

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL

**"ELABORACIÓN DE BRIQUETAS PARA APROVECHAMIENTO DEL RESIDUO DE ARROZ EN
BENEFICIOS DEL MUNICIPIO DE EL PROGRESO, JUTIAPA"**

TESIS DE GRADO

ASTRID CAROLINA VALIENTE MACK

CARNET 10253-12

GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN, NOVIEMBRE DE 2017
CAMPUS CENTRAL

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL

**"ELABORACIÓN DE BRIQUETAS PARA APROVECHAMIENTO DEL RESIDUO DE ARROZ EN
BENEFICIOS DEL MUNICIPIO DE EL PROGRESO, JUTIAPA"**

TESIS DE GRADO

TRABAJO PRESENTADO AL CONSEJO DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA

POR
ASTRID CAROLINA VALIENTE MACK

PREVIO A CONFERÍRSELE
EL TÍTULO DE INGENIERA QUÍMICA INDUSTRIAL EN EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIADA

GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN, NOVIEMBRE DE 2017
CAMPUS CENTRAL

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

RECTOR: P. MARCO TULIO MARTINEZ SALAZAR, S. J.

VICERRECTORA ACADÉMICA: DRA. MARTA LUCRECIA MÉNDEZ GONZÁLEZ DE PENEDO

VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN: ING. JOSÉ JUVENTINO GÁLVEZ RUANO

VICERRECTOR DE INTEGRACIÓN UNIVERSITARIA: P. JULIO ENRIQUE MOREIRA CHAVARRÍA, S. J.

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO: LIC. ARIEL RIVERA IRÍAS

SECRETARIA GENERAL: LIC. FABIOLA DE LA LUZ PADILLA BELTRANENA DE LORENZANA

AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

DECANA: MGTR. KAREN GABRIELA MORALES HERRERA DE ZUNIGA

VICEDECANO: MGTR. OSMAN CARRILLO SOTO

SECRETARIA: MGTR. MARYA ALEJANDRA ORTIZ PATZAN

DIRECTOR DE CARRERA: DR. MARIO RENE SANTIZO CALDERON

NOMBRE DEL ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

MGTR. JOSE ANTONIO ROSAL CHICAS

TERNA QUE PRACTICÓ LA EVALUACIÓN

MGTR. ANNA MARGARITA RIOS GONZALEZ

MGTR. RYAN RENE RAMIREZ RODAS

ING. FRANCISCO GERARDO MARTINEZ TURCIOS



Orden de Impresión

De acuerdo a la aprobación de la Evaluación del Trabajo de Graduación en la variante Tesis de Grado de la estudiante ASTRID CAROLINA VALIENTE MACK, Carnet 10253-12 en la carrera LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL, del Campus Central, que consta en el Acta No. 02549-2017 de fecha 13 de octubre de 2017, se autoriza la impresión digital del trabajo titulado:

"ELABORACIÓN DE BRIQUETAS PARA APROVECHAMIENTO DEL RESIDUO DE ARROZ EN BENEFICIOS DEL MUNICIPIO DE EL PROGRESO, JUTIAPA"

Previo a conferírsele el título de INGENIERA QUÍMICA INDUSTRIAL en el grado académico de LICENCIADA.

Dado en la ciudad de Guatemala de la Asunción, a los 15 días del mes de noviembre del año 2017.



**MGTR. MARYA ALEJANDRA ORTIZ PATZAN, SECRETARIA
INGENIERÍA
Universidad Rafael Landívar**

Guatemala, 17 de julio de 2017

Magister
Alejandra Ortiz
Secretaria de Facultad
Facultad de Ingeniería

Estimada Mgtr. Ortiz:

Por este medio me es grato saludarle y desearle toda clase de éxitos en sus labores diarias.

El motivo de la presente es para informarle que he revisado el informe final del Trabajo de Graduación titulado: **“ELABORACIÓN DE BRIQUETAS PARA APROVECHAMIENTO DEL RESIDUO DE ARROZ EN BENEFICIOS DEL MUNICIPIO DE EL PROGRESO, JUTIAPA”**. De la estudiante **Astrid Carolina Valiente Mack** quien se identifica con número de carnet. **10253-12**. Después de haber revisado el informe final y de acuerdo con los requerimientos establecidos por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Rafael Landívar doy como aprobado dicho trabajo.

Sin otro particular, me suscribo de Ud.

Atentamente,



Ing. José Antonio Rosal Chicas
Asesor

Dedicatoria

- A Dios** Por todas sus bendiciones, ayudarme en cada momento bueno y malo durante toda la carrera y por haberme permitido culminar mis estudios.
- A mis padres** Edwin Valiente y Astrid Mack, por su apoyo incondicional, por siempre darme ánimos, por cuidarme, por todo su amor y por su esfuerzo para brindarme la mejor educación, los amo y gracias por todo.
- A mis hermanos** Edwin Fernando y Emilio José, por su apoyo durante toda mi carrera, gracias por todo los amo mucho.
- A mis abuelos** Augusto, Mina y Mamá Nalda, por ser un ejemplo, por su cariño y por todas las palabras de apoyo y ánimo que me brindaron.
- A mi familia** Gracias por ayudarme, cuidarme, apoyarme y por todo lo que hicieron por mí durante todo este tiempo, a mis tíos y primos los quiero mucho.

Resumen Ejecutivo

El presente trabajo de graduación tuvo como objetivo general evaluar la viabilidad ambiental y económica de elaborar briquetas a partir del residuo agroindustrial de arroz como alternativa de sustitución de leña proveniente de fuentes no controladas en el municipio de El Progreso ubicado en el departamento de Jutiapa, Guatemala.

El principal residuo que se genera en los beneficios de arroz es la cascarilla con un 20% de la producción total y se tienen 171,437.11 quintales de biomasa de cascarilla de arroz disponibles anualmente en el municipio. Para cumplir con los objetivos propuestos se realizaron ensayos para determinar la composición óptima de cascarilla de arroz con almidón de yuca que maximicé el uso de la biomasa y minimicé el uso de otros componentes como aglutinantes en el proceso de elaboración de las briquetas, las composiciones evaluadas de cascarilla y almidón fueron: 50%-50%, 60%-40%, 70%-30%, 80%-20% y 90%-10% respectivamente.

La mezcla cascarilla de arroz y almidón de yuca se compacto para aumentar la densidad y evaluar adhesión de las partículas, para seleccionar la composición óptima se evaluó la adhesión de la briqueta y se seleccionó la briqueta elaborada con 70% cascarilla de arroz y 30% almidón de yuca. Con la composición seleccionada se realizaron briquetas de 0.3 m de largo y 0.1 m de diámetro, a las cuales se les realizó análisis de humedad, cenizas, tiempo de combustión y poder calorífico, propiedades que fueron comparadas con la leña proveniente de fuentes no controladas.

Al estimar los costos de producción industrial es necesario tomar en cuenta la inversión inicial, costo de materia prima, costo de mano de obra, energía eléctrica y empaque. Por último se indicó la cantidad de dióxido de carbono que se dejaría de emitir si se utilizan las briquetas de cascarilla de arroz como alternativa de la leña proveniente de fuentes no renovables.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Lo escrito sobre el tema	2
1.2 Marco teórico	4
1.2.1 Biomasa	4
1.2.2 Información general de la leña	8
1.2.3 Información general del arroz	9
1.2.4 Briqueta	13
1.2.5 Aglutinante	19
1.2.6 Protocolo de Kioto	21
1.2.7 Información del Municipio de El Progreso	22
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	25
2.1 Objetivos	26
2.1.1 Objetivo general	26
2.1.2 Objetivos específicos	26
2.2 Variables	27
2.2.1 Variables independientes	27
2.2.2 Variables dependientes	27
2.3 Definición de variables	27
2.3.1 Variables independientes	27
2.3.2 Variables dependientes	28
2.4 Alcances y límites	30
2.4.1 Alcances	30
2.4.2 Límites	31
2.5 Aporte	31
III. MÉTODO	32
3.1 Unidad de análisis	32
3.2 Instrumentos	32
3.3 Procedimiento	36
3.3.1 Diagrama del proceso para obtener composición óptima	36
3.3.2 Diagrama de análisis específicos	37

3.4	Diseño y metodología estadística.....	39
3.4.1	Diseño experimental.....	39
3.4.2	Descripción de las unidades experimentales.....	40
3.4.3	Variables Respuesta.....	40
3.4.4	Metodología de análisis.....	41
IV.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	42
4.1	Composición óptima de las briquetas.....	42
4.2	Propiedades de las briquetas	42
4.3	Estimación de costos de producción a nivel industrial.....	44
4.4	Estimación de beneficios ambientales.....	47
V.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	48
VI.	CONCLUSIONES.....	53
VII.	RECOMENDACIONES	54
VIII.	REFERENCIAS	55
IX.	GLOSARIO	62
X.	ANEXOS.....	64
10.1	Imágenes de la elaboración y análisis de briquetas.....	64
10.2	Datos Obtenidos de ensayos previos para seleccionar briqueta	65
10.3	Datos para obtener resultados de las briquetas.....	69
10.4	Briquetas elaboradas	73
10.5	Determinación de costos de producción.....	76
10.6	Información del municipio de El Progreso, Jutiapa.....	79
10.7	Muestra de cálculo.....	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Composición química de tipos de biomasa	5
Tabla 2 Contenido energético de diferentes tipos de leña.....	9
Tabla 3 Porcentaje de humedad de la leña.....	9
Tabla 4 Cantidad de cenizas en la leña.....	9
Tabla 5 Propiedades de la cascarilla	12
Tabla 6 Valores de los principales componentes de la cascarilla	12
Tabla 7 Requisitos para elaborar briquetas	13
Tabla 8 Principales gases de combustión	16
Tabla 9 Composición de diferentes almidones.....	20
Tabla 10 Beneficios ubicados en El Progreso	24
Tabla 11 Instrumentos y equipos utilizados	32
Tabla 12 Experimento, diseño experimental.....	39
Tabla 13 Experimentos, variables respuesta.....	40
Tabla 14 Composición óptima de las briquetas.....	42
Tabla 15 Porcentaje de humedad y sólidos totales	42
Tabla 16 Densidad de las briquetas	42
Tabla 17 Porcentaje de cenizas.....	43
Tabla 18 Poder calorífico de las briquetas	43
Tabla 19 Tiempo de Combustión.....	43
Tabla 20 Base para determinar costos de una briqueta	44
Tabla 21 Costos de materia prima.....	44
Tabla 22 Costo de energía eléctrica.....	44
Tabla 23 Costo de mano de obra	45
Tabla 24 Costos de mantenimiento.....	45
Tabla 25 Costos de empaque	45
Tabla 26 Precio de venta de la briqueta	45
Tabla 27 Briquetas que podrían elaborarse al año.....	46
Tabla 28 Período de recuperación de la inversión.....	46
Tabla 29 Consumo anual de leña.....	47
Tabla 30 Emisiones atmosféricas de la leña.....	47
Tabla 31 Cobertura forestal	47
Tabla 32 Porcentaje de humedad de la materia prima.....	65
Tabla 33 Densidad de la cascarilla de arroz	65
Tabla 34 Diferentes composiciones de las briquetas	66
Tabla 35 Ensayos preliminares para seleccionar composición óptima	67
Tabla 36 Masas de las briquetas elaboradas	69
Tabla 37 Humedad de las muestras briquetas	70
Tabla 38 Densidad de las muestras de briquetas.....	70
Tabla 39 Cantidad de cenizas de las muestras de briquetas.....	72
Tabla 40 Poder calorífico	74
Tabla 41 Precio de venta de productos similares	76

Tabla 42 Datos técnicos de la máquina briquetadora	76
Tabla 43 Punto de equilibrio	77
Tabla 44 Datos para determinar el punto de equilibrio.....	78
Tabla 45 Capacidad productiva del municipio	79
Tabla 46 Cantidad de biomasa de cascarilla de arroz disponible en el municipio.....	79
Tabla 47 Datos de población y consumo de leña.....	79
Tabla 48 Cantidad de habitantes que consume leña	80
Tabla 49 Consumo total de leña	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Briquetas de varios tipos de materiales.	13
Figura 2 Ubicación geográfica del municipio El Progreso, Jutiapa	23
Figura 3 Materia prima.....	64
Figura 4 Análisis de humedad y porcentaje de cenizas	64
Figura 5 Alternativas para elaborar briquetas.....	65
Figura 6 Comportamiento de la humedad en los distintos beneficios	71
Figura 7 Comportamiento de la densidad con las diferentes composiciones.....	71
Figura 8 Prueba de combustión de briquetas y leña	72
Figura 9 Comparación del poder calorífico	74
Figura 10 Datos del poder calorífico de las briquetas	75
Figura 11 Máquina briquetadora	77
Figura 12 Punto de Equilibrio	78

ÍNDICE DE DIAGRAMAS

Diagrama 1 Elaboración de briquetas para determinar composición	36
Diagrama 2 Determinación de humedad	37
Diagrama 3 Determinación de cenizas	38

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente el uso de biocombustibles se ha convertido en una necesidad para el ser humano, son elaborados a partir de biomasa que es una fuente energética renovable, se emplean recursos vegetales o animales que son considerados residuos en diferentes industrias estos pueden ser materia orgánica o inorgánica utilizados para generar energía limpia. Los recursos pueden ser: forestales, agrícolas, biodegradables, industria agroalimentaria, entre otros.

La presente investigación trata sobre la elaboración de briquetas también llamadas biomasa sólida a base de cascarilla de arroz para el aprovechamiento de este residuo agroindustrial, abundante de la industria arrocera. Este estudio se realizó en el municipio de El Progreso ubicado en el departamento de Jutiapa, Guatemala.

Las briquetas son productos ecológicos y renovables, entre las ventajas que ofrecen: energía limpia, fuente renovable, materia orgánica no tóxica y natural, que reduce las emisiones atmosféricas considerablemente en comparación con la leña.

El municipio de El Progreso, es muy importante en la agroindustria arrocera, ya que en él se procesa aproximadamente el 80% del consumo nacional de arroz, según datos obtenidos de la Municipalidad de El Progreso, y se genera 20% de cascarilla de arroz del volumen total procesado.

El aporte que se tuvo al elaborar briquetas fue el aprovechando el residuo de cascarilla de arroz para utilizarlo como sustituto de la leña, con el fin de evaluar la viabilidad ambiental y económica realizando ensayos para determinar la composición óptima que maximizará el uso de biomasa, estimando costos, evaluando los beneficios ambientales a partir de la emisión de gases y reducción de emisiones de carbono no renovable, poder calorífico y período de combustión del producto elaborado.

1.1 Lo escrito sobre el tema

De León, (2010) define como objetivo garantizar una generación continua de energía eléctrica durante la época de no zafra con biomasa a un bajo costo. Como fin del estudio es realizar una comparación entre la generación de energía por medio de madera desfibrada de eucalipto y bunker, las pruebas se realizan en calderas industriales de las azucareras, para esto se mantiene estable la producción de vapor, presión y temperatura. También realiza un análisis económico para saber la rentabilidad del proyecto para la industria azucarera.

Sus conclusiones son las siguientes: se demostró que la biomasa de madera sea la principal fuente de alimentación en época de no zafra, manteniendo una combustión estable y continua dentro de la caldera, la industria azucarera es pionera en producción de energía a bajo costo y sustituyendo combustibles, la madera de eucalipto fue obtenida de bosques energéticos y se obtiene que el proyecto es rentable para la industria azucarera.

Amézquita, (2005), presenta como objetivo general determinar qué recurso renovable se dispone y en qué cantidad, para transformarlo y sustituir la demanda de diésel por biodiésel en el país. Se analizó en diferentes recursos renovables disponibles en Guatemala la cantidad, producción, superficie cultivada y rendimiento de biodiésel.

Las conclusiones de la investigación son; el país no dispone con recursos renovables suficientes para sustituir la demanda de Diésel fósil en un 100%, el recurso renovable que se encuentra en mayor cantidad en Guatemala y puede utilizarse para producir biodiésel es la Palma Africana, entre otros recursos renovables que se dispone es arroz, sebo, girasol, grasa animal, entre otros, la capacidad que tiene Guatemala para cultivar palma africana es de 721,603.58 hectáreas. Para poder sustituir el diésel fósil por biocombustible se necesita aumentar la producción de aceite de Palma Africana.

Castillo, (2005) desarrolló y registró un tipo de leña artificial también recibe el nombre de briqueta, que no daña el medio ambiente, cuya combustión emite humo blanco, en lugar del habitual humo negro alergénico. Elaboró varias pruebas con diferentes materiales como: papel, madera tratada, aserrín, este último le funcionó por su problema de alergias y fue el utilizado como base para elaborar las briquetas.

Utilizó un conjunto de componentes para realizar la mezcla entre ellos, aserrín, virutas de madera, residuos forestales y cera de parafina que es una sustancia derivada de la producción de gasolina. La creación de Ken Lou fue una marca de briquetas cilíndricas llamada Mr. Fuego que arden hasta por dos horas, deja una pequeña cantidad de ceniza, no produce residuos contaminantes o nocivos y puede ser un sustituto de la leña. Presentó en 2005 una solicitud de registro de la marca Mr. Fuego en el Registro de la Propiedad Intelectual del Ministerio de Economía del Gobierno de Guatemala. La marca fue registrada (con el número 2005-03672) ese mismo año y Ken Lou se convirtió en la persona más joven en obtener un registro de marca en Guatemala.

1.2 Marco teórico

1.2.1 Biomasa

El término biomasa se le da a toda materia viva de origen animal y vegetal, que puede ser utilizada como fuente energética. Según Martín (2013) la biomasa es una de las energías renovables de menor costo y limpia, está puede sustituir a combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos y es recomendable para utilizarse en hogares o en diferentes industrias para la producción de energía.

La energía que se produce por medio de la biomasa es energía renovable, debido a que su contenido energético proviene del sol que se almacenó en el proceso de fotosíntesis. El uso de biomasa como fuente de energía no contribuye al aumento del efecto invernadero, el CO₂ liberado al momento de la combustión ya formaba parte de la atmósfera y fue absorbido por las plantas durante su crecimiento, al contrario de los combustibles fósiles que el CO₂ ha estado encapsulado por millones de años y al liberarse provocan desequilibrio en la atmósfera. (EPEC, s.f)

Hay diversos tipos de biomasa dependiendo el origen entre ellos están:

- Biomasa natural: se genera de ecosistemas naturales, no tienen intervención del ser humano. Ejemplo, leña o ramas. El problema que representa el uso de esta biomasa es el uso desmedido o la explotación intensiva que se convierte en un tipo de combustible no renovable. (Combustibles Aragón, 2016)
- Biomasa residual: generada por actividades humana por actividades ganaderas, agrícolas y diferentes industrias como la agroalimentaria. La eliminación de estos residuos puede causar problemas por lo que la elaboración de combustibles sostenibles es gran opción. (Combustibles Aragón, 2016)
- Excedentes agrícolas: estos no se utilizan para alimentación por lo que se puede utilizar como combustibles para generación de energía eléctrica o como biocombustibles. (Combustibles Aragón, 2016)

- Cultivos energéticos: son cultivos que únicamente se utilizan para la generación de energía, como por ejemplo cereales, caña de azúcar. (Combustibles Aragón, 2016)

Propiedades y características de la biomasa

La biomasa cuenta con propiedades importantes para considerarla como combustible de buena calidad.

a. Composición química

La biomasa está compuesta por una parte orgánica, inorgánica y agua. Lo que sucede es que durante la combustión se quema la parte orgánica y la inorgánica es la que forma el residuo o las cenizas. Los principales elementos que contiene la biomasa son hidrógeno, carbono, oxígeno, nitrógeno, azufre y algunos casos cloro. (De Lucas y Tarranco, s.f)

Tabla 1 Composición química de tipos de biomasa

Biomasa	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
Madera Coníferas	50.0	6.0	40.0	0.7	0.09
Maderas Tropicales	52.4	5.7	39.8	0.3	0.01
Cascarilla de arroz	39.6	4.97	37.5	1.8	0.40

Fuente: Jara (2009)
Tipanluisa (2015)

b. Poder calorífico

La definición de poder calorífico según Fernández (2009), es la cantidad de energía que entrega o desprende un kilogramo o un metro cúbico de combustible al quemarse. La energía que se libera en forma de calor cuando se realiza la combustión de la biomasa. El valor del poder calorífico depende de la especie de la

leña, parte del árbol que se obtiene, edad del árbol y contenido de agua. El poder calorífico se divide en poder calorífico superior e inferior.

El poder calorífico superior, es el calor que realmente se genera en la combustión, el vapor de agua se encuentra condensado. Y el poder calorífico inferior es el calor que se aprovecha, en este caso el vapor de agua contenido en los gases no condensa. (Fernández, 2009)

c. Contenido de humedad

El contenido de humedad de la biomasa es muy importante ya que a mayor humedad menor es el poder calorífico. La humedad en la biomasa se puede medir en base seca o en base húmeda.

El contenido de humedad en base húmeda representa la relación entre la masa de agua total y la masa seca, el contenido de humedad en base seca representa la relación entre la masa de agua presente en el material y la masa seca. (Martines y Lira, 2010)

a. Cantidad de cenizas

Es la cantidad de materia inorgánica sólida no combustibles, la cantidad de cenizas en la mayoría de biomasa no sobrepasa el 5 % pero depende también de las impurezas o de material contaminante como tierra, arena, entre otros, lo que hace que se reduzca la energía neta que está disponible. (Jara, 2009)

b. Densidad

La densidad es una propiedad importante en la biomasa, ya que para fines de almacenamiento, manejo, venta del producto conviene que en un metro cúbico abarque mayor cantidad de biomasa. La densidad depende de la masa de la biomasa y del volumen. (De Lucas et al. s.f)

Ventajas y desventajas de utilizar biomasa

El uso de biomasa como fuente de energía tiene gran cantidad de ventajas para el medio ambiente pero también puede contar con desventajas. A continuación se presenta una lista de ventajas y desventajas según De Lucas et al. (s.f)

- Ventajas

Disminución de emisiones de CO₂, la cantidad emitida es la misma que se absorbe al momento de crecer en el caso de las plantas, por lo que se consideran cero emisiones.

Disminución de residuos, ya que se aprovechan para la generación de energía.

Evita erosión de los suelos, esto tiene fundamento en los cultivos energéticos en tierras abandonadas, en donde se planta para generar energía renovable.

Disminución de la dependencia de combustibles fósiles o de combustibles provenientes de fuentes no renovables.

Oportunidades de desarrollo, sustitución de combustibles fósiles y de leña proveniente de sectores no controlados.

- Desventajas

Menor rendimiento energético que los combustibles fósiles, el poder calorífico de los combustibles ronda aproximadamente entre 2,000 a 11,000 kcal/m³.

Mayor costo de producción

Baja densidad energética, se necesita mayor cantidad de biomasa para igualar la de los combustibles fósiles.

1.2.2 Información general de la leña

Food and Agriculture Organization of the United Nations, (2017) da a conocer que la leña es la madera utilizada como fuente energética, pertenece a las fuentes renovables, también indica que la demanda de leña en Guatemala es del 63% del consumo nacional y la mayor cantidad de leña es utilizada en el sector doméstico.

La leña es una biomasa, si se utilizara de forma consiente y exclusivamente de lugares autorizados o controlados no generaría ningún problema. Lo que sucede es que la mayoría de personas compran leña no autorizada y genera problemas de deforestación, sequias, erosión de los suelos.

Según estudio realizado por Aché (2006) la venta de leña generalmente es por tarea o carga.

- Tarea: las medidas son variables, se mide por varas de alto y ancho, el precio depende del tipo y la longitud del leño.
- Carga: se mide por la cantidad de leña que puede cargar un animal.

La quema de la leña se realiza generalmente en lugares cerrados, para cocinar en diferentes hogares o también en tortillerías. Los diferentes tipos de sistemas se mencionan a continuación:

Sistema de fuego aislado: Este sistema tiene una abertura en la cual se coloca la leña, en su interior se tienen conductos los cuales hacen subir el calor y se concentra en hornillas, en las cuales se colocan comales de barro o metálico para cocinar. (Aché, 2006)

Sistema de fuego abierto o de tres piedras: En este sistema se utiliza una estructura en el cual se levanta el recipiente para colocar la leña dentro del espacio libre, se fabrica con piedras que mantienen el recipiente estático. (Aché, 2006)

Propiedades y características de varios tipos de leña

Tabla 2 Contenido energético de diferentes tipos de leña

Leña	Poder calorífico (kJ/kg)	Poder calorífico (MJ/kg)
Pino	20,482.0	20.48
Cedro	18,066.0	18.06
Encino	19,500.0	19.50

Fuente: OLADE (s.f)

Tabla 3 Porcentaje de humedad de la leña

Biomasa	Humedad (%)
Leña coníferas y frondosas	20

Fuente: IDAE (2008)

Tabla 4 Cantidad de cenizas en la leña

Biomasa	Cenizas (%)
Madera Coníferas	3.3
Maderas Tropicales	1.8

Fuente: Jara (2009)

1.2.3 Información general del arroz

Azurdia, (2014) menciona que a nivel mundial son cultivados dos especies de arroz, el arroz asiático (*Oryza sativa*) y el africano (*O. glaberrima*), este último es cultivado solo en África, el arroz de origen asiático actualmente ha desplazado al africano. Se cree que el origen y domesticación del arroz asiático fue en la región del valle del río Yangtzé en China.

En América tropical se encuentran las siguientes especies: *O. sativa* f. *spontanea*, *O. rufipogon*, *O. glumaepatula*, *O. alta*, *O. grandiglumis* y *O. latifolia*. En Guatemala

solo está presente la especie *O. latifolia*, en las partes bajas de Jutiapa, Santa Rosa y el departamento de Izabal. (Azurdia, 2014)

El arroz (*Oryza Sativa*), según el RAE “*Planta anual propia de terrenos muy húmedos, cuyo fruto es un grano oval rico en almidón*”, el arroz pertenece al grupo de las gramíneas son plantas cultivadas o silvestres que constituye una fuente de alimentación básica para humanos y animales, este cereal es el segundo más utilizado del mundo después del trigo, en países como China e India basan su alimentación en este alimento. (Azurdia, 2014)

Proceso industrial del arroz

El proceso industrial del arroz según Arroz- ROA (s.f), cuenta con los siguientes pasos:

a. Recolección de materia prima

Se recibe el arroz granza, de fincas y terrenos de diferentes partes del país. Este llega al beneficio en bultos o a granel

b. Pre Limpieza

En esta etapa se realiza la remoción de impurezas, residuos de cosecha, piedras, entre otros

c. Secado

Se realiza utilizando una corriente de aire caliente, removiendo el exceso de agua que contiene el grano

d. Almacenamiento

El grano es almacenado en silos o bodegas luego del secado

e. Limpieza

Para garantizar que el grano no tenga impurezas se realiza otra limpieza, antes del proceso de descascarado

f. Descascarado

Al grano seco y limpio se le remueve la cáscara por medio de dos rodillos que giran a grandes velocidades, en esta operación se extrae la cáscara del grano por medio de dos efectos la velocidad diferencial y la presión

g. Pulimento y blanqueo

Por medio de fricción y abrasión se remueven capas de aleurona (harina de arroz) y se le da la tonalidad blanca y brillante

h. Clasificación

El arroz obtenido del proceso anterior se clasifica según tamaño y color para estandarizar el producto final

i. Empaque

Luego de tener los granos clasificados, se empaca y está listo para distribuir

Mediante el descascarado del grano de arroz se elimina la cáscara durante la molienda, y mediante el pulido son eliminadas las capas que recubren el endosperma y se obteniendo dos importante sub productos, la cascarilla y el afrecho que es rico en proteínas mayormente lisina. Estos sub productos conforman aproximadamente el 20% cascarilla y 10% afrecho del arroz cosechado. (Arroz – ROA, s.f)

Cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz es un residuo generado en la agroindustria arrocera, es un tejido vegetal constituido por celulosa y sílice que protege el grano de arroz, y por sus propiedades fisicoquímicas puede ser utilizado como combustible alternativo, también se le da otros usos en granjas avícolas, construcción, aislantes térmicos, abonos. La cascarilla del arroz le da impermeabilidad al grano, menor contacto con el aire para no degradar componentes internos y también ofrece termo estabilidad.

Tabla 5 Propiedades de la cascarilla

Propiedad	Valor
Densidad aparente (g/cm ³)	0.1 – 0.16
Densidad real (g/cm ³)	0.67 – 0.74
Temperatura de incineración (°C)	800 – 1,000
Conductividad térmica (J/m s°C)	3.5 x 10 ⁻⁵

Fuente: Vargas, Alvarado, Vega y Porras (2013)

Componentes de la cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz está compuesta por un componente de los más abundantes en las plantas, la pared celular está formada por celulosa, hemicelulosa y lignina. La lignina cuando es sometida a altas temperaturas desarrolla una propiedad aglomerante en la cascarilla. El sílice es un componente que está presente en gran cantidad en las cenizas que se generan al quemar la cascarilla de arroz representa más del 90% de las misma. (Vargas et al, 2013)

Tabla 6 Valores de los principales componentes de la cascarilla

Componente	Valor
Cenizas Crudas (%)	13.2 – 21.0
Sílice (%)	18.8 – 22.3
Calcio (mg/g)	0.6 – 1.3
Fósforo (mg/g)	0.3 – 0.7
Lignina (%)	9 – 20
Celulosa (%)	28 – 36
Pentosas (%)	21 – 22
Hemicelulosa (%)	12

Fuente: Vargas et al (2013)

1.2.4 Briqueta

Martín, (2014), indica que “Las briquetas son un combustible mayormente de origen lignocelulósico, formadas por la compactación de biomasa utilizada como materia prima astillas, residuos de madera y deferentes tipos de residuos”. El proceso de briquetado consiste en obtener productos finales de mayor densidad a los productos iniciales, este proceso también es conocido como densificado. La importancia de realizar este proceso es que al momento de transportarlo ocupan menor volumen con el mismo peso, comparando con las leñas y astillas. (De Lucas et al, s.f.)



Fuente: Krizan (2015)

Figura 1 Briquetas de varios tipos de materiales.

Requerimientos de las briquetas

Según la norma Alemana DIN 51731 las briquetas fabricadas deben cumplir los siguientes requisitos:

Tabla 7 Requisitos para elaborar briquetas

Norma	Grupo	Diámetro (cm)	Longitud (cm)
DIN 51731	HP1	>1	>3
	HP2	6 – 10	15 -30
	HP3	3 – 7	10 – 16
	HP4	1 – 4	<1
	HP5	0.4 – 1	<0.5

Fuente: Krizan (2015)

Propiedades y características de las briquetas

Las briquetas son bloques renovables y ecológicos utilizados para generación de energía calórica, éstas se conocen también como biomasa sólida. Se pueden realizar a base de: residuos de arroz, café, coco, caña de azúcar, pulpa de papel, aserrín, entre otros.

Las briquetas generalmente tienen forma cilíndrica, también se fabrican cuadrangulares, rectangulares, hexagonales, entre otras, éstas pueden ser macizas o huecas. El diámetro es mayor a 5 cm y la longitud oscila entre 50-80 cm y proporcional al diámetro. (De Lucas et al, s.f)

- Densidad

De las características más importantes de las briquetas es su alta densidad, esto porque facilita el transporte, almacenaje y manipulación del producto. La obtención de briquetas de alta densidad tiene como objetivo que al transportar el producto final este ocupe menor volumen a igual peso. Para la densidad se tiene dos tipos la real y aparente, la densidad real es la propia de la materia y densidad aparente tiene relación al modo cómo cada tipo de biocombustible sólido tiende a llenar un determinado volumen, y el grado de compactación que se haya realizado. (Nogués, García y Rezeau, 2010) Las formas de determinar ambas densidades son:

Ecuación 1 Densidad Aparente

$$\rho_{aparente} = \frac{\textit{masa de materia}}{\textit{volumen de materia} + \textit{volumen aire en espacios}}$$

Ecuación 2 Densidad Real

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

Fuente: De Lucas et al. (s.f)

- Humedad

La humedad es la cantidad de agua presente en el total de masa de la muestra, esta puede ser humedad superficial o inherente. La humedad superficial se elimina por medio del secado al aire y la humedad inherente se define como el porcentaje de pérdida de peso que experimenta la masa al secarse con aire a temperatura de 105 °C hasta alcanza un peso constante. (Nogués et al. 2010)

El porcentaje de humedad de las briqueta es importante tomar en cuenta porque de esto depende el rendimiento, al momento de realizar el proceso de prensado para formar la briqueta se deben utilizar partículas de materia prima secas con una humedad menor al 12 % en base húmeda. (Martín, 2014).

- Contenido de humedad

El contenido de humedad puede ser determinado por métodos analíticos que consisten en calentar la muestra a una temperatura constante entre 103-105°C y luego se coloca en un desecador para eliminar la humedad. Para determinar el porcentaje de humedad y sólidos totales de las muestras se utilizan las siguientes ecuaciones: (AMTEX, 2005).

Ecuación 3 Porcentaje de Humedad

$$\%H = \frac{A}{B} \times 100$$

A= Peso perdido por el calentamiento, en gramos.

B= Peso de la muestra, en gramos.

Ecuación 4 Sólidos Totales

$$\text{Sólidos Totales} = 100 - \%Humedad$$

Fuente: AMTEX (2005)

- Combustión

La combustión es la reacción por la cual es material (combustible), a partir de una determinada temperatura, se combina con el comburente (oxígeno) para da lugar a dos productos los gaseosos (humos o gases de combustión) y los sólidos (cenizas). (Nogués et al. 2010)

- Emisiones

En la quema de la biomasa se generan tres principales partículas: Carbón fijo, materia volátil y cenizas. (Nogués et al. 2010)

Carbono fijo: Son fracciones que se restan una vez se ha desprendido el material volátil, en la combustión este se sigue quemando luego de extinguirse las llamas. (Nogués et al. 2010)

Materia Volátil: En la biomasa sólida el contenido de materia volátil se encuentra entre el 60 – 80 %, está es la porción de combustible que se libera en forma de gases y vapores. La celulosa se descompone formando cadenas de hidrocarburos ligeros, si hay oxígeno se produce una llama al quemarlos. (Nogués et al. 2010)

Residuos inorgánicos: Son las cenizas residuo que queda de la combustión. (Nogués et al. 2010)

Tabla 8 Principales gases de combustión

Gases	Emisiones atmosféricas de cascarilla de arroz (g/kg)	Emisiones atmosféricas de la leña (g/kg)
SO ₂	0.11	0.40
NO _x	2.31	1.49
CO	14.04	48.25
CO ₂	880.48	1445.2

Fuente: Atmospheric Environment (2014)
Atmospheric Chemistry and Physics (2016)

- Cenizas

Las cenizas son residuos de la combustión, presentes en la biomasa como sales unidas químicamente a la estructura del carbón o como partículas minerales de la tierra donde han sido cultivadas. Hay dos tipos de ceniza la que queda en el fondo y la que se volatiliza.

El contenido de la ceniza en la biomasa depende del tipo de cada una, para algunas especies de pulpa de madera puede ser tan bajo como 0.5 %, en cereales y desechos de la industria agropecuaria hasta del 20 %. (Melissari, 2012)

$$\%Cenizas = \frac{M_c - M_a}{M_b} \times 100$$

Ecuación 5 Porcentaje de Cenizas

M_a = Masa de crisol vacío, en gramos.

M_b = Masa de la muestra seca, en gramos.

M_c = Masa del crisol y muestra calcinada, en gramos.

Fuente: Instituto de Salud Pública de Chile (2011)

Proceso de briquetado

El briquetado es uno de los tres procesos para densificar la biomasa, los otros dos son empaquetado y paletizado. Según Nogués et al. (2010) la obtención de briqueta es necesario que la materia prima tenga características determinadas de humedad y granulometría, la forma común de las briquetas es cilíndrica y su densidad varía entre los 700 – 1400 kg/m³ aproximadamente.

Densificación, es el proceso de compactación de la biomasa sometida a presiones altas, para formar los combustibles sólidos (briquetas). Al someter las partículas de biomasa a altas presiones se produce la unión máxima. (Nogués et al. 2010)

Elaboración de briquetas

La elaboración de las briquetas no es un proceso complicado pero requiere atención en las propiedades de la materia prima que se utiliza, para realizarlas se tiene diferentes procesos artesanal e industrial.

- Fabricación Artesanal

La elaboración de briquetas de forma artesanal se necesita de la materia prima cordada, triturada o molida, luego se le agrega agua hasta formar la mezcla. Luego se prensa en un recipiente que puede ser de PVC, para extraer la humedad y se deja secar por dos o tres días, se utilizan prensas para compactar el material. Esta manera de fabricar briquetas es el más sencillo no requiere gran inversión.

Para que la briqueta se compacte muchas veces es necesario utilizar aglutinantes para mantener unido el material que se está utilizando, estos son de fácil preparación y tienen propiedad de adhesión, el costo es relativamente bajo, no contaminan.

- Fabricación Industrial

Para la fabricación industrializada de las briquetas es necesario el uso de briquetadoras que son máquinas compactadoras de materiales sólidos. Están formadas básicamente por tolvas de alimentación, cámaras de compresión, émbolos y motor, cuando se utilizan este tipo de máquinas no es necesario utilizar aglutinantes debido a alta presión y temperatura con la que se trabaja.

Según LLARIFOC (2013). Para el proceso de briquetado se pueden utilizar tres diferentes equipos, briquetadora de pistón o por impacto, de tornillo o extrusión, de rodillos y briquetadora hidráulica.

- **Densificación por impacto:** golpeo que se produce sobre la biomasa, esto mediante acción de un pistón y se obtiene densidades entre 1,000 – 1,200 kg/m³. (LLARIFOC, 2013)

- Briquetadoras hidráulicas o neumáticas: son máquinas de presión que utilizan cilindros accionados por sistemas hidráulicos, se utiliza cuando la biomasa es de baja calidad y el costo de mantenimiento es bajo. Las densidades obtenidas varían entre 700 – 1000 kg/m³. (LLARIFOC, 2013)
- Briquetadoras de tornillo: son densificadoras por extrusión, la presión la lleva a cabo un tornillo especial que obliga a que el material avance hasta una cámara que se estrecha, obteniendo las briquetas con densidades entre 1,300 – 1,400 kg/m³ y con orificios inferiores que favorecen la combustión. Es el método más caro para mantenimiento y producción. (LLARIFOC, 2013)

1.2.5 Aglutinante

Los aglutinantes son sustancias que mantienen unidos diferentes materiales, estos le dan cohesión y evitan la deformación. Los aglutinantes se pueden clasificar en tres, polímeros naturales, sintéticos y azúcares. (Universidad de Guayaquil, s.f)

- Polímeros naturales: almidones (yuca, maíz, papa, etc.), resinas naturales, aceite vegetal. (Universidad de Guayaquil, s.f)
- Polímeros sintéticos: alquitrán, cal o cal hidratada, sílice, goma arábiga.
- Azúcares: melaza, glucosa, sacarosa, sorbitol. (Universidad de Guayaquil, s.f)

Para la elaboración de briquetas de cascarilla de arroz, los aglutinantes más utilizados son los almidones entre ellos el almidón de yuca debido a su bajo costo, fácil elaboración y adquisición. El almidón es un hidrato de carbono que tiene un nivel de glucosa alto, este puede ser utilizado como adhesivo o espesante cuando se disuelve en agua esta mezcla se realiza en caliente.

Almidón

El aglutinante de almidón tiene propiedades de adhesión y expansión superiores. Actúa como aglutinante natural para la fabricación de pellets, briquetas, se prepara con agua caliente formando un adhesivo de alta adherencia que mantiene los

materiales juntos. El aglutinante de almidón es un aglutinante de baja inclusión y tiene un costo menor comparado con otros aglutinantes químicos. También es libre de olor y sabor. El almidón es versátil y barato, y tiene muchos usos como espesante, aglutinante de agua, estabilizador de emulsión y gelificante. (ViscoStarch, s.f)

Selección de aglutinante

El almidón de yuca está formado por una mezcla de amilosa y amilopectina. La influencia de la amilopectina es importante porque cuanto mayor sea su contenido el producto es más adhesivo. (Gutiérrez, 2010)

Según estudio realizado por Cadena y Bula (2002), el almidón de yuca se perfila como adherente adecuado para la aglomeración de fibras naturales debido a:

- Bajo costo
- Fácil elaboración
- Fácil acceso en la región
- Resistencia biótica

Tabla 9 Composición de diferentes almidones

Componente (%)	Yuca (%)	Maíz (%)	Papa (%)	Camote (%)
Amilosa	17.0	28.3	21.0	19.6
Amilopectina	83.0	71.7	79.0	80.4

Fuente: Hernández et al. (s.f)

Lignina como aglutinante

Las biomásas residuales de compuestos ligno-celulósicos, aportan lignina propia como aglutinante, este es un polímero termoplástico que como otros fenoles, gomas y ceras se reblandece a temperaturas mayores de 150°C, y se endurece por medio del enfriamiento. La presión a la que se somete el material en las máquinas

briquetadoras es un factor importante para la formación de la briqueta, la temperatura, depende de la briquetadora, y se alcanza con la presión que se aporta por medio de la fricción interna entre el material y las paredes del tornillo que se utiliza. (Pedraja, 2016)

1.2.6 Protocolo de Kioto

El Protocolo de Kioto sobre el cambio climático es un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de gases provocadores del calentamiento global. Este instrumento se encuentra dentro del marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), suscrita en 1992 dentro de lo que se conoció como la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro, y es uno de los instrumentos jurídicos internacionales más importantes destinado a luchar contra el cambio climático. Contiene los compromisos asumidos por los países industrializados de reducir sus emisiones de algunos gases de efecto invernadero, responsables del calentamiento global. (Cambio climático, s.f)

El Protocolo de Kioto se aplica a las emisiones de seis gases de efecto invernadero:

- Dióxido de carbono (CO_2)
- Metano (CH_4)
- Óxido nitroso (N_2O)
- Hidrofluorocarbonos (HFC)
- Perfluorocarbonos (PFC)
- Hexafluoruro de azufre (SF_6)

El Protocolo permite a estos países la opción de decidir cuáles de los seis gases mencionados pueden llegar a formar parte de su estrategia nacional de reducción de emisiones. El Protocolo de Kioto entró en vigencia el 16 de febrero de 2005 ya que cumplió con la condición de ser ratificado por 55 Partes en la Convención, entre los que se encuentran países desarrollados cuyas emisiones combinadas de CO_2 superan el 55% del total de ese grupo. (SINIA, s.f)

Mecanismo para un desarrollo limpio

El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) es un procedimiento contemplado en el Protocolo de Kioto (PK) en el cual países desarrollados pueden financiar proyectos de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) dentro de países en desarrollo, y recibir a cambio Certificados de Reducción de Emisiones aplicables a cumplir con su propio compromiso de reducción. (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, s.f)

Según documento realizado por PNUMA (s.f), entre los proyectos que pueden ser elegibles están: Mejoramiento de la eficiencia en el uso final de la energía, mejoramiento de la eficiencia en la oferta de energía, Energía renovable, sustitución de combustibles, agricultura (CH₄, N₂O), procesos industriales (dióxido de carbono, HFCs, PFCs, SF₆), proyectos de sumideros (deforestación y reforestación).

1.2.7 Información del Municipio de El Progreso

El Progreso es uno de los 17 municipios del departamento de Jutiapa situado al oriente del país, conocido como Valle de Achuapa, el municipio es el mayor productor de arroz de la región. Su cabecera municipal tiene el mismo nombre El Progreso, tiene 8 aldeas, 8 caseríos y 19 fincas. (Municipalidad de El Progreso, s.f)

Localización geográfica y extensión territorial

El municipio se encuentra a 11 kilómetros de la cabecera departamental, está a 969 metros sobre el nivel del mar y colinda al norte con el municipio de Monjas, Jalapa; Jutiapa al sur y oeste, al este con Santa Catarina Mita y Asunción Mita. Forma parte de la Región IV de la República que es la región Sur-Oriental. Cuenta con una extensión territorial de 68 Km cuadrados, representa el 2.11 % de los 3,219 km cuadrados que tiene el departamento de Jutiapa. (Municipalidad de El Progreso, s.f)

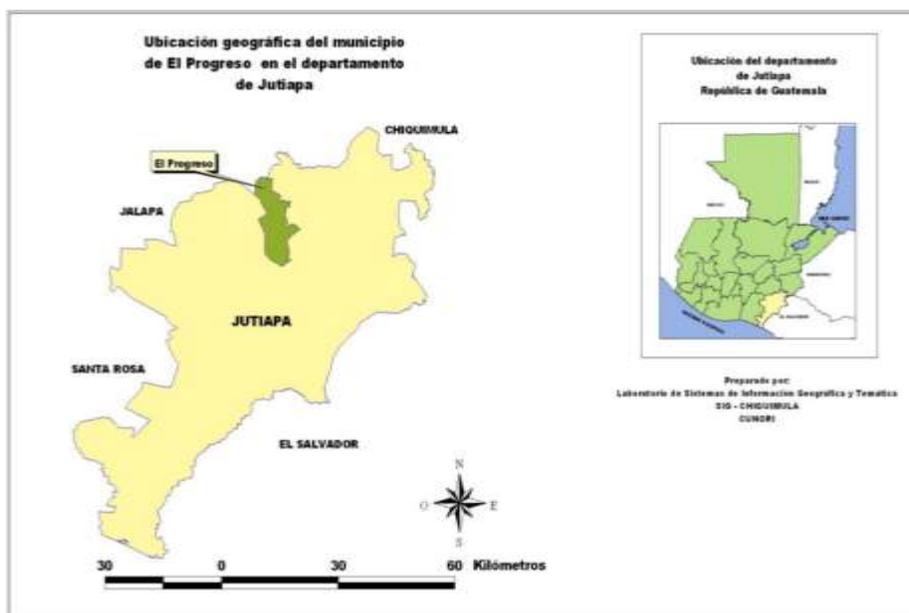


Figura 2 Ubicación geográfica del municipio El Progreso, Jutiapa

Fuente: Municipalidad de El Progreso, (s.f)

Producción Agrícola

La producción agrícola es de las actividades más importantes en el municipio para subsistir y para la economía de los habitantes. Entro los principales productos están: Tomate, cebolla, maíz, chile pimiento, arroz y frijól. (Municipalidad de El Progreso, s.f)

Producción Agroindustrial

Esta actividad se concentra en la producción de arroz, debido al clima favorable para el secado a un costo bajo, el municipio procesa aproximadamente el 80% del consumo nacional. (Municipalidad de El Progreso, s.f)

La producción de arroz se lleva a cabo en los 14 beneficios que actualmente integran el municipio, tienen la capacidad de procesar 65,000 quintales anuales cada uno, se procesa el proveniente de municipio y de otras zonas arroceras del país. El municipio cuenta con infraestructura para procesar más del 50% del

consumo nacional de arroz y el 40% de los molinos dedicados al secado se encuentran en el municipio. (Municipalidad de El Progreso, s.f)

Tabla 10 Beneficios ubicados en El Progreso

Beneficios de arroz	
Elvira	Aragón 1,2 y 3
El Edén	El amanecer
La Palma	Beneficio
Tempisque Las Flores	Miramundo
Los Palomos	El Progreso
Los Corrales	Achuapa

Fuente: Ministerio de economía, (s.f)

Según el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación y su Unidad de Políticas e Información Estratégica, la capacidad de producción del sector agroindustrial en el municipio es de 900,000 quintales de arroz granza, los 14 beneficios producen anualmente en promedio 42,859.28 quintales de arroz oro, en total 600,030 quintales que aproximadamente equivalen a Q83,000,000.00. (Municipalidad de El Progreso, s.f)

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En El Progreso Municipio del Departamento de Jutiapa, gran parte de su economía se basa en la producción agrícola siendo el arroz el producto principal, dada su importancia están organizados por la Gremial de Procesadores de Arroz El Progreso, Jutiapa. Según datos del MAGA, el 15% de la producción nacional de arroz se encuentra en el departamento de Jutiapa.

El municipio de El Progreso, es el de mayor importancia en el procesamiento de arroz, ya que procesa el 80% del consumo nacional y cuenta con infraestructura para procesar anualmente 900,000 quintales de arroz granza (Municipalidad El Progreso, 2015). En el proceso del arroz la generación de residuos se encuentra entre el 20 – 30 % del peso total. Los principales residuos sólidos que se generan durante la molienda y el pulido son 20% de cascarilla y 10% afrecho.

Al investigar en los diferentes beneficios de arroz del municipio, estos no tienen suficiente información sobre alternativas de aprovechamiento de residuos, algunos cuentan con la alternativa de comercializarlo para camas de animales en granjas avícolas, alimento para animales o para el mejoramiento de suelos. Pero ninguno utiliza la cascarilla de arroz como fuente de energía o calor.

La Gremial de arroceros de El Progreso está conformado por 14 beneficios en los cuales se genera aproximadamente 171,437 quintales (17, 143,714.20 kg) de cascarilla de arroz anualmente, cantidad que puede ser aprovechada para la elaboración de briquetas que puede ser utilizada como alternativa del uso de la leña.

Según datos de FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), en Guatemala la fuente energética de mayor demanda es la leña con el 63 % del consumo nacional, luego está el diésel con 12% y gasolinas 8%. Con la fabricación de briquetas como fuente de energía, se busca reducir el consumo de leña, suministrar energía en áreas rurales a un precio accesible, brindarles alternativas a las personas para elaborar briquetas artesanales y aprovechar de manera racional los recursos naturales. De lo expuesto anteriormente surge la

siguiente interrogante: ¿Es posible evaluar la viabilidad ambiental y económica de la elaboración de briquetas a partir del residuo agroindustrial de arroz como fuente alternativa de sustitución de la leña en el municipio de El Progreso, Jutiapa?

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo general

Evaluar la viabilidad ambiental y económica de elaborar briquetas a partir del residuo agroindustrial de arroz como alternativa de sustitución de la leña proveniente de fuentes no controladas en el municipio de El Progreso ubicado en el departamento de Jutiapa, Guatemala.

2.1.2 Objetivos específicos

1. Calcular composición óptima para elaborar briquetas de residuos de cascarilla de arroz proveniente del municipio El Progreso, que permita maximizar el uso de biomasa y minimizar los componentes adicionales.
2. Evaluar humedad, porcentaje de cenizas, el poder calorífico y periodo de combustión de la briqueta elaborada.
3. Estimar costos de producción a nivel industrial de briquetas a base de cascarilla de arroz en el municipio de El Progreso como sustituto de la leña.
4. Estimar los beneficios ambientales del uso de briquetas de residuo agroindustrial de la cascarilla de arroz a través de la estimación del carbono no emitido de fuentes no renovables.

2.2 Variables

2.2.1 Variables independientes

- a. Composición
- b. Longitud
- c. Diámetro
- d. Masa
- e. Volumen

2.2.2 Variables dependientes

- f. Densidad
- g. Humedad
- h. Cenizas
- i. Poder calorífico
- j. Combustión
- k. Costo
- l. Emisiones atmosféricas

2.3 Definición de variables

2.3.1 Variables independientes

- a. Composición

Definición Conceptual: porcentaje o cantidad en masa de cada elemento presente en un compuesto o en un todo.

Definición Operacional: en este proyecto se especifica la composición en porcentaje de cascarilla de arroz y aglutinante de almidón de yuca que presentó las mejores características físicas y que se pudo maximizar el uso de la biomasa.

- b. Longitud

Definición Conceptual: magnitud física que expresa la distancia entre dos puntos, su unidad en el SI es el metro. (RAE, 2017)

Definición Operacional: para el largo de la briqueta se imitó el tamaño de un leño, la medida se tomó en centímetros y metros.

c. Diámetro

Definición Conceptual: recta que une dos puntos en una circunferencia, una curva y pasando por su centro. (RAE, 2017)

Definición Operacional: el diámetro de la briqueta se midió en metros y se realizó en forma de cilindro para simular la forma de un leño.

d. Masa

Definición Conceptual: magnitud física que expresa la cantidad de materia de un cuerpo. (RAE, 2017)

Definición Operacional: masa medida en kilogramos, de cada una de las briquetas elaboradas.

e. Volumen

Definición Conceptual: magnitud que expresa la extensión de un cuerpo en tres dimensiones, largo, ancho y alto. (RAE, 2017)

Definición Operacional: el volumen se expresó en m^3 , para utilizarlo en la determinación de la densidad de las briquetas.

2.3.2 Variables dependientes

f. Densidad

Definición Conceptual: magnitud que expresa la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo, y cuya unidad en el sistema internacional es el kilogramo por metro cúbico. (RAE, 2017)

Definición Operacional: la densidad se determinó ya que a mayor densidad la briqueta se tiene un mejor manejo, transporte y almacenamiento, esta propiedad depende de la masa y el volumen, se midió en kg/m^3 .

g. Humedad

Definición Conceptual: agua que está impregnada en un cuerpo o que, vaporizada, se mezcla con el aire. (RAE, 2017)

Definición Operacional: cantidad de agua que estaba presente en las briquetas, medición realizada en porcentaje.

h. Cenizas

Definición Conceptual: polvo color gris claro que queda después de una combustión completa, y está formado, generalmente, por sales alcalinas y térreas, sílice y óxidos metálicos. (RAE, 2017)

Definición Operacional: cantidad de material que no se quema, determinado por medio de una Mufla a 800 °C temperatura de incineración de la cascarilla, el dato de la cantidad de cenizas se presentó en porcentaje.

i. Poder calorífico

Definición Conceptual: cantidad de energía que entrega o desprende un kilogramo o un metro cúbico de combustible al quemarse. (Fernández, J. 2009)

Definición Operacional: para la medición del poder calorífico se utilizó el método ASTM 0-240 en el laboratorio del MEM, resultado obtenido en MJ/kg.

j. Combustión

Definición Conceptual: reacción química entre el oxígeno y un material oxidable, se acompaña con el desprendimiento de energía y que generalmente genera llama o incandescencia. (RAE, 2017)

Definición Operacional: representa el tiempo que tardó la briqueta encendida, se midió en minutos.

k. Costo

Definición Conceptual: cantidad que se da o se paga por algo. (RAE, 2017)

Definición Operacional: costo de producir industrialmente briquetas de cascarilla de arroz, tomando en cuenta la maquinaria necesaria.

I. Emisiones atmosféricas

Definición Conceptual: salidas de sustancias al medio ambiente y que afectan la calidad del mismo, provienen de una fuente fija o fuente móvil. (Manual de Seguridad)

Definición Operacional: cantidad de carbono emitido a la atmosfera por la quema de leña proveniente de fuentes no renovables, medido en kg de CO₂.

2.4 Alcances y límites

2.4.1 Alcances

La investigación se centró en la elaboración de briquetas aprovechando el residuo agroindustrial de arroz proveniente de la especie (*Oryza sativa*), esta investigación incluye únicamente el municipio de El Progreso ubicado en el departamento de Jutiapa, Guatemala y exclusivamente abarca información sobre aprovechamiento del residuo de cascarilla de arroz.

Se evaluó el uso de almidón de yuca como aglutinante para compactar, aumentar cohesión y dureza para la formación de la briketa en forma de tronco o leño, por facilidad de transporte y almacenamiento. Los datos fueron obtenidos de los beneficios registrados en la Gremial de arroceros de El Progreso, para evaluar la producción arroz y generación de cascarilla de arroz.

Con la investigación se proyecta beneficiar al impacto ambiental mostrando que al sustituir la leña con briquetas de biomasa se disminuyen las emisiones atmosféricas y se brinda información relevante de los beneficios de arroz sobre el diseño óptimo de las briquetas.

2.4.2 Límites

Entre las limitantes que se tuvieron fue el costo de las máquinas briquetadoras por lo que solamente se realizó una estimación de costos de escalar una producción industrial y se realizaron los ensayos para calcular la composición óptima de las briquetas de forma artesanal.

Otra limitante al inicio fue la obtención de información dentro de los beneficios, ya que estos no brindaban datos exactos solamente estimaciones sobre la producción de arroz y generación de residuos que se tiene dentro de sus beneficios.

2.5 Aporte

A la agroindustria arrocera del municipio de El Progreso, al presentarlo como proyecto de desarrollo y aprovechando las propiedades que ofrece el residuo que se genera en los beneficios de arroz para la elaboración de briquetas.

A la Gremial de arroceros de El Progreso, mostrando un diseño óptimo de fabricación de briquetas para utilización como sustituto de combustibles tradicionales.

Al medio ambiente, estimando la disminución de la cantidad de emisiones atmosféricas al cambiar el uso de leña por el de briquetas de cascarilla de arroz.

Al municipio de El Progreso, dando a conocer una alternativa viable para la gestión de la cascarilla de arroz y que pueda utilizarse como sustituto de la leña, mostrando forma artesanal e industrial de elaborar briquetas aprovechando el residuo.

III. MÉTODO

3.1 Unidad de análisis

- a. Composición óptima de las briquetas, en relación al porcentaje de cascarilla de arroz y almidón de yuca.
- b. Briquetas Elaboradas y Leña
- c. Porcentaje de Humedad presente en las briquetas elaborada.
- d. Porcentaje de cenizas de las briquetas.
- e. Resultado del poder calorífico
- f. Tiempo de combustión de las briquetas de cascarilla de arroz.
- g. Costos de producción industrial
- h. Cantidad de emisiones de carbono de la leña.

3.2 Instrumentos

Tabla 11 Instrumentos y equipos utilizados

Instrumento/Equipo	Descripción y/o capacidad	Uso	Imagen
Horno de convección	Marca Cenco, Volts 115, Watts 1000, Ciclos 50/60, Temperatura máxima 300 °C	Utilizado para eliminar humedad	
Desecador	Recipiente de vidrio, herméticamente cerrado, contiene gel de sílice	Utilizado para eliminar humedad de sólidos.	

Instrumento/Equipo	Descripción y/o capacidad	Uso	Imagen
Mufia	Marca Furnace, Modelo 48000, Máxima temperatura 1210°C	Incinerar muestra para determinar cenizas	
Balanza de Humedad	Modelo AMB 50, dispositivo de precisión, capacidad máxima 50 g	Determinar porcentaje de humedad de la materia prima	
Balanza Analítica	Modelo APX-200, Capacidad máxima 200 g, medida más pequeña 0.1 mg, Incertidumbre de ± 0.00005 gramos	Para pesar muestras de briquetas y materia prima	
Balanza Granataria	Marca OHAUS, Capacidad máxima 2610 gramos, Incertidumbre ± 0.005 gramos	Pesar briquetas elaboradas	

Instrumento/Equipo	Descripción y/o capacidad	Uso	Imagen
Probeta	Material plástico, Capacidad 500 ml, Incertidumbre \pm 0.05 ml	Utilizada para medir el agua para cada composición de la briqueta	
Crisol	Material porcelana	Utilizado para calcinar el material y determinar las cenizas	
Tubos PVC	Tubos de 2 pulgadas y 30 cm de largo	Utilizados como moldes para las briquetas	
Triquet	Equipo utilizado para la elevación de cargas pesadas	Generar presión para formar la briqueta.	
Molde	Material, madera. Diámetro 0.1 m	Utilizado para generar presión sobre la briqueta.	

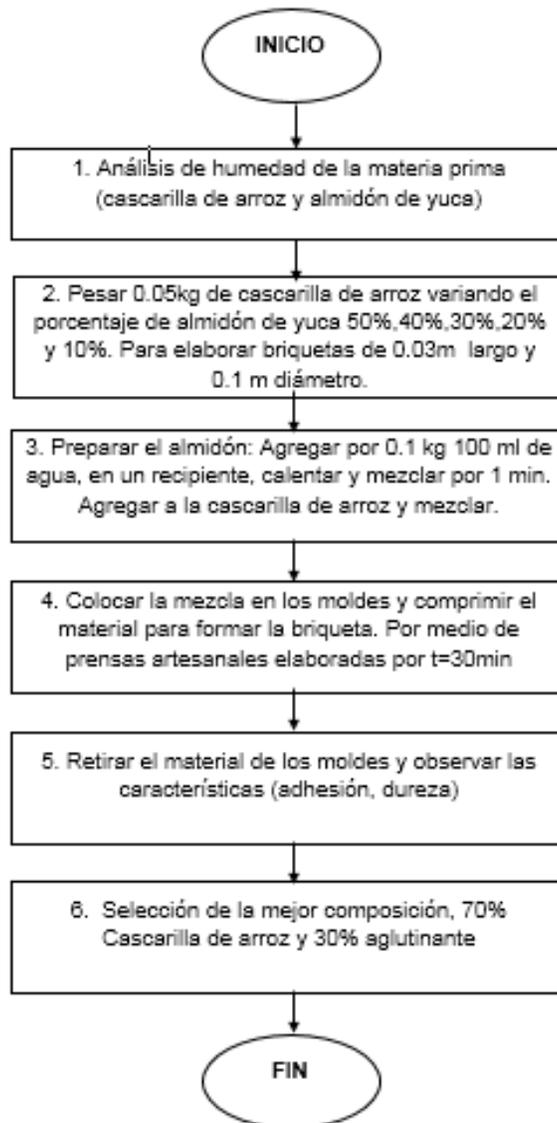
Instrumento/Equipo	Descripción y/o capacidad	Uso	Imagen
Cronómetro	Marca Casio, incertidumbre \pm 0.0005	Utilizado para tomar el tiempo de combustión	
Regla	Material plástico, Máxima medición 30 cm Incertidumbre \pm 0.05 cm	Medir las dimensiones de las briquetas	

Fuente: elaboración propia (2017)

3.3 Procedimiento

3.3.1 Diagrama del proceso para obtener composición óptima

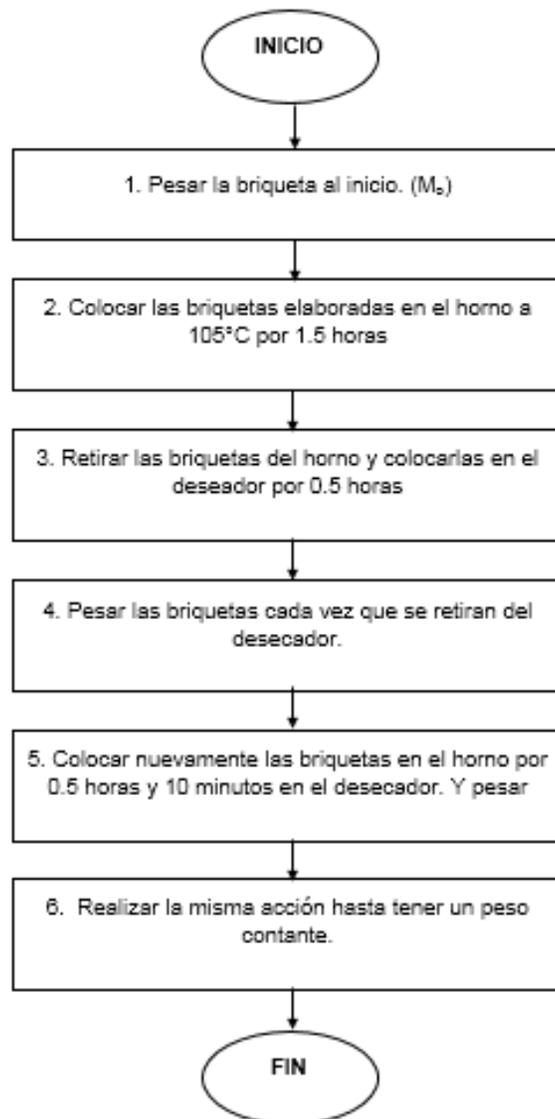
Diagrama 1 Elaboración de briquetas para determinar composición



Fuente: elaboración propia (2017)

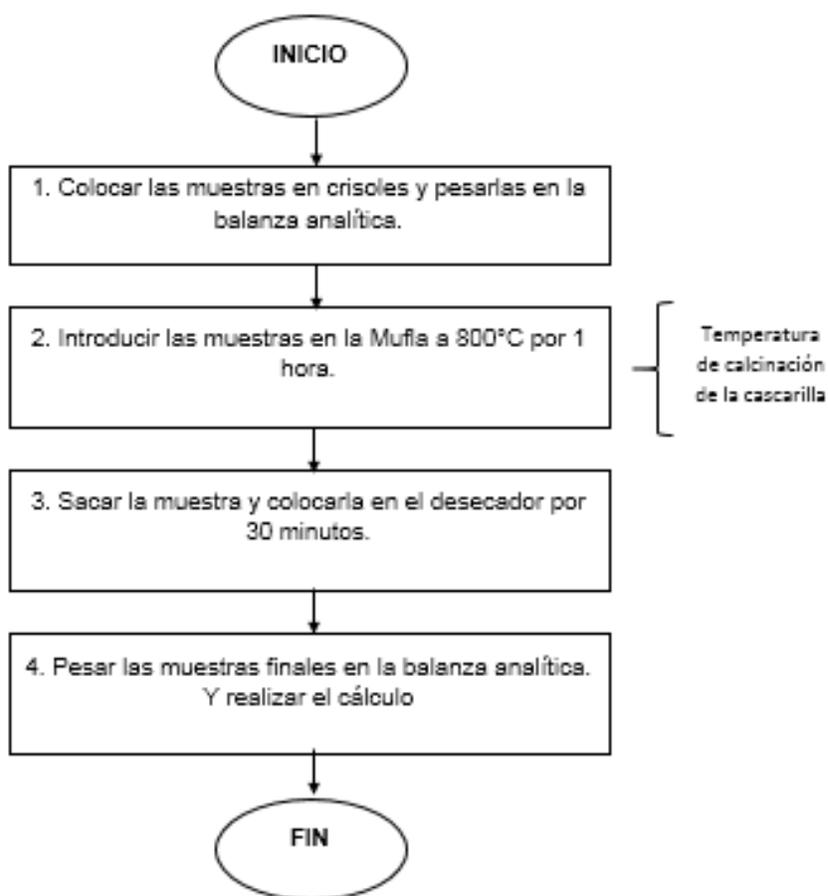
3.3.2 Diagrama de análisis específicos

Diagrama 2 Determinación de humedad



Fuente: elaboración propia (2017)

Diagrama 3 Determinación de cenizas



Fuente: elaboración propia (2017)

3.4 Diseño y metodología estadística

3.4.1 Diseño experimental

Tabla 12 Experimento, diseño experimental.

Experimento	Nombre	Descripción	Unidades de análisis	Muestras
Experimento No.1	Composición óptima de las briquetas	Se determinó que composición maximizaba el uso de cascarilla de arroz y minimizaba el uso de almidón como aglutinante	Porcentaje de cascarilla y almidón, dureza y forma de la briqueta.	15 briquetas
Experimento No. 2	Humedad	Determinación del porcentaje de humedad de las briquetas.	Peso perdido por calentamiento en kg, peso de la muestra.	Triplicado
Experimento No. 3	Cenizas	Determinación del porcentaje de cenizas utilizando una mufla a 800°C.	Peso inicial de la muestra, peso final y cantidad de cenizas en %	Triplicado
Experimento No. 4	Poder Calorífico	Análisis de las briquetas pulverizadas, en el laboratorio del MEM Guatemala.	Poder calorífico superior (MJ/kg).	7.5 kg
Experimento No. 5	Tiempo de combustión	Combustión de las briquetas comparadas con leña, comparación hecha por cantidad de peso.	Tiempo que dura la briqueta y la leña encendida (min)	Triplicado
Experimento No. 6	Carbono emitido	Calcular cantidad de leña consumida	Kg de CO ₂	N/A
Experimento No. 7	Costo	Se determinó el costo de elaborar briquetas industrialmente.	Costo de materia prima, mano de obra, electricidad.	N/A

Fuente: elaboración propia (2017)

3.4.2 Descripción de las unidades experimentales

- Proceso de elaboración de las briquetas, se utilizaron diferentes cantidades en porcentaje de cascarilla de arroz y almidón de yuca para evaluar la adhesión, y determinar la mejor opción.
- Análisis realizados a las briquetas, la composición seleccionada se analizó la humedad, cenizas, poder calorífico y el tiempo de combustión.
- Costo de elaborar briquetas industrialmente, se evaluó el costo de las materias primas, mano de obra, energía eléctrica, mantenimiento, empaque y la inversión inicial.
- Emisiones de dióxido de carbono, evaluación del carbono no emitido de fuentes no renovables.

3.4.3 Variables Respuesta

Tabla 13 Experimentos, variables respuesta

Experimento	Nombre	Variables respuesta
Experimento No.1	Composición óptima de las briquetas	Composición óptima de briquetas de cascarilla de arroz y almidón de yuca.
Experimento No. 2	Humedad	Porcentaje de humedad
Experimento No. 3	Cenizas	Porcentaje de cenizas
Experimento No. 4	Poder Calorífico	Poder calorífico superior
Experimento No. 5	Tiempo de combustión	Tiempo que tarda las briquetas encendidas
Experimento No. 6	Emisiones de carbono	Cantidad de CO ₂ que genera la leña.
Experimento No. 7	Costo	Costo de elaborar industrialmente briquetas.

Fuente: elaboración propia (2017)

3.4.4 Metodología de análisis

La metodología de análisis de la investigación se basa en el proceso de elaboración de briquetas a base de cascarilla de arroz utilizando almidón de yuca como aglutinante. Para esto se necesitó evaluar la cascarilla de arroz proveniente de los diferentes beneficios ubicados en el municipio.

- Determinar muestra de análisis

$$n = \frac{Z^2 \times p \times q \times N}{e^2(N - 1) + Z^2 \times p \times q}$$

Ecuación 6 Tamaño de Muestra

Dónde:

Z= Nivel de confianza (1.96)

p= Probabilidad de éxito o proporción esperada (0.95)

q= Probabilidad de fracaso (p-1) (0.05)

N= Tamaño de la población (14 beneficios)

e= Límite aceptable del error muestral (0.10)

$$n = \frac{(1.96)^2 \times (0.95) \times (0.05) \times (14)}{(0.15)^2(14 - 1) + (1.96)^2 \times (0.95) \times (0.05)}$$

$$n = 5.3 \text{ beneficios}$$

Se utilizaron muestras de 5 beneficios para la elaboración de briquetas, determinar la composición óptima y evaluar el poder calorífico de las briquetas.

IV. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Composición óptima de las briquetas

Tabla 14 Composición óptima de las briquetas

Composición (%)	
Cascarilla de arroz	Almidón de yuca
70	30

Fuente: elaboración propia (2017)

4.2 Propiedades de las briquetas

Tabla 15 Porcentaje de humedad y sólidos totales

Beneficio	Humedad (%)	Sólidos Totales (%)
1	48.67	51.33
2	48.67	51.33
3	48.21	51.79
4	48.78	51.22
5	48.34	51.66
<u>Promedio:</u>	48.53	51.47
<u>Varianza:</u>	0.05984	1.3466
<u>Desviación:</u>	0.24462	1.1211

Fuente: elaboración propia (2017)

Tabla 16 Densidad de las briquetas

Beneficio	Largo (m)	Diámetro (m)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
1	0.30 ± 0.0005	0.10 ± 0.0005	0.0024 ± 0.0216	320.83 ± 9.00
2	0.30 ± 0.0005	0.10 ± 0.0005	0.0024 ± 0.0216	322.22 ± 9.00
3	0.30 ± 0.0005	0.10 ± 0.0005	0.0024 ± 0.0216	326.39 ± 9.00
4	0.30 ± 0.0005	0.10 ± 0.0005	0.0024 ± 0.0216	322.22 ± 9.00
5	0.30 ± 0.0005	0.10 ± 0.0005	0.0024 ± 0.0216	323.61 ± 9.00

Fuente: elaboración propia (2017)

Tabla 17 Porcentaje de cenizas

Beneficio	Cenizas (%)
1	9.7
2	9.6
3	9.9
4	10.13
5	9.7
<u>Promedio:</u>	9.806
<u>Varianza:</u>	0.04468
<u>Desviación:</u>	0.21137

Fuente: elaboración propia (2017)

Tabla 18 Poder calorífico de las briquetas

Beneficio	Poder Calorífico (MJ/kg)
1	14.12
2	14.11
3	14.12
4	14.11
5	14.11
<u>Promedio:</u>	14.113
<u>Varianza:</u>	0.000011
<u>Desviación:</u>	0.003333

Fuente: elaboración propia (2017)

Tabla 19 Tiempo de Combustión

Muestra	Cantidad (kg)	Tiempo de combustión Briqueta (min)	Tiempo de combustión Leña (min)
1	0.785 ± 0.00005	69.70 ± 0.005	70.50 ± 0.005
2	0.778 ± 0.00005	69.10 ± 0.005	70.00 ± 0.005
3	0.797 ± 0.00005	70.80 ± 0.005	69.00 ± 0.005

Fuente: elaboración propia (2017)

4.3 Estimación de costos de producción a nivel industrial

Tabla 20 Base para determinar costos de una briqueta

Producto	Cantidad	Cantidad necesaria	Costo por materia prima	Costo de la briqueta
Cascarilla de arroz	1 briqueta	0.500 kg	Q 4.72	Q 5.27
Almidón de yuca		0.214 kg	Q 0.55	

Fuente: elaboración propia (2017)

Tabla 21 Costos de materia prima

Producto	Cantidad	Costo
Cascarilla de arroz	1 costal (40 lb)	Q 20.00
Almidón de yuca	1 lb	Q 10.00

Fuente: elaboración propia (2017)

Tabla 22 Costo de energía eléctrica

Descripción	Potencia de la máquina (kW)	Tiempo de trabajo (h/mes)	Consumo mensual (kWh)	Tarifa (Q/kWh)	Costo mensual (Q)
Energía Eléctrica	18.50	160	2,960	1.877023	5,556

Fuente: elaboración propia (2017)

ENERGUATE (2017)

Tabla 23 Costo de mano de obra

Descripción	Encargados del Proceso
Cantidad de personas	2
Sueldo Base	Q 2,643.21
Bono 14	Q 220.27
Aguinaldo	Q 220.27
Indemnización	Q 220.27
Intecap+Irtra+IGSS	Q 334.89
Bono incentivo	Q 250.00
Costo Unitario Mensual	Q 3,888.91
Costo Total Mensual	Q 7,777.82

Fuente: elaboración propia (2017)

Tabla 24 Costos de mantenimiento

Inversión Inicial	Q 35,977.66
Mantenimiento semestral	Q 1,000.00
Mantenimiento Anual:	Q 2,000.00

Fuente: elaboración propia (2017)

Tabla 25 Costos de empaque

Material	Costo unitario	Costo Total (Q)
Papel	2%(costo de materia prima)	0.11

Fuente: elaboración propia (2017)

Tabla 26 Precio de venta de la briqueta

	Unidades por paquete	Peso (kg)	Costo Total (Q)
Briqueta de cascarilla de arroz	1	0.78	8.00

Fuente: elaboración propia (2017)

Tabla 27 Briquetas que podrían elaborarse al año.

Cantidad de cascarilla por beneficio	1,224,551.02 kg/año
Capacidad de producción de la máquina briquetadora	691,200 kg/año
Capacidad de producir briquetas anualmente	886,153 briquetas
Punto de equilibrio de las ventas	61,720 briquetas/año

Fuente: elaboración propia (2017)

Tabla 28 Período de recuperación de la inversión

Año	1	2	3	4	5
Unidades vendidas	61726	64812	68053	71455	75028
Ventas (Q)	493807.33	518497.69	544422.58	571643.71	600225.89
C. Mano de Obra (Q)	93333.84	93333.84	93333.84	93333.84	93333.84
C. Mantenimiento (Q)	2000	2000	2000	2000	2000
C. Empaque (Q)	331801.49	348391.56	365811.14	384101.70	403306.78
C. E. eléctrica (Q)	66672.00	66672.00	66672.00	66672.00	66672.00
Flujo (Q)	0.00	8100.29	16605.60	25536.17	34913.27
Flujo acumulado (Q)	0.00	8100.29	24705.89	50242.06	85155.33
Período de Recuperación:	3.22 años				
TIR:	27%				

Fuente: elaboración propia (2017)

4.4 Estimación de beneficios ambientales

Tabla 29 Consumo anual de leña

Consumo anual de leña (Leños)	Peso promedio (kg/leño)	Cantidad consumida anualmente (kg)
16,449,536.00	0.4535	7,459,864.6

Fuente: elaboración propia (2017)

Tabla 30 Emisiones atmosféricas de la leña

Gases	Emisiones atmosféricas (g/kg)	Emisiones atmosféricas de la leña	
		(kg)	(ton)
CO ₂	1,445.2	1.07x10 ⁷	10,700

Fuente: elaboración propia (2017)

Tabla 31 Cobertura forestal

Municipio	Cobertura 2006 (Ha)	Cobertura 2010 (Ha)	Cambio Neto (Ha)	Tasa de cambio anual (%)
El Progreso	N/A	52.00	-9.00	-2.82

Fuente: SIFGUA (s.f)

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El objetivo principal del trabajo de graduación fue evaluar la viabilidad ambiental y económica de elaborar briquetas a partir del residuo agroindustrial de arroz como alternativa de sustitución de la leña proveniente de fuentes no controladas en el municipio de El Progreso, Jutiapa.

Lo primero fue determinar la cantidad óptima para elaborar las briquetas que permitió maximizar el uso de biomasa de cascarilla de arroz y minimizar el uso de aglutinante. El aglutinante se seleccionó principalmente por ser un natural, optando por el almidón debido a sus propiedades de adhesión, ser de los más utilizados y fácil acceso en la región. Para seleccionar el tipo de almidón se comparó el porcentaje de amilopectina de los diferentes almidones de yuca, maíz, papa y camote los cuales tienen 83%, 71%, 79% y 80.4% de amilopectina respectivamente los datos están referidos en la Tabla 9, pág. 20, la amilopectina es una molécula presente en el almidón que le da la propiedad de adhesión, cuando mayor sea su contenido más adhesivo es el almidón, luego de evaluar este aspecto se seleccionó el almidón de yuca que tiene 83% el mayor porcentaje de amilopectina y que puede mejorar la propiedad de adhesión en las briquetas. Para seleccionar la composición óptima se llevaron a cabo una serie de ensayos variando el porcentaje de aglutinante en cada muestra, tomando como base 0.050 ± 0.00005 kg y variando la cantidad de almidón de yuca. Las briquetas elaboradas de composición 90%-10% y 80%-20% de cascarilla de arroz y almidón de yuca respectivamente, no se compactaron lo suficiente por lo que al retirarlas del molde éstas se destruyeron debido a la poca cantidad de aglutinante, por lo solamente se tomaron en cuenta las tres composiciones restantes, mostrando los ensayos en la Tabla 35 pág.67-68.

Ya que el objetivo era maximizar el uso de biomasa se optó por la opción que menor cantidad de aglutinante utilizaba, por lo que la composición optima fue de 70% cascarilla de arroz y 30% almidón de yuca. Para elaborar la briqueta se agregó 0.50 ± 0.0005 kg de cascarilla de arroz 0.214 ± 0.0005 kg de almidón de yuca y 210 ml de agua, la preparación del almidón se realiza en caliente a temperaturas entre

65-70°C porque es cuando se produce el hinchamiento del grano de almidón y su viscosidad aumenta lo que produce el efecto de pegamento.

Con la composición seleccionada se elaboraron briquetas tomando como base 0.5 ± 0.00005 kg de cascarilla de arroz que es la cantidad necesaria para la elaboración de la briketa de 0.3 m de largo y 0.1 m de diámetro. Las dimensiones se basaron en la norma Alemana DIN 51731 mostrada en la Tabla 7, pág. 13, esto porque en el país no se tiene una norma que establezca los requisitos o parámetros para este tipo de biocombustible sólido. Se utilizó cascarilla de arroz de cinco beneficios ubicados en el municipio, esto porque cada beneficio procesa arroz de diferentes partes del país, utilizan maquinaria diferente y esto podría afectar las propiedades de la materia prima, para evaluar las características de cada briketa se realizaron análisis en triplicado de la humedad, porcentaje cenizas, densidad y poder calorífico. Los resultados obtenidos fueron muy parecidos en todos los beneficios esto se debe a que aunque se procese arroz de diferentes partes la especie de arroz (*Oryza sativa*) que se cultiva en el país es la misma.

Para la determinación del porcentaje de humedad y sólidos totales, se utilizó un horno de convección a 105°C por 1.50 horas la temperatura es constante para eliminar la mayor cantidad de agua posible, el resultado de la humedad está entre el intervalo de 48.21% - 48.78%, el comportamiento de la humedad en los diferentes beneficios se muestra en la Figura 6, pág.71 y se observa que los resultados son similares con una varianza de 0.059 y desviación estándar de 0.244 entre las briquetas elaboradas con cascarilla de arroz de cada beneficio. La densidad es una propiedad importante en las briquetas ya que a mayor densidad es más fácil el almacenamiento y transporte, mayor cantidad de masa en un menor espacio, la densidad obtenida está entre 320 kg/m^3 - 326.39 kg/m^3 y en la Tabla 16 pág. 42, se observan los resultados en los diferentes briquetas, también en la Figura 7, pág. 71 se muestra el comportamiento de la densidad y que el beneficio que mayor densidad promedio presentó en las briquetas es el número tres.

La cascarilla de arroz como biomasa genera de 5-18 % de ceniza, y al agregar almidón para formar la briqueta se obtuvieron resultados dentro del rango 9.6 % - 10.13% de cenizas como se muestra en la Tabla 17, pág. 43. El porcentaje de cenizas que genera la quema de las briquetas es mayor a la leña de madera conífera 3.3 % y maderas tropicales 1.8%, como se muestra en la Tabla 4, pág. 9.

El poder calorífico indica la cantidad de energía que se entrega al quemarse un kilogramo de combustible, el análisis fue realizado por el método ASTM D-240 utilizando una bomba calorimétrica adiabática en el laboratorio del Ministerio de Energía y Minas de Guatemala en la figura 10, pág. 75 se tiene una muestra de los resultados obtenidos del poder calorífico, obteniendo como resultado promedio de 14.11 MJ/kg, los resultados de los beneficios evaluados presentan una varianza de 0.000011 y desviación estándar de 0.0033, y en la Figura 9, pág. 74 se observa que los resultados son parecidos no hay diferencia significativa entre las tres muestras tomadas para realizar el análisis en los diferentes beneficios. Otro análisis importante es el tiempo de combustión de la briqueta en comparación con la leña, para esto se utilizó la misma cantidad de leña y briqueta entre 0.77 ± 0.00005 kg y 0.79 ± 0.00005 kg, para comparar obteniendo que los tiempos de combustión es parecido la briqueta dura entre 69.1min – 70.8min encendida y la leña entre 69.0 ± 0.005 min – 70.5 ± 0.005 min, los resultados se muestra en la Tabla 19, pág. 43. Las briquetas de cascarilla de arroz pueden ser utilizadas como alternativa de sustitución de leña debido a que cumplen la misma función de generar calor, el único problema es que se necesita mayor cantidad de briquetas para igualar el calor que genera un kilogramo de las diferentes leñas que se utilizan en el municipio, en la Tabla 2, pág. 9 se muestra el contenido energético de los diferentes tipos de leña. Pero en la elaboración de briquetas se utiliza un residuo abundante en el municipio el cuál se tiene disponible anualmente 171,431.11 quintales que no se están aprovechando y que provienen de una fuente renovable.

Entre los objetivos de la investigación se tiene la estimación de costos de una producción de briquetas a base de cascarilla de arroz a nivel industrial, para estimar

los costos fue necesario tomar en cuenta costos de materia prima, mano de obra, energía eléctrica, empaque y costo de la máquina briquetadora. El costo de elaborar una briqueta de dimensiones 0.30 m de largo y 0.10 m de diámetro es de Q 5.27 tomando en cuenta el costo de la cascarilla y del almidón de yuca, el peso promedio de la briqueta es de 0.78 ± 0.00005 kg. La inversión inicial que se tendría que realizar es la compra de la máquina briquetadora y el costo es de Q 35,977.66, está se seleccionó por la capacidad por hora que tiene la máquina que es la necesaria por la generación de cascarilla de arroz aproximada en los beneficios 350 kg/hora, la máquina briquetadora tiene una potencia de 18.5 kW trabajando 160 h/mes generaría un costo mensual de Q 5,556.00, para el mantenimiento se estiman Q 2,000 anuales. Para la mano de obra se necesitan dos operarios para máquina briquetadora los cuales cumplan la función de verter el material y recolectar las briquetas elaboradas con un costo mensual de Q 7,777.82.

Estos costos se tendrían que tomar en cuenta si se invierte en un proceso industrializado de elaboración de briquetas. El periodo de recuperación de la inversión es de 3.22 años, si se venden más 61,726 briquetas al año con un crecimiento estimado del 5% en las ventas y como precio de venta Q 8.00 valor que se obtuvo al comparar productos similares que están disponibles en el mercado los cuales se mencionan en la Tabla 41, pág. 76, los diferentes productos son briquetas de aserrín, carbón, leña proveniente de fuentes controladas y no controladas. Para determinar la cantidad que se necesitan vender se calculó el punto de equilibrio el cuál se muestra en la figura 12, pág. 78, tomando en cuenta los costos variables y costos fijos del proceso de elaboración, se necesitan vender más de 61,726 briquetas anualmente para que se tengan utilidades. Para este proyecto se determinó la tasa interna de retorno, y se obtuvo como resultado una TIR del 27% lo que indica que luego de los 3.22 años que se tarda en recuperar la inversión se va a tener un rendimiento del 27% en el tiempo de vida que tenga el proyecto, los flujos para obtener el resultado se muestran en la Tabla 28, pág. 46.

El municipio de El Progreso, Jutiapa consume anualmente un aproximado de 16, 4449,536 leños provenientes de fuentes no renovables, los cuales equivalen a 7, 459,864 kg, para dar respuesta sobre la viabilidad ambiental de elaborar briquetas se utilizaron las emisiones de CO₂ de la leña que son 1,445.2 g/kg, en la Tabla 8, pág. 16 se muestran los diferentes gases de efecto invernadero que emite la leña en comparación con la cascarilla de arroz, y en la Tabla 30 pág. 47 se muestra que la cantidad de dióxido de carbono que se dejaría de emitir a la atmosfera es de 10,700 toneladas si se deja de utilizar leña como biocombustible sólido. Este proyecto es susceptible a los proyectos de mecanismo limpio del protocolo de Kioto ya que este busca disminuir las emisiones de los gases de efecto invernadero. Entre otros beneficios los gases de combustión de la leña son mayores a las de la cascarilla de arroz, excluyendo únicamente al NO_x.

Desde el punto de vista de la cobertura forestal del municipio de El Progreso, en el 2010 se tenían 52 hectáreas de bosque, el cual ha tenido una disminución de 2.00 hectáreas al año con un porcentaje de pérdida de bosque del 2.82% anual, los datos se observan en la Tabla 31, pág. 47. Si se aprovechara el residuo del arroz para generación de energía en forma de calor se estaría ayudando a la disminución de la deforestación en el municipio utilizando un residuo y evitando que se continúe con la tala ilegal de árboles para generar leña, los 17, 143,714.30 kg de cascarilla de arroz que se generan anualmente en el municipio podrían cubrir gran parte de la necesidad que tiene el municipio del consumo de leña como principal combustible sólido.

En base a los resultados obtenidos es posible concluir que las briquetas a base del residuo agroindustrial pueden ser una alternativa viable para la sustitución de la leña en el municipio de El Progreso, ya que se tiene cascarilla de arroz abundante que puede ser utilizada para la generación de calor, aprovechando el residuo y evitando el uso de leña ilegal o proveniente de fuentes no controladas.

VI. CONCLUSIONES

1. La composición óptima para elaborar briquetas a base del residuo agroindustrial proveniente del municipio El Progreso que permite maximizar el uso de biomasa y disminuir los componentes adicionales es de 70% cascarilla de arroz y 30% aglutinante de almidón de yuca.
2. De los análisis realizados a las briquetas de composición óptima se obtuvo, 48.53% humedad, 9.81% cenizas, 14.11 MJ/kg el poder calorífico y el periodo de combustión de 69.90 minutos.
3. La inversión inicial para producir briquetas a nivel industrial de Q 35,977.66, tiene un periodo de recuperación de 3.11 años y una tasa interna de retorno del 27%.
4. Los beneficios ambientales estimados del uso de briqueta como alternativa de la leña son 10,700 toneladas de dióxido de carbono que dejarían de emitirse de la leña quemada proveniente de fuentes no renovables.

VII. RECOMENDACIONES

- Elaborar un estudio de factibilidad financiera para elaborar briquetas de cascarilla de arroz a gran escala en el municipio de El Progreso ubicado en el departamento de Jutiapa.
- Como opción para la producción y compactación de las briquetas, utilizar prensas hidráulicas para agilizar el proceso y aumentar la densidad de las briquetas, también evaluar otros tipos de aglutinantes naturales o artificiales.
- Implementar el método utilizado para elaborar las briquetas de cascarilla de arroz con diferentes tipos de biomásas para generar energía en forma de calor que estén disponibles en el municipio.

VIII. REFERENCIAS

- Acné, H. (2006) Experiencias de la construcción de estufas economizadoras de leña en el área rural del país. Tesis inédita. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- ALIBABA. *Máquina briquetadora*. Recuperado el 15 de septiembre 2017. Obtenido de: https://www.alibaba.com/product-detail/High-Efficiency-Corn-Cob-Straw-Hay_60696674636.html?spm=a2700.7724838.2017115.75.7c23a4f6W6Abtv
- Amézquita, D. (2005) *Potencial que tiene Guatemala para producir Biodiesel*. Recuperado el 17 de agosto de 2017. Obtenido de: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0933_Q.pdf
- AMTEX. (s.f) *Método para determinar la humedad*. Recuperado el 12 de julio 2017. Obtenido de: http://www.amtex-corp.com/repositorioaps/0/0/jer/informacion_tecnica_hijo/MetodoHumedad.pdf
- Arroz-ROA. (s.f) *Proceso industrial del arroz*. Recuperado el 11 de julio 2017. Obtenido de: <http://www.arrozroa.com/proceso-del-arroz>
- Atmospheric Chemistry and Physics. (2016). *A comprehensive biomass burning emission inventory with high spatial and temporal resolution in China*. Recuperado el 20 de septiembre 2017. Obtenido de: <https://www.atmos-chem-phys-discuss.net/acp-2016-560/acp-2016-560.pdf>
- Atmospheric Environment. (2014) *Estimation and characterization of gaseous pollutant emissions from agricultural crop residue combustion in industrial and household sectors of Pakistan*. Recuperado el 20 de septiembre 2017. Obtenido de: <http://www.b-ware.eu/sites/default/files/publicaties/Irfan-Atm-Env-2014.pdf>

- Azurdia, C. (2014) *Cultivos Nativos de Guatemala y Bioseguridad del Uso de Organismos Vivos Modificados*. Recuperado el 20 de septiembre 2017. Obtenido de: <http://bch.cbd.int/database/attachment/?id=14876>
- Cadena, G; Bula, A. (2002) *Estudio de la variación en la conductividad térmica de la cascarilla de arroz aglomerada con fibras vegetales*. Recuperado 15 de septiembre 2017. Obtenido de: <http://www.redalyc.org/pdf/852/85201201.pdf>
- Cambio Climático. *Protocolo de Kioto*. Recuperado el 30 de septiembre 2017. Obtenido de: <http://www.cambioclimatico.org/tema/protocolo-de-kyoto>
- Combustibles Aragón. (2016) *Tipos de biomasa*. Recuperado el 12 de julio 2017. Obtenido de: <http://combustiblesaragon.es/tipos-de-biomasa/>
- De León, J. (2010) *Estudio de Factibilidad para Producción de Energía Eléctrica, a partir de Biomasa de Eucalipto*. Recuperado el 17 de agosto de 2017. Obtenido de: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0749_EA.pdf
- De Lucas, A; Tarranco, C. (s.f) *Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad*. Recuperado el 12 de julio 2017. Obtenido de: <http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%2C%20Biocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf>
- Empresa Provincial de Energía de Córdoba, (s.f) *Energía renovable: la biomasa*. Recuperado el 12 de julio 2017. Obtenido de: <https://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/biomasa.pdf>
- FAO. (2017) *Información general sobre generación de electricidad*. Recuperado el 10 de junio 2017. Obtenido de: <http://www.fao.org/docrep/T2363s/t2363s0w.htm>
- Fernández, J. (2009) *Poder Calorífico*. Recuperado el 8 de septiembre 2017. Obtenido de: http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas_termicas/01-poder_calorifico.pdf

Gutiérrez, J. (2010) *Activación física de cascarilla de arroz aglomerada con engrudo de almidón de yuca para la obtención de carbón activado*. Recuperado 15 de septiembre 2017. Obtenido de: http://www.academia.edu/3440550/ACTIVACION_FISICA_DE_CASCARILLA_DE_ARROZ_AGLOMERADA_CON_ENGRUDO_DE_ALMIDON_DE_YUCA_PARA_LA_OBTENCION_DE_CARBON_ACTIVADO

Hernández, M., Torruco, J., Chel, L. y Betancur, D. *Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México*. Recuperado el 10 de julio 2017. Obtenido de: <http://www.scielo.br/pdf/cta/v28n3/a31v28n3.pdf>

Instituto Nacional de Bosques, (2015). *Estrategia Nacional de Producción Sostenible y uso Eficiente de Leña 2013-2024*. Recuperado el 5 de julio 2017. Obtenido de: <http://186.151.231.170/inab/images/descargas/industriaycomercio/Estrategia%20produc%20y%20uso%20le%C3%B1a%20final.pdf>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2016). *Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL)*. Recuperado el 30 de septiembre 2017. Obtenido de: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/mecanismo-de-desarrollo-limpio-mdl>

Instituto Nacional de Estadística, (s.f) *Estimaciones de la Población total por municipio. Período 2008-2020*. Recuperado el 5 de julio 2017. Obtenido de: [http://www.oj.gob.gt/estadisticaj/reportes/poblacion-total-por-municipio\(1\).pdf](http://www.oj.gob.gt/estadisticaj/reportes/poblacion-total-por-municipio(1).pdf)

Instituto para Diversificación y Ahorro de la Energía. (2008) *Biomasa Industrial*. Recuperado el 11 de julio 2017. Obtenido de: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10980_Biomasa_industria_A2008_A_402485e2.pdf

Instituto de Salud Pública de Chile, (2011). *Procedimiento para determinar cenizas totales*. Recuperado el 11 de julio 2017. Obtenido de:

http://www.ispch.cl/lab_amb/met_analitico/doc/ambiente%20pdf/CenizasTotales.pdf

Jara, H. (2009) *Biomasa y sus Propiedades como Combustible*. Recuperado el 11 de julio 2017. Obtenido de: http://www.atcp.cl/privado/docs/revistas/17/rev_154100243301.pdf

Krizan, P. (2015) *The Densification Process of Wood Waste*. Recuperado el 15 de septiembre 2017. Obtenido de: https://books.google.com.gt/books?id=JAzuCAAAQBAJ&pg=PA34&lpg=PA34&dq=Germany+DIN+51731++for+briquettes&source=bl&ots=jeqH0D8qN9&sig=ynkBum-9avXuXZMxZe32C6jX2TQ&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=Germany%20DIN%2051731%20for%20briquettes&f=false

Llarifoc. (2013) *¿Qué es la Biomasa y cuáles son sus aprovechamientos energéticos en Catalunya?* Recuperado el 3 de julio 2017. Obtenido de: <http://llarifoc.com/?p=296>

Martín, F. (2014) *Pellets y briquetas*. Recuperado el 13 de junio 2017. Obtenido de: http://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_2293_9990.pdf

Martín, L. (2013) *Biomasa, la energía natural*. Recuperado el 12 de julio 2017. Obtenido de: <http://www.compromisoempresarial.com/rsc/medio-ambiente/2013/03/biomasa-la-energia-natural/>

Martines, L. y Lira, L. (2010). *Análisis y aplicación de las expresiones del contenido de humedad en sólidos*. Recuperado el 13 de junio 2017. Obtenido de: <http://www.cenam.gob.mx/sm2010/info/pviernes/sm2010-vp01b.pdf>

Melissari, B. (2012). *Comportamiento de Cenizas y su Impacto en Sistemas de Combustión de Biomasa*. Recuperado el 12 de junio 2017. Obtenido de: http://www.um.edu.uy/docs/6_comportamiento_de_cenizas_y_suimpacto_en_sistemas_de_%20combustion_de_biomasa.pdf

- Ministerio de Economía, (s.f). *Listado de Empresas*. Recuperado el 13 de Julio 2017.
Obtenido de: http://www.mineco.gob.gt/sites/default/files/lmg/empresas_inscritas_en_los_contingentes_arancelarios.pdf
- Mintrab. (2017). Salario Mínimo 2017. Recuperado el 30 de septiembre 2017.
Obtenido de: <http://www.mintrabajo.gob.gt/index.php/salariominimo.html>
- Municipalidad de El Progreso, (s.f). *El Progreso, Jutiapa*. Recuperado el 3 de julio 2017
Obtenido de: <http://www.munielprogreso.gob>
- Mutual de seguridad Cchc. (s.f) *Emisiones atmosféricas*. Recuperado el 22 de septiembre 2017. Obtenido de: <https://www.mutual.cl/portal/wcm/connect/c682065c-3012-48e9-929a-65c242876e34/107300193.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=ROOTWORKSPACE-c682065c-3012-48e9-929a-65c242876e34-kYpsfPz>
- Nogués, S., García, D., y Rezeau, A. (2010) Energía de la Biomasa. (Vol. 1). Zaragoza, España: Universidad de Zaragoza
- Obernberger, Ingwald; Thek, Gerold. (2002) *Physical characterization and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior*. Recuperado el 29 de agosto 2017. Obtenido de: <http://www.bios-bioenergy.at/uploads/media/Paper-Obernberger-PelletCharacterisation-2004.pdf>
- Organización Latinoamericana de Energía, (s.f). *Contenido-Leña*. Recuperado el 13 de julio 2017. Obtenido de: <http://www.olade.org/sites/default/files/PGIE%20SESION%2006%20Oferta%20le%C3%B1a.pdf>
- Pedraja, A. (2016) *Combustión, gasificación y pirolisis de lignosulfonato de calcio mediante TG-DSC-MS*. Tesis. Universidad de Cantabria, España.

- PNUMA, (s.f). *Mecanismo de Desarrollo Limpio*. Recuperado el 30 de septiembre 2017. Obtenido de:
<http://cd4cdm.org/Publications/brochure%20spanish/MDL%20Intro%20con.pdf>
- RAE. (2017) Recursos; *Diccionarios; Diccionarios de la lengua española*. Recuperado el 8 de septiembre 2017. Obtenido de:
<http://dle.rae.es/?w=diccionario>
- RAI. (2017) Recursos; *Diccionarios; Diccionario de la real academia de ingeniería*. Recuperado el 30 de septiembre 2017. Obtenido de:
<http://diccionario.raing.es>
- Sánchez, E. (2008) *Amilosa y Amilopectina*. Recuperado el 30 de septiembre 2017. Obtenido de: <http://chocolatisimo.com/amilosa-y-amilopectina/>
- SEGEPLAN, (s.f). *Demografía*. Recuperado el 5 de julio 2017. Obtenido de:
[http://sistemas.segeplan.gob.gt/sideplanw/SDPPGDM\\$PRINCIPAL.VISUALIZAR?pID=POBLACION_PDF_2202](http://sistemas.segeplan.gob.gt/sideplanw/SDPPGDM$PRINCIPAL.VISUALIZAR?pID=POBLACION_PDF_2202)
- SIFGUA, (2010). *Cobertura Forestal*. Recuperado el 31 de Octubre 2017. Obtenido de: <http://www.sifgua.org.gt/Cobertura.aspx>
- SINIA, (s.f). *¿Qué es el Protocolo de Kioto?* Recuperado el 30 de septiembre 2017. Obtenido de: <http://www.sinia.cl/1292/w3-article-48407.html>
- Tipanluisa, L., Moreno, G., Guasumba, J., Celi, Santiago., y Molina, J. (2015). *Estudio experimental de la combustión de la cascarilla de arroz en una cámara de lecho fijo*. Recuperado el 12 de Julio 2017. Obtenido de:
https://www.researchgate.net/profile/Luis_Tipanluisa/publication/291830215_Estudio_experimental_de_la_combustion_de_la_cascarilla_de_arroz_en_una_camara_de_lecho_fijo/links/56a6a0cd08ae860e0253cdc7/Estudio-experimental-de-la-combustion-de-la-cascarilla-de-arroz-en-una-camara-de-lecho-fijo.pdf

Universidad de Guayaquil. (s.f) *Aglutinantes*. Recuperado el 15 de agosto 2017.
Obtenido de:
<http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/703/33/TESISC~4.pdf>

Valverde, A., Sarrial, B. y Monteagudo, J. (2007). *Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz*. Recuperado el 12 de Julio 2017. Obtenido de:
<https://es.slideshare.net/segundocorreamorán/cascarilla-de-arroz>

Vargas, J., Alvarado, P., Vega, J. y Porras, M. (2013). Caracterización del subproducto cascarilla de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos. Revista Científica de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. USAC. 12 – 16.

ViscoStarch. Starch. (s.f) *Binder*. Recuperado 15 de septiembre 2017. Obtenido de:
<http://www.viscostarch.com/starch-binder.php>

IX. GLOSARIO

Adhesión: fuerza de atracción que mantiene unidas moléculas de distinta especie química. (RAE, 2017)

Aglutinante: que aglutina a una sustancia o elemento, y sirve para unir o pegar una cosa con otra de modo que resulte un cuerpo compacto. (RAE, 2017)

Agroindustria: conjunto de industrias relacionadas con la agricultura. (RAE, 2017)

Almidón: hidrato de carbono que constituye la principal reserva energética de casi todos los vegetales y tiene usos alimenticios e industriales. (RAE, 2017)

Amilopectina: molécula del almidón que tiene ramificaciones y está constituida por muchos anillos de glucosa unidos entre sí para formar largas moléculas con numerosas ramificaciones laterales cortas. (Sánchez, 2008)

Amilosa: polisacárido constituyente del almidón, formado por moléculas de glucosa. (RAE, 2017)

Arrocera: establecimiento donde se procesa el arroz. (RAE, 2017)

Biocombustible: combustible obtenido mediante el tratamiento físico o químico de materia vegetal o residuos orgánicos. (RAE, 2017)

Biomasa: materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. (RAE, 2017)

Briqueta: conglomerado de carbón u otra materia en forma de ladrillo. (RAE, 2017)

Briquetado: operación de aglutinar minerales pulverizados, tal como polvo de carbón, en briquetas bajo presión, a menudo con ayuda de un aglutinante. (RAE, 2017)

Carbono: elemento químico, abundante en la naturaleza, tanto en los seres vivos como en el mundo mineral y en la atmósfera, constituye la base química orgánica y tiene gran importancia biológica. (RAE, 2017)

Celulosa: polisacárido que forma la pared de las células vegetales y es el componente fundamental del papel. (RAE, 2017)

Combustión: reacción química entre el oxígeno y un material oxidable, acompañada de desprendimiento de energía y que habitualmente se manifiesta por incandescencia o llama. (RAE, 2017)

Convección: propagación de calor u otra magnitud física en un medio fluido por diferencia de densidad. (RAE, 2017)

Emisión: arrojar, exhalar o echar hacia fuera algo. (RAE, 2017)

Energía: capacidad para realizar un trabajo. Se mide en J. (RAE, 2017)

Fotosíntesis: proceso metabólico específico de ciertas células de los organismos autótrofos, como las plantas verdes, por el que se sintetizan sustancias orgánicas gracias a la clorofila a partir de dióxido de carbono y agua, utilizando como fuente de energía la luz solar. (RAE, 2017)

Inorgánico: sustancia que no tiene el carbono como componente. (RAE, 2017)

Lignina: sustancia orgánica de color marrón que actúa como agente de enlace entre las fibras de los vegetales. (RAE, 2017)

Leña: parte de los árboles y matas que cortada y hecha trozos se emplea como combustible. (RAE, 2017)

Mufla: hornillo semicilíndrico o en forma de copa, que se coloca dentro de un horno para reconcentrar el calor y conseguir la fusión de diversos cuerpos. (RAE, 2017)

Orgánico: dicho de una sustancia: Que tiene como componente el carbono y que forma parte de los seres vivos. (RAE, 2017)

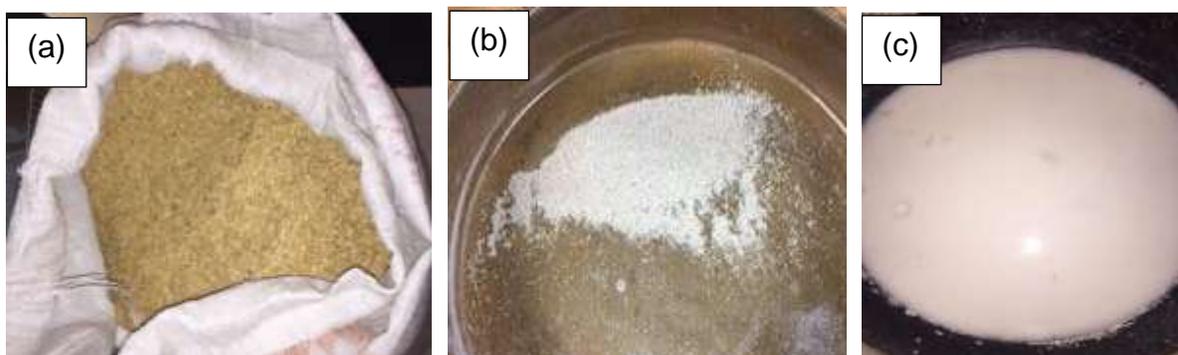
Residuos: aquello que resulta de la descomposición o destrucción de algo, material que queda como inservible después de haber realizado una operación. (RAE, 2017)

X. ANEXOS

10.1 Imágenes de la elaboración y análisis de briquetas

Figura 3 Materia prima

Para elaborar las briquetas se requiere de: (a) Cascarilla de arroz, (b) Almidón de yuca como aglutinante, (c) aglutinante preparado.



Fuente: elaboración propia (2017)

Figura 4 Análisis de humedad y porcentaje de cenizas

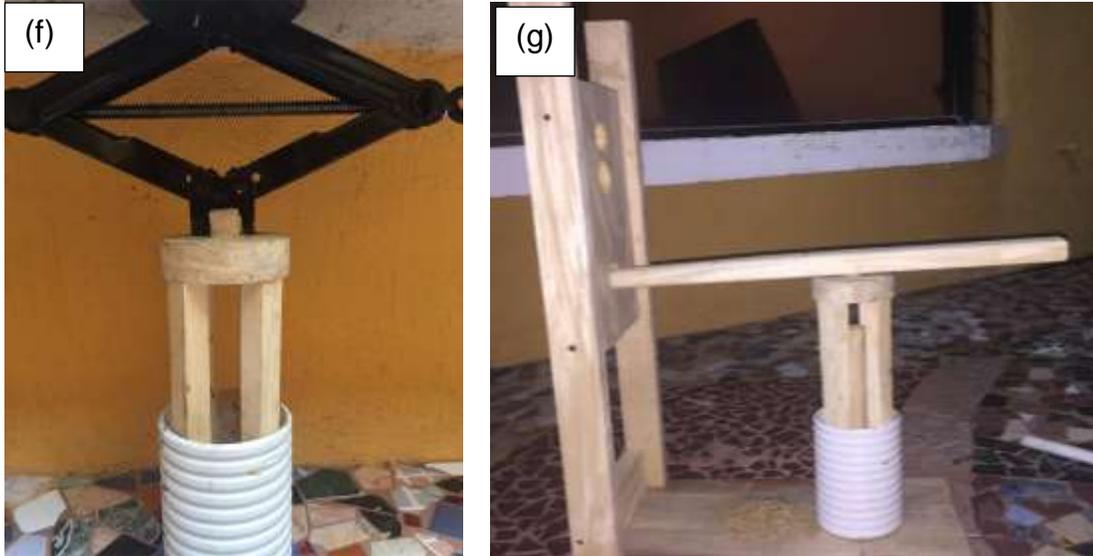
(d) Horno de convección con las muestras, (e) cenizas de las briquetas.



Fuente: elaboración propia (2017)

Figura 5 Alternativas para elaborar briquetas

(f) Compactar el material por medio de un triquet, (g) Prensa de palanca para formar la briqueta.



Fuente: elaboración propia (2017)

10.2 Datos Obtenidos de ensayos previos para seleccionar briqueta

Tabla 32 Porcentaje de humedad de la materia prima

Producto	Humedad (%)
Cascarilla de Arroz	10.71
Almidón de Yuca	12.47

Fuente: elaboración propia (2017)

Tabla 33 Densidad de la cascarilla de arroz

Producto	Densidad (kg/m ³)
Cascarilla de Arroz	127.00

Fuente: elaboración propia (2017)

Se utilizó como base 0.050 kilogramos de cascarilla para elaborar briquetas de 3 cm de largo y 10.16 cm de ancho. Y se evaluaron las siguientes composiciones:

Tabla 34 Diferentes composiciones de las briquetas

	Cascarilla de arroz (%)	Almidón de yuca (%)
Composición 1	50	50
Composición 2	60	40
Composición 3	70	30
Composición 4	80	20
Composición 5	90	10

Fuente: elaboración propia (2017)

Tabla 35 Ensayos preliminares para seleccionar composición óptima

	Cascarilla de Arroz (kg)	Almidón de yuca (kg)	Agua (ml)	Figura	Observaciones
1	0.050 ± 0.00005	0.050 ± 0.00005	50.0		Buena adhesión
2	0.050 ± 0.00005	0.033 ± 0.00005	33.3		
3	0.050 ± 0.00005	0.021 ± 0.00005	21.4		Buena adhesión

Fuente: elaboración propia (2017)

	Cascarilla de Arroz (kg)	Almidón de yuca (kg)	Agua (ml)	Figura	Observaciones
4	0.050 ± 0.00005	0.012 ± 0.00005	12.5		Poca adhesión, se destruyeron al retirarlas del molde.
5	0.050 ± 0.00005	0.0056 ± 0.00005	5.6		

Fuente: elaboración propia (2017)

10.3 Datos para obtener resultados de las briquetas

Tabla 36 Masas de las briquetas elaboradas

Beneficio	Muestra	M₀ (kg)	M₁ (kg)	M₂ (kg)	M₃ (kg)	M_f (kg)
1	1	1.49 ± 0.00005	1.20 ± 0.00005	0.855 ± 0.00005	0.75 ± 0.00005	0.75 ± 0.00005
	2	1.50 ± 0.00005	1.15 ± 0.00005	0.450 ± 0.00005	0.77 ± 0.00005	0.77 ± 0.00005
	3	1.51 ± 0.00005	1.25 ± 0.00005	0.860 ± 0.00005	0.79 ± 0.00005	0.79 ± 0.00005
2	1	1.50 ± 0.00005	1.19 ± 0.00005	0.812 ± 0.00005	0.76 ± 0.00005	0.77 ± 0.00005
	2	1.52 ± 0.00005	1.11 ± 0.00005	0.840 ± 0.00005	0.75 ± 0.00005	0.76 ± 0.00005
	3	1.50 ± 0.00005	1.10 ± 0.00005	0.870 ± 0.00005	0.70 ± 0.00005	0.79 ± 0.00005
3	1	1.48 ± 0.00005	1.11 ± 0.00005	0.800 ± 0.00005	0.80 ± 0.00005	0.80 ± 0.00005
	2	1.53 ± 0.00005	1.14 ± 0.00005	0.835 ± 0.00005	0.76 ± 0.00005	0.76 ± 0.00005
	3	1.53 ± 0.00005	1.15 ± 0.00005	0.823 ± 0.00005	0.79 ± 0.00005	0.79 ± 0.00005
4	1	1.53 ± 0.00005	1.14 ± 0.00005	0.845 ± 0.00005	0.77 ± 0.00005	0.77 ± 0.00005
	2	1.50 ± 0.00005	1.10 ± 0.00005	0.835 ± 0.00005	0.78 ± 0.00005	0.78 ± 0.00005
	3	1.50 ± 0.00005	1.15 ± 0.00005	0.834 ± 0.00005	0.77 ± 0.00005	0.77 ± 0.00005
5	1	1.50 ± 0.00005	1.11 ± 0.00005	0.828 ± 0.00005	0.79 ± 0.00005	0.79 ± 0.00005
	2	1.51 ± 0.00005	1.11 ± 0.00005	0.830 ± 0.00005	0.78 ± 0.00005	0.77 ± 0.00005
	3	1.50 ± 0.00005	1.14 ± 0.00005	0.830 ± 0.00005	0.77 ± 0.00005	0.77 ± 0.00005

Fuente: elaboración propia (2017)

Tabla 37 Humedad de las muestras briquetas

Beneficio	Muestra	Humedad (%)	Promedio de humedad	Sólidos Totales (%)
1	1	49.66	48.67 %	50.34
	2	48.67		51.33
	3	47.68		52.32
2	1	48.67	48.67 %	51.33
	2	50.00		50.00
	3	47.33		52.67
3	1	45.95	48.21 %	54.05
	2	50.33		49.67
	3	48.37		51.63
4	1	49.67	48.78 %	50.33
	2	48.00		52.00
	3	48.67		51.33
5	1	47.33	48.34 %	52.67
	2	49.01		50.99
	3	48.67		51.33

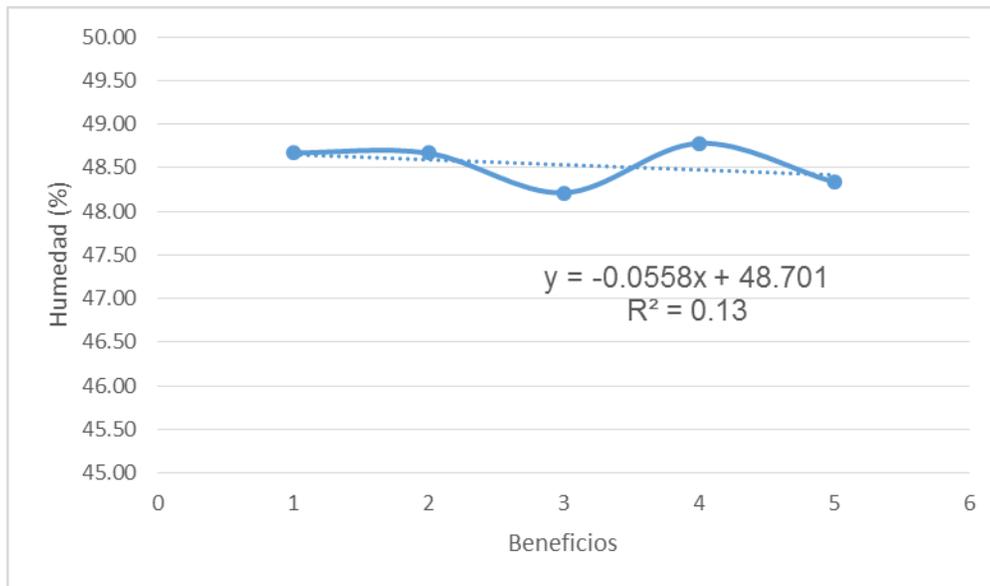
Fuente: elaboración propia (2017)

Tabla 38 Densidad de las muestras de briquetas

Beneficio	Muestra	Largo (m)	Diámetro (m)	Volumen (m ³)	Densidad (kg/m ³)	Promedio de densidad
1	1	0.30 ± 0.0005	0.10 ± 0.0005	0.0024 ± 0.0216	312.50 ± 9.0	320.83 kg/m ³
	2				320.83 ± 9.0	
	3				329.17 ± 9.0	
2	1	0.30 ± 0.0005	0.10 ± 0.0005	0.0024 ± 0.0216	320.83 ± 9.0	322.22 kg/m ³
	2				316.67 ± 9.0	
	3				329.17 ± 9.0	
3	1	0.30 ± 0.0005	0.10 ± 0.0005	0.0024 ± 0.0216	333.33 ± 9.0	326.39 kg/m ³
	2				316.67 ± 9.0	
	3				329.17 ± 9.0	
4	1	0.30 ± 0.0005	0.10 ± 0.0005	0.0024 ± 0.0216	320.83 ± 9.0	322.22 kg/m ³
	2				325.00 ± 9.0	
	3				320.83 ± 9.0	
5	1	0.30 ± 0.0005	0.10 ± 0.0005	0.0024 ± 0.0216	329.17 ± 9.0	323.61 kg/m ³
	2				320.83 ± 9.0	
	3				320.83 ± 9.0	

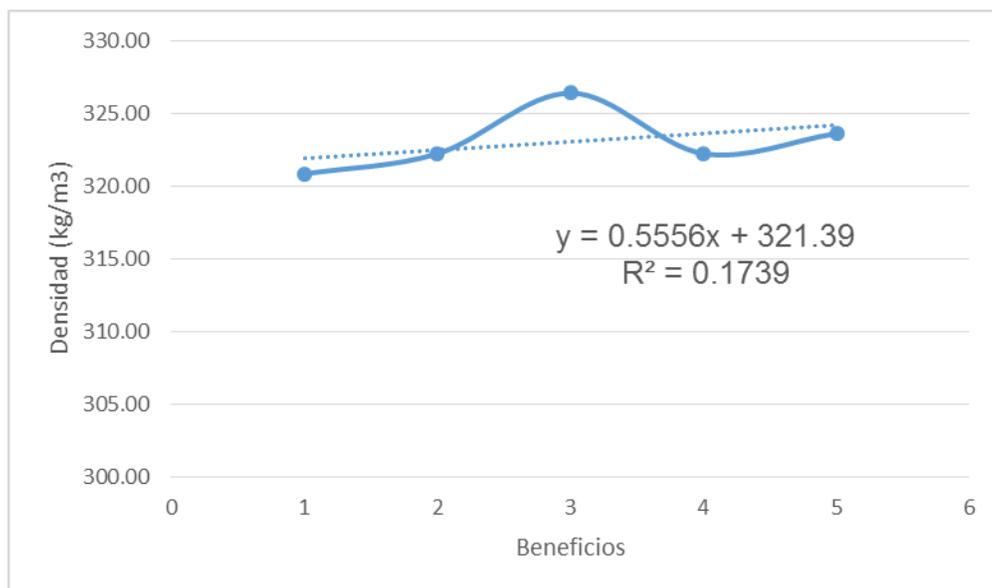
Fuente: elaboración propia (2017)

Figura 6 Comportamiento de la humedad en los distintos beneficios



Fuente: elaboración propia (2017)

Figura 7 Comportamiento de la densidad con las diferentes composiciones



Fuente: elaboración propia (2017)

Tabla 39 Cantidad de cenizas de las muestras de briquetas

Beneficio	Muestra	Muestra de briketa (kg)	Muestra calcinada (kg)	Cenizas (%)	Promedio cenizas
1	1	0.005 ± 0.00005	0.00046 ± 0.00005	9.2	9.7 %
	2	0.005 ± 0.00005	0.00050 ± 0.00005	10.0	
	3	0.005 ± 0.00005	0.00049 ± 0.00005	9.8	
2	1	0.005 ± 0.00005	0.00048 ± 0.00005	9.7	9.6 %
	2	0.005 ± 0.00005	0.00051 ± 0.00005	10.2	
	3	0.005 ± 0.00005	0.00045 ± 0.00005	9.0	
3	1	0.005 ± 0.00005	0.00050 ± 0.00005	10.0	9.9 %
	2	0.005 ± 0.00005	0.00050 ± 0.00005	10.0	
	3	0.005 ± 0.00005	0.00048 ± 0.00005	9.6	
4	1	0.005 ± 0.00005	0.00047 ± 0.00005	9.4	10.13 %
	2	0.005 ± 0.00005	0.00050 ± 0.00005	10.0	
	3	0.005 ± 0.00005	0.00055 ± 0.00005	11.0	
5	1	0.005 ± 0.00005	0.00051 ± 0.00005	10.2	9.7 %
	2	0.005 ± 0.00005	0.00048 ± 0.00005	9.6	
	3	0.005 ± 0.00005	0.00047 ± 0.00005	9.4	

Fuente: elaboración propia (2017)

Figura 8 Prueba de combustión de briquetas y leña

(h) Leña, (i) Briketa de cascarilla de arroz.



Fuente: elaboración propia (2017)

10.4 Briquetas elaboradas



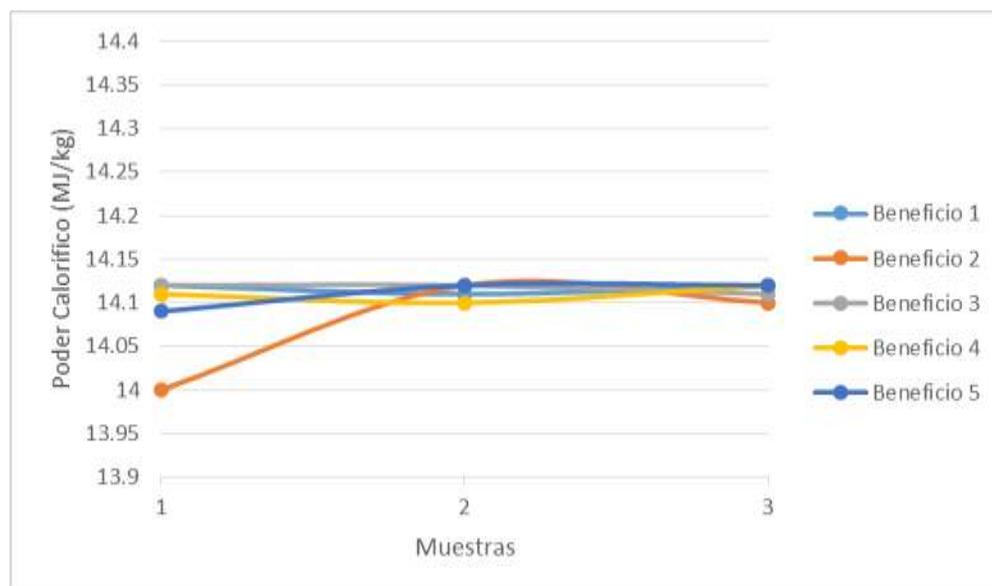
Fuente: elaboración propia (2017)

Tabla 40 Poder calorífico

Beneficio	Muestra	Poder Calorífico (MJ/kg)	Poder Calorífico promedio
1	1	14.12	14.116 MJ/kg
	2	14.11	
	3	14.12	
2	1	14.00	14.113 MJ/kg
	2	14.12	
	3	14.10	
3	1	14.12	14.116 MJ/kg
	2	14.12	
	3	14.11	
4	1	14.11	14.110 MJ/kg
	2	14.10	
	3	14.12	
5	1	14.09	14.110 MJ/kg
	2	14.12	
	3	14.12	

Fuente: elaboración propia (2017)

Figura 9 Comparación del poder calorífico



Fuente: elaboración propia (2017)

Figura 10 Datos del poder calorífico de las briquetas

 <p>GOBIERNO DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS</p>	<p>LABORATORIOS TÉCNICOS</p>	<p>PÁGINA 1 DE (1)</p> <p>LAB-REP-0936-17</p> <p>ORDEN No. L-0395-17</p> <p>GUATEMALA, 21-06-17</p>									
<p>RESULTADOS DE ANÁLISIS</p> <p>MUESTRA: Briqueta de Cascarilla de Arroz PRESENTADA POR: Astrid Valiente RESPONSABLE DEL MUESTREO: Astrid Valiente PROCEDENCIA: Universidad Rafael Landívar LOCALIZACIÓN: Guatemala, Guatemala FECHA DE MUESTREO: 16-06-17 FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA Y PAPELERÍA: 20-06-17 FECHA DE ANÁLISIS: Del 19 al 20-06-17 PRECIO DE ANÁLISIS: \$ 20.00 ANALISTA: Jhonatan Ríos</p>											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>DESCRIPCIÓN</th> <th>MÉTODO DE ANÁLISIS</th> <th>ESPECIFICACIÓN (a)</th> <th>RESULTADO (b)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PODER CALÓRICO SUPERIOR, MJ/Kg</td> <td>ASTM D 240</td> <td>—</td> <td>(c) 14.12</td> </tr> </tbody> </table>	DESCRIPCIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS	ESPECIFICACIÓN (a)	RESULTADO (b)	PODER CALÓRICO SUPERIOR, MJ/Kg	ASTM D 240	—	(c) 14.12			
DESCRIPCIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS	ESPECIFICACIÓN (a)	RESULTADO (b)								
PODER CALÓRICO SUPERIOR, MJ/Kg	ASTM D 240	—	(c) 14.12								
<p>OBSERVACIONES:</p> <p>a) En el Acuerdo Ministerial No. 263-2016 no existen especificaciones para este producto. b) El resultado es válido solo para la cantidad de muestra presentada en este laboratorio. c) El valor de 14.12 MJ/Kg es equivalente a 3374 Kcal/Kg y a 6072 Btu/Lb.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div data-bbox="548 1155 771 1365">  </div> <div data-bbox="771 1176 990 1365"> <p><i>[Signature]</i> Ing. Julio Villacorta ÁREA DE HIDROCARBUROS</p> </div> <div data-bbox="1112 1354 1323 1564">  </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center; margin-top: 20px;"> <div data-bbox="771 1375 1128 1575"> <p><i>[Signature]</i> Vo. Bo. Inga. María Villatoro COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS</p> </div> </div>											
<p style="text-align: center;">Ministerio de Energía y Minas / Dirección: Diagonal 17, 29-78, Zona 11 Las Charcas / PBX: 2419-6464 El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico</p>											
<p>  @MEMguatemala  MEMguatemala www.mem.gob.gt </p>											

10.5 Determinación de costos de producción

Costos de briqueta elaborada

Para determinar costo y precio de la briqueta es necesario tomar referencia de productos similares.

Tabla 41 Precio de venta de productos similares

Producto	Cantidad	Peso (kg)	Precio
Leña no controlada	80 leños	36.28	Q 35.00
Leña controlada	10 leños	9.07	Q 22.00
Briquetas de carbón	N/A	1.36	Q 17.50
Briqueta de aserrín	1 briqueta	1.50	Q 28.50

Fuente: elaboración propia (2017)

Determinación de costos de producción a nivel industrial

- Inversión Inicial

Tabla 42 Datos técnicos de la máquina briquetadora

Modelo	PH80-9
Diámetro	50 – 90 mm
Largo	30 cm
Capacidad	320 – 360 kg/h
Forma	Hexagonal, pentagonal
Humedad	8-12%
Potencia	18.5 kW
Presión	20 Toneladas
Peso	850 kg
Tamaño maquinaria	2400X750x1400 mm
Costo de la máquina:	Q 35,977.66 (\$4,895)

Fuente: Alibaba, (2017)

Figura 11 Máquina briquetadora

(j) Máquina briquetadora, (k) Briquetas que elabora la máquina.



Fuente: Alibaba, (2017)

Tabla 43 Punto de equilibrio

Capacidad Productiva de un beneficio	102,045.91 kg/mes
Costo Fijo (salario+mantenimiento+energía)	Q 162,005.84
Precio de venta	Q 8.00
Costo variable unitario (materia prima empaque)	Q 5.37
Cantidad necesaria al año	61,725.9163 unidades
Costo variable Total	Q 331801.49
Ingreso Total	Q 493807.33

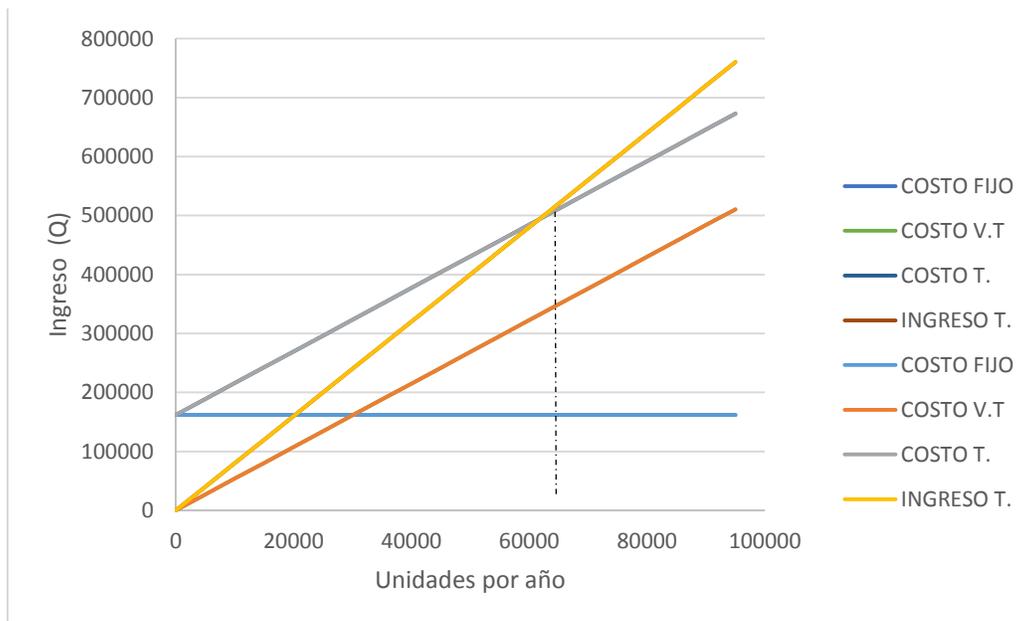
Fuente: elaboración propia (2017)

Tabla 44 Datos para determinar el punto de equilibrio

Unidades	Costo Fijo (Q)	Costo V. Total (Q)	Costo Total (Q)	Ingreso Total (Q)
0	162005.84	0	162005.84	0
5000	162005.84	26877	188882.84	40000
10000	162005.84	53754	215759.84	80000
15000	162005.84	80631	242636.84	120000
20000	162005.84	107508	269513.84	160000
25000	162005.84	134385	296390.84	200000
30000	162005.84	161262	323267.84	240000
35000	162005.84	188139	350144.84	280000
40000	162005.84	215016	377021.84	320000
45000	162005.84	241893	403898.84	360000
50000	162005.84	268770	430775.84	400000
55000	162005.84	295647	457652.84	440000
60000	162005.84	322524	484529.84	480000
61726	162006.00	331801	493807.00	493807
65000	162005.84	349401	511406.84	520000

Fuente: elaboración propia (2017)

Figura 12 Punto de Equilibrio



Fuente: elaboración propia (2017)

10.6 Información del municipio de El Progreso, Jutiapa

Tabla 45 Capacidad productiva del municipio

	Capacidad productiva del municipio	Cantidad de total de arroz granza	Procesamiento anual de arroz granza por beneficio
Quintales	900,000.00	857,185.56	61,2217.54
Kg	90,000,000.00	85,718,571.40	6,122,755.10

Fuente: Municipalidad de El Progreso (s.f)

Tabla 46 Cantidad de biomasa de cascarilla de arroz disponible en el municipio

	Cantidad de cascarilla de arroz
Quintales	171,437.11
Kg	17,143,714.30

Fuente: elaboración propia (2017)

Tabla 47 Datos de población y consumo de leña por zona

Población total en El Progreso	Población por zona (%)		Consumo de leña por zona (%)	
	Rural	Urbana	Rural	Urbana
Personas	60.20	39.80	67.0	33.0
19,252				

Fuente: INE, (s.f)
SEGEPLAN, (2011)
INAB, (2015)

Tabla 48 Cantidad de habitantes que consume leña

	Población por área		Consumo de leña por área		Total de personas que consumen leña
	Rural	Urbana	Rural	Urbana	
Habitantes	11,590	7,662	7,765	2,528	10,293.46

Fuente: elaboración propia (2017)

Tabla 49 Consumo total de leña

Consumo mensual por familia de 6 miembros	Consumo anual por persona	Consumo total anual (Leños)
800 leños	1,600 leños	16,469,536

Fuente: Oficina Forestal del Municipio de El Progreso (s.f)

10.7 Muestra de cálculo

Determinar la densidad de las briquetas

Ecuación 1 Densidad real

$$\rho = \frac{\text{masa_material}}{\text{volumen}} = \frac{0.750\text{kg}}{0.0024\text{m}^3} = 312.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Determinación del porcentaje de Humedad

Ecuación 3 Porcentaje de Humedad

$$\%H = \frac{A}{B} \times 100 = \frac{1.49 - 0.750}{1.49} \times 100$$

$$\%H = 49.66$$

Dónde:

A= Peso perdido por el calentamiento, en gramos.

B= Peso de la muestra, en gramos.

Cálculo para determinar porcentaje de sólidos

Ecuación 4 Sólidos totales

$$\text{Sólidos totales} = 100 - \%H$$

$$\text{Sólidos}_{\text{totales}} = 100 - 49.66 = 50.33\%$$

Determinación del porcentaje de cenizas

Ecuación 5 Porcentaje de Cenizas

$$\% \text{Cenizas} = \frac{M_c - M_a}{M_b} \times 100$$

$$\% \text{Cenizas} = \frac{M_c - M_a}{M_b} \times 100 = \frac{0.00046}{0.005} \times 100 = 9.2$$

Determinación de costo de la briqueta

$$\text{Costo}_{\text{briqueta}} = \text{Cascarilla} + \text{aglutinante}$$

$$\text{Costo}_{\text{briqueta}} = \left(\frac{0.5\text{kg} \times Q20}{18.14\text{kg}} \right) + \left(\frac{0.214\text{kg} \times Q10}{0.4535\text{kg}} \right)$$

$$\text{Costo}_{\text{briqueta}} = Q5.27$$

Costos de energía eléctrica

$$\text{Costo}_{E.\text{eléctrica}} = \text{Potencia} \times \text{Tiempo} \times \text{Tarifa}$$

$$\text{Costo}_{E.\text{eléctrica}} = 18.50\text{kW} \times 160 \frac{\text{h}}{\text{mes}} \times 1.877 \frac{\text{Q}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Costo}_{E.\text{eléctrica}} = \text{Q}5,556$$

Costos de mano de obra

$$\text{Bono}_{14} = \frac{\text{Salariomínimo}}{12} = \frac{\text{Q}2,643.21}{12} = \text{Q}220.27$$

$$\text{Aguinaldo} = \frac{\text{Salariomínimo}}{12} = \frac{\text{Q}2,643.21}{12} = \text{Q}220.27$$

$$\text{Indemnización} = \frac{\text{Salariomínimo}}{12} = \frac{\text{Q}2,643.21}{12} = \text{Q}220.27$$

$$\text{Intecap} + \text{Irtra} + \text{IGSS} = 12.67\%(\text{Salario mínimo})$$

$$\text{Intecap} + \text{Irtra} + \text{IGSS} = 12.67\%(\text{Q}2643.21) = \text{Q}334.89$$

$$\text{Costo}_{M.\text{obra}} = \text{Sueldo} + \text{bono}_{14} + \text{aguinaldo} + \text{indemnización} + \text{Bono} + \text{Intecap} + \text{Irtra} + \text{IGSS}$$

$$\text{Costo}_{M.\text{obra}} = 2,643.21 + 220.27 + 220.27 + 220.27 + 250 + 334.89 = \text{Q}3,888.91$$

Determinar la cantidad de cascarilla de arroz disponible

$$\text{Cascarilla}_{\text{disponible}} = \% \text{Cascarilla} \times \text{Arrozgranza}$$

$$\text{Cascarilla}_{\text{disponible}} = 20\% \times 857,185.56 \text{ quintales}$$

Cantidad de leños consumidos

$$\text{Consumo}_{\text{zona}} = P_{\text{total}} \times \%P_{\text{zona}} \times \% \text{Consumo}$$

$$\text{Consumo}_{\text{rural}} = 19,252 \times 60.2\% \times 67\% = 7,765 \text{ personas}$$

$$\text{Consumo}_{\text{urbano}} = 19,252 \times 39.8\% \times 33\% = 2,528 \text{ personas}$$

$$\text{Consumo}_{\text{total}} = 7,765 + 2,528 = 10,293 \text{ personas}$$

$$\text{Consumo}_{\text{total anual}} = \frac{1,600 \text{ leños}}{\text{persona}} \times 10,293 \text{ personas}$$

$$\text{Consumo}_{\text{total anual}} = 16,469,536 \text{ Leños}$$

Consumo total de leña anual

$$\text{Cantidad}_{\text{consumida}} = \text{Consumo}_{\text{total}} \times P_{\text{promedio}}$$

$$\text{Cantidad}_{\text{consumida}} = 16,449,536 \text{ leños} \times 0.4535 \frac{\text{kg}}{\text{leño}}$$

$$\text{Cantidad}_{\text{consumida}} = 7,459,864.6 \text{ kg}$$

Punto de Equilibrio

$$PE = \frac{\text{Costos Fijos}}{\text{Precio} - \text{Costos Variables}}$$

$$PE = \frac{162,005.84}{8.00 - 5.3754} = 61,725.91 \text{ unidades}$$

Período de recuperación de la inversión

Ecuación 7 Periodo de recuperación

$$PRI = a + \frac{(b - c)}{d}$$

Dónde:

a= Año inmediato anterior en que se recupera la inversión

b= Inversión inicial

c= Flujo de efectivo acumulado del año anterior al de recuperación de la inversión.

d= Flujo en el que se recupera la inversión

$$PRI = 3 + \frac{(35,977.66 - 24,705.89)}{50,242.06} = 3.22 \text{Años}$$

Cálculo de la Media muestral

Ecuación 8 Media Muestral

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n X_i = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n}$$

Dónde:

n= Tamaño de la muestra

X= Datos de cada muestra

- Promedio del porcentaje de cenizas, de las cinco resultados obtenidos de los beneficios.

$$\bar{X} = \frac{9.7 + 9.6 + 9.9 + 10.13 + 9.7}{5}$$

$$\bar{X} = 9.8$$

Cálculo de la Varianza

$$\sigma^2 = \frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + (X_3 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n}$$

$$\sigma^2 = \frac{(9.7 - 9.8)^2 + (9.6 - 9.8)^2 + (9.9 - 9.8)^2 + (10.13 - 9.8)^2 + (9.7 - 9.8)^2}{5}$$

$$\sigma^2 = 0.04468$$

Cálculo de la desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{0.04468} = 0.21137$$