.1 Secado arroz en granza .....	10
1.2.4.2 Almacenado en granza .....	11
1.2.4.3 Parbolización.....	11
1.2.4.4 Proceso de molienda.....	13
1.3 Caracterización de la cascarilla de arroz .....	15
1.3.1 Uso de la cascarilla de arroz .....	16
1.3.2 Composición de la cascarilla de arroz .....	18

1.4	La biomasa en procesos para generación de energía .....	20
1.4.1	Definición.....	20
1.4.2	La biomasa como fuente de energía.....	20
1.4.3	Tipos de biomasa .....	22
1.4.3.1	Biomasa natural.....	22
1.4.3.2	Biomasa residual .....	22
1.4.3.3	Excedentes agrícolas .....	23
1.4.3.4	Cultivos energéticos .....	23
1.4.4	Contenido energético de la biomasa.....	23
1.4.5	Caracterización de la biomasa.....	24
1.5	Briqueta ecológica.....	26
1.5.1	Descripción.....	26
1.5.2	Composición.....	27
1.5.3	Tipos de procesos para fabricación de briquetas... ..	27
1.5.3.1	Fabricación artesanal .....	28
1.5.3.2	Fabricación semiindustrial .....	29
1.5.3.3	Fabricación industrial.....	30
1.5.4	Biocombustibles sólidos .....	31
1.6	Calderas de combustión de biomasa .....	32
1.6.1	Tipos de calderas de biomasa por combustión .....	33
1.6.1.1	Calderas de parrillas .....	34
1.6.1.2	Caldera de lecho fluidizado.....	34
1.6.1.3	Caldera de inyección .....	35
1.6.2	Proceso de combustión de biomasa .....	35
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN .....	37
2.1	Recolección y preparación de la materia prima .....	37
2.1.1	Reconocimiento y calidad de la materia prima.....	37
2.1.2	Determinación de la producción de cascarilla.....	38

2.2	Proceso para elaboración de las briquetas .....	39
2.2.1	Formulación de la mezcla para la elaboración de las briquetas. ....	39
2.2.1.1	Elección del aglutinante .....	40
2.2.1.2	Proporción de la mezcla para la briqueta .....	43
2.2.2	Instrumentos y equipos utilizados en la elaboración de la briqueta. ....	45
2.2.3	Evaluación del proceso para elaborar briquetas.....	47
2.3	Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de las briquetas.....	50
2.3.1	Propiedades fisicoquímicas de las briquetas.....	50
2.3.2	Comparativo de poder calorífico con el carbón mineral .....	51
2.4	Determinación de los beneficios obtenidos del estudio. ....	51
2.4.1	Reutilización de residuos y su impacto .....	52
2.4.2	Reducción del uso de carbón mineral. ....	52
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....	53
3.1	Producción de cascarilla .....	53
3.2	Elección de aglutinante.....	54
3.3	Proporción de la mezcla para la briqueta.....	55
3.4	Propiedades de la briqueta elaborada. ....	56
3.5	Beneficios obtenidos del estudio.....	60
3.5.1	Los beneficios ambientales .....	61
3.5.2	Reducción en el consumo de carbón mineral.....	62
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	65

CONCLUSIONES ..... 69  
RECOMENDACIONES ..... 71  
REFERENCIAS..... 73  
APÉNDICES .....79  
ANEXOS ..... 85

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Partes de la planta de arroz .....	7
2.	Estructura del grano de arroz .....	9
3.	Proceso productivo del arroz.....	11
4.	Cascarilla de arroz .....	16
5.	Proceso de conversión y formas de energía .....	21
6.	Formas físicas de briquetas .....	26
7.	Máquinas de tipo artesanal para hacer briquetas .....	28
8.	Máquinas tipo semiindustrial para fabricar briquetas .....	29
9.	Diseño de planta, para fabricación industrial de briquetas.....	31
10.	Funcionamiento paso a paso de termoeléctrica de biomasa .....	32
11.	Caldera de agua caliente de biomasa DZL.....	34
12.	Proceso de combustión de la biomasa .....	36
13.	Área donde se deposita de cascarilla de arroz .....	38
14.	Esquema de la mezcla de materiales e insumos .....	40
15.	Proceso para la elaboración del engrudo .....	42
16.	Preparación de la cascarilla y aglutinante .....	44
17.	Diagrama del proceso para la elaboración de briquetas .....	48
18.	Cascarilla generada por producción de arroz .....	53
19.	Comparativo del poder calorífico obtenido .....	58
20.	Comparativo del porcentaje de ceniza obtenido .....	59
21.	Comparativo del porcentaje de humedad obtenido .....	60
22.	Tendencia en la reducción del consumo de carbón mineral vs a la producción de briquetas .....	64

## TABLAS

I.	Propiedades minerales de la cascarilla de arroz.....	17
II.	Características de briquetas comparando a otra fuente de combustibles.....	18
III.	Características químicas de cuatro variedades de cascarilla de arroz en Canadá.....	19
IV.	Poder calorífico inferior y composición elemental, de cuatro variedades de cascarilla de arroz en Canadá.....	19
V.	Rendimientos energéticos de algunas biomosas residuales.....	24
VI.	Parámetros físicos, químicos y energéticos de la biomasa.....	25
VII.	Producción de arroz y cascarilla generada.....	38
VIII.	Combinación de almidón y agua para determinar el aglutinante.....	41
IX.	Composición de la mezcla de aglutinante y cascarilla.....	43
X.	Instrumentos y equipos utilizados.....	45
XI.	Descripción de la briqueta elaborada.....	49
XII.	Composición seleccionada para el aglutinante.....	54
XIII.	Composición de la mezcla con aglutinante y cascarilla de arroz.....	55
XIV.	Caracterización de la briqueta elaborada.....	56
XV.	Resultados del poder calorífico, porcentajes de ceniza y humedad.....	57
XVI.	Capacidad de producción de briquetas de cascarilla por cada tonelada generada.....	62
XVII.	Rendimiento del poder calorífico de la briqueta vs carbón mineral.....	63

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>cal</b>	Calorías
<b>cm<sup>2</sup></b>	Centímetro cuadrado
<b>cm<sup>3</sup></b>	Centímetro cúbico
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>g</b>	Gramo
<b>kcal</b>	Kilocaloría
<b>kcal/kg</b>	Kilocaloría por kilogramo
<b>kJ</b>	Kilojulios
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>lb</b>	Libra
<b>PSI</b>	Libras por pulgada cuadrada
<b>MJ</b>	Mega julios
<b>MJ/kg</b>	Mega julios por kilogramo
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>msnm</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>mm</b>	Milímetros
<b>TJ</b>	Tera julios
<b>t</b>	Tonelada



## GLOSARIO

<b>Aglutinante</b>	Sustancia o elemento, y sirve para unir o pegar un material de modo que resulte un cuerpo compacto.
<b>Almidón</b>	Hidrato de carbono que constituye la principal reserva energética de casi todos los vegetales.
<b>Arroz parbolizado</b>	Es un tipo de arroz que se obtiene después de realizar un proceso de cocción húmedo y secado del arroz con cáscara.
<b>ASTM</b>	Sociedad Americana para pruebas y materiales
<b>Biocombustible</b>	Combustible obtenido mediante el tratamiento físico o químico de materia vegetal o residuos orgánicos.
<b>Biomasa</b>	Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.
<b>Briqueta</b>	Conglomerado de carbón u otra materia en forma de ladrillo o cilíndrica.
<b>Caldera</b>	Es un equipo capaz de producir calor al quemar un combustible en su interior, transmitiendo ese calor a un fluido que en la mayoría de los casos será agua.

<b>Cascarilla de arroz</b>	Residuo generado del proceso de pilado, durante la molienda del grano de arroz, en una planta de beneficio.
<b>Combustión</b>	Reacción química entre el oxígeno y un material oxidable, acompañada de desprendimiento de energía y que habitualmente se manifiesta por incandescencia o llama.
<b>Fauna nociva</b>	Son aquellas especies animales capaces de ocasionar daños a la salud, como transmisores de enfermedades.
<b>Lignina</b>	Sustancia orgánica de color marrón que actúa como agente de enlace entre las fibras de los vegetales.
<b>Lixiviado</b>	Fluido residual que, a partir de un proceso de percolación, se filtra de un vertedero.
<b>Pilado</b>	Es el proceso por el cual se quita la cáscara al cereal, ya sea trigo, cebada, arroz, entre otros.
<b>Poder calorífico</b>	Cantidad de energía desprendida en la reacción de combustión, referida a la unidad de masa de combustible.
<b>Residuo</b>	Material que se desecha después de haber realizado un trabajo o cumplido con su objetivo.

## RESUMEN

La investigación realizada tuvo por objetivo evaluar el potencial de un biocombustible sólido, a partir de los desechos sólidos provenientes del proceso de pilado en una planta de beneficio de arroz, a través de la implementación de una metodología para la elaboración de una briqueta ecológica y su aprovechamiento como un recurso energético, así como la estimación del beneficio ambiental al darle una solución viable a los residuos generados.

Se realizó un proceso experimental a nivel laboratorio, para la elaboración de briquetas ecológicas a partir de la cascarilla de arroz. Se planteó la fabricación de briquetas a partir de compactar una mezcla de cascarilla de arroz y almidón de yuca, para la obtención de combustible alternativo para alimentar una caldera de biomasa, que es usada en diferentes procesos de producción. A la briqueta obtenida se le hicieron análisis de sus propiedades fisicoquímicas y mecánicas.

Para cumplir con los objetivos propuestos, se realizaron ensayos para determinar la composición óptima de cascarilla de arroz con almidón de yuca, que maximice el uso de la biomasa y minimice el uso de otros materiales como el aglutinante en la elaboración de las briquetas. La mezcla seleccionada permitió elaborar una briqueta con un 70 % cascarilla de arroz y un 30 % almidón de yuca, que al ser compactada aumentó la densidad y adhesión de las partículas.

A la briqueta elaborada se le hicieron análisis de laboratorio para determinar las propiedades fisicoquímicas y así establecer la factibilidad de traducir a energía viable dentro de la caldera de biomasa. Como el poder calorífico kJ/kg, con la técnica de Calorimetría, teniendo de referencia la norma ASTM D5468-02

/ASTM D5865 / D5865M–19. El porcentaje de humedad, con la técnica de Termogravimetría, teniendo de referencia la norma Sartorius MA150 -MA156. El porcentaje de ceniza, con la técnica de Gravimetría, teniendo de referencia la norma ASTM D-482-03.

Se consiguió hacer varias briquetas con la mezcla seleccionada que tuvieron la consistencia sólida adecuada, para poder ser utilizada como un biocombustible alternativo, permitiendo con ello reducir el consumo de carbón mineral. Se logró alcanzar un poder calorífico promedio de 16.46 MJ/kg que representa un 65 % del poder calorífico del carbón mineral. El porcentaje de ceniza del 10 % y el porcentaje de humedad del 9.14 %. Demostrando con ello la factibilidad del uso de la briqueta como un biocombustible alternativo.

El estudio realizado, demuestra que es factible la elaboración de una briqueta con la cascarilla de arroz y almidón de yuca, para el aprovechamiento de un biocombustible sólido como un recurso energético a partir de los residuos sólidos generados en la molienda, permitiendo la sustitución de fuentes energéticas a base combustibles fósiles, por fuentes renovables y contribuyendo con la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, al utilizar el carbón mineral como fuente energética.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En la producción de arroz blanco y parbolizado, son generados residuos sólidos en los diferentes procesos que se llevan a cabo en la molienda. El no tener un plan integral y uso de tecnología apropiada para el manejo de estos, hace que estos residuos no sean reutilizados y aprovechados de mejor manera en su totalidad. Con ello, se podría mitigar los efectos que tiene el manejo inapropiado de estos residuos al medio ambiente y comunidades aledañas.

En una Planta de Beneficio de Arroz durante los procesos de prelimpieza, descascarado y pulido se obtienen los residuos sólidos. La cascarilla y el polvillo o pulimento. No se cuenta con una alternativa para que se pueda aprovechar la biomasa residual generada durante los procesos que se realizan en la molienda para que se utilice como biocombustible sólido.

Entre los efectos al medio ambiente se tienen la contaminación del aire, la contaminación de suelos y la tierra, la contaminación del agua y el deterioro del ornato, entre otros. De la contaminación del aire, se tienen efectos de olores fétidos que se producen debido a su descomposición que emite el biogás. De la contaminación del suelo y la tierra se tiene el manejo inapropiado de estos residuos, que, al no ser tratados debidamente como un abono orgánico, sustrato para macetas o una fuente de energía renovable perjudican a ambos. De igual forma, existe la contaminación del agua por lixiviación de los sólidos que han sufrido un proceso de saneamiento.

Otras consecuencias que se tiene es la proliferación de fauna nociva, que son focos de enfermedades que afecta directamente a los colaboradores al tener

contacto con superficies contaminadas por orina y heces de estas plagas, provocando enfermedades gastrointestinales, enfermedades de la piel por hongos, enfermedades respiratorias, enfermedades de la vista por infecciones debido a las partículas en el ambiente y también mordeduras de animales e insectos,

En la agroindustria arrocera, se originan residuos sólidos que deben ser tratados debidamente, ya que los costos de prevención son menores a los de mitigación al ser controlados de manera apropiada. Esto lleva a plantear la pregunta principal de este estudio: ¿cómo podrían alimentarse calderas de biomasa de una Planta de Beneficio de Arroz en Palencia, con briquetas de residuos sólidos obtenidos?

Esta pregunta se complementa con las respuestas a las preguntas auxiliares:

- ¿Qué cantidad de residuos sólidos son generados por cada tonelada de arroz producido en una Planta de Beneficio de Arroz en Palencia, Guatemala?
- ¿Cómo elaborar briquetas con biomasa residual de una Planta de Beneficio de Arroz en Palencia, Guatemala?
- ¿Cuál será el poder calorífico y rendimiento de briquetas hechas de biomasa residual generada en el proceso de producción en una Planta de Beneficio de Arroz en Palencia, Guatemala?

- ¿Cuáles serán los beneficios de reutilizar los residuos sólidos generados por cada tonelada de arroz producido en una Planta de Beneficio de Arroz en Palencia, Guatemala?



## **OBJETIVOS**

### **General**

Formular un proyecto para alimentar calderas de biomasa con briquetas de residuos sólidos de una Planta de Beneficio de Arroz en Palencia, Guatemala.

### **Específicos**

- Calcular la cantidad y calidad de residuos sólidos generados por cada tonelada de arroz producido en una Planta de Beneficio de Arroz en Palencia, Guatemala.
- Elaborar briquetas con biomasa residual de una Planta de Beneficio de Arroz en Palencia, Guatemala.
- Establecer el poder calorífico y rendimiento de briquetas hechas de biomasa residual generada en el proceso de producción en una Planta de Beneficio de Arroz en Palencia, Guatemala.
- Determinar los beneficios de reutilizar residuos sólidos generados por cada tonelada de arroz producido en una Planta de Beneficio de Arroz en Palencia, Guatemala.



## RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

El presente estudio es de tipo cuantitativo descriptivo, se buscó describir la metodología de recolección de residuos sólidos generados durante la molienda de una planta de beneficio de arroz, para la elaboración de una briqueta que sirva de combustible sólido para alimentar la caldera de biomasa.

La recolección de la cascarilla se hizo directamente donde es depositada, luego del proceso de pilado que se encuentra fuera del área de producción, ya que no se tiene un lugar de almacenamiento apropiado, por lo que se verificó la calidad de la misma. También para determinar la composición ideal de aglutinante, se realizaron varias combinaciones de agua con almidón de yuca, polvillo de arroz y fécula de maíz, para establecer cuál era la de mayor viscosidad y eficiencia de adherencia.

Para la producción de la briqueta se desarrolló un diagrama de flujo que permita ir evaluando cada uno de los procesos que se llevaron a cabo, como es la preparación del aglutinante y la cantidad de cascarilla según la formulación desarrollada, los porcentajes que se utilizaron fueron un 70 % de cascarilla de arroz y 30 % de almidón de yuca, descartando otro tipo de aglutinante por la falta de viscosidad y adherencia con la cascarilla.

La fabricación de la briqueta se hizo a pequeña escala de manera experimental, utilizando medios domésticos, para la preparación del aglutinante con base en la fórmula seleccionada por las características evaluadas. También se cumplió con las proporciones establecidas de cascarilla de arroz suelta y del almidón de yuca, para hacer la mezcla utilizada como materia prima. Se utilizó

un equipo a pequeña escala, para comprimir la mezcla o materia prima para la elaboración de las briquetas.

Posterior a la elaboración de la briqueta se procedió a registrar ciertos datos físicos de la misma, como fue el peso de la briqueta húmeda, el tiempo de secado de manera natural, el peso de la briqueta seca, lo que permitió determinar el porcentaje de humedad que se tenía al momento de su fabricación, de igual manera se calculó la densidad de las briquetas según su peso y volumen.

La briqueta obtenida se llevó a un laboratorio, para determinar sus propiedades fisicoquímicas como el poder calorífico, y los porcentajes de humedad y ceniza. La caracterización de estas propiedades permitió hacer un análisis del rendimiento que se tiene como un biocombustible sólido para alimentar la caldera de biomasa.

Por último, la briqueta obtenida podrá ser utilizada como fuente energética para alimentar la caldera de biomasa y sustituir en parte el consumo de carbón mineral que se emplea actualmente, lo cual tendrá un impacto positivo al reducir estos costos de operación. También se dará una solución viable al acopio de este tipo de residuos sólidos, que representa un foco de contaminación al medio ambiente y contribuirá a la reducción de gases de efecto invernadero, que se genera al utilizar un combustible fósil como lo es el carbón mineral.

## INTRODUCCIÓN

La producción de arroz es una industria en crecimiento, debido a que es un alimento de alto consumo para los guatemaltecos. El no tener un plan integral y uso de tecnología apropiada para el manejo de los residuos sólidos, que son generados durante el proceso de molienda de una planta de beneficio de arroz, y el no reutilizar estos residuos para elaborar un biocombustible alternativo, tiene efectos al medio ambiente, como la contaminación del aire, la contaminación de suelos, la tierra y la contaminación del agua, que se ven afectados al no tener una solución para tratamiento adecuado de estos residuos sólidos.

El estudio aporta una metodología de recolección de los residuos en una planta de beneficio de arroz, para darle una solución factible al manejo de estos residuos, al ser reutilizados en la elaboración de una briqueta, fomentando la utilización de recursos energéticos renovables, permitiendo mantener un equilibrio entre el medio ambiente y las actividades productivas, que garanticen la sostenibilidad de la industria arrocera, dando una solución viable al acopio de estos residuos derivados de las actividades productivas de la agroindustria del arroz.

De los resultados obtenidos, se estableció una mezcla adecuada para la elaboración de la briqueta, que maximizará el uso de biomasa residual generada y minimizará el uso de aglutinante a base del almidón de yuca. Así mismo, de los análisis fisicoquímicos hechos a la briqueta, se determinó que el potencial energético, lo hace un combustible alternativo para ser usado en la caldera de biomasa. También se obtuvieron los porcentajes de humedad y ceniza, siendo estos dos factores importantes en la capacidad calorífica de las briquetas,

cumpliendo ambos parámetros con los requerimientos de funcionamiento de la caldera.

En el capítulo 1, se presentan los antecedentes relevantes para la investigación, y el marco teórico y conceptual sobre el cultivo del arroz y su proceso industrial, así como la caracterización de los residuos sólidos generados. La información recolectada permitió establecer la factibilidad de un combustible alternativo, a través de la elaboración de una briqueta con la cascarilla de arroz y almidón de yuca. Seguidamente en el capítulo 2, se muestra el desarrollo metodológico para la selección y recolección de la materia prima que se utilizó para la elaboración de las briquetas y el proceso para la elaboración de la misma.

En el capítulo 3, se detallan los resultados obtenidos, los beneficios de reutilizar residuos sólidos generados al elaborar briquetas. Se estimó el potencial energético de las briquetas a partir del análisis de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas tales como el poder calorífico, el porcentaje de humedad y el porcentaje de ceniza. Por último, en el capítulo 4, se presentan la discusión de los resultados obtenidos y finalmente se dan las conclusiones de la investigación y las recomendaciones consideradas.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 Antecedentes de la investigación

En Guatemala se han realizado estudios, sobre el aprovechamiento de la generación residuos sólidos como biocombustible sólido, a partir de la biomasa residual en la agroindustria. A continuación, se presentan algunos estudios que aportan datos importantes sobre el tema, en plantas industriales similares que se encuentran en el país.

En la tesis Análisis técnico financiero en la implementación de briquetas de aserrín, cáscara de café y olote, para disminuir el consumo de leña en San Juan Sacatepéquez elaborada por Álvarez (2018), se realizó un proyecto para evaluar una alternativa a través de briquetas aprovechando los residuos generados por algunas actividades productivas en San Juan Sacatepéquez. Como la industria maderera, cultivo de café y maíz.

Con base en el estudio se determinó que la formulación para las briquetas sería la siguiente: aserrín un 60 %, la cantidad de cascarilla de café sería de un 25 %, para el olote y papel reciclado como aglutinante serían un 10 % y 5 % respectivamente. Los resultados que se obtuvieron dieron que el encendido era inmediato para la prueba de combustión y la emisión de gases de efecto invernadero, había sufrido una reducción del 75 % aproximadamente.

La capacidad calorífica promedio es de 4,010 kcal/kg con una eficiencia del 98 % respecto a la leña tradicional. Alcanza una densidad de 509 kg/m<sup>3</sup> que es aceptable para una combustión eficiente. El aporte a la investigación será

metodológico para determinar la factibilidad técnica y económica de un proceso de conversión de biomasa en energía.

Valiente (2017) en su tesis Elaboración de briquetas para aprovechamiento del residuo de arroz en beneficios del municipio de el Progreso, Jutiapa, realizó una investigación sobre la elaboración de briquetas de biomasa sólida a base de cascarilla de arroz para el aprovechamiento de este residuo agroindustrial. La composición adecuada para elaborar briquetas a base del residuo agroindustrial es de 70 % cascarilla de arroz y 30 % aglutinante de almidón de yuca.

De los análisis realizados a las briquetas de composición apropiada se obtuvo 48.53 % humedad, 9.81 % cenizas, 14.11 MJ/kg el poder calorífico y el periodo de combustión de 69.90 minutos. El aporte a la investigación será práctico y metodológico, porque se tomarán los resultados de las propiedades que tiene la cascarilla de arroz, y la técnica empleada en el proceso para la elaboración de briquetas.

En la tesis Determinación de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de briquetas elaboradas con aserrín, residuos sólidos, vacasa y tetrabrik, utilizando almidón y cal como aglutinantes, de Martínez (2015), se desarrolló una investigación para evaluar cómo influye la cal y almidón al usarlos como aglutinantes, sobre las propiedades físicas, químicas y mecánicas de briquetas elaboradas con aserrín, vacasa, residuos sólidos y tetrabrik.

La composición que se usó fue de un 34 % de biocombustible y un 9 % de almidón, además también se hizo la combinación de un 39 % de biocombustible y un 4 % de cal. De ambas combinaciones se terminó que el biocombustible con las mejores propiedades fue la briqueta elaborada de tetrabrik y almidón, una densidad de 0.83 g/cm<sup>3</sup>, una humedad de 17.30 %, una resistencia de

compresión de 23.18 kg/cm<sup>2</sup> y el poder calorífico de 26.01 J/kg. El aporte a la investigación será práctico porque se tomará los porcentajes para la formulación del aglutinante ideal a base de almidón y utilizará la información de la forma y tamaño óptimo para la elaboración de briquetas, para el desarrollo del diseño experimental.

En otros países de Latinoamérica se encontraron estudios relacionados al tema de investigación y se presentan a continuación.

En la tesis Caracterización físico-química de residuos agroindustriales (cascarilla de arroz y cascarilla de café) como materia prima potencial para la obtención de bioetanol, Laboratorios de Química UNAN-Managua, de Arias y Meneses (2016), se realizó un estudio para la generación de biocombustible a partir de los residuos sólidos de la cascarilla de arroz y de café. Los resultados que se obtuvieron para la cascarilla de arroz y café respectivamente fueron: humedad del 6.59 % y 8.60 %; ceniza 18.52 % y 3.67 %; celulosa 36.03 % y 36.70 %; lignina 18.49 % y 15.93 % y hemicelulosa 45.48 % y 4.37 %.

En Perú, Costilla y Aguirre (2017) en la publicación Propuesta de una Briqueta Ecológica utilizando cascarilla y polvillo de arroz, hacen una propuesta para la fabricación de una briqueta ecológica utilizando cascarilla y polvillo de arroz, analizando sus propiedades físicas. Se elaboraron la cantidad de 15 muestras de ensayo, las primeras cinco se hicieron con la proporción de un 40 % de engrudo de polvillo de arroz combinado con un 60 % de cascarilla de arroz; otras cinco con una mezcla de 50 % con aglutinante a base de polvillo de arroz y un 50 % de cascarilla y por ultimo las 5 restante se elaboraron con una proporción del 60 % del aglutinante a base de polvillo de arroz y un 40 % del residuo de cascarilla.

Todas las muestras fueron compactadas a una presión de 400 PSI (libras por pulgada cuadrada). Con base en los resultados obtenidos se concluyó que la combinación apropiada para la mezcla es 40 gramos de cascarilla y un 60 % de aglutinante a base del polvillo de arroz, para obtener una briqueta con una textura sólida y masa uniforme que ayudará a la comprensión. El aporte a la investigación será metodológico porque se utilizará la técnica empleada en el proceso para la elaboración de briquetas.

En Colombia, en la publicación Obtención y caracterización de materiales adsorbentes a partir de cascarilla de arroz (Rodríguez, Campos, y Pérez, 2019), hicieron un trabajo de investigación sobre los materiales adsorbentes a partir de la cascarilla de arroz, para determinar su caracterización al ser producidos a través de una activación química con ácido fosfórico.

Al realizar el análisis respectivo según la norma ASTM D3172, se concluyó que el material obtenido a partir de la calcinación de cascarilla de arroz está conformado por 16.7 % de humedad, 19.9 % de materia volátil, 35.9 % y 27.5 % para las cenizas y carbono fijo respectivamente. Se concluye que el material es una mezcla de componentes que presenta una superficie un alto porcentaje de carbón fijo el cual brinda atractivas propiedades de absorción. El aporte a la investigación será práctico porque se tomarán los resultados de la caracterización de la cascarilla de arroz.

## **1.2 El cultivo del arroz**

El arroz es una de las plantas más antiguas, por tal razón es difícil lograr establecer el período o la época en que inició su propagación por el hombre, aunque la literatura China menciona 3,000 años antes de Cristo. El origen del grano de arroz es la India, y llegó a América a través de los territorios de China, Egipto, Grecia, España entre otros. Este cultivo, se manifiesta como el renglón con mayor beneficio neto por manzana en el conjunto de los granos básicos, y también ofrece la frecuencia más alta en términos de valores positivos en la relación beneficio-costos (CENTA, 2018).

El arroz es una planta herbácea, de tallos redondos y huecos formado por nudos y entrenudos, sus hojas de chapa plana unidas al tallo por la vaina y su inflorescencia es una espiga. Se cultiva a nivel nacional a una altura entre 0 a 800 metros sobre el nivel del mar, y a una temperatura de 25-30 °C para su crecimiento óptimo. Se trata de un cereal que es considerado alimento básico en varias culturas culinarias (en especial la cocina asiática), así como en algunas partes de Latinoamérica. Detrás del maíz, el arroz es el segundo cereal de mayor producción a nivel mundial (Arias y Meneses, 2016).

La producción nacional de arroz no cubre la demanda del mercado, mientras que la industria arrocera si tiene la capacidad de molienda requerida. En este sentido la industria del arroz en Guatemala absorbe la totalidad de la cosecha nacional de arroz y realiza importaciones de arroz en granza, normalmente procedente de los Estados Unidos. Las principales zonas productoras de arroz en el país son San Marcos, Quetzaltenango, Retalhuleu, Suchitepéquez, Escuintla, Jutiapa, Santa Rosa, Chiquimula, Quiché, Alta Verapaz, Izabal y Petén (Roldan, 2016).

## **1.2.1 Aspectos botánicos**

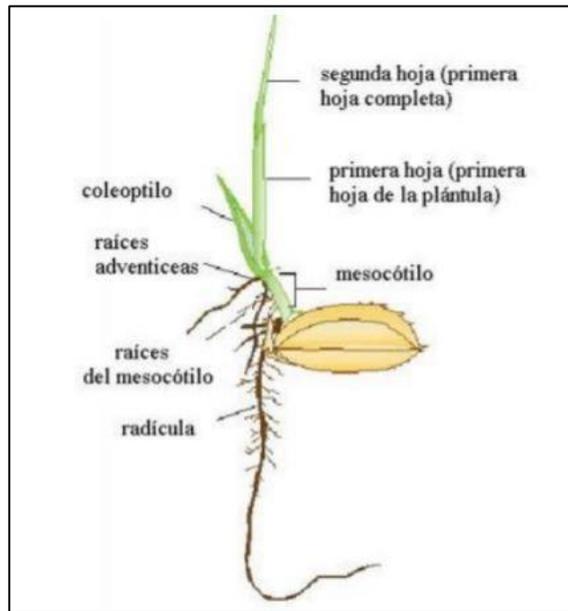
El conocimiento morfológico de la planta de arroz (*Oryza sativa L.*) es importante en la investigación, es por ello por lo que a continuación se describe la fisiología de los órganos de la planta.

### **1.2.1.1 La planta de arroz**

Está formada de una raíz seminal y raíces secundarias que forman un fascículo no muy profundo, de cada uno de sus nudos nace una hoja y una yema con la capacidad de engendrar un nuevo tallo. Los tallos son huecos y más o menos redondos, formados por nudos y entrenudos que varían en número y tamaño según el cultivo de arroz que es una gramínea que se produce anualmente.

Sus hojas tienen la forma de lámina plana, están unidas al tallo por la vaina y su inflorescencia es en panícula, se da en los climas templados y subtropicales, luego de la cosecha que se realiza puede sobrevivir como perenne al rebrotar. La altura de las plantas varía y esta dependen de cada variedad y condición de su crecimiento, el rango es entre 0.4 metro a 1 metro. En la figura 1 se muestran las partes de una planta de arroz (Aguilar y Tulcán, 2018).

Figura 1. Partes de la planta de arroz



Fuente: Aguilar y Tulcán (2018). *Estudio del potencial energético de la cáscara de arroz ecuatoriano pelletizado para su uso como combustible.*

- Raíz

La planta de arroz durante su desarrollo tiene una raíz seminal o temporales y otras raíces adventicias o permanentes (CENTA, 2018).

- Tallo

Al tallo lo conforman la variación de nudos y entrenudos. El entrenudo maduro tiene una superficie glabra finamente estriado y vacío. Su brillo y color dependen la variedad, la longitud del entrenudo varía, siendo mayor en los entrenudos de la parte superior del tallo, en la base los entrenudos se van engrosando y forman una parte firme y sólida del tallo (CENTA, 2018).

- Hojas

Estas son de formas laminadas de cara plana, y lo largo del tallo; se le denomina prófalo a la primera hoja que aparece en la base del tallo principal, el cual está formado por dos brácteas aquilladas, que son sujetadas por los bordes en cada nudo y por el reverso del prófalo. La hoja superior también es conocida como hoja bandera es la que se desarrolla por debajo de la panícula (CENTA, 2018).

- Panícula

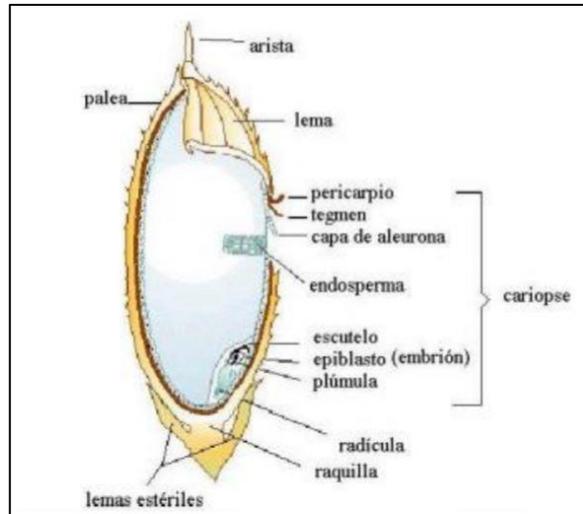
En la planta de arroz, sus flores se encuentran agrupadas en una inflorescencia compuesta denominada panícula; la cual está situada por encima del nudo ciliar o base de la panícula (CENTA, 2018).

### **1.2.1.2 Grano de arroz o semilla**

Al grano de arroz, comúnmente se le llama semilla, recién cosechado está formado por el fruto llamado cariopse y por la cáscara que se compone por las glumelas (palea y lema). Industrialmente se considera al arroz en granza al conjunto de cariopse y glumelas como se puede ver en la figura 2.

Durante la molienda para producir arroz blanco o integral, el arroz en granza tiene un 20 % de cáscara y 10 % es afrecho estos elementos son eliminados en los procesos de descascarado y pulido respectivamente, y el 70 % lo constituye el arroz blanco los cuales son granos enteros o quebrados (Aguilar y Tulcán, 2018).

Figura 2. **Estructura del grano de arroz**



Fuente: Aguilar y Tulcán (2018). *Estudio del potencial energético de la cáscara de arroz ecuatoriano pelletizado para su uso como combustible.*

### 1.2.2 Cosecha

Cuando los granos de la parte superior de la panícula se muestren claros y firmes se inicia la recolección, y los granos de la base están en la etapa de endurecimiento, y la panícula se nuestra inclinada, la humedad del grano es otro indicador que se debe considerar. El corte de la planta se realiza con cosechadoras mecánicas o de forma manual, después de la trilla el grano es depositado en un receptáculo. Conforme se va cosechando el arroz, el mismo es transportado en camiones a las industrias molineras (Periódico Los Molinos, 2020).

### 1.2.3 Proceso en planta de beneficio

Una vez que el arroz se encuentra listo para que se utilizado en proceso de molienda, de los silos de almacenamiento es trasladado para su proceso

respectivo, inicialmente se inicia con la operación “pilado” para obtener un arroz blanco, listo para su venta. El rendimiento de la piladora está en función del arroz blanco que se obtenga durante del proceso (Reaño, 2015).

#### **1.2.4 Recepción**

El proceso productivo de arroz inicia con la recepción de materia prima, arroz Paddy, es decir, el arroz con cáscara o granza. Este producto pasa por un proceso de verificación para garantizar la calidad del mismo. Se recibe materia prima nacional e importada. La granza importada ingresa limpia seca y fumigada por lo que únicamente se almacena hasta que pasa al proceso de pilado (Lizama, 2013).

La recepción de granza nacional se realiza durante la época de cosecha en el país, de septiembre a noviembre. Los camiones, proveniente de los campos de cultivo llegan a las industrias arroceras, para su descarga, se toman muestras para ver sus propiedades de humedad e impurezas. Luego es llevado al área de secado para que el arroz cáscara presente la humedad adecuada y luego almacenada en los silos (Reaño, 2015).

##### **1.2.4.1 Secado arroz en granza**

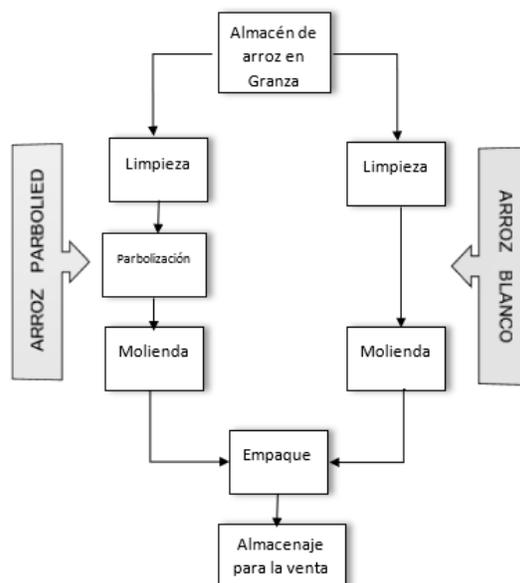
Este proceso es importante para evitar la fermentación del grano de arroz, debido a que cuando llega de las plantaciones, el grado de humedad varía entre el 18 % hasta un 30 %, por lo que se hace imperativo bajar esos grados de humedad a través del secado. El arroz se traslada a la planta a granel, y se descarga en los depósitos, luego se pasa por las secadoras para ir bajando la humedad hasta obtener la adecuada para su almacenamiento. Existen las secadoras de columna donde el arroz se mantiene en movimiento pasando por

baffles, en donde se le inyecta aire caliente a su paso hasta alcanzar la humedad deseada (Periódico Los Molinos, 2020).

#### 1.2.4.2 Almacenado en granza

Luego de un proceso de secado, para obtener la humedad deseada, el arroz en granza se almacena en silos. Posteriormente se lleva al proceso de manufactura o molienda, dentro de la planta de producción para obtener como producto final un arroz blanco, listo para su comercialización como se ilustra en la figura 3.

Figura 3. **Proceso productivo del arroz**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft PowerPoint.

#### 1.2.4.3 Parbolización

Este proceso consiste en cocinar el arroz en granza, el propósito del proceso es producir modificaciones organolépticas, físicas y químicas al cereal,

causando características con ciertas mejoras nutricionales. Las fases del proceso de precocción son, maceración, gelatinización y secado del producto (Lizama, 2013).

- Maceración

El arroz en granza es vertido en un tanque de remojo es el recipiente donde se realiza la maceración, ahí se deja reposar durante 5 horas aproximadamente en agua caliente entre 70 °C y 85 °C. Este proceso permite que los minerales y vitaminas que se encuentran en la película y en el germen, penetren en el grano a medida que absorbe el agua. El objetivo de la maceración es aumentar la humedad del grano hasta un 30 % - 33 %, humedad necesaria para la posterior gelatinización del grano (Lizama, 2013).

- Gelatinización

En esta etapa del proceso se llega a la temperatura a la cual el gránulo de almidón comienza a absorber agua y a aumentar de tamaño, perdiendo su estado cristalino y tornándose gelatinoso. El grano se torna más compacto y las vitaminas y minerales son fijados en su interior. La humedad ideal del arroz que ingresa para realizar este proceso es entre 30 % y 33 %.

- Secado

Primero el producto precocado se somete a un proceso de pre secado, utilizando un secador de lecho fluidizado. Se realiza esta operación para reducir el contenido de humedad del grano a un nivel próximo del adecuado, en el menor tiempo posible. Posteriormente el producto es recirculado dentro de las cámaras

de secadores verticales intermitentes por medio de elevadores de cangilones. La humedad a la que debe llegar el grano es de 11 % - 13 % (Lizama,2013).

#### **1.2.4.4 Proceso de molienda**

Es el proceso por medio del cual el grano de arroz en granza se inicia con el prelimpieza, luego pasa a la actividad de pilado, posteriormente sigue el pulido, seguidamente clasifica y selecciona para obtener el arroz elaborado que será empacado y almacenado listo para ser comercializado.

- Prelimpieza

El arroz en granza, luego de la fase etapa de secado, pasa a través de zaranda vibratoria de manera continua, de esa manera el grano que llega al proceso de “pilado” va limpio libre de impurezas y contaminantes. Las impurezas que se encontraron se retiran a través de un juego de dos mallas donde inicialmente en la primera se separan las impurezas mayores y en la segunda el arroz queda retenido, listo para la siguiente fase (Reaño, 2015).

- Descascarillado

El arroz con cáscara (*Paddy*) es descascarado mediando dos rodillos de goma que giran en forma contraria, obteniéndose arroz descascarado y la cascarilla de arroz, posteriormente a una mesa seleccionadora que separa el arroz con cáscara y el arroz sin cáscara a través de movimientos vibratorios. Este es un circuito cerrado que se encarga de retornar el arroz *Paddy* para que vuelva a pasar por la operación de descascarado. El arroz integral o sea sin cáscara pasa a la siguiente etapa que es el pulido (Reaño, 2015).

- Pulido de arroz

En esta operación de pulido se remueve del grano la capa superficial, por lo que se realiza en dos etapas: el pulido con agua: el producto pasa por una pulidora vertical donde con agua a presión se inicia la eliminación de pulimento. El agua debe cumplir parámetros microbiológicos y fisicoquímicos para evitar contaminación del producto, por lo que es un punto crítico de control. A continuación, para eliminar totalmente el pulimento del grano, está el pulido secundario donde el producto se pasa por dos pulidoras continuas. En esta operación se encuentran dos puntos críticos de control (Lizama, 2013).

- Clasificación y selección

Previo a ingresar el arroz pulido a la zaranda de clasificación, a través de un aspirador se elimina las impurezas finas que pudieran venir de las pulidoras. Posteriormente en la zaranda la que tiene como función separar el arroz blanco de mayor tamaño del arrocillo  $\frac{1}{2}$  y por último el arroz entero y arroz  $\frac{3}{4}$  pasan a una selección electrónica para separar granos con ciertos defectos. Los granos de arroz que son seleccionados pasan a la fase de empaque o envasado. Todo el rechazado se envasa en sacos de 50 kg para su venta (Reaño, 2015).

- Empaque y almacenaje

El empaque es una operación que se realiza de manera manual, el colaborador va llenando y pesando sacos 50 kg de arroz posteriormente se cose, y luego se traslada a la bodega de producto terminado. El arroz puede permanecer un periodo de 2 a 3 meses en condiciones adecuadas de inocuidad (Reaño, 2015).

### **1.3 Caracterización de la cascarilla de arroz**

Del proceso de pilado en una arrocera, se obtiene la cascarilla que es un subproducto de origen vegetal, compuesto básicamente por celulosa y óxido de silicio, que son dos elementos importantes en la elaboración de combustibles.

El uso de la cascarilla de arroz para la elaboración de un biocombustible alternativo es importante progreso en la conservación de los recursos naturales. Lo cual representa el desarrollo de nuevas tecnologías limpias y económicas; también cabe mencionar que el grano de arroz forma parte esencial de la canasta básica en todo el mundo (Ríos, 2019).

La corteza dura que cubre al grano de arroz se llama cascarilla y aproximadamente tiene un 22 % de la porción que forma el arroz. Se le considera residuo por no ser comestible ya que su propiedad puede causar daños en el tracto digestivo.

Las características que posee la cáscara son: quebradizas, el color particular varía entre el pardo rojizo a púrpura oscuro. La densidad que posee es baja por eso al reunirlos ocupa gran parte del espacio. El peso específico es de  $125 \text{ kg/m}^3$ , y un 10 % de humedad aproximadamente dependiendo de las zonas de cultivo (Aguilar y Tulcán, 2018).

Figura 4. **Cascarilla de arroz**



Fuente: Aguilar y Tulcán (2018). *Estudio del potencial energético de la cáscara de arroz ecuatoriano peletizado para su uso como combustible.*

### **1.3.1 Uso de la cascarilla de arroz**

Según las variedades, el porcentaje de cascarilla extraída en la operación de descascarillado puede variar del 15 % al 20 %. Puede tener varias aplicaciones de uso, para las cuales se considera como prioritario el aspecto económico que el técnico (Arias y Meneses, 2016).

Existen métodos para compactar biomasa residual de la agroindustria entre los que se hallan la peletización y diseño de briquetas, cuyo objetivo es reutilizar estos residuos para la producción de energía calórica o térmica empleada como fuente natural y sustentable, al compactar cierta cantidad de residuos sólidos se obtiene un producto como pellet o briquetas, en la tabla I se presentan las propiedades minerales de la cascarilla de arroz (Aguilar y Tulcán, 2018).

Tabla I. **Propiedades minerales de la cascarilla de arroz**

<b>Propiedad</b>	<b>Porcentaje %</b>
Cenizas	18.59
Sílice (SiO <sub>2</sub> )	94.50
Óxido de Calcio (CaO)	0.25
Óxido de Magnesio (MgO)	0.23
Óxido de Potasio (K <sub>3</sub> O)	1.10
Óxido de Sodio (Na <sub>2</sub> O)	0.78
Sulfatos (SO <sub>3</sub> )	1.13

Fuente: elaboración propia con base en los datos de Aguilar & Tulcán (2018, p.27).

- Como biocombustible

Según la variedad de arroz su composición varía, esta contiene del 17 % al 20 % de cenizas de cascarilla seca; su poder calorífico oscila de 3.3 a 3.6 kcal/kg. En las instalaciones de la industria arrocera, la cascarilla puede ser utilizada como biocombustible en las máquinas de vapor fijas o semifijas, destinadas a la mecanización. La carencia de elementos perjudiciales (el azufre en este caso) favorece la utilización de la cascarilla en las calderas, porque no provoca corrosión ni formación de adherencias o irritaciones. Algunas dificultades que hay que superar es el alto contenido de cenizas (Arias y Meneses, 2016).

En la tabla II se muestran el parámetro del poder calorífico que se obtuvo a través de un análisis realizado a diferentes tipos de biocombustibles, cada combustible tiene un poder calorífico superior (PCS) y poder calorífico inferior, este se basa en la cantidad de calor que entrega un kilogramo o metro cúbico de combustible al oxidarse en forma completa (Aguilar y Tulcán, 2018).

Tabla II. **Características de briquetas comparando a otra fuente de combustibles**

Combustible	PCI		Humedad
	kJ/kg	kWh/kg	%
Astillas	10,000 – 16,000	2.8 – 4.4	< 40
Briquetas	17,000 – 19,000	4.7 – 5.3	< 20
Cáscara fruto seco	16,000 – 19,000	4.4 – 5.3	8 - 15
Hueso de aceituna	18,000 – 19,000	5.0 – 5.3	7 - 12
Leña	14,400 – 16,200	4.0 – 4,5	< 20
Pellets	17,000 – 19,000	4.7 – 5.3	< 15

Fuente: elaboración propia con base en los datos de Aguilar & Tulcán (2018, p.32).

- Como abono orgánico

La cascarilla de arroz puede ser aprovechada como materia prima, para preparar abonos compuestos o artificiales o bien como sustrato para macetas, por ser rica en celulosa y lignina, facilita la fabricación de estos. No debe permanecer completamente seca, ya que el polvillo que produce es nocivo por lo que conviene evitarlo. Sin embargo, para eliminar los elementos de propagación de algunas enfermedades criptogámicas y bacterianas que pudiera contener, es indispensable su completa fermentación (Arias y Meneses, 2016).

### 1.3.2 Composición de la cascarilla de arroz

Es importante conocer la caracterización de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la cascarilla de arroz, como lo es el poder calorífico, el porcentaje de ceniza y humedad, entre otras. Por lo que se consideran estas propiedades en la construcción y el funcionamiento de hornos, que lo hará más eficientes en la quema e incineración de este residuo agroindustrial; las propiedades físicas y químicas de la cascarilla podrán variar de acuerdo con su variedad y la zona de cultivo (Ríos, 2019).

La tabla III y IV presentan algunos parámetros de la caracterización y evaluación de cuatro variedades diferentes de cascarilla de arroz que se cultiva en Canadá. Debido al alto contenido de sílice que tiene, el cual es aproximadamente de 20 % hace que su uso sea limitado para alimento en harinas para animales. Uno de los elementos que contribuye a la combustión de la cascarilla de arroz es la celulosa, siendo el elemento elemental de las fibras de este subproducto agrícola (Ríos, 2019).

**Tabla III. Características químicas de cuatro variedades de cascarilla de arroz en Canadá**

Parámetro	Muestras de Canadá			
	V.1	V.2	V.3	V.4
Celulosa	29.20	33.47	25.89	33.50
Hemicelulosa	20.10	21.03	18.10	21.35
Lignina	20.00	18.80	24.60	18.20

Fuente: elaboración propia con base en los datos de Ríos (2019, p.29).

**Tabla IV. Poder calorífico inferior y composición elemental, de cuatro variedades de cascarilla de arroz en Canadá**

Canadá	Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre	Ceniza	Poder Calorífico kJ/kg
V.1	37.60	5.42	36.56	0.38	0.03	20.00	14.22
V.2	24.10	4.98	33.66	0.40	0.02	18.80	13.24
V.3	38.70	4.70	31.37	0.50	0.01	24.60	13.40
V.4	42.60	5.10	33.44	0.51	0.02	18.20	14.12

Fuente: elaboración propia con base en los datos de Ríos (2019, p.33).

## **1.4 La biomasa en procesos para generación de energía**

El uso conveniente de la biomasa ofrece una alternativa para reducir los costos de operación por concepto de insumos energéticos, con ello disminuye la dependencia en el consumo de combustibles fósiles, contribuyendo con ello a la disminución en la emisión de gases de efecto invernadero.

Mediante procesos de transformación térmicos, biológicos o fisicoquímicas, la biomasa puede ser transformada en un biocombustible sólido, líquido o gaseoso, por lo que es una fuente de energía renovable. Cuando se aplican estos procesos se elaboran ciertos productos con un valor energético mayor, de igual manera se tienen densidades altas, convirtiendo la biomasa residual en un recurso energético alternativo en forma de biocombustible; a partir de los cuales se produce energía renovable transformada en electricidad, calor o fuerza motriz (Ríos, 2019).

### **1.4.1 Definición**

Toda materia orgánica que proviene de la biosfera, o la proveniente de la agroindustria, ganadería, industria de alimentos, residuos urbanos entre otros, y que pueden ser convertidos en energía se le conoce como biomasa. La biomasa es considerada como una fuente de energía renovable, es materia orgánica susceptible de ser utilizada como fuente de energía, porque la misma proviene del sol. Al quemarse estos carbohidratos, regresan a su forma de dióxido de carbono y agua, liberando la energía que contienen (Álvarez, 2018).

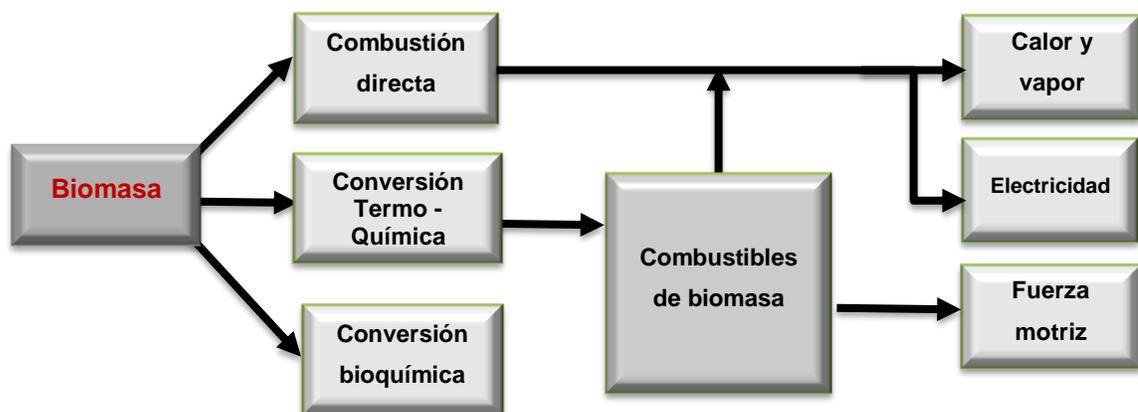
### **1.4.2 La biomasa como fuente de energía**

La biomasa como fuente de energía no provoca un aumento del efecto invernadero, el CO<sub>2</sub> liberado al momento de la combustión ya formaba parte de

la atmósfera y fue absorbido por las plantas durante su crecimiento, por eso se considera como energía renovable, al contrario de los combustibles fósiles que el CO<sub>2</sub> ha estado encapsulado por millones de años y al liberarse provocan impacto al cambio climático (Valiente, 2017).

La utilización de biomasa con fines energéticos posee numerosas ventajas, entre las que destacan; disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> respecto a otros combustibles fósiles, y contaminantes sulfurados o nitrogenados (causantes de la lluvia ácida), una gran problemática que presentan todas las empresas es el exceso de residuos, gracias al reciclaje de la biomasa se disminuyen los residuos agroindustriales esto contribuye a la diversificación energética del país, los cultivos energéticos no atentan contra la seguridad alimentaria presentando nuevas oportunidades para el sector agrícola, en la siguiente figura se ilustra el proceso de conversión y formas de energía (Quintero y Torres, 2019).

Figura 5. **Proceso de conversión y formas de energía**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

### **1.4.3 Tipos de biomasa**

Se cataloga a la biomasa con base en su procedencia u origen, y por el uso final que se le pueda darse, tomando en cuenta que la biomasa primaria es aquella que se obtiene directamente de un ecosistema natural para su utilización energética y la biomasa secundaria, también llamada residual, es aquella que se obtiene como residuo o subproducto de alguna actividad productiva (Gaona, 2014).

#### **1.4.3.1 Biomasa natural**

Es la que se genera sin intervención del ser humano, es decir que son los propios ecosistemas naturales la que la generan, son ejemplo de este tipo de biomasa los residuos de los árboles como la leña y ramas. La explotación desmedida de este recurso es un problema porque no se preserva la protección del medio ambiente, por lo que dejaría de ser un tipo de combustible renovable y ecológico (Combustibles Aragón, 2016).

#### **1.4.3.2 Biomasa residual**

Es toda aquella que se genera por algunos procesos agroindustriales que son realizados por la actividad del ser humano, como el de caña de azúcar, arroz, café y palma africana, a partir del uso energético de residuos agroindustriales, también se resalta que el potencial para aprovechamiento energético de las biomásas para alimentar de manera directa calderas como un combustible sostenible, y así generar el vapor necesario que satisfaga los requerimientos energéticas que son necesarios para llevar a cabo los diferentes procesos. Es por ello que la biomasa residual combinada con tecnologías modernas permite

tanto la producción de electricidad como la producción de calor con aplicaciones en el hogar, la industria y el comercio (Quintero, 2017).

#### **1.4.3.3 Excedentes agrícolas**

Se le conoce como excedente agrícola a todo lo que no es utilizado en la alimentación humana por alguna razón pueden ser utilizados como biomasa con fines energéticos, ya sea como combustible o transformado como biocombustible para la generación eléctrica (García, 2012).

#### **1.4.3.4 Cultivos energéticos**

Son cultivos destinados a la generación de energía, entre los que se encuentran algunos cultivos tradicionales como la caña de azúcar o algunos cereales, así como otros cultivos que son menos comunes. Se deben elegir plantas y árboles de fácil crecimiento y con un mantenimiento relativamente bajo, las cuales usualmente se cultivan en tierras de bajo valor productivo (Gaona, 2014).

#### **1.4.4 Contenido energético de la biomasa**

Esta propiedad es fundamental para determinar el tipo de biomasa que puede utilizarse como combustible. El proceso de la combustión es una reacción química relativamente rápida de los componentes de la biomasa a alta temperatura mediante la cual se combina con el oxígeno del aire, es suficiente para producir la oxidación de los elementos de los residuos sólidos, para obtener energía en forma de calor y dióxido de carbono, agua y cenizas como productos de la reacción. La oxidación de la materia que contenga carbono e hidrógeno, para generar metano y agua, y se lleva a cabo mediante una reacción de

oxidación exotérmica. El poder calorífico inferior (PCI) es la variable que permite cuantificar la energía liberada en los procesos de combustión de la materia, en la tabla V se muestra el potencial energético de ciertas biomásas (Quintero, 2017).

Tabla V. **Rendimientos energéticos de algunas biomásas residuales**

<b>Biomasa / Cultivo</b>	<b>Cantidad de producción (t)</b>	<b>Tipo de residuo</b>	<b>Masa de residuo (t)</b>	<b>Potencial energético total (TJ)</b>
Arroz	1	Cascarilla	0.200	0.0028
Café	1	Pulpa	2.131	0.0247
		Cisco	0.205	
		Tallos	3.024	
Caña panelera	1	Bagazo	2.530	0.0084
Maíz	1	Rastrojo	0.934	0.0119
		Tusa	0.270	
		Cuesco	0.217	
Palma de aceite	1	Fibra	0.627	0.0303
		Raquis	1.060	
Leña combustible	1	Leña	1.000	0.0138

Fuente: Quintero (2017). *Evaluación del potencial energético de los residuos sólidos agroindustriales del proceso de extracción de aceite de palma africana como alternativa energética para el reemplazo de la leña en la zona norte del departamento del Cesar.*

#### **1.4.5 Caracterización de la biomasa**

Esta caracterización permite obtener una previsión del comportamiento de la biomasa ante las diferentes etapas involucradas en su uso como fuente de energía: obtención, transporte, tratamiento y conversión en energía. También sus propiedades fisicoquímicas y energéticas deben ser objeto para su análisis se muestran en la tabla VI (Gaona, 2014).

Tabla VI. **Parámetros físicos, químicos y energéticos de la biomasa**

<b>Propiedades</b>	<b>Parámetros</b>	<b>Descripción</b>
<b>Físicas</b>	Densidad real y aparente Porcentaje de humedad Distribución granulométrica	Influyen en la selección y el diseño de los equipos de manejo del material y la necesidad de pretratamiento.
<b>Químicas</b>	Análisis elemental Análisis inmediato Componentes estructurales Composición de cenizas	Determinan el desempeño de la biomasa durante los procesos de transformación química y termoquímica.
<b>Energéticas</b>	Poder calorífico	Determina la cantidad de energía aprovechable

Fuente: elaboración propia con base en los datos de Gaona (2014, p.10).

- **Propiedades físicas:** esta característica nos permite establecer el tipo de combustible energético que se puede generar la biomasa. Por otro lado, las características físicas influyen en el tratamiento previo que sea necesario aplicar y dentro de estas tenemos algunas que son propiedades relacionadas al formato como la biomasa se presenta (Gaona, 2014).
- **Propiedades químicas:** las propiedades químicas pueden referirse a los elementos que constituyen a la biomasa (C, H, O, N, S). El contenido de cenizas, elementos inorgánicos y su comportamiento son de vital importancia en la caracterización de los combustibles sólidos. Por otra parte, el análisis más sencillo de la biomasa como combustible consiste en determinar poder calorífico, volátiles y cenizas (Gaona, 2014).

## 1.5 Briqueta ecológica

Es un producto ecológico y renovable, está catalogado como biocombustible sólido, generalmente tienen forma cilíndrica o de bloques rectangulares como se ilustra en la figura 6, por su capacidad calorífica y su alta densidad, el mismo puede ser utilizado y comercializado como un sustituto de la leña tradicional y el carbón. La materia prima utilizada proviene comúnmente de residuos de industriales forestales, agroindustriales, ganaderos, naturales, ecosistemas, entre otros (Martínez, 2015).

Figura 6. Formas físicas de briquetas



Fuente: Martínez (2015). *Determinación de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de briquetas elaboradas con aserrín, residuos sólidos, vacasa y tetrabrik, utilizando almidón y cal como aglutinantes*

### 1.5.1 Descripción

La briqueta es un biocombustible sólido producido a partir de biomasa residual de origen lignocelulósico u otros materiales los cuales son compactados. La cual puede ser fabricada de manera artesanal hasta industrial donde la presión

de compactación es grande y a temperatura elevada, lo que produce una auto aglomeración y no es necesario el uso de un aglutinante. Mientras que de forma artesanal la presión es media y por lo mismo necesita de un aglomerante para tener una buena compactación. Su uso puede ser doméstico o en la industria para la generación de calor y energía (Martínez, 2015).

### **1.5.2 Composición**

Se debe considerar la mezcla apropiada de los residuos sólidos orgánicos como fuente de energía calorífica, cuya caracterización permita evaluar el poder calorífico, un rápido encendido y reducida emisión de cenizas. La materia prima debe tener las condiciones adecuadas determinadas dentro de los parámetros de humedad, granulometría, aglutinante, presión y temperatura (Martínez, 2015).

Las briquetas son 100 % naturales y ecológicas, ya que están hechas de residuos de madera y aserrín; orujo de girasol, cascarilla de arroz, alforfón y otros cereales; maíz y mazorcas de maíz; la corvina, ramas, arbustos, hojas; paja, cañas; cáscaras de nuez, huesos de aceituna; lignina, turba y otros tipos de biomasa. Para fabricar briquetas los residuos sólidos deben ser triturados a una granulometría apropiada, para luego poder ser compactados obteniendo un bajo porcentaje de humedad, por lo regular tienen una forma cilíndrica o rectangular. Posee mayor poder calorífico superior a la leña tradicional, además enciende más rápido y no desprende humos, ni olores (Tienda biomasa, s.f.).

### **1.5.3 Tipos de procesos para fabricación de briquetas**

Existen diferentes procesos para la fabricación de briquetas a partir de la biomasa residual de la actividad industrial, ganadera o agrícola, que puede ser

empleada para uso doméstico, comercial e industria, los cuales se presentan a continuación.

### 1.5.3.1 Fabricación artesanal

En este tipo de proceso no intervienen equipos sofisticados (ver figura 7), ya que no se necesita producir gran cantidad, es por ello que son utilizados medios caseros, para preparar la mezcla y el prensado de briquetas con fuerza muscular. Es un proceso sencillo que persigue la elaboración de briquetas de manera práctica y sencilla con recursos mínimos y que estén al alcance y no generen costos de inversión, la materia prima es la que se encuentra en el entorno (Martínez, 2015).

Figura 7. Máquinas de tipo artesanal para hacer briquetas



Fuente: Martínez (2015). *Determinación de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de briquetas elaboradas con aserrín, residuos sólidos, vacasa y tetrabrik, utilizando almidón y cal como aglutinantes.*

### 1.5.3.2 Fabricación semiindustrial

Existe un proceso de fabricación, el cual tiende a ser continuo, con medianas producciones de briquetas, para poder desarrollar una microempresa y comercializar a pequeña escala dentro de la comunidad. Se requiere de una pequeña inversión para la compra del equipo básico necesario (mezcladora, prensa, molino, entre otros).

La presión de compactación es un elemento importante, debido a que la presión ejercida por la máquina de briquetadora permite que la materia prima logre alcanzar un grado de auto aglomeración, por lo que el uso de un aglutinante para la mezcla es mínimo o nulo. La humedad de la materia prima la cual debe estar entre el 15 % al 20 % deber ser considerada en el proceso. En la figura 8 se muestran unos tipos de máquinas briquetadoras semiindustriales (Martínez, 2015).

Figura 8. **Máquinas tipo semiindustrial para fabricar briquetas**



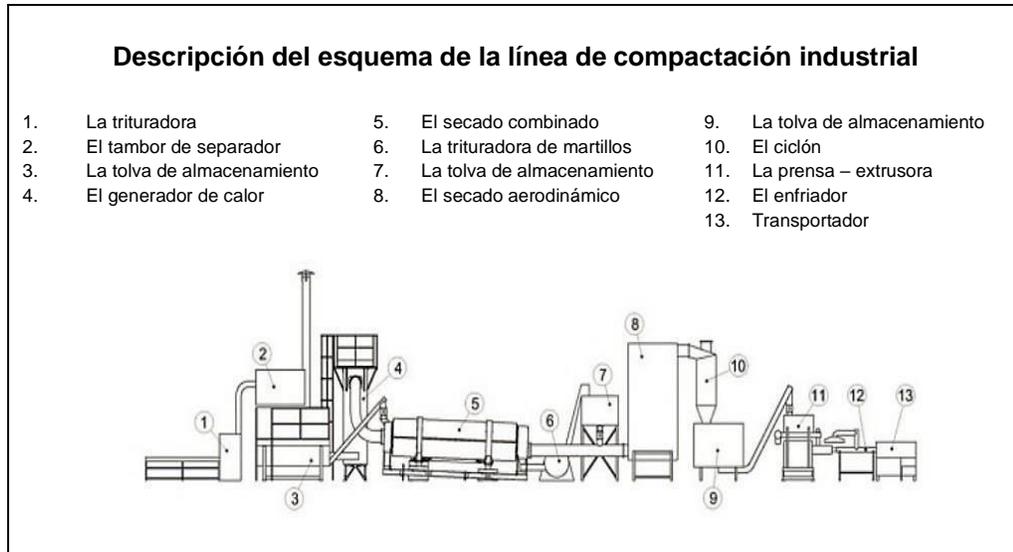
Fuente: Alibaba (s.f). *Fabricante, Empresa de Trading. Henan, China.*

### **1.5.3.3 Fabricación industrial**

En el mercado se encuentran máquinas con grandes niveles de producción continua y con altas presiones de compactación que alcanzan los 100 MPa. Además, no es necesario utilizar aglutinante, pero si es necesario que la materia prima se encuentre lo más seca factible, con una humedad entre el 5 % y 15 %. Por la presión ejercida en la compactación y el aumento de la temperatura la materia prima de la mezcla se auto aglomera, debido a que es material lignocelulósico que suministra lignina propia como aglutinante (Martínez, 2015). En la figura 9 se muestra un diseño de una planta industrial para fabricar briquetas.

La fabricación industrial se tienen varias etapas en el proceso de producción, algunos equipos esenciales como las secadoras, tamizadoras, filtros, trituradoras, recolectores de polvo entre otros, permiten obtener briquetas de buena calidad con excelentes propiedades fisicoquímicas y mecánicas, pues todo ello ayuda a la auto aglomeración, más las presiones elevadas de compactación (Martínez, 2015).

Figura 9. **Diseño de planta, para fabricación industrial de briquetas**



Fuente: Martínez (2015). *Determinación de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de briquetas elaboradas con aserrín, residuos sólidos, vacasa y tetrabrik, utilizando almidón y cal como aglutinantes.*

#### 1.5.4 **Biocombustibles sólidos**

Una de las principales características de un biocombustible sólido es su poder calorífico, tanto superior como inferior. El poder calorífico superior (PCS) se define como la energía liberada cuando una sustancia de biocombustible se quema con oxígeno en una bomba calorimétrica en condiciones normalizadas. El PCS que se obtiene a través de un análisis en laboratorios, permite establecer la energía contenida en la biomasa que se consumirá al evaporar el agua producida en la combustión (Quintero y Torres, 2019).

Los biocombustibles sólidos de origen lignocelulósico proceden del sector agroindustrial, la ganadería y la industria de alimentos, esta biomasa residual es la más común para la elaboración de biocombustibles sólidos sostenibles. Una

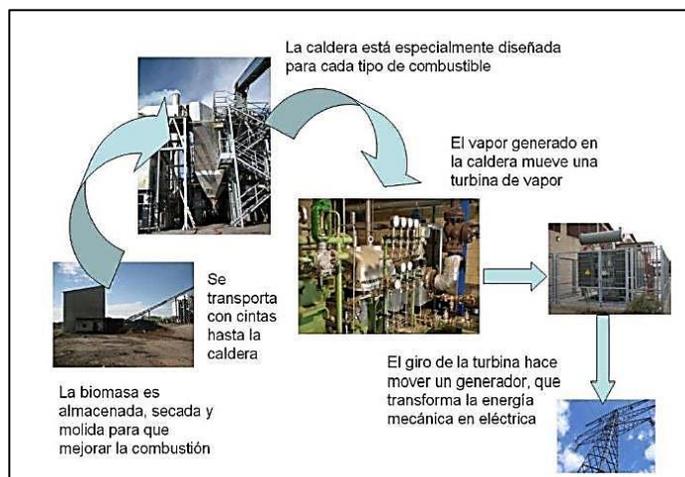
de las maneras comunes de la utilización de este tipo de combustibles sólidos son los residuos de astillas, aserrín, pellets y briquetas (Velasco, 2017).

## 1.6 Calderas de combustión de biomasa

La caldera es un módulo cerrado que está diseñado para producir vapor o calentamiento de agua, por medio de la acción del calor a una temperatura por arriba al ambiente y de igual manera la presión debe estar por encima de la atmosférica. Regularmente los intercambios de calor tienen lugar por radiación-convección del lado de los gases de combustión, y por conducción convección del lado del fluido portador (Velasco, 2015).

Las calderas de combustión de biomasa o combustibles provechosos, hoy día, pueden obtener eficiencias superiores al 86 % sobre PCI (Poder calorífico inferior). Se utilizan presiones de vapor de más de 30 bares y temperaturas del orden de los 450 °C, en la figura 10 se muestra el proceso de una termoeléctrica de biomasa (Quintero y Torres, 2019).

Figura 10. **Funcionamiento paso a paso de termoeléctrica de biomasa**



Fuente: Serrano (2018). *Principales tipos de calderas y cuestiones prácticas de una central.*

Las calderas de biomasa en su mayoría cuentan con los siguientes sistemas según Velasco (2015).

- Sistema de almacenamiento y alimentación de combustible. Puede ser manual, o mediante tornillo sin fin o empujador hidráulico.
- Sistema de combustión. Ahí se produce la conversión de la biomasa. Consta de hoguera, parrilla, entradas de aire y encendedor.
- Sistema de extracción de cenizas. Es un cenicero bajo la parrilla para extracción de las cenizas obtenidas.
- Sistema de extracción de gases. Lo que permite regular el grado de carga de la caldera es la variación del régimen del extractor.
- Sistema de control. Permite controlar el exceso de aire.

### **1.6.1 Tipos de calderas de biomasa por combustión**

Se debe seleccionar una caldera apropiada de acuerdo al tipo de industria para cumplir con los requerimientos que se deben cubrir, considerando un presupuesto que cubra los costos de un mantenimiento preventivo. Con base en la tecnología empleada existen varios tipos de calderas de vapor. Las calderas de parrilla, las de lecho fluidizado, y las de inyección son las que tienen una tecnología de vanguardia. A continuación, los detalles de cada una de ellas por separado, en la figura 11 se muestran las características de una caldera de biomasa DZL (Serrano, 2018).

Figura 11. **Caldera de agua caliente de biomasa DZL**



Fuente: Zozen Boiler (s.f.). *Fabricantes de calderas modernas en China.*

### 1.6.1.1 **Calderas de parrillas**

Su funcionamiento es simple, se basan en el transporte de la biomasa a través de una serie de parrillas en las que se llevará a cabo la combustión es la de mayor demanda a nivel industrial. Su mecanismo es a través de parrillas, siendo la más común la de parrillas móviles viajeras que utilizan cintas rotativas para facilitar el avance de la biomasa. También están las de parrillas fijas y mixtas (Serrano, 2018).

### 1.6.1.2 **Caldera de lecho fluidizado**

En este tipo de calderas se incorpora un componente inerte a la biomasa, el aire que se le suministra es de manera ascendente, de este modo se logra tener un comportamiento afín a la de un líquido, logrando mantener una temperatura uniforme dentro de la cámara. Para los combustibles difíciles o de baja densidad energética, este tipo de calderas facilita su combustión, por lo que tiene un mejor rendimiento. Su operación es más compleja que las de parrilla debido a su tecnología (Serrano, 2018).

### **1.6.1.3 Caldera de inyección**

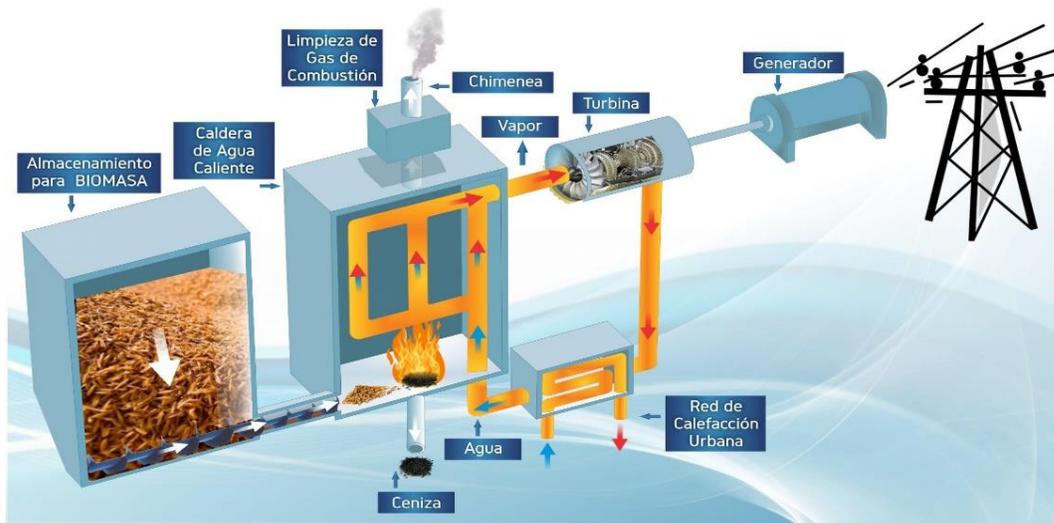
Este tipo de calderas dispone de varios quemadores a diferentes alturas, son las más utilizadas en centrales convencionales de carbón, a través del arrastre de una corriente de aire el combustible es alimentado a la caldera. Para este tipo de calderas el combustible que vaya a ser utilizado debe estar bien triturado en partículas finas no mayor de 5 mm y con una humedad por debajo del 15 % (Serrano, 2018).

### **1.6.2 Proceso de combustión de biomasa**

La combustión de la biomasa es un proceso esencial para la generación de la energía térmica o calorífica, la quema de la biomasa requiere de un agente oxidante que por lo regular es usado el oxígeno contenido en el aire, que reacciona exotérmicamente generando calor y una serie de gases de combustión.

Pueden ser usados diferentes tipos de materiales como combustibles de combustión, tales como combustibles fósiles, residuos o biomasa. Se considera que un combustible es bueno en la medida que este es amigable al medio ambiente y posee una capacidad calorífica alta. La combinación del valor calorífico y las condiciones de operación determina la calidad de la combustión y, por lo tanto, el calor de salida obtenido, la figura 12 muestra el proceso de combustión de la biomasa para la generación energética (BEFS, 2014).

Figura 12. **Proceso de combustión de la biomasa**



Fuente: Microm (s,f). Generación de energía con biomasa.

## **2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **2.1 Recolección y preparación de la materia prima**

En esta etapa se realizó una visita a la planta de beneficio de arroz, ubicada en el municipio de Palencia, Guatemala. Se tuvo una entrevista con el Gerente de producción para conocer el proceso que se lleva a cabo, y también establecer la producción diaria de arroz blanco y parbolizado. Con ello se puede determinar la cantidad de cascarilla que se genera diariamente durante el proceso de la molienda, así mismo también observar el lugar donde es acumulado este residuo sólido después del proceso de pilado.

#### **2.1.1 Reconocimiento y calidad de la materia prima**

Para verificar la calidad de la cascarilla de arroz que se utilizó como materia prima para la fabricación de la briqueta, se realizó una inspección in situ. Logrando determinar que la misma es depositada fuera de la planta de producción, pero no a la intemperie. Se le realizó una inspección ocular a la misma y se comprobó que no existe contaminación de otros materiales que puedan perjudicar las características de la cascarilla como se muestra en la figura 13.

Figura 13. **Área donde se deposita de cascarilla de arroz**



Fuente: [Fotografía de Pablo Ovidio García]. (Palencia, Guatemala. 2020). Colección particular. Guatemala.

### 2.1.2 Determinación de la producción de cascarilla

Para lograr determinar la cantidad de cascarilla que se produce diariamente en la planta se consideró el promedio de una semana de producción la cual podría variar dependiendo de la época del año y de la demanda que se tenga. En la tabla VII se tabuló la producción diaria tanto de arroz blanco como arroz parbolizado durante una semana, de igual manera se estableció la cantidad de cascarilla generada diariamente.

Tabla VII. **Producción de arroz y cascarilla generada**

Día	Producción de Arroz			Cascarilla generada (t)
	Blanco (t)	Parbolizado (t)	TOTAL (t)	
1	22.35	9.40	31.75	8.96
2	19.75	14.65	34.40	9.70
3	18.00	15.50	33.50	9.45
4	14.00	15.10	29.10	8.21
5	17.30	14.95	32.25	9.10
6	16.25	14.85	31.10	8.77
<b>Total</b>	<b>107.65</b>	<b>84.45</b>	<b>192.10</b>	<b>54.18</b>
Promedio	18.00	14.00	32.00	9.03
Desviación estándar	2.88	2.31	1.86	0.53

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Los cálculos anteriores se obtuvieron con las siguientes ecuaciones:

- Ecuación de promedio  $\bar{X} = \frac{\sum_i^N X_i}{N}$ ; [1]
- Ecuación de la desviación estándar  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^N (X_i - \bar{X})^2}{N}}$ ; [2]

$X = variable$

$N = número de observaciones$

$\bar{X} = media de la variable X$

## 2.2 Proceso para elaboración de las briquetas

Para la fabricación de las briquetas con cascarilla de arroz y almidón de yuca, se desarrolló un diagrama de flujo que permitió ir evaluando cada uno de los pasos que se llevaron a cabo para la elaboración de la misma.

### 2.2.1 Formulación de la mezcla para la elaboración de las briquetas

La composición de la mezcla de materiales para la preparación de la materia prima base para la fabricación de la briqueta se desarrolló en dos partes, en principio la elaboración del aglutinante. Luego se mezcló con la cascarilla de arroz y agua como se muestra en la figura 14, observando las características que permitieron obtener una masa consistente, compacta y adherente.

Figura 14. **Esquema de la mezcla de materiales e insumos**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft PowerPoint.

### **2.2.1.1 Elección del aglutinante**

Para establecer la composición apropiada de aglutinante, se realizaron las tres combinaciones siguientes: agua con almidón de yuca, agua con fécula de maíz y agua con polvillo de arroz, para determinar que producto presenta mayor viscosidad, consistencia y adherencia con la cascarilla de arroz suelta, para ser utilizado como aglutinante, según se muestra en la tabla VIII.

Tabla VIII. **Combinación de almidón y agua para determinar el aglutinante**

Muestra	Composición		Características del almidón	Observaciones
	Agua (l)	Material (kg)		
Almidón de yuca	0.6	0.2	Masa pegada a la superficie con grumos y sin consistencia.	No elegible
	1.5	0.3	Masa consistente, pegajosa y viscosidad apropiada.	Elegible
Fécula de maíz	0.6	0.2	Masa seca, poca viscosidad.	No elegible
	1.5	0.3	Masa que tiene una poca consistencia, y escasa adhesión.	No Elegible
Polvillo de arroz	0.6	0.2	Masa sin características de adhesión, y con poca viscosidad.	No elegible
	1.2	0.3	Masa con consistencia, viscosidad y adhesión.	Elegible

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

En la figura 15 se ilustra los pasos en la preparación del engrudo que se usará como aglutinante, comprobando las características a través del tacto y pruebas de adherencia con materiales como papel y cartón. Para la primera muestra tuvo composición de 1.5 litros de agua y 0.3 kg de almidón de yuca, con un tiempo de cocción de 12 minutos a temperatura promedio. Para la segunda muestra tuvo una composición 1.2 litros de agua y 0.3 kg de polvillo de arroz con un tiempo de cocción de 16 minutos a temperatura promedio. Ambas muestras tuvieron características similares para ser usadas como aglutinante adhesivo para la compactación de la briqueta después del prensado y el secado.

Figura 15. Proceso para la elaboración del engrudo

### **PREPARACIÓN DE AGLUTINANTE** Con Almidón de Yuca



Fuente: [Fotografía de Pablo Ovidio García]. (Villa Nueva, Guatemala. 2021).  
Colección particular. Guatemala.

Las características observadas en la masa de engrudo útil que se usará como aglutinante con la cascarilla de arroz fueron:

- Engrudo con una textura espesa y uniforme.
- Engrudo con propiedades adhesivas consistentes.
- Engrudo con buena adhesión con la cascarilla de arroz.
- Engrudo con fuerza de adhesión uniforme al compactar.
- Engrudo que al secar mantenga una adhesión y compactación.

### 2.2.1.2 Proporción de la mezcla para la briqueta

Una vez determinado el aglutinante para la mezcla con la cascarilla de arroz considerando las características de viscosidad, textura y adherencia observadas. Lo primero fue determinar la cantidad adecuada de aglutinante y cascarilla para elaborar las briquetas que permitiera maximizar el uso de biomasa de cascarilla de arroz y minimizar el uso de aglutinante como una condicionante fundamental, los resultados obtenidos se muestran en la tabla IX.

Tabla IX. **Composición de la mezcla de aglutinante y cascarilla**

Muestra	Aglutinante		Cascarilla de arroz		Masa Ensayo	Observaciones
	kg	%	kg	%	Kg 100 %	
<b>Aglutinante Almidón de yuca</b>	0.30	10 %	2.70	90 %	3.00	No tiene adherencia, se desmorona al hacer la compactación con la cascarilla.
	0.60	20 %	2.40	80 %	3.00	Poca adherencia y consistencia al compactar con la cascarilla.
	0.90	30 %	2.10	70 %	3.00	Mantiene textura firme y compacta, tiene buena adherencia con la cascarilla de arroz.
<b>Aglutinante Polvillo de arroz</b>	0.30	10 %	2.70	90 %	3.00	Sin textura firme ni adherencia al compactar con la cascarilla.
	1.05	35 %	1.95	65 %	3.00	Sin textura firme ni adherencia al compactar con la cascarilla.
	1.80	60 %	1.20	40 %	3.00	Mantiene textura compacta, adherencia aceptable con la cascarilla de arroz.

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

En la figura 16 se ilustra el proceso de las pruebas para elegir las cantidades de la mezcla de cascarilla de arroz y aglutinante, comprobando su compactación y adherencia al momento de elaborar la briqueta.

Figura 16. **Preparación de la cascarilla y aglutinante**



Fuente: [Fotografía de Pablo Ovidio García]. (Villa Nueva, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

De los resultados obtenidos para mezcla de aglutinante y cascarilla de arroz, se pudo determinar que la composición apropiada para la mezcla que servirá para elaboración de briquetas que maximice el uso de biomasa de cascarilla y minimice el uso de aglutinante. Estuvo dada por un 70 % de cascarilla y un 30 % de aglutinante, con estas proporciones se obtiene una buena compactación al aumentar cohesión y dureza para la formación de la briqueta de forma rectangular, facilitando su transporte y almacenamiento respectivo.

## 2.2.2 Instrumentos y equipos utilizados en la elaboración de la briqueta

En la tabla X se muestran los instrumentos y equipos utilizados para la elaboración de las briquetas.

Tabla X. Instrumentos y equipos utilizados

Equipo	Descripción	Uso	Imagen
<b>Balanza digital</b>	Pesa cocina 5 kg 11 lb tazón acero inoxidable Nordika	Para pesar muestras de briquetas y materia prima	
<b>Metro</b>	Material Metal, máxima medición de 3 metros.	Para tomar la medida de las dimensiones de la briqueta	
<b>Olla</b>	Recipiente de acero inoxidable capacidad 5 litros	Para preparar el almidón de yuca que se usara como aglutinante	
<b>Barreno</b>	Marca Truper, con rotomartillo de 1/2" para uso doméstico	Que será utilizado con el removedor de pintura, para facilitar el mezclado.	
<b>Removedor</b>	Marca Truper removedor de acero de 100 mm	Para la mezcla del aglutinante y la cascarilla de arroz para hacer la masa de la briqueta	

Continúa tabla X.

<b>Equipo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Uso</b>	<b>Imagen</b>
<b>Cubeta plástica</b>	Recipiente de plástico de 5 galones	Para preparar la mezcla de la masa de cascarilla de arroz y aglutinante	
<b>Licuadaora</b>	Marca Oster de velocidades color negra	Para moler briqueta para llevar a laboratorio para los análisis fisicoquímicos	
<b>Medidor</b>	Recipiente de vidrio para medir líquidos de 1/2 litro de capacidad.	Para medir el agua para la preparación del aglutinante.	
<b>Molde</b>	Molde para elaborar briqueta de 15X25X10 cm de lámina de 10 mm	Para uso en la máquina briquetadora artesanal para hacer briquetas	
<b>Tricket</b>	Equipo que se usa para levantar cargas pesadas, como con una capacidad de 2 toneladas.	Usado en la máquina artesanal para generar presión para formar la briqueta.	
<b>Máquina</b>	Equipo experimental hecha de hierro y lámina de diferentes calibres para elaboración de briquetas.	Para la elaboración de briquetas de cascarilla de arroz, con una presión ejercida por un tricket.	

Fuente: elaboración propia, realizando con Microsoft Excel.

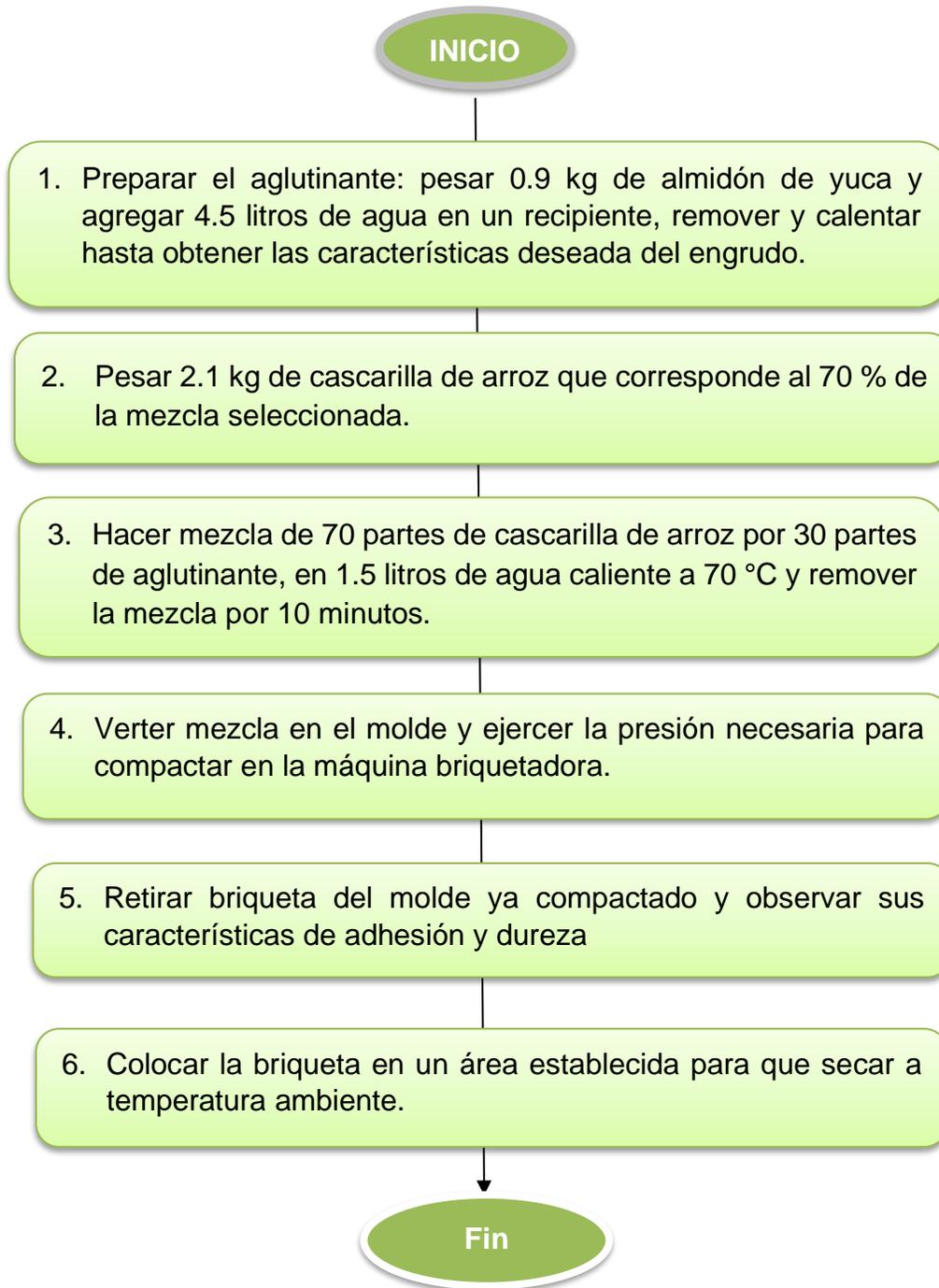
### **2.2.3 Evaluación del proceso para elaborar briquetas**

Para la elaboración de una briketa de cascarilla de arroz, es necesario seguir los siguientes dos pasos:

- Lo primero es la preparación del aglutinante con el almidón de yuca, el cual fue el que presentó la masa con mejores características de viscosidad, adhesión, textura y compactación con la cascarilla de arroz al momento de la elaboración de las briquetas a pequeña escala.
- Lo segundo es la preparación de la mezcla que será utilizada como materia prima, con los componentes que son: aglutinante a base del almidón de yuca, la cascarilla de arroz que permita y agua en las proporciones establecidas que permita maximizar el uso de la cascarilla de arroz, logrando una masa uniforme y firme con características de adhesión al momento de ser compactada y así evitar deformaciones al momento de ser extraída del molde rectangular, y continuar con el proceso establecido.

En la figura 17, se presenta una descripción de los pasos que se llevan a cabo para la elaboración de la briketa a un nivel experimental, usando los recursos mínimos que permitan que el proyecto sea factible.

Figura 17. Diagrama del proceso para la elaboración de briquetas



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

La tabla XI se muestra la descripción de la briqueta elaborada de manera experimental con el cálculo del peso húmedo y peso en seco, porcentaje de humedad y el tiempo de secado, el cual fue variable de acuerdo a las condiciones climatológicas del ambiente.

Tabla XI. Descripción de la briqueta elaborada

No de Prueba	Fecha de Inicio	Número de Briqueta	Peso Húmedo kg	Fecha Final	Peso Seco kg	Humedad % base húmeda	Tiempo Secado días
1ra	30/05/21	1	1.134	23/06/21	0.445	60.76 %	14
	30/05/21	2	1.134	23/06/21	0.446	60.67 %	14
	30/05/21	3	1.275	23/06/21	0.502	60.61 %	14
<b>PROMEDIO</b>			<b>1.181</b>		<b>0.464</b>	<b>60.68 %</b>	<b>14</b>
2da	7/06/21	1	1.250	2/07/21	0.523	58.16 %	16
	7/06/21	2	1.300	2/07/21	0.494	62.00 %	16
	7/06/21	3	1.410	2/07/21	0.535	62.06 %	16
	7/06/21	4	1.360	2/07/21	0.528	61.17 %	16
<b>PROMEDIO</b>			<b>1.330</b>		<b>0.520</b>	<b>60.90 %</b>	<b>16</b>
3ra	15/06/21	1	1.069	5/07/21	0.399	62.66 %	18
	15/06/21	2	0.964	5/07/21	0.389	59.64 %	18
	15/06/21	3	1.066	5/07/21	0.313	70.64 %	18
	15/06/21	4	1.018	5/07/21	0.383	62.37 %	18
	15/06/21	5	1.120	5/07/21	0.432	61.43 %	18
<b>PROMEDIO</b>			<b>1.047</b>		<b>0.383</b>	<b>63.41 %</b>	<b>18</b>
4ta	27/06/21	1	0.862	15/07/21	0.313	63.68 %	18
	27/06/21	2	0.866	15/07/21	0.346	60.06 %	18
	27/06/21	3	0.855	15/07/21	0.340	60.02 %	18
	27/06/21	4	0.785	15/07/21	0.332	57.72 %	18
<b>PROMEDIO</b>			<b>0.841</b>		<b>0.333</b>	<b>60.43%</b>	<b>18</b>
5ta	4/07/21	1	1.120	25/07/21	0.427	61.87 %	16
	4/07/21	2	0.981	25/07/21	0.369	62.38 %	16
	4/07/21	3	1.038	25/07/21	0.373	64.05 %	16
	4/07/21	4	1.035	25/07/21	0.363	64.92 %	16
	4/07/21	5	1.123	25/07/21	0.419	62.68 %	16
<b>PROMEDIO</b>			<b>1.059</b>		<b>0.390</b>	<b>63.16 %</b>	<b>16</b>

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

## **2.3 Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de las briquetas**

Para la caracterización de las propiedades físicas y químicas de las briquetas elaboradas se llevó a dos laboratorios técnicos, siendo estos Proverde Gestión Integral de Residuos y El Ministerio de Energía y Minas (MEM), en donde se realizaron los análisis respectivos.

### **2.3.1 Propiedades fisicoquímicas de las briquetas**

Los análisis que se realizaron a la briketa de cascarilla de arroz con almidón de yuca fueron:

- El Poder calorífico:
  - PROVERDE realizó el análisis del poder calorífico kJ/kg, con la técnica de Calorimetría, teniendo de referencia la norma ASTM D5468-02 /ASTM D5865 / D5865M–19 (Ver anexo 1).
  - MEM realizó el análisis del poder calorífico MJ/kg, con el método ASTM D-420 (Ver anexo 2).
  
- Porcentaje de humedad:
  - PROVERDE realizó el análisis del porcentaje de humedad, con la técnica de Termogravimetría, teniendo de referencia la norma Sartorius MA150 -MA156 (ver anexo 1).

- MEM realizó el análisis del porcentaje de humedad, por el método Gravimétrico (ver anexo 2).
- Porcentaje de ceniza:
  - PROVERDE realizó el análisis del porcentaje de ceniza, con la técnica de Gravimetría, teniendo de referencia la norma ASTM D-482-03 (ver anexo 1)
  - MEM realizó el análisis del porcentaje de ceniza, por el método ASTM D-482 (ver anexo 2)

### **2.3.2 Comparativo de poder calorífico con el carbón mineral**

Con base en los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio se realizó un análisis comparativo del poder calorífico, porcentaje de ceniza y porcentaje de humedad, respecto al carbón mineral según la ficha técnica del mismo (ver anexo 3). Con ello se estableció el porcentaje de carbón mineral que puede ser reemplazado con la briqueta de cascarilla de arroz al usarlo como un biocombustible para alimentar la caldera de biomasa.

### **2.4 Determinación de los beneficios obtenidos del estudio**

La briqueta obtenida podrá ser utilizada como fuente energética y sustituir en parte el consumo de carbón mineral, lo cual tendrá un impacto positivo al reducir estos costos de operación. También se dará una solución viable al acaparamiento de residuos sólidos que se generan y contribuirá a la reducción

de gases de efecto invernadero que se genera al utilizar un combustible fósil como lo es el carbón mineral.

#### **2.4.1 Reutilización de residuos y su impacto**

Con la elaboración de una briqueta de cascarilla de arroz y almidón de yuca para ser utilizada como un biocombustible sólido para alimentar la caldera de biomasa de le estará dando una solución viable al acopio de los residuos, que son un foco de contaminación ambiental, al ser reutilizados y aprovechados de mejor manera en su totalidad. Con ello, se podría mitigar los efectos que tiene el manejo inapropiado de estos residuos al medio ambiente y comunidades aledañas, como la contaminación del aire, la contaminación de suelos y la tierra, la contaminación del agua y el deterioro del ornato, entre otros.

#### **2.4.2 Reducción del uso de carbón mineral**

Con la metodología propuesta para el uso de los residuos sólidos generados en el proceso de pilado en una planta de beneficio de arroz, para la elaboración de briquetas como un biocombustible alternativo. Un beneficio directo será la reducción de carbón mineral, está directamente relacionado con el poder calorífico de la misma en relación al poder calorífico del carbón mineral.

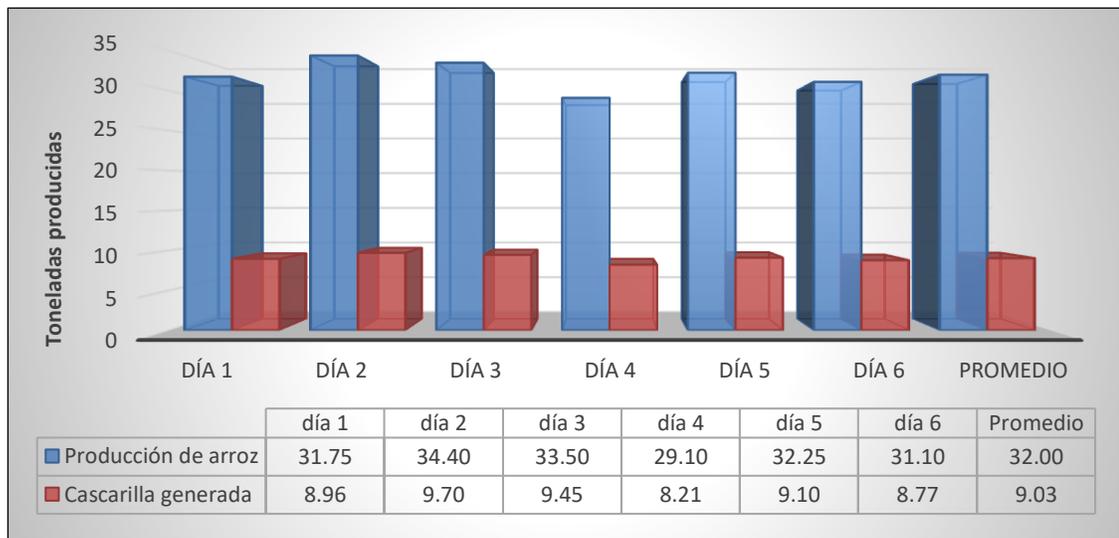
- Para alcanzar este objetivo, se presentan varios escenarios que ilustran los porcentajes de fabricación de briquetas y la reducción en el consumo del carbón mineral. Para optimizar la reutilización de la cascarilla en la elaboración de una briqueta ecológica es necesario que se automatice el proceso de producción para alcanzar estos escenarios. Se podrá obtener una reducción del 10 % hasta un 100 % en el consumo de carbón mineral que depende directamente de la de la productividad de briquetas.

### 3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1 Producción de cascarilla

En la figura 18 se representa la producción diaria de arroz durante una semana, de igual manera la cantidad de cascarilla generada diariamente, en toneladas.

Figura 18. **Cascarilla generada por producción de arroz**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Con base en los datos obtenidos, se pudo determinar que al día se tiene una producción promedio de 32 toneladas de arroz, lo que genera en promedio 9.03 toneladas de cascarilla de arroz, que equivale a 0.28 toneladas de cascarilla suelta por cada tonelada de arroz producido.

### 3.2 Elección de aglutinante

En la tabla XII se presentan las diferentes proporciones de agua y almidón, que tuvieron las concentraciones para elegir el aglutinante adecuado que cumpliera con las características necesarias de adhesión y consistencia para la compactación de la briqueta.

Tabla XII. **Composición seleccionada para el aglutinante**

Muestra	Composición		Características del almidón obtenido	Observaciones
	Agua (l)	Material (kg)		
<b>Almidón de yuca</b>	1.5	0.3	Masa pegajosa y consistente, viscosidad apropiada con la cascarilla.	<b>Elegible</b>
<b>Polvillo de Arroz</b>	1.2	0.3	Masa con consistencia, viscosidad y adhesión adecuada con la cascarilla.	<b>Elegible</b>

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Con las pruebas realizadas se pudo determinar las características apropiadas del aglutinante, siendo las proporciones siguientes las que fueron elegibles. La primera proporción de 0.3 kg de almidón de yuca disuelta en 1.5 litros de agua, y la segunda la proporción de 0.3 kg de polvillo de arroz disueltos en 1.2 litros de agua. Ambas composiciones tuvieron las características necesarias para ser usadas como engrudo adhesivo que al momento de la compactación y el secado conservó su consistencia y forma.

### 3.3 Proporción de la mezcla para la briqueta

En tabla XIII muestra la composición apropiada, que permitió maximizar el uso del residuo de la cascarilla de arroz y minimizar el uso de aglutinante para cumplir con uno de los objetivos planteados, al elaborar una briqueta que será utilizada como biocombustible sólido.

Tabla XIII. **Composición de la mezcla con aglutinante y cascarilla de arroz**

Material	Aglutinante		Cascarilla		Mezcla kg 100 %	Observación
	kg	%	kg	%		
Almidón de yuca	0.90	30 %	2.70	70 %	3.00	Mantiene textura firme y compacta, presenta buena adherencia con la cascarilla de arroz al momento de compactar.
Polvillo de arroz	1.80	60 %	1.20	40 %	3.00	Se obtiene una textura compacta, con adherencia aceptable al momento de compactar con la cascarilla de arroz.

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Con los resultados obtenidos se determinó que la composición conveniente, que permite maximizar el consumo de la cascarilla de arroz y minimizar el aglutinante en la elaboración de la briqueta, para cumplir con uno de los objetivos planteados, es la mezcla de un 30 % almidón de yuca y un 70 % de cascarilla de arroz.

### 3.4 Propiedades de la briqueta elaborada

Las características físicas de las briquetas elaboradas con los residuos sólidos se presentan en la tabla XIV.

Tabla XIV. Caracterización de la briqueta elaborada

No Prueba	Peso Húmedo kg	Peso Seco kg	Humedad % base húmeda	Tiempo Secado días	Volumen m <sup>3</sup>	Densidad kg/ m <sup>3</sup>
1ra	1.181	0.46	60.68 %	14	0.0023	199.00
2da	1.330	0.52	60.90 %	16	0.0021	242.57
3ra	1.047	0.38	63.41 %	18	0.0020	189.70
4ta	0.841	0.33	60.43 %	18	0.0021	161.82
5ta	1.059	0.39	63.16 %	16	0.0022	180.23
Promedio	1.092	0.418	61.72 %	16.4	0.0021	194.67
Desviación estándar	0.181	0.074		1.7		30.10

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

- Fórmula porcentaje de humedad, base húmeda

$$\%H = \left( \frac{P_h - P_s}{P_h} \right) \times 100; [3]$$

$\%H = \% \text{ humedad}$ ;  $P_h = \text{peso húmedo (kg)}$ ;  $P_s = \text{peso seco (kg)}$

- Fórmula volumen prisma rectangular

$$V_R = l * a * h; [4]$$

$V_R = \text{volumen prisma rectangular (m}^3\text{)}$ ;

$l = \text{largo (m)}$ ;  $a = \text{ancho(m)}$ ;  $h = \text{altura(m)}$

- Fórmula de densidad

$$\rho = \frac{m}{v}; [5]$$

$\rho = \text{densidad (kg/m}^3\text{)}$ ;  $m = \text{masa (kg)}$ ;  $v = \text{volumen(m}^3\text{)}$

Los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados por los laboratorios técnicos de PROVERDE y del Ministerio de Energía y Minas (MEM) a las briquetas elaboradas para determinar el poder calorífico, porcentaje de humedad y porcentaje de ceniza se presentan en la tabla XV.

Tabla XV. **Resultados del poder calorífico, porcentajes de ceniza y humedad**

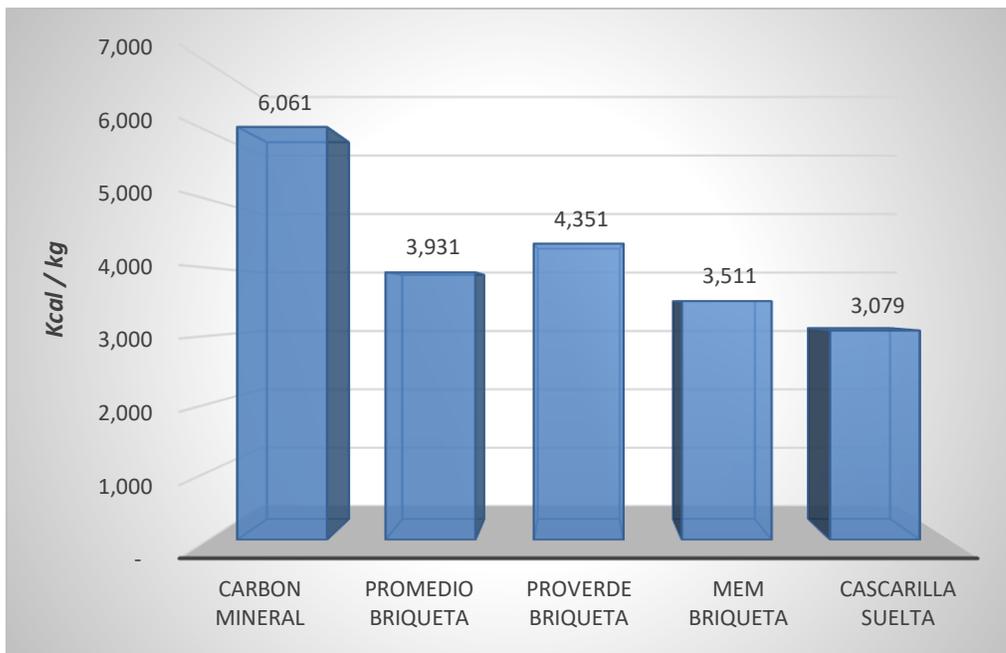
	BRIQUETA CASCARILLA DE ARROZ Y ALMIDÓN DE YUCA			Cascarilla SUELTA	CARBÓN MINERAL
	PROVERDE	MEM	PROMEDIO	Teórico	Ficha técnica
<b>PODER CALORÍFICO</b>					
kcal/kg	4,351.29	3,511.03	3,931.16	3,078.72	6,060.55
Respecto al carbón mineral	-28 %	-42 %	-35 %	-49 %	100 %
<b>CENIZA</b>					
%	12.69	7.43	10.06	19.3	7.40
Respecto al carbón mineral	71 %	0.4 %	36 %	161 %	100 %
<b>HUMEDAD</b>					
%	9.45	8.83	9.14	10.00	12.20
Respecto al carbón mineral	-23 %	-28 %	-25 %	-18 %	100 %

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Estos parámetros analizados nos permiten establecer la viabilidad que tiene la briqueta elaborada con cascarilla de arroz y almidón de yuca para poder alimentar la caldera de biomasa que actualmente es abastecida con carbón mineral.

La figura 19 muestra el comparativo del poder calorífico del carbón mineral, respecto a los resultados obtenidos de los análisis de laboratorios a la briqueta y el de la cascarilla suelta.

Figura 19. **Comparativo del poder calorífico obtenido**

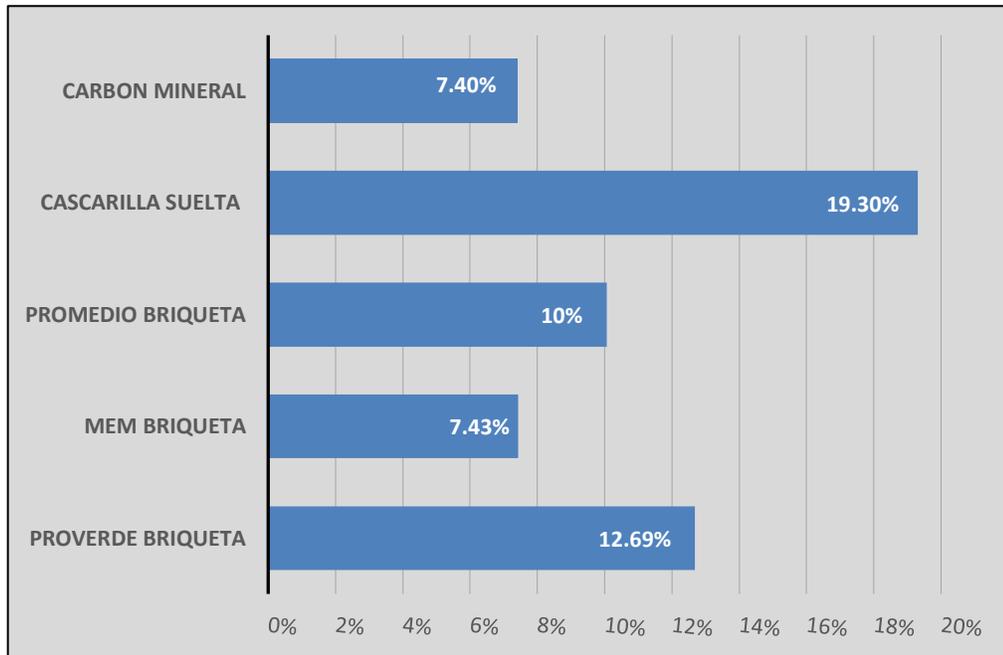


Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Con los resultados obtenidos de los análisis practicados a la briqueta elaborada con cascarilla de arroz y almidón de yuca, se pudo establecer que el poder calorífico de la briqueta es de un 65 % respecto al poder calorífico del carbón mineral que es utilizado para alimentar una caldera de biomasa, mientras que la cascarilla suelta representa un 51 %.

En la figura 20 se presentan los resultados del porcentaje de ceniza del carbón mineral, respecto a los resultados obtenidos de los análisis de laboratorios hechos a la briqueta y el de la cascarilla de arroz suelta.

Figura 20. **Comparativo del porcentaje de ceniza obtenido**

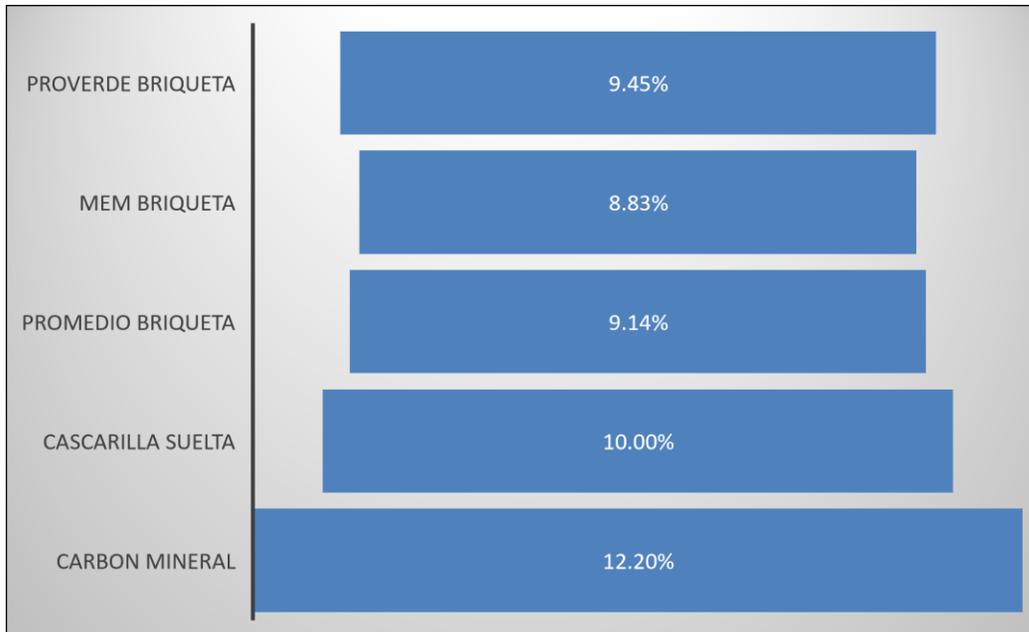


Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

En la figura 20 se puede observar que el contenido promedio de ceniza de la briqueta elaborada con cascarilla de arroz y almidón de yuca, es de un 36 % por encima del carbón mineral.

Respectó al comparativo de humedad, en la figura 21 se presentan los porcentajes de humedad del carbón mineral, respecto a los resultados obtenidos de los análisis de laboratorios hechos a la briqueta y el de la cascarilla de arroz suelta.

Figura 21. **Comparativo del porcentaje de humedad obtenido**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

En la figura 21 se observa que el contenido promedio de humedad para la briqueta elaborada con cascarilla de arroz y almidón de yuca es de 9.14 %, lo que indica estar un 25 % por debajo del carbón mineral que es utilizado y que tiene una humedad del 12.20 %.

### **3.5 Beneficios obtenidos del estudio**

Con la elaboración de una briqueta ecológica a base de cascarilla de arroz y almidón de yuca para alimentar la caldera de biomasa, se tendrán beneficios al ambiente y la reducción en el consumo de carbón mineral para alimentar la caldera de biomasa.

### **3.5.1 Los beneficios ambientales**

Con la elaboración de la briqueta ecológica de cascarilla de arroz y almidón de yuca, se tendrán los siguientes beneficios:

- Dar un tratamiento y disposición final adecuado los residuos generados, reduciendo los mismos de un 10 % hasta un 90 % de la cascarilla generada en el proceso de pilado en un beneficio de arroz, con base en la productividad que se logró en la elaboración de las briquetas.
- Fortalecer las políticas ambientales de la empresa al integrar un sistema de gestión ambiental, en el manejo de residuos sólidos generados de los procesos productivos que se tienen.
- Dar cumplimiento a la legislación guatemalteca “Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos Acuerdo Gubernativo No. 281-2015” en el manejo y tratamiento de desechos sólidos.
- Reducción en la emisión de gases de efecto invernadero al disminuir el consumo del carbón mineral como combustible para alimentar la caldera de biomasa en el beneficio de arroz en Palencia, Guatemala.
- Mermar la contaminación de los recursos naturales como lo es el suelo, la tierra, el agua al darle un tratamiento y disposición final a los residuos generados durante los procesos de producción en la arrocera.
- Mitigar la proliferación de fauna nociva que es un foco de enfermedades perjudiciales a la salud de los colaboradores de la empresa.

- Promover el uso de energía limpia para reducir el consumo de combustibles fósiles como lo es el carbón mineral para alimentar la caldera, al utilizar un biocombustible solido alternativo como lo es una briqueta ecología a base de cascarilla de arroz.

### 3.5.2 Reducción en el consumo de carbón mineral

En las tablas XVI y XVII se reflejan los resultados que se tendrían para diferentes escenarios que muestran la reducción en el consumo de carbón mineral a utilizar la briqueta elaborada con la biomasa residual que se genera en el beneficio de arroz.

Tabla XVI. **Capacidad de producción de briquetas de cascarilla por cada tonelada generada**

Descripción Actividad	Unidad de medida	Escenario	Escenario	Escenario	Escenario	Escenario	Escenario
		1 Reutilizar 10 %	2 Reutilizar 25 %	3 Reutilizar 40 %	4 Reutilizar 50 %	5 Reutilizar 75 %	6 Reutilizar 90 %
Cascarilla suelta generada al día	Tonelada (t)	9.03	9.03	9.03	9.03	9.03	9.03
% de cascarilla a reutilizar al día	%	10 %	25 %	40 %	50 %	75 %	90 %
Producción briqueta al día	Unidades	1,605	4,013	6,422	8,027	12,040	14,449
Peso de la producción de briquetas	Tonelada (t)	0.90	2.26	3.61	4.52	6.77	8.13

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

En la tabla XVI se presentan varios escenarios sobre el porcentaje de aprovechamiento al reutilizar la cascarilla de arroz disponible para la elaboración de briquetas ecológicas, donde se considera de manera conservadora un 10 %, y de manera optimista hasta un 90 %.

**Tabla XVII. Rendimiento del poder calorífico de la briqueta vs carbón mineral**

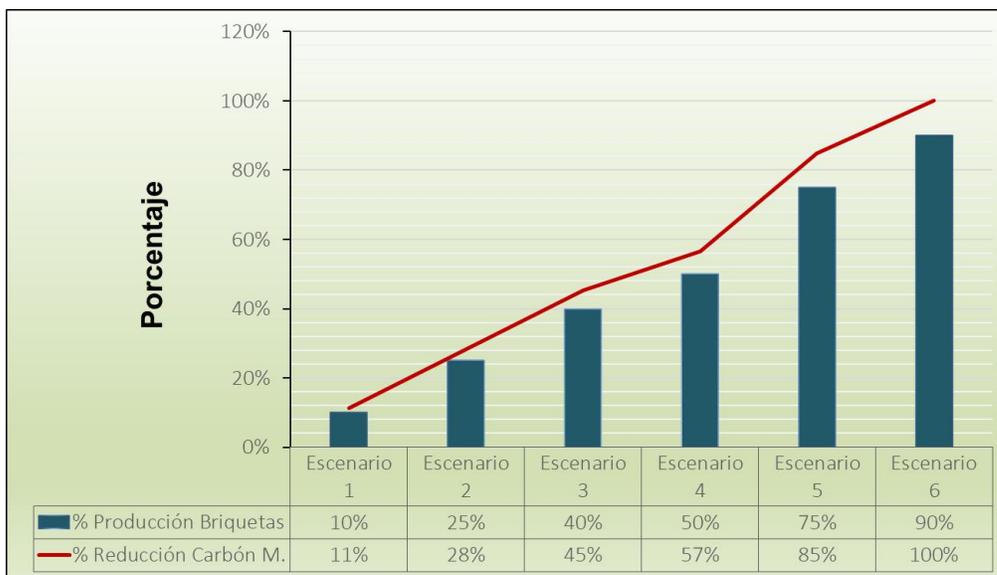
<b>Descripción Actividad</b>	<b>Unidad de medida</b>	Escenario	Escenario	Escenario	Escenario	Escenario	Escenario
		1 Reutilizar 10 %	2 Reutilizar 25 %	3 Reutilizar 40 %	4 Reutilizar 50 %	5 Reutilizar 75 %	6 Reutilizar 90 %
Consumo carbón mineral / día	Tonelada (t)	5.28	5.28	5.28	5.28	5.28	5.28
Producción briqueta seca	Tonelada (t)	0.92	2.30	3.68	4.60	6.90	8.28
Porcentaje Poder Calorífico de la briqueta respecto al carbón mineral	%	65 %	65 %	65 %	65 %	65 %	65 %
Cantidad de carbón mineral que se puede sustituir	Tonelada (t)	0.60	1.50	2.39	2.99	4.49	5.38
% de reducción en el consumo de carbón mineral.	%	<b>11 %</b>	<b>28 %</b>	<b>45 %</b>	<b>57 %</b>	<b>85 %</b>	<b>100 %</b>

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

En la tabla XVII se presentan varios escenarios sobre el porcentaje de reducción en el consumo carbón mineral por la briqueta ecológica elaborada con cascarilla de arroz. Al considerar el poder calorífico de la misma respecto al carbón mineral.

Así mismo en la figura 22 se presenta la tendencia que hay en relación a la productividad de briquetas y el consumo de carbón mineral, que disminuye directamente proporcional a la elaboración de briquetas, considerando la relación del poder calorífico que existe.

Figura 22. **Tendencia en la reducción del consumo de carbón mineral vs a la producción de briquetas**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

En cada uno de los escenarios planteados se aprecia el porcentaje de producción de briquetas y el porcentaje de carbón mineral que puede ser reemplazado, aprovechando al máximo el reutilizar los residuos que se generan en el proceso de pilado, en el beneficio de arroz.

## 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente trabajo de investigación propone el uso de la cascarilla de arroz en forma de briqueta, como un combustible alternativo en calderas, para reducir el impacto de los residuos de la producción de arroz y para reducir el uso de combustibles fósiles en el proceso productivo del beneficio.

El beneficio de arroz donde se realizó el estudio produce en promedio al día 32 toneladas de arroz (de agosto a noviembre) lo que generan 9 toneladas de cascarilla de arroz, lo que equivale a 0.28 toneladas de cascarilla arroz por cada tonelada de arroz producida. Esto muestra que hay una importante generación de residuos, que actualmente es aprovechado en parte para la alimentación de las calderas, pero de forma suelta. Otra parte se pierde como residuo en el suelo. Se propuso entonces mejorar la eficiencia en la combustión, por medio de briquetas y con ello darle una solución viable al acopio que se tiene de la cascarilla de arroz.

Se hizo una visita in situ para ver la calidad de la cascarilla de arroz y se logró determinar que la misma está libre de contaminación que no sea propia de los procesos de producción, lo que permite ser utilizada para la elaboración de una briqueta ecológica.

La elaboración de las briquetas se llevó a cabo en tres etapas: La primer etapa fue elegir el un aglutinante, a base del almidón de yuca, fécula de maíz y polvillo de arroz. Luego de varias pruebas y evaluaciones de desempeño, se determinó que tanto el engrudo a base del almidón de yuca en una composición de 1.5 litros de agua y 0.3 kg de material, y el engrudo a base del polvillo de arroz en una composición de 1.2 litros de agua y 0.3 kg de material. Podrían ser

utilizados como aglutinantes para la preparación de la mezcla con la cascarilla de arroz, que sería utilizada como materia prima.

La segunda etapa consistió, fue determinar la combinación de la mezcla que sería utilizada como materia prima para la elaboración de briquetas, luego de varias pruebas y combinaciones con el aglutinante a base del almidón de yuca e y el aglutinante a base del polvillo de arroz, se obtuvo que tanto la combinación de un 30 % de aglutinante de almidón de yuca y 70 % de cascarilla de arroz, y la combinación de un 60 % de aglutinante a base del polvillo de arroz y un 40 % de cascarilla de arroz.

Ambas combinaciones presentaban una textura firme, buena adherencia con la cascarilla de arroz al momento de compactar. Se pudo evaluar que la composición óptima para elaborar briquetas a base del residuo agroindustrial proveniente del proceso productivo del beneficio de arroz, que permite maximizar el uso de biomasa residual y disminuir los componentes adicionales es de 70 % cascarilla de arroz y 30 % aglutinante a base de almidón de yuca.

El almidón de yuca es un componente que se puede encontrar en las cantidades necesarias para el procesamiento de todo el residuo producido, además de ser un producto de elaboración nacional y de bajo costo, mientras que el polvillo de arroz se obtiene del proceso de pulido del arroz.

En la tercera etapa fue la elaboración de la briqueta ecológica, se realizó de manera artesanal a pequeña escala, utilizando una maquina elaborada en un taller de metal mecánica. Para elaborar la briqueta la mezcla se preparó con  $2.1 \pm 0.0005$  kg de cascarilla de arroz  $0.9 \pm 0.0005$  kg de almidón de yuca y 1.5 litros de agua, la preparación del almidón se realiza en caliente a temperaturas entre

65-75 °C porque es cuando se produce el abultamiento del grano de almidón y su viscosidad aumenta lo que produce el efecto de pegamento.

Luego de preparada la mezcla como materia prima, se vertió en el molde de la maquina ejerciendo un presión muscular y obtenido una briqueta con forma de prisma rectangular con los siguientes datos promedio: dimensiones 8.5 cm de alto, por 25 cm de largo y 10 cm de ancho, un peso húmedo de 1.092 kg, un peso seco de 0.418 kg, un porcentaje de humedad de base húmeda de 61.72 %, densidad de 195.04 kg/m<sup>3</sup> y un tiempo de secado de 16 días el cual puede variar dependiendo de las condiciones climáticas.

Para determinar la caracterización de las briquetas elaboradas con cascarilla de arroz se realizó un análisis fisicoquímico en los laboratorios técnicos de Proverde Gestión Integral de Residuos y El Ministerio de Energía y Minas (MEM). Obteniendo que el poder calorífico promedio para la briqueta de cascarilla de arroz es de 3,931.16 kcal/kg que equivale a un 65 % respecto al poder calorífico del carbón mineral que es de 6,060.55 kcal/kg según su ficha técnica. Esto refiere a que se necesitan 1.54 toneladas para suplir cada tonelada de carbón, algo que demuestra la viabilidad del uso de la briqueta en función de la energía.

Otros resultados que se obtuvieron de los análisis de laboratorio fue el porcentaje promedio de cenizas que equivale a un 10.06 % y que representa un 36 % por encima del porcentaje de ceniza del carbón mineral que es de 7.46 %. El porcentaje promedio de humedad es de 9.14 % que representa un 25 % por debajo del carbón mineral que es de un 12.23 % según la ficha técnica del mismo. Estos dos factores son importantes en la reducción de la capacidad calorífica de las briquetas contra el carbón, pero no limitan su uso, pues estos parámetros cumplen con los requerimientos de funcionamiento de la caldera, lo cual hace

que las briquetas elaboradas sean un biocombustible alternativo para alimentar la caldera del beneficio de arroz.

Según la cantidad de residuos sólidos generados se puede obtener la cantidad necesaria para sustituir el uso de carbón mineral que va desde un 10 % hasta un 100 % si se tiene una productividad eficiente que permita utilizar al máximo la cascarilla disponible. La empresa entonces podría justificar una inversión para la producción *in situ* a nivel semi industrial de las briquetas pues es un residuo que se puede volver un subproducto valorizado y con su uso, además de reducir el consumo de carbón mineral, mejoraría la integración de sus procesos.

## CONCLUSIONES

1. Se estimó que en promedio se generan 9 toneladas de cascarilla de arroz al día del proceso productivo de la molienda, que equivale a 0.28 toneladas de cascarilla por cada tonelada de arroz producido. Este residuo presenta una buena calidad en lo referente a contaminación, que permite ser utilizado para la elaboración de briquetas ecológicas.
2. La composición óptima para elaborar briquetas a base del residuo agroindustrial proveniente del proceso de producción del beneficio de arroz que permite maximizar el uso de biomasa residual y disminuir los componentes adicionales es de 70 % cascarilla de arroz y 30 % aglutinante de almidón de yuca.
3. El poder calorífico de las briquetas fue en promedio de 3,931.16 kcal/kg, lo que representa un rendimiento del 65 % respecto al del carbón mineral, esto hace que sean un combustible alternativo viable para alimentar la caldera del Beneficio de Arroz.
4. Se presentó un proyecto para alimentar calderas de biomasa con briquetas de residuos sólidos de una planta de Beneficio de Arroz en Palencia, Guatemala. Este demostró que se puede sustituir de forma factible el total del consumo actual de carbón mineral, utilizando el 90 % del residuo generado.



## RECOMENDACIONES

1. Ubicar un lugar apropiado para el almacenamiento de la cascarilla generada luego del proceso de producción, para que se mantenga en buenas condiciones y sin impurezas propias de la cosecha de arroz, y así se pueda tener un mejor aprovechamiento al ser utilizada para hacer briquetas.
2. Para mejorar la eficiencia en la producción de briquetas que permita aprovechar al máximo el potencial existente, la empresa podría justificar una inversión para la producción *in situ* a nivel semi industrial de las briquetas.
3. Aprovechar el potencial energético de la briqueta de cascarilla de arroz y almidón de yuca como un combustible alternativo en calderas, para reducir el consumo de combustibles fósiles en el proceso productivo, y al mismo tiempo reducir el impacto de este residuo originado de la producción de arroz.
4. Aplicar la metodología descrita en el estudio, en el diseño de briquetas ecológicas utilizando otro tipo biomasa residual de diferentes proceso productivos como podría ser cascarilla de café, cascara de almendra, cuesco de coco, entre otros. para ser utilizado como un biocombustible alternativo.



## REFERENCIAS

1. Aguilar, J. y Tulcán, E. (2018). *Estudio del potencial energético de la cáscara de arroz ecuatoriano peletizado para su uso como combustible*. (Tesis de licenciatura). Universidad de Guayaquil, Ecuador. <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/33180/1/401-1317%20-%20potencial%20energetico%20cascara%20arroz%20ecuadoriano.pdf>
2. Alibaba. (s.f). *Fabricante, Empresa de Trading*. [Mensaje de blog]. [https://spanish.alibaba.com/products/briqueta\\_maquina/CID100009480.html?IndexArea=product\\_en](https://spanish.alibaba.com/products/briqueta_maquina/CID100009480.html?IndexArea=product_en)
3. Álvarez, E. (2018). *Análisis técnico financiero en la implementación de briquetas de aserrín, cáscara de café y olote, para disminuir el consumo de leña en San Juan Sacatepéquez*. (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/10260/1/Erick%20Jony%20Alvarez%20Maldonado.pdf>
4. Arias, R. y Meneses, J. (2016). *Caracterización físico-química de residuos agroindustriales (cascarilla de arroz y cascarilla de café), como materia prima potencial para la obtención de bioetanol, Laboratorios de Química UNAN-Managua I-II semestre 2016*. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, Nicaragua. <https://repositorio.unan.edu.ni/3793/1/53860.pdf>

5. BEFS. (2014). Bioenergía y seguridad alimentaria evaluación rápida (BEFS RA). *Manual de usuario, sección 3 combustión*. Alemania: FAO. <http://www.fao.org/3/a-bp848s.pdf>
6. CENTA. (2018). *Programa de granos básicos*. El Salvador: Ministerio de Agricultura y Ganadería. [http://centa.gob.sv/docs/guias/granos%20basicos/Guia%20Centa\\_Arroz%202019.pdf](http://centa.gob.sv/docs/guias/granos%20basicos/Guia%20Centa_Arroz%202019.pdf)
7. Combustibles Aragón. (22 de mayo, 2016). *Tipos de biomasa*. [Mensaje de blog]. <http://combustiblesaragon.es/tipos-de-biomasa/>
8. Costilla, Y. y Aguirre, R. (2017). *Propuesta de una Briqueta Ecológica utilizando cascarilla y polvillo de arroz*. (Tesis de licenciatura). Universidad Católica de Trujillo Benedicto XVI, Perú. <file:///C:/Users/casa/Downloads/Tesis%20propuesta%20de%20una%20briqueta%20ecologica%20utilizando%20cascarilla%20y%20polvillo%20de%20arroz.pdf>
9. Gaona, D. (2014). *Mezcla de cascarilla de nuez de palmiste y raquis como combustible alternativo para generación eléctrica*. (Tesis de licenciatura). Universidad Central de Ecuador. Quito, Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/3498/1/T-UCE-0017-84.pdf>
10. García, S. (11 de octubre, 2012). *Centrales termoeléctricas de biomasa*. [Mensaje de blog]. <http://www.plantasdebiomasa.net/tipos-de-biomasa.html>

11. Lizama, S. (2013). *Diseño de investigación de la implementación del sistema de eficiencia global de equipos (OEE) en la sección de empaque de una empresa procesadora de arroz, ubicada en Villa Nueva, Guatemala, para el aumento en la productividad.* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_1346\\_Q.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1346_Q.pdf)
12. Martínez, A. (2015). *Determinación de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de briquetas elaboradas con aserrín, residuos sólidos, vacasa y tetrabrik, utilizando almidón y cal como aglutinantes.* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/3256/1/Ana%20Luc%C3%ADa%20Mart%C3%ADnez%20Maldonado.pdf>
13. MICROM. (s.f). *Generación de energía con biomasa.* Venezuela. [Mensaje de blog]. <https://www.microm-inc.com/works/generacion-de-energia-con-biomasa>
14. Periódico los Molinos. (3 de enero, 2020). *Producción de arroz.* [Mensaje de blog]. <http://molineria.online/produccion-de-arroz/>
15. Quintero, L. (2017). *Evaluación de potencial energético de los residuos sólidos agroindustriales del proceso de extracción de aceite de palma africana como alternativa energética para el reemplazo de la leña en la zona norte del departamento del Cesar.* (Tesis de maestría). Universidad de Manizales, Colombia. <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/3286>

16. Quintero, L., y Torres, C. (febrero de 2019). *Análisis de residuos sólidos de Palma Africana, como alternativa de aprovechamiento de energías renovables en el departamento del Cesar/Analysis of African palm solid waste, as an alternative to use renewable energy in the department of Cesar. Ingenierías USBmed, vol 10(1), pp. 8.* <https://revistas.usb.edu.co/index.php/IngUSBmed/article/view/3662/3256>
17. Reaño, R. (2015). *Propuesta de mejora de la productividad en el proceso de pilado de arroz en el Molino Latino S.A.C.* (Tesis de licenciatura). Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo. Chiclayo, Perú. [http://tesis.usat.edu.pe/bitstream/20.500.12423/502/1/TL\\_Reano\\_Villalobos\\_RaulErnesto.pdf](http://tesis.usat.edu.pe/bitstream/20.500.12423/502/1/TL_Reano_Villalobos_RaulErnesto.pdf)
18. Ríos, I. (2019). *Producción de pellets de cascarilla de arroz con máximo contenido energético.* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, México. <http://ring.uaq.mx/bitstream/123456789/1218/1/RI005085.pdf>
19. Rodríguez, A., Campos, A. y Pérez, A. (junio de 2019). *Obtención y caracterización de materiales adsorbentes a partir de cascarilla de arroz.* Revista Motus, vol 9(1), pp. 29-39. <https://revistas.utadeo.edu.co/index.php/mutis/article/view/1515/1487>
20. Roldan, E. (2016). *Análisis de situación de país para la fortificación del arroz.* Guatemala: Programa Mundial de Alimentos. <https://sightandlife.org/wp-content/uploads/2017/04/Guatemala-FINAL.pdf>

21. Serrano, M. (19 de mayo, 2018). *Principales tipos de calderas y Cuestiones prácticas de una central*. [Mensaje de blog]. [https://www.researchgate.net/publication/328391912\\_tipos\\_de\\_calderas\\_para\\_centrales\\_termoelectricas\\_de\\_biomasa](https://www.researchgate.net/publication/328391912_tipos_de_calderas_para_centrales_termoelectricas_de_biomasa)
22. Telemadrid. (12 de marzo, 2018). *Proceso cultivo del arroz*. [Mensaje de blog]. <http://www.telemadrid.es/noticias/proceso-cultivo-arroz-0-1555044523--20140312011738.html>
23. Tienda Biomasa. (s.f.). *Especialistas en biomasa*. [Mensaje de blog]. <https://tiendabiomasa.com/briqueta>
24. Valiente, A. (2017). *Elaboración de briquetas para aprovechamiento del residuo de arroz en beneficios del municipio de El Progreso, Jutiapa*. (Tesis de licenciatura). U. Rafael Landívar, Guatemala. <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjrkd/2017/02/02/ValienteAstrid.pdf>
25. Velasco, J. (2015). *Caracterización y simulación del lecho de una caldera de biomasa en contracorriente*. (Tesis de licenciatura). Universidad de Valladolid, España. <https://1library.co/document/oz1vgd8zcaracterizacionsimulacionlechoalderabiomasacontracorriente.html>
26. Velasco, K. (2017). *Formulación de un biocombustible a partir de los residuos de la industria extractora de aceite*. (Tesis de licenciatura). Universidad Central de Ecuador, Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/13593/1/T-UCE-0017-0081-2017.pdf>

27. Vera, A. (2014). *Diseño de briquetas ecológicas para la generación de energía calórica y mejoramiento de ecosistemas en el corregimiento de Nabusimake, municipio de Pueblo Bello-Cesar*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia.  
<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/61111/92694041.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
  
28. ZOZEN BOILER. (s.f.). *Fabricantes de calderas modernas en China*. [Mensaje de blog]. <https://es.zozen.com/?5xyFrom=google-NT>

# APÉNDICES

## Apéndice 1. Elaboración de briquetas



1. Remover Mezcla



2. Mezcla Preparada



3. Preparar Máquina



4. Llenar molde



5. Compactar briqueta



6. Briqueta elaborada

Fuente: [Fotografía de Pablo Ovidio García]. (Villa Nueva, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 2. **Briquetas elaboradas**



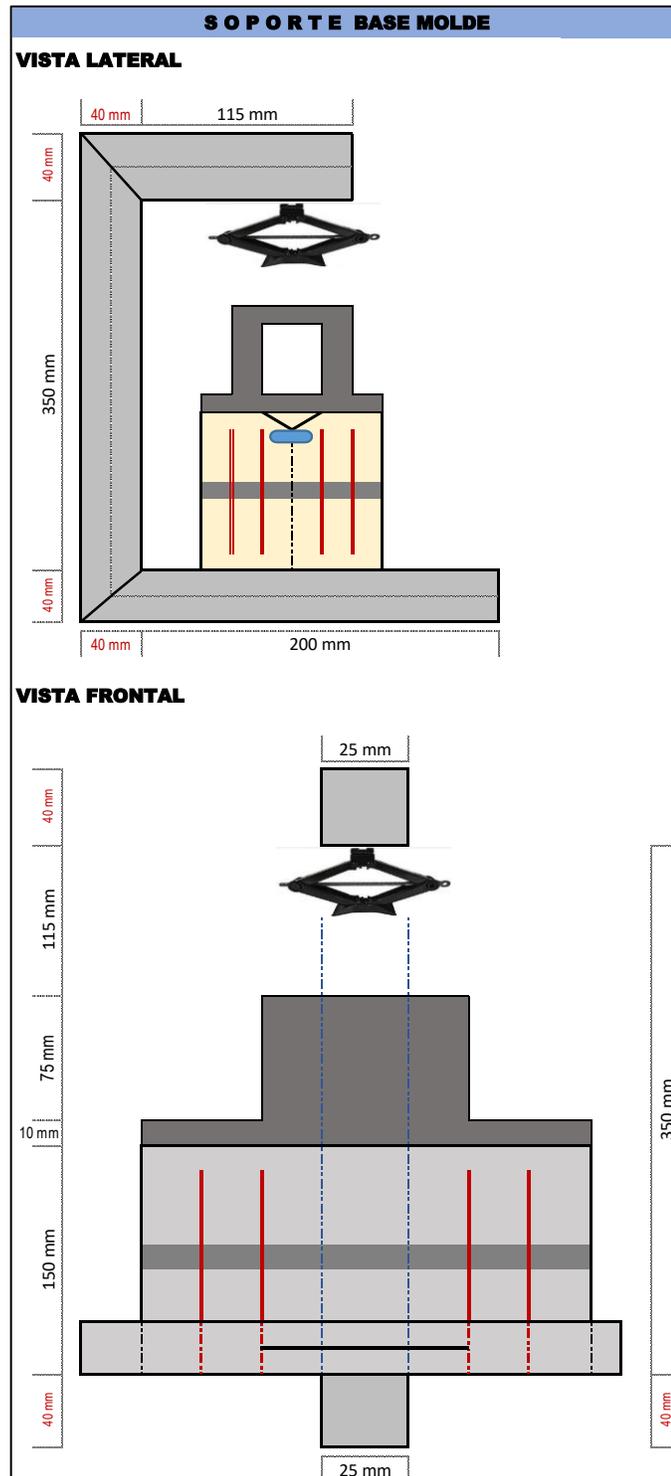
Briqueta húmeda de  
cascarilla de arroz



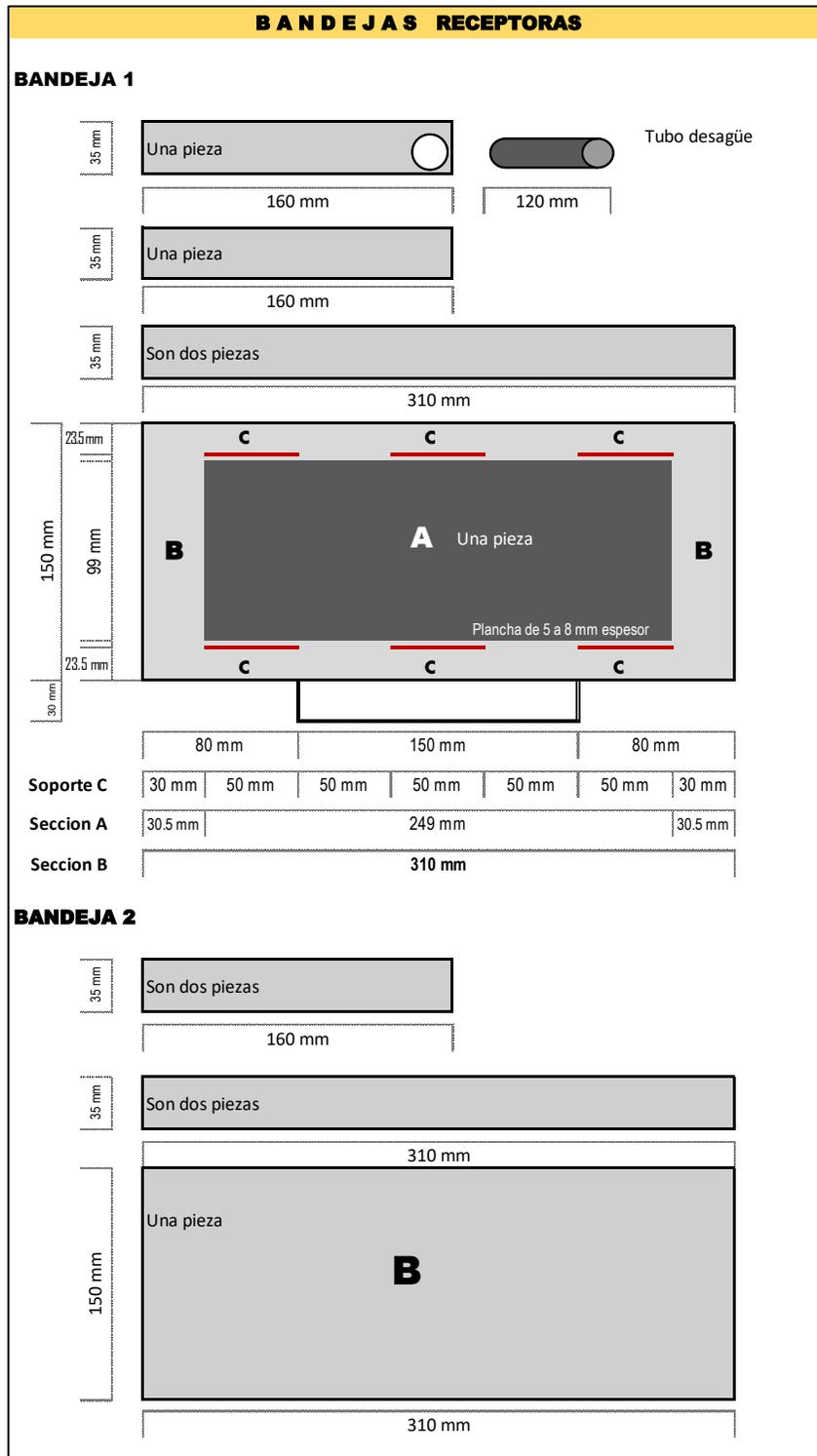
Briqueta seca de  
cascarilla de arroz

Fuente: [Fotografía de Pablo Ovidio García]. (Villa Nueva, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

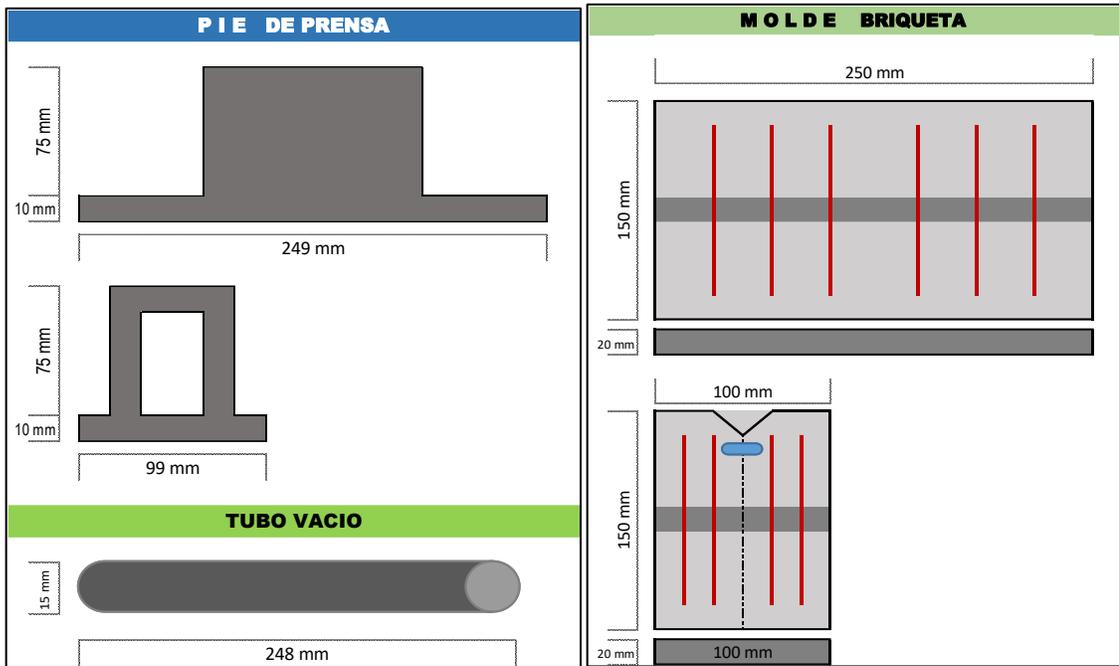
Apéndice 3. Planos de máquina briquetadora



Continuación apéndice 3.



Continuación apéndice 3.



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.



## ANEXOS

### Anexo 1. Resultados de los análisis de laboratorio del PROVERDE



CEMENTOS PROGRESO S.A.  
LABORATORIO DE PROVERDE  
Finca San Miguel, kilómetro 46.5 Carretera al Atlántico  
Sanarate, El Progreso  
Tel (502) 7952 8000 ext. 7553, 7554  
(502) 2338 9112 y 13



<b>Cliente:</b>	Pablo Ovidio Garcia Morales	<b>Número de informe:</b>	AFRLAB-2021-035
<b>Dirección:</b>	Colonia Monte Maria sur 2da calle A zona 7 villa nueva	<b>Fecha del Informe:</b>	31 de agosto 2021
<b>Teléfono:</b>	58002140-58515754	<b>Número de muestra:</b>	(ver tabla No. De muestra)
<b>Contacto:</b>	Pablo Ovidio Garcia Morales	<b>Fecha de recepción de muestra:</b>	05/08/2021
<b>Identificación de la muestra:</b> (ver tabla ID cliente)			

INFORME DE ENSAYO

No. De muestra	ID CLIENTE	PODER CALORÍFICO NETO KJ/Kg	% HUMEDAD	%CENIZA
2021081201	Briqueta de cascarilla de arroz	18218	9.45	12.69

**Observaciones:** Sustituye a AFRLAB-2021-034

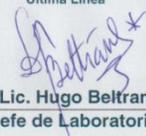
**Método:**  
 Poder Calorífico bruto KJ/Kg ASTM D5468-02 /ASTM D5865 / D5865M – 19  
 % HUMEDAD Termogravimetría Sartorius MA150 -MA156  
 %Ceniza ASTM D-482-03

**Fecha de Análisis:** 12/08/2021 **Analista:** LR


---

Última Línea



**Lic. Hugo Beltrán**  
Jefe de Laboratorio



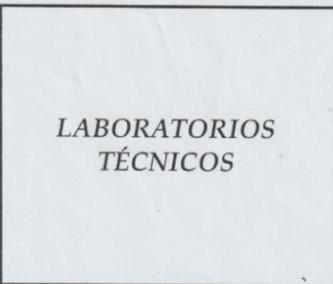
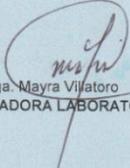
  

<sup>1</sup>Los resultados de este informe son válidos únicamente para las muestras que fueron presentadas al laboratorio.  
<sup>2</sup> No reproducir de forma parcial el presente informe salvo que se haga íntegramente.  
<sup>3</sup> Este informe es válido solo en su versión original impresa.

1/1

Fuente: Cementos Progreso S.A., laboratorios de Proverde (2021).

Anexo 2. Resultados de los análisis de laboratorio del MEM

 <p><b>LABORATORIOS TÉCNICOS</b></p>	 <p><b>BICENTENARIO GUATEMALA 1821-2021</b></p>	PÁGINA 1 DE (1)																
		LAB-REP-1234-2021																
		ORDEN No. L-0608-2021																
		GUATEMALA, 26-08-2021																
<p><b>RESULTADOS DE ANÁLISIS</b></p> <p>MUESTRA: <b>Briqueta Cascarilla de Arroz y Almidón de Yuca</b>  PRESENTADA POR: Pablo Ovidio García Morales  RESPONSABLE DEL MUESTREO: Pablo Ovidio García Morales  PROCEDENCIA: Pablo Ovidio García Morales  LOCALIZACIÓN: 2a. Calle "A", Zona 7, Villa Nueva, Colina de Monte María Sur  FECHA DE MUESTREO: 13-08-2021  FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA Y PAPELERÍA: 17-08-2021  FECHA DE ANÁLISIS: Del 23 al 26-08-2021  PRECIO DE ANÁLISIS: \$ 44.00  ANALISTA: Jhonatan Ríos</p>																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 40%;">DESCRIPCIÓN</th> <th style="width: 20%;">MÉTODO DE ANÁLISIS</th> <th style="width: 20%;">ESPECIFICACIÓN (a)</th> <th style="width: 20%;">RESULTADOS (b)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PODER CALORÍFICO SUPERIOR, MJ/Kg</td> <td>ASTM D-240</td> <td>-----</td> <td style="text-align: right;">(c) 14.70</td> </tr> <tr> <td>CENIZA, % masa</td> <td>ASTM D-482</td> <td>-----</td> <td style="text-align: right;">7.43</td> </tr> <tr> <td>HUMEDAD, % masa</td> <td>Gravimétrico</td> <td>-----</td> <td style="text-align: right;">8.83</td> </tr> </tbody> </table>			DESCRIPCIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS	ESPECIFICACIÓN (a)	RESULTADOS (b)	PODER CALORÍFICO SUPERIOR, MJ/Kg	ASTM D-240	-----	(c) 14.70	CENIZA, % masa	ASTM D-482	-----	7.43	HUMEDAD, % masa	Gravimétrico	-----	8.83
DESCRIPCIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS	ESPECIFICACIÓN (a)	RESULTADOS (b)															
PODER CALORÍFICO SUPERIOR, MJ/Kg	ASTM D-240	-----	(c) 14.70															
CENIZA, % masa	ASTM D-482	-----	7.43															
HUMEDAD, % masa	Gravimétrico	-----	8.83															
<p><b>OBSERVACIONES:</b></p> <p>a) En el Acuerdo Ministerial No. 258-2020 no existen especificaciones para este producto.  b) Los resultados son válidos solo para la cantidad de muestra presentada en este laboratorio.  c) El valor de 14.70 MJ/Kg es equivalente a 3509 Kcal/Kg y a 6317 Btu/Lb.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>Ing. Julio Villacinda ÁREA DE HIDROCARBUROS</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Vo. Bo. Inga. Mayra Villatoro COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS</p> </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;">  <p>MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS www.mem.gob.gt</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS</p> </div> </div> <p style="font-size: small; text-align: center;">El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico</p>																		

Fuente: Ministerio de Energía y Minas, laboratorio técnico (2021).

### Anexo 3. Ficha técnica del carbón mineral



**Anexo**  
Especificaciones Técnicas del Carbón

PARAMETER	UNIT	AS RECEIVED	AIR DRIED	DRY BASIS	DRY ASH FREE	TEST METHOD
TOTAL MOISTURE	%	12.2	-	-	-	ASTM D 3302
ASH CONTENT	%	7.4	7.8	8.5	-	ASTM D 3174
VOLATILE MATTER	%	35.2	36.8	40.1	43.8	ASTM D 3105
TOTAL SULPHUR	%	0.83	0.87	0.95	1.04	ASTM D 4239
GROSS CALORIFIC VALUE	BTU/Lb	10909	-	-	-	ASTM D 5865
HARDGROVE INDEX	-	-	49	-	-	ASTM D 409
FREE SWELLING INDEX	-	-	0.0	-	-	ASTM D 720

SIZE ANALYSIS	SIZE (mm)	UNIT	FRACTION	TEST METHOD
	>= 500	%	2.8	ASTM D 4749
	0.075-50.0	%	97.2	ASTM D 4749

Av. Reforma 7-62 zona 9 Edificio Aristos Reforma Nivel 7 Oficina 710 Tel. 2362-8028/9

Fuente: La Libertad, corporación eléctrica (2021).

