



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA
BIOMASA RESIDUAL SECA DEL MERCADO LA TERMINAL PARA LA ELABORACIÓN DE
BRIQUETAS**

Mildred Xiomara Gálvez

Asesorado por la M.A. Inga. Karen Michelle Martínez Figueroa

Guatemala, enero de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA
BIOMASA RESIDUAL SECA DEL MERCADO LA TERMINAL PARA LA ELABORACIÓN DE
BRIQUETAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MILDRED XIOMARA GÁLVEZ

ASESORADO POR LA M.A. INGA. KAREN MICHELLE MARTÍNEZ FIGUEROA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, ENERO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADORA	Ing. Casta Petrona Zeceña Zeceña
EXAMINADORA	Ing. Cinthya Patricia Ortiz Quiroa
EXAMINADOR	Ing. William Eduardo Fagiani Cruz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL SECA DEL MERCADO LA TERMINAL PARA LA ELABORACIÓN DE BRIQUETAS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha noviembre de 2022.



Mildred Xiomara Gálvez



EEPFI-PP-2096-2022

Guatemala, 16 de noviembre de 2022

Director
Williams G. Álvarez Mejía
Escuela De Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ing. Álvarez

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL SECA DEL MERCADO LA TERMINAL PARA LA ELABORACIÓN DE BRIQUETAS**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Gestión Ambiental - Tratamientos estrategias en la Gestión de Residuos - Problemática en la generación de residuos**, presentado por la estudiante **Mildred Xiomara Gálvez** con número **201504521**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Energía Y Ambiente.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Mtra. Karen Michelle Martínez Figueroa
Asesor(a)

Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador(a) de Maestría



Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





EEP.EIQ.1717.2022

El Director de la Escuela De Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL SECA DEL MERCADO LA TERMINAL PARA LA ELABORACIÓN DE BRIQUETAS**, presentado por el estudiante universitario **Mildred Xiomara Gálvez**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Williams G. Álvarez Mejía; Mg.I.Q., M.U.I.E.
Director
Escuela De Ingeniería Química

Guatemala, noviembre de 2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL SECA DEL MERCADO LA TERMINAL PARA LA ELABORACIÓN DE BRIQUETAS**, presentado por: **Mildred Xiomara Gálvez**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana



Guatemala, enero de 2023

AACE/gaac

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por permitirme culminar una más de mis metas y guiarme a través del camino.

Mi madre

Olivia Gálvez por apoyarme y darme ánimos a través de mi carrera, mi eterno agradecimiento por su compañía y enseñanzas para hacer realidad este sueño.

Mis hermanos

Eveling, Fidel, Elmer, Yeimy y Henry Gálvez, por su apoyo incondicional y por no dejar que me rindiera.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser el alma *mater* que me permitió nutrirme de conocimientos.

**Facultad de
Ingeniería**

Por proporcionarme los conocimientos que me permitieron realizar este trabajo de graduación.

**Escuela de
Postgrado**

Por brindarme la oportunidad de graduarme a nivel Licenciatura.

Mi asesor

M.A. Inga. Karen Michelle Martínez Figueroa, por guiarme y brindarme sus conocimientos durante el trabajo de graduación.

Mi familia

Por su apoyo incondicional, ser mis ejemplos y no dejar que me rindiera nunca.

Mis amigos

Por su amistad incondicional, su apoyo y ánimos por estar allí en los buenos y malos momentos.

Mi catedrático

Del curso de Proyectos de biomasa Ing. José Rosal quien bondadosamente me guio a lo largo de la investigación.

INDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN.....	IX
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
4. JUSTIFICACIÓN	9
5. OBJETIVOS	11
5.1 General	11
5.2 Específicos.....	11
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	13
7. MARCO TEÓRICO.....	15
7.1. Residuos sólidos orgánicos.....	15
7.1.1 Características de los residuos sólidos orgánicos	16
7.2. Situación de los residuos sólidos orgánicos en Guatemala	17
7.2.1. Caracterización y cuantificación de los residuos sólidos orgánicos.....	18

7.3. Briquetaje	19
7.3.1. Determinación de la materia prima	20
7.3.2. Proceso de fabricación de briquetas	23
7.3.2.1. Acondicionamiento de la materia prima	23
7.3.2.2. Procesamiento de la materia prima	25
7.3.2.3. Proceso de compactación	26
7.3.2.4. Parámetros de fabricación	26
7.3.3. Características de las briquetas	27
7.4. Eficiencia energética.....	28
8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	31
9. METODOLOGÍA	33
9.1. Tipo de estudio	33
9.2. Definición de variables.....	34
9.3. Fases de la investigación.....	35
9.3.1. Revisión bibliográfica	35
9.3.2. Muestreo	36
9.3.3. Recolección de datos.....	36
10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE DATOS	47
10.1. Herramientas de recolección	47
10.2. Herramientas estadísticas	47
11. CRONOGRAMA.....	49
12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	51
REFERENCIAS	53
APÉNDICES.....	57

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Caracterización física de desechos sólidos.....	19
2.	Partes del fruto de palma de coco	21
3.	Olote de maíz	22
4.	Proceso de producción de briquetas	25
I.	Caracterización química de desechos sólidos	18
II.	Características de biomasa residuales.....	38
III.	Proporciones de la mezcla para elaboración de briquetas.....	41
IV.	Resumen de los análisis estadísticos por variable.....	48
V.	Cronograma de la investigación.....	50
VI.	Presupuesto	51

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetro
Δm	Diferencia de masas
gpp	Generación por puesto diaria de biomasa residual
kJ/kg	Kilo jule por kilogramo
kg	Kilogramo
kg/m³	Kilogramo por metro cúbico
E	Límite aceptable de error
mi	Masa inicial del combustible
mf	Masa final del combustible
m³	Metro cúbico
mm	Milímetro
n	Número de muestras
m	Peso de la briqueta
Pc	Peso de la briqueta después de la caída
Pi	Peso inicial de la briqueta
Wh	Peso total de residuos por hora
C	Poder calorífico del combustible
%	Porcentaje
P	Probabilidad de éxito
Q	Probabilidad de fracaso
t	Tiempo total de horas de trabajo en el mercado
Nt	Total de puestos
z	Valor obtenido, mediante niveles de confianza

v

Volumen de la briqueta

GLOSARIO

Aprovechamiento	Utilización de los elementos naturales, en forma que resulte eficiente, socialmente útil y procure su preservación y la del hombre.
Biodegradable	Material que puede descomponerse en elementos químicos naturales, por la acción de agentes biológicos, como el sol, el agua, las bacterias, las plantas o los animales.
Biomasa	Cantidad de productos obtenidos por fotosíntesis, susceptibles de ser transformados en combustible útil para el hombre y expresada en unidades de superficie y de volumen.
Briqueta	Conglomerado de materia en forma de cilíndrica o rectangular útil para combustible.
Caracterización	Método que permite conocer la composición de los residuos sólidos, permitiendo diseñar una mejor gestión integral, logrando a su vez, una optimización de los recursos disponibles para tales efectos.
Contaminación	La presencia en el ambiente de uno o más contaminantes, o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico.

Generación	Cantidad de desechos originados por una determinada fuente en un intervalo de tiempo dado.
Higrómetro	Instrumento que se utiliza para medir el grado de humedad del aire, gas o material sólido como madera.
Poder calorífico	Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de una unidad de masa de combustible sin contar la parte correspondiente al calor latente del vapor de agua generado en la combustión.
Potencial	Que no es, no se manifiesta o no existe, pero tiene la posibilidad de ser, de manifestarse o de existir en un futuro.
WBT	Protocolo Water Boiling Test. (Prueba de ebullición de agua.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación busca analizar el potencial energético de la biomasa residual seca generada en el mercado de La Terminal para la elaboración de briquetas. A partir de la cual se determinará la generación diaria de residuos orgánicos, evaluando el proceso de fabricación de las briquetas mediante las etapas de acondicionamiento de materia prima, preparación de aglutinante y briquetación. Por último, se calculará la eficiencia de las briquetas como combustible doméstico, al realizar el análisis de poder calorífico, contenido de cenizas y la prueba de WBT.

La determinación de la generación de biomasa residual se realizará a través de un muestreo estratificado de varios puestos dentro del mercado de la Terminal de la zona 4 del departamento de Guatemala. Luego, la materia prima recolectada pasará por un proceso de acondicionamiento, secado y triturado, para posteriormente mezclarse con el aglutinante, en este caso cáscara de papa y cáscara de plátano. Posteriormente, se realizará el proceso de elaboración de las briquetas, para luego determinar la densidad, durabilidad, poder calorífico, eficiencia y contenido de cenizas.

A partir de las briquetas elaboradas con biomasa residual seca generada en el mercado de La Terminal, se busca mejorar las características entorna al contenido de cenizas, eficiencia y poder calorífico en comparación con la leña para evaluar sí puede convertirse en sustituto a esta fuente tradicional de energía, contribuyendo a su vez a la reducción de los residuos del lugar.

1. INTRODUCCIÓN

En Guatemala, la generación de residuos orgánicos representa un problema grave debido a su mala disposición, como es el caso del mercado de la Terminal de la zona 4 donde se generan aproximadamente 5 482 197 kg de desechos sólidos orgánicos, lo que provoca contaminación visual de los alrededores, malos olores, permitiendo la proliferación de plagas, entre otros efectos negativos. (Alvarado, 2017)

Mediante el desarrollo de la presente investigación se busca la reducción del volumen de desechos generados aprovecha el potencial energético de la biomasa residual seca generada en el mercado de La Terminal, como fuente alternativa para combustible de uso doméstico a partir de la producción de briquetas con residuos orgánicos. Asimismo, se calculará la eficiencia de dichas briquetas como combustible de uso doméstico, se comprobará que puede ser un sustituto de la leña en los hogares de escasos recursos, lo que representaría un decrecimiento en el uso de este recurso que es un combustible altamente contaminante y que genera problemas de deforestación.

La metodología por utilizarse en el análisis del aprovechamiento del potencial energético de la biomasa residual seca del mercado de la Terminal consistirá en la realización de un muestreo aleatorio de puestos para cuantificar la generación de residuos en una hora, luego con base en esto se estimará el total de la generación. Para el proceso de fabricación se establecerá el pretratamiento de la materia prima, se ensayarán diferentes proporciones de mezcla, con dos posibles aglutinantes, cáscara de plátano y cáscara de papa.

Y para finalizar se evaluará la eficiencia de las briquetas a través del cálculo del poder calorífico y el protocolo de WBT (Prueba de ebullición de agua).

Para el desarrollo del capítulo uno se tiene la presentación de información de la biomasa residual seca, situación actual del mercado de la Terminal, los conceptos claves para la densificación de la biomasa residual seca, el proceso de fabricación y las pruebas a realizar para evaluar la eficiencia energética. En el capítulo dos se encontrará la delimitación de la biomasa residual seca generada en el mercado de La Terminal que se utilizará para la fabricación de briquetas, se detallará el pretratamiento necesario para la materia prima, el proceso de fabricación de las briquetas.

En el capítulo tres se expondrán las pruebas realizadas a las briquetas para evaluar su calidad y su eficiencia energética, se explicará las pruebas de durabilidad, porcentajes de cenizas, poder calorífico y Protocolo WBT. El capítulo cuatro se recopilarán los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a través de la experimentación, se presentarán en tablas o gráficas para facilitar su comprensión. El capítulo cinco consistirá en el análisis de los resultados obtenidos.

2. ANTECEDENTES

En el tema de análisis del potencial energético de los desechos orgánicos se han desarrollado una serie de investigaciones en diferentes ámbitos; por lo tanto, se listan las siguientes investigaciones.

Según Pérez *et al.* (2017) en su tesis de maestría *Estudio de la Factibilidad para el Aprovechamiento de la Biomasa a partir de los Desechos Sólidos Recibidos En El Relleno Sanitario Mides* explican la importancia de buscar alternativas de tratamiento para los desechos sólidos generados en las áreas metropolitanas. Para ello propone como primer punto la caracterización de los residuos a través de muestreos aleatorios estratificados, posterior a ello se realiza la determinación del poder calorífico teórico de la composición de residuos, y el poder calorífico real. De las cuales se obtiene un mayor potencial de las briquetas primero al triturar los residuos y luego secándolos. Como conclusión de este trabajo se encuentra que los desechos sólidos de un Relleno sanitario pueden tener un potencial de energía mecánica de 301MW, dependiendo de su composición. Los autores también exponen que la gasificación con recuperación energética puede ser una opción viable para la valorización de los desechos sólidos.

Otra investigación importante es *Elaboración de un Plan de Manejo Integral de Residuos Sólidos para el Vertedero Controlado, Ubicado en el Km 22, Carretera al Pacífico, Villa Nueva, Guatemala* Girón, (2017) cuyo objetivo principal es presentar un plan de manejo integral de desechos para el Relleno sanitario ubicado en el km 22, carretera al Pacífico. Como primer paso realizó la caracterización física de los desechos sólidos, proceso que consistió en un

muestreo aleatorio para determinar el peso de cada componente a través del método de cuarteo. Este método incluyó los pasos siguientes: seleccionar residuos homogenizados, separación de sus elementos, clasificación y pesaje. Entre los aspectos relevantes encontrados en esta investigación se caracterizó un 48.78 % de material biodegradable, un 30.6 % material aprovechable y un 20.62 % que no pueden aprovecharse.

La investigación *Metodología para la Caracterización de los Desechos Sólidos Municipales y Asimilables: Caso de Estudio ciudad de Ibarra, Ecuador* Lorente *et al.*, (2018) plantea que es importante proponer alternativas de combustibles para producción de energía y aprovechamiento de los desechos. Y bajo este marco se expone que la caracterización de los desechos sólidos es de los primeros pasos a realizar, la cual añade la ventaja de conocer el potencial energético que estos materiales puedan tener. La metodología establecida por los investigadores fue el muestreo directo de la fuente generadora, luego se realizó la determinación de la generación per cápita, la composición química a través de análisis proximal y elemental.

Como resultados se obtuvieron un promedio de producción diaria de desechos sólidos de 0.45kg/persona/día, con la caracterización se estableció que aproximadamente el 80 % de los residuos son de dimensiones menores a 100mm, y con la composición química se determinó que el poder calorífico de la mezcla fue de 7 033 Btu/lb.

La tesis de maestría *Análisis de Eficiencia Energética a través de la Determinación del Poder Calorífico de la Biomasa Forestal en Forma de Briqueta de la Especie Eucalyptus Grandis, para la Región del municipio de Palencia en el departamento de Guatemala* Hernández, (2018) trata la viabilidad técnica sobre el aprovechamiento de los recursos en las extensiones

boscosas sin explotar en el municipio de Palencia y propone fabricar briquetas con aserrín de madera de eucalipto y utilizando 40 % de almidón de yuca como aglutinante.

En pasos posteriores se evaluó el poder calórico y se analizó en estufas ahorradoras la eficiencia energética del biocombustible. El autor realizó tres mezclas con proporciones distintas, a través de un protocolo de WBT se estableció la eficiencia de las briquetas hirviendo 5L de agua. Y se realizó un análisis por el Laboratorio de Hidrocarburos para definir el poder calorífico. Como conclusiones del trabajo investigativo se establecieron que “la fabricación de briquetas aprovecha la totalidad de biomasa, el poder calorífico de una mezcla de proporción 60 % aserrín y 40 % aglutinante es mayor que la leña común en un 7 %.” Y por último es más eficiente energéticamente las briquetas que el uso de la leña común, presentando un ahorro de un 31 %.

Y por último la investigación *Una Revisión de los aspectos Técnicos y Económicos de la Fabricación de Briquetas de Biomasa Kpalo et al., (2020)* expone aspectos relevantes para la investigación como presiones altas en el rango de 100-150 MPa que ayudan a la densificación, 80 °C para el proceso mejoran la liberación de componentes como lignina, celulosa y hemicelulosa. También menciona que a temperatura ambiente la humedad podría encontrarse de 12-20 % para facilitar la formación de almidón.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la ciudad de Guatemala la gestión de los desechos sólidos ha representado un gran reto para el gobierno y principalmente para las municipalidades. Según datos del Sistema Nacional de Información sobre Cambio Climático, para el año 2016 el 46 % de los residuos sólidos correspondía a desechos orgánicos provenientes de alimentos. Estos residuos orgánicos no tienen un adecuado manejo y son depositados en vertederos no autorizados o terminan en los drenajes de las calles, derivando en un problema de riesgo de inundación en la época lluviosa.

Asimismo, la falta de una planta de tratamiento que permita una disposición final adecuada para la biomasa residual seca generada en los mercados representa para la ciudad de Guatemala un problema con un alto impacto ambiental; ya que dentro de los vertederos autorizados no se realiza un adecuado manejo de los residuos recolectados, permitiendo que únicamente el 4.5 % de dichos materiales se recicle o se convierte en compost.

Cabe mencionar que los dos vertederos autorizados, Vertedero de la Zona 3 y El Vertedero Controlado de AMSA, están llegando a su capacidad máxima de ocupación; aumentando la creación de vertederos clandestinos y generando problemas como contaminación de ríos, lagos y todas las fuentes cercanas de agua, ya sea por la llegada de los desechos sólidos al lugar o por la infiltración de los lixiviados producidos.

La inadecuada gestión y mala disposición de dicha biomasa residual produce gases de efecto invernadero, que provocan malas condiciones para la salud de la población, contaminación visual de los alrededores, acumulación de basura en los tragantes de la ciudad, entre otras.

Es por ello, que toman una gran importancia las propuestas de alternativas para un manejo integral de desechos sólidos y como estos pueden generar valor con su reutilización, como es el caso de explorar el potencial energético de la biomasa residual seca generada en los mercados.

Por lo anterior se plantean las siguientes preguntas de investigación:

Pregunta General

¿Cuál es el potencial energético que tiene la biomasa residual seca generado en el mercado de la Terminal para la elaboración de briquetas?

Para responder a esta interrogante se deberán contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuánto es el volumen generado de biomasa residual seca con potencial energético?
- ¿Qué proceso es el óptimo para la elaboración de briquetas a partir biomasa residual seca?
- ¿Cuál es la eficiencia de las briquetas fabricadas con biomasa residual seca como posible combustible doméstico?

4. JUSTIFICACIÓN

La realización de la presente investigación se justifica en la línea de investigación de la problemática en la generación de residuos de la Maestría en Energía y Ambiente.

A partir del aprovechamiento de biomasa residual seca como materia prima para la producción de briquetas se busca reducir el volumen de residuos orgánicos generado en el mercado La Terminal de la zona 4 de Guatemala. Asimismo, se evaluará el potencial energético que la biomasa posee como combustible alternativo para el uso de leña, lo que podría ayudar a cubrir las necesidades energéticas de las familias.

Los principales beneficiarios sería la población en general que haga uso de las instalaciones del mercado, dado a que se tendría una disposición adecuada de la biomasa residual generada en las instalaciones reduciendo así la contaminación visual, malos olores y proliferación de plagas. Las familias que carecen de los recursos energéticos para la cocción de sus alimentos se favorecerían al obtener un combustible alternativo a la leña que genere menos contaminación, sea más eficiente y reduzca costos. Por último, podría mencionarse a la Municipalidad de Guatemala como un favorecido a causa de la reducción del volumen de desechos para recolección en el mercado de La Terminal.

La presente investigación propone una alternativa para el tratamiento de la biomasa residual seca, a través del aprovechamiento de su potencial energético para la fabricación de briquetas. Genera un combustible alternativo con lo cual se presenta la reducción de volumen generado de residuos orgánicos que llegan a los vertederos; así como, la disminución de la contaminación que estos representan, minimizando la degradación de los ríos, lagos y del aire. Y con ello ayuda a mejorar la calidad de vida de la población.

5. OBJETIVOS

5.1 General

Analizar el potencial energético que tiene la biomasa residual seca generada en el mercado de La Terminal para la elaboración de briquetas.

5.2 Específicos

1. Cuantificar la biomasa residual seca con potencial energético para la formación de briquetas en el mercado La Terminal.
2. Evaluar el proceso de producción de briquetas para el aprovechamiento de la biomasa residual seca.
3. Calcular la eficiencia de las briquetas fabricadas con biomasa residual seca, como potencial fuente de combustible para uso doméstico.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Mediante la valorización energética de la biomasa seca residual del mercado de la Terminal, se busca hacer un aprovechamiento energético a partir de la fabricación de briquetas como posible fuente para el uso doméstico. Y así reducir el volumen de residuos generados en el mercado de La Terminal para minimizar la contaminación de los alrededores.

Se cuantificará de la biomasa residual seca con potencial energético para ser utilizada como materia prima para la elaboración de briquetas, y con base en una revisión y evaluación de la literatura se analizarán variables como contenido de cenizas y poder calorífico para establecer cuáles son las óptimas para la producción de las briquetas. Posterior a ello se realizará la evaluación del proceso de producción y la eficiencia de las briquetas como un combustible alternativo a la leña, que genere menos contaminación, menores costos y sea más eficiente.

La elaboración de briquetas a partir del aprovechamiento de la biomasa residual seca generada en los mercados busca, además de presentar un adecuado manejo de estos y su reducción, la oportunidad de explorar su potencial energético. Esto a través de su utilización como un combustible alternativo para la población que utiliza leña, determinando su calidad de producción a través de pruebas como la friabilidad, poder calorífico y contenido de cenizas.

Se evaluará el desempeño de las briquetas de residuos orgánicos como fuente de combustible para uso doméstico por medio del Protocolo WBT (Water Boling Test), para comparar el desempeño de las briquetas de Biomasa residual seca con la leña tradicional.

Se mejorará la gestión de los residuos sólidos orgánicos generados en los mercados reduciendo su volumen y también se estará proponiendo una forma para la disminución de los desechos que son trasladados a los rellenos sanitarios, brindando una solución alternativa a otra problemática presente en el país como lo es el uso de la leña en los hogares de familias de escasos recursos que no tienen accesos al gas propano.

7. MARCO TEÓRICO

En el tema del análisis del potencial energético de la biomasa residual seca y el proceso de elaboración de briquetas es necesario conocer algunos conceptos claves, los cuales se describen a continuación.

7.1. Residuos sólidos orgánicos

Los residuos sólidos son definidos como todo material que es desechado por su propietario y no tiene un valor de uso directo, estos pueden originarse de diferentes actividades y sectores como el comercial, industrial, doméstico, municipal, entre otros. Se conocen en la actualidad dos grandes clasificaciones de los residuos por su composición química, inorgánicos en los que se encuentran vidrio, plástico, metal y todo material inerte. Y orgánicos en los que se puede incluir al cartón, madera, papel y materiales biodegradables. (Girón, 2017)

Al hablar de residuos orgánicos o biomasa residual se tienen diferentes formas de aprovechamiento energético entre los cuales se encuentra la transformación en biocombustibles, biodiesel, biogás y la combustión directa de la biomasa. El proceso de densificación del material mejora la eficiencia de la quema de estos residuos, por lo que se vuelve relevante el conocimiento de sus propiedades.

7.1.1 Características de los residuos sólidos orgánicos

Para la combustión directa es de especial interés conocer las propiedades físicas y químicas de la biomasa residual. Las propiedades físicas son aquellas en la que no se requiere de un cambio en su estructura, por ejemplo, un cambio de fase, mientras que en las químicas si se da un cambio en el material. (Girón, 2017)

En el proceso de briquetaje deben tenerse en cuenta factores como la densidad aparente del material, la humedad, el tamaño de partícula, la cantidad de cenizas, su composición química por mencionar algunas, para un proceso de combustión efectivo. (Dinesha *et al.*, 2019)

- Densidad: es el peso por unidad de volumen del material, este influye sobre el manejo y transporte, así como en las posibilidades de tratamiento. Según Girón este valor soporta grandes variaciones, según el grado de compactación a que están sometidos los residuos.
- Humedad: es la cantidad de masa presente en la biomasa, para minimizar el tiempo y energía de secado esta debe de limitarse del 10-15 %. Al tener un mayor contenido de humedad la temperatura de combustión se reduce y se tiene un efecto negativo en la combustión.
- Contenido de cenizas: es la cantidad de ceniza producida durante la combustión, es decir todo el material sólido inorgánico que queda luego del proceso. Un mayor contenido de cenizas de la materia prima de biomasa genera problemas como menor poder calorífico, temperatura de fusión más baja de cenizas que da como resultado

- Una tendencia a la formación de escoria. Por ello al seleccionar el residuo orgánico el contenido de ceniza debe ser menor al 4 %.
- Tamaño de partícula: se refiere a la longitud de los fragmentos de materia, y para la formación de briquetas se prefieren las partículas granulares con tamaños pequeños. (Dinesha *et al.*, 2019)

Según Khorasgani *et al.*, (2020) la densificación ha sido de gran interés en los países en desarrollo como técnica para mejorar las fuentes de energía". Los residuos orgánicos de tamaño pequeño, partículas, polvo, las astillas de madera, entre otros tipos de biomasa son generalmente los preferidos para el proceso de densificar en formas compactadas, por acción de cargas. Para mejorar el poder calórico de las briquetas los procesos combinados de carbonización y activación por calentamiento pueden ayudar.

7.2. Situación de los residuos sólidos orgánicos en Guatemala

En Guatemala se generaron 75,601,400 toneladas de restos de alimentos y 165,083 ton solo en la ciudad en el año 2010, según datos del INE. (García, 2019)

Alvarado describe a el mercado La Terminal como uno de los centros de comercio más grande de la ciudad con sus más de 4,500 inquilinos (2017). En este ámbito los desechos generados son depositados en una de las calles de zona 4 que se utiliza como centro de acopio, este ocupa un área de 500 m² aproximadamente.

Para la recolección el encargado es el tren de aseo de la Municipalidad de Guatemala, que luego de recoger lo que se encuentra acumulado se dirige a los vertederos autorizados para realizar la descarga. (Alvarado, 2017)

7.2.1. Caracterización y cuantificación de los residuos sólidos orgánicos

La cuantificación y caracterización de los desechos sólidos es relevante para la evaluación de las necesidades de equipamiento, sistemas, planes y programas de manejo. Para ello es importante identificar componentes individuales, analizar el tamaño de partículas generadas, contenido de la mezcla y la densidad.

Las propiedades químicas que conocer para el aprovechamiento energético son cantidad de material volátil, cenizas totales, porcentaje de carbono, nitrógeno, oxígeno, hidrogeno y poder calorífico. (Lorente *et al.*, 2018)

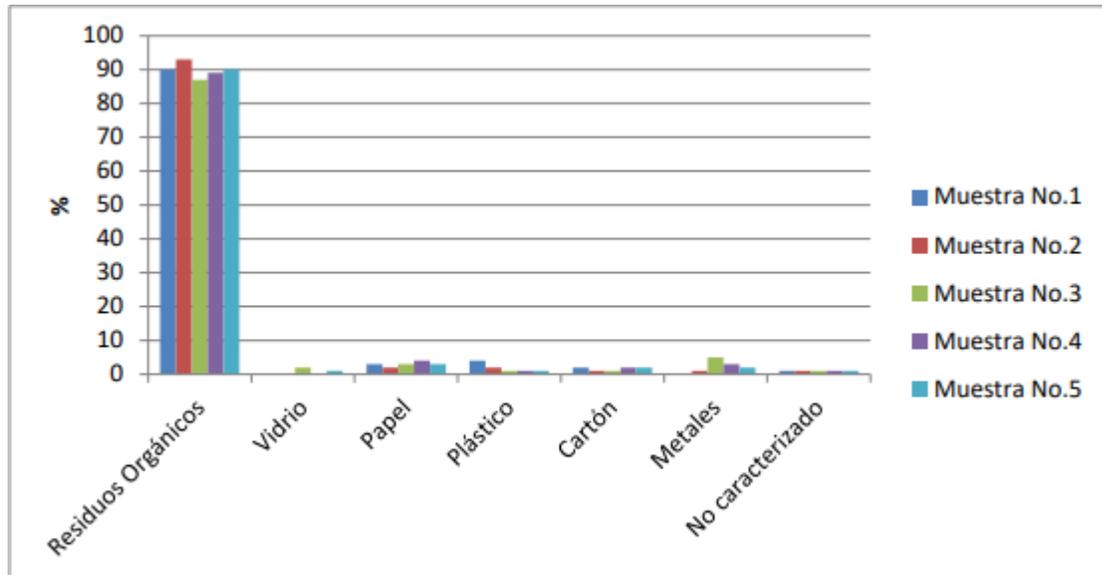
En la caracterización física y química realizada por Alvarado (2017) a los residuos generados en el mercado de La Terminal se puede observar un gran potencial energético para desarrollar proyectos de aprovechamiento.

Tabla I. Caracterización química de desechos sólidos

Nutrientes	Nitrógeno	Fósforo	Potasio	pH	%Humedad	%Sólidos Totales	%Sólidos Volátiles
Muestra 1	2.37	2.20	1.80	7.0	71.94	28.06	31.05
Muestra 2	2.43	2.12	1.96	6.8	78.73	21.27	36.78
Muestra 3	1.85	2.33	1.74	7.1	76.84	23.16	34.15
Promedio	2.22	2.22	1.83	6.97	75.84	24.16	33.99

Fuente: Alvarado (2017) *Potencial de producción de biogás de los residuos orgánicos biodegradables de la Terminal zona 4.*

Figura 1. Caracterización física de desechos sólidos



Fuente: Alvarado (2017) *Potencial de producción de biogás de los residuos orgánicos biodegradables de la Terminal zona 4.*

El muestreo directo es una técnica para conocer las características físicas de los desechos, esta consiste en determinar una muestra que sea representativa estadísticamente para luego realizar un pesaje de los residuos sólidos en la fuente generadora. Mientras que para las propiedades químicas se realizan análisis proximales para conocer propiedades como humedad, contenido de sólidos totales y sólidos volátiles. (Lorente *et al.*, 2018)

7.3. Briquetaje

La técnica del briquetaje o densificación de la biomasa ayuda a disminuir el volumen de esta, reduce costos y facilita el transporte lo que lo hace económicamente factible. Otras ventajas que se recalcan son el aumento del poder calorífico, la reducción de producción de cenizas, menor contaminación y

el mejoramiento de la eficiencia comparado con la leña o quema directa de la biomasa.

Los estudios exploratorios en la actualidad buscan la forma de reducir la contaminación por combustibles fósiles proponiendo alternativas para generación de energía, entre las que se destacan la utilización eficaz de los residuos de la agricultura y residuos industriales de biomasa. (Dinesha *et al.*, 2019)

El proceso de briquetaje puede aumentar la densidad aparente de la biomasa en un rango de 10 a 20 veces del volumen de densidad inicial, lo que ayuda a mejorar su almacenamiento, transporte y manejo. Entre los aspectos importantes que considerar en el proceso de briquetaje son el contenido de humedad, el tipo de materia prima utilizada, temperatura de prensado, porcentaje y tipo de aglutinante, tamaño de partícula y el método de fabricación. (Khorasgani *et al.*, 2020)

Debido a que estos factores son importantes es necesario profundizar en ellos, comenzando por la materia prima utilizada y sus características idóneas.

7.3.1. Determinación de la materia prima

La materia prima que se utiliza para la fabricación de briquetas consiste desde residuos de industrias madereras, residuos sólidos urbanos, bosques energéticos, residuos agroindustriales, algas, entre otros. (Khorasgani *et al.*, 2020)

Materiales como el polvo, desechos orgánicos o astillas de madera y biomasa residual pueden aumentar de 10 hasta 20 veces su densidad,

reduciendo así costos de transporte, espacio de almacenamiento, entre otros beneficios.

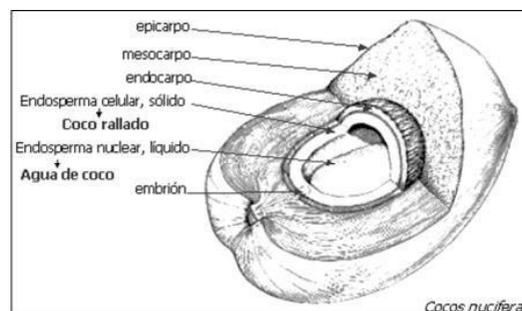
Palma de coco (Cocos nucifera)

Es una planta cocotera cuyo fruto es el coco, utilizado en una gran variedad de industrias como la alimentaria, medicinal, cosmética y de construcción. El fruto consta de diversas partes en las que se encuentran la pulpa blanca utilizada en la industria cosmética y alimentaria, la cáscara vellosa de color marrón, una exterior llamada mesocarpio fibroso y la exterior gruesa.

Es una planta rica en nitrógeno, potasio y fósforo, y según la literatura se tienen indicios de su utilización como sustituto de carbón vegetal, ya que se puede aprovechar la mayoría de sus partes como combustibles.

La cáscara de coco constituye el 33 % del fruto y la capa dura el 15 %, ambas con oportunidad para aprovecharlo como fuente de energía. Se tiene un poder calorífico de 14,70 MJ/kg para la parte fibrosa y 23,01 MJ/kg para la parte dura. (Calderón, 2018)

Figura 2. Partes del fruto de palma de coco



Fuente: Calderón, D. (2018). *Análisis técnico-económico del uso de la biomasa generada por la palma de coco (Cocos nucifera) para la reducción del consumo de leña en el municipio de Patulul, Suchitepéquez.*

Olote de maíz

Después del proceso de desgranado del maíz queda un residuo que se conoce como olote de maíz, esta es la médula de la mazorca en ella se depositan las reservas alimenticias tiene un aspecto esponjoso y blanco.

Su composición es un 45 % de celulosa, 35 % de hemicelulosa y 15 % de lignina, se estima que cada tonelada de maíz deja unos 170 kg de olote como biomasa residual después del proceso de separación del grano de la mazorca. (Alvarez, 2018)

Figura 3. **Olote de maíz**



Fuente: Alvarez, E. (2018). *Análisis técnico financiero en la implementación de briquetas de aserrín, cáscara de café y olote, para disminuir el consumo de leña en San Juan Sacatepéquez.*

Polvo de carbón

Se genera por la abrasión que sufre el carbón durante el manejo, almacenamiento y la manipulación, debido a este proceso se obtiene un polvo residual el cual tiene un valor de poder calorífico de 18.9 kJ/g aproximadamente. Este material no tiene ningún valor de mercado directo para los vendedores o usuarios de carbón por ello se trata como desecho, y para ser considerado polvo se tamiza por una rejilla de 0.5mm. (Nikiema *et al.*, 2022)

Residuos de madereros

Son aquellos restos que quedan de procesos como la venta de madera, residuos de granos como arroz, aserrín y otros. Estos materiales han tenido una gran aceptación como biomasa para la fabricación de briquetas debido a su poder calorífico promedio, como el valor de la cascarilla de arroz de 13.38 MJ/kg y 18.48 MJ/kg para el aserrín. (Dinesha *et al.*, 2019)

7.3.2. Proceso de fabricación de briquetas

La lignina, celulosa y hemicelulosa están presentes en la biomasa de origen vegetal, que es de naturaleza lignocelulósica lo que hace que la biomasa sea rica en contenido energético. Algunos estudios han explorado la combinación de materiales de origen inorgánico con varios tipos de materiales de biomasa en la fabricación de briquetas de residuos agrícolas, biomasa leñosa y residuos de frutas, por mencionar algunos. (Kpalo *et al.*, 2020)

7.3.2.1. Acondicionamiento de la materia prima

Dependiendo del tipo de materia prima por utilizar esta debe de tener un acondicionamiento previo, para ello se puede aplicar los siguientes pasos.

Limpieza: o tamizado esto permite garantizar que toda la materia prima tenga el tamaño requerido y para eliminar todos los materiales no deseados. Los equipos como tamices y transportadores magnéticos se utilizan para eliminar impurezas como tierra, suciedad, hilos de metal y plástico, entre otros. El lavado puede mejorar las propiedades de combustión de la biomasa según algunos autores.

Secado: sirve para aumentar su eficiencia, pero permitir una pequeña cantidad de humedad ayuda a unir las partículas de biomasa. Materiales como la cáscara de café, las cáscaras de maní y la cáscara de arroz generalmente no requieren secado. Este proceso puede realizarse de forma natural a condiciones ambientales, o a través de forzado por un proceso industrial que reduce la humedad contenida en la biomasa hasta un rango específico (5 % a 15 %) adecuado para comenzar la densificación.

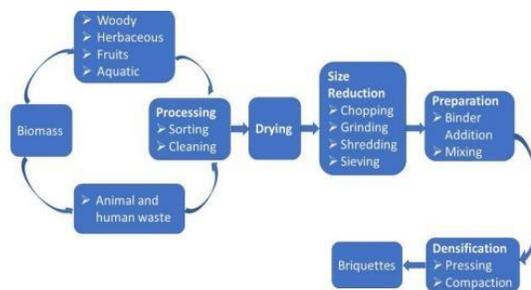
Reducción de talla: al reducir el tamaño de biomasa previo a la fabricación de briquetas, ayuda a descomponer parcialmente el contenido de lignina de la biomasa y aumenta el área de superficie. Esto permite mejorar el flujo de biomasa durante la densificación, algunos métodos aplicables incluyen cortar, astillar, moler, triturar, entre otros.

Adición de aglutinante: algunos materiales de biomasa no son fácilmente aglomerados, en especial a bajas presiones, por lo que es necesario la adición de aglutinantes para mejorar las propiedades mecánicas o térmicas. La agregación de este material ayuda a formar un puente para mejorar la unión entre partículas de los componentes de la biomasa, esta se puede agregar durante la mezcla de la materia prima o después de la carbonización si el proceso lo incluye. Se conocen tres tipos de aglutinantes inorgánico, orgánico y compuesto, el tipo de aglutinante puede variar de acuerdo con las características que se necesitan para el tipo de briqueta requerido. Para una producción de combustible eficaz, el aglutinante debe ser plástico y elástico debido a que la calidad del aglutinante tiene una gran influencia en la resistencia, la estabilidad térmica, el rendimiento de la combustión y el costo de la briqueta. (Kpalo *et al.*, 2020)

7.3.2.2. Procesamiento de la materia prima

El proceso de fabricación comienza con la adquisición de la materia prima, el procesamiento y eventual densificación, para ello se aplica presión, calor y algún agente aglutinante.

Figura 4. Proceso de producción de briquetas



Fuente: Kpalo, *et al.*, (2021). *Evaluación de briquetas híbridas de mazorca de maíz y corteza de tronco de palma aceitera en una aplicación de cocina doméstica para comunidades rurales en Nigeria.*

Molienda: se trata de la reducción de las partículas de una muestra sólida realizada por medios mecánicos hasta el tamaño deseado. La molienda es una operación unitaria que reduce el volumen promedio de las partículas de una muestra sólida.

Preparación de mezclas: se realiza la preparación de mezclas de los diferentes componentes de las briquetas, utilizando distintos porcentajes de aglomerantes, de componentes o variando alguna otra característica. Esto para conocer el comportamiento de las briquetas. (Lopez *et al.*, 2021)

7.3.2.3. Proceso de compactación

Fabricación de *pellets*: para ello los parámetros del proceso que deben tomarse en cuenta incluyen la presión de la matriz, temperatura, tamaño y forma de la matriz, tiempo de mantenimiento o retención. Estos tienen una repercusión directa de la calidad de las briquetas. (Dinesha *et al.*, 2019)

7.3.2.4. Parámetros de fabricación

Condiciones como presión, temperatura y tiempo son algunos de los principales determinantes de la calidad de las briquetas para el proceso de compresión. Durante la fabricación de briquetas comprender estos parámetros mejora el buen funcionamiento. (Kpalo *et al.*, 2020)

Presión de compactación: factores como el tamaño y la forma de las partículas, el tipo de materia prima y el contenido de humedad determinan la cantidad de presión que se debe aplicar. Puede haber densificación bajo baja presión de compactación y también a alta presión, cada una tiene sus características. Como la densificación a baja presión requiere un agente aglutinante para permitir la unión entre partículas, mientras que a alta presión utiliza los componentes de unión naturales como el almidón, la proteína, la lignina y la pectina, que se exprimen de las partículas de los materiales de biomasa. La presión de 15,3 MPa produjo las densidades más altas para cada proporción de briquetas, esta característica influye en la densidad, la resistencia a la compresión y la durabilidad de las briquetas. (Kpalo *et al.*, 2020) Kaliyan y Morey (citados en Kpalo *et al.*, 2020) sugieren un rango de 100 a 150 MPa o superior ya que la alta presión ayuda a la densificación de la biomasa.

Temperatura: la temperatura ayuda en la liberación de componentes que actúa como aglutinante, tales como lignina, celulosa y hemicelulosa. Esta

propiedad afecta tanto a la materia prima de biomasa como a la matriz de la máquina briquetadora antes y durante el proceso de briquetaje. Diversos autores apoyan que temperaturas altas ayudan a mejorar el mecanismo de unión, también proponen un rango de entre 60-300 °C que producirían briquetas con alta densidad y durabilidad mecánica Grover *et al.*; Okot *et al.*; Mandal *et al.*; (citados en Kpalo *et al.*, 2020).

Tecnología para fabricación de briquetas: puede haber equipos de alta o baja presión, los de baja presión trabajan en un rango de menor a 5MPa, mientras que los de alta presión superan los 100MPa. Cada tecnología utiliza ayuda para mejorar las propiedades de unión entre las partículas a densificar, en el caso de alta presión se utiliza la temperatura mientras que el aglutinante es utilizado en la técnica con presiones menores a 100MPa. (Kpalo *et al.*, 2020)

7.3.3. Características de las briquetas

Algunas propiedades importantes para determinar la calidad de densificación realizada se detallan a continuación:

Friabilidad: esta propiedad detalla la capacidad que las briquetas tiene para desmenuzarse luego de su fabricación. Para probar el poder calórico e ignición es de muy importante que la fragmentación se de en tamaños que puedan ser combustionadas para encontrar sus propiedades caloríficas.

Poder calórico: es la forma de medir la cantidad de calor que proporciona un material de combustión, y es denominado también calor específico de la sustancia. A la cantidad de calor que cede la unidad de masa del cuerpo al quemarse totalmente se le conoce como calor específico para la combustión.

Para la determinación de esta propiedad puede utilizarse una bomba calorimétrica, en la que se realiza el ensayo haciendo combustionar un material específico con el oxígeno necesario en un recipiente especial. Se realiza dentro lugar hermético para asegurarse de mantener el calor liberado por el combustible, se deben de tomar en cuenta factores como liberación de calor por el alambre de encendido, absorción de calor por la bomba, entre otros que afectan la determinación del poder calorífico del combustible. (Hernández, 2018)

7.4. Eficiencia energética

Es una propiedad que considera el buen uso y las buenas prácticas, es optimizar todas las actividades de tal forma que se reduzca el consumo energético mientras se mantiene la calidad.

Para la aplicación en briquetas esta se puede realizar por la prueba de ebullición de agua, según el protocolo descrito por Chen *et al.*, (citado en Kpalo *et al.*, 2021) la forma de realizar el procedimiento es la siguiente:

- Se queman aproximadamente 200 g de briquetas en una estufa tradicional, para hervir una olla tapada que contenía 1 L de agua.
- Se determina el tiempo total que tomó encender las briquetas y hervir el agua.
- Se establece la eficiencia térmica del combustible (TFE), la tasa de quema de combustible (FBR) y el consumo específico de combustible (SFC)

La eficiencia térmica del combustible es la relación entre el trabajo realizado al calentar y evaporar el agua y la energía consumida, al hablar de la tasa de quema de este se refiere a la medida de la velocidad a la que sequema

una cantidad específica en el aire. Y por último el consumo específico de combustible es el volumen de combustible sólido equivalente utilizado para realizar una determinada tarea sobre el peso de la tarea. (Kpalo *et al.*, 2021)

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Situación de los residuos sólidos orgánicos en Guatemala

1.1.1. Caracterización y Cuantificación de los residuos sólidos orgánicos

1.2. Briquetaje

1.2.1. Biomasa residual seca

1.2.2. Características Biomasa residual seca

1.2.3. Proceso de fabricación de briquetas

1.2.3.1. Acondicionamiento de la materia prima

1.2.3.2. Procesamiento de la materia prima

1.2.3.3. Proceso de compactación

1.2.3.3.1. Parámetros de fabricación

1.2.4. Características de las briquetas

1.2.5. Eficiencia energética

2. FABRICACIÓN DE BRIQUETAS DE BIOMASA RESIDUAL SECA

2.1. Delimitación de la Biomasa residual seca

2.2. Pretratamiento de la materia prima

2.2.1. Trituración

2.2.2. Tamizado

2.3. Proceso de fabricación de las briquetas

3. EVALUACIÓN DE LAS BRIQUETAS

3.1. Análisis de la calidad de las briquetas

3.1.1. Prueba de friabilidad

3.2. Análisis de la eficiencia de las briquetas

3.2.1. Poder calorífico

3.2.2. Protocolo WBT Water Boiling Test

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

El potencial energético de los residuos sólidos orgánicos para el desarrollo de proyectos de recuperación de energía puede ayudar con la problemática de la generación excesiva de estos. (Pérez *et al.*, 2017)

El mercado de La Terminal es uno de los mayores centros de comercio de la ciudad de Guatemala, pero este no cuenta con un adecuado sistema de gestión de desechos orgánicos, desaprovechando el potencial energético que tienen sus 7663 m³ de biomasa residual seca generada en promedio cada mes. (Alvarado, 2017)

9.1. Tipo de estudio

Se desarrollará un estudio cuantitativo descriptivo, ya que se determinará el potencial energético de los desechos sólidos orgánicos generados en el mercado de La Terminal para la producción de briquetas; para esto se realizará una cuantificación de la generación semanal de biomasa residual con potencial energético para la fabricación de briquetas, se evaluará el proceso de producción de las briquetas y por último se realizará el cálculo de la eficiencia de las briquetas como combustible doméstico.

La investigación descriptiva específica medirá de forma independiente las variables, centrándose en las propiedades y características importantes sobre el potencial de producción de briquetas de la biomasa residual del mercado La Terminal.

Esto es importante para determinar si puede haber un aprovechamiento de los residuos en este sector público o descartarlos como posible fuente de producción de briquetas.

El enfoque cuantitativo utilizará la recolección y el análisis de datos para determinar las variables evaluadas. Esto se realizará a través de la medición numérica, el uso de estadística para establecer patrones de la caracterización de biomasa residual seca y su utilización para la producción de briquetas.

9.2. Definición de variables

A continuación, se tiene una descripción de las variables, según la metodología que se utilizará para esta investigación:

- Generación de residuos: cantidad de residuos orgánicos, de la cual se muestreará la generación por hora, es una variable cuantitativa medida en kilogramos por hora.
- Humedad: se realizará a través de pesar una muestra recién tomada, luego se pondrá a secar hasta tener una masa constante y la cantidad de humedad se tomará como el diferencial entre estos dos pesos. Se mide en porcentaje y es una variable cuantitativa.
- Tamaño de partícula: se determinará el tamaño de partícula de la biomasa residual a través de tamización con diferentes mallas. Es una variable cuantitativa, que se mide en milímetros.
- Proporción de la mezcla: se realizarán diferentes proporciones de los desechos orgánicos para determinar cuál es el más adecuado. Variable cuantitativa expresada en porcentaje.

- Tiempo de prensado: tiempo que dura el proceso de prensado mecánico, variable cuantitativa medida en segundos.
- Densidad: se evaluarán las densidades aparentes de las briquetas fabricadas para determinar la cantidad de masa por unidad de volumen, expresada en kilogramos por metro cúbico.
- Durabilidad: se calcula del porcentaje de finos como una proporción de la masa inicial, ayuda a determinar la capacidad de las briquetas de fragmentarse. Se presenta en porcentaje.

9.3. Fases de la investigación

A continuación, se presentan las fases que se realizarán en la investigación.

9.3.1. Revisión bibliográfica

En esta fase se realizará la exploración de la literatura para conocer la explicación del tema de investigación y sus componentes más importantes. Además se determinarán variables, características y parámetros adecuados para el proceso de fabricación de briquetas y su potencial energético.

Se revisarán a fondo las investigaciones para conocer el comportamiento de la diferente biomasa residual seca para la fabricación de briquetas y así establecer la mezcla óptima para el desarrollo de la experimentación. También se determinarán los parámetros de proceso como presión y temperatura, tamaño de partícula, tiempo de prensado, humedad, entre otras.

9.3.2. Muestreo

Las muestras se recolectarán durante una semana continua bajo condiciones controladas procurando mantenerlas sin alteración, esta recolección se hará por medio una caja de madera de un pie cúbico de volumen recubierta internamente con bolsa plástica.

Para determinar el número de muestras representativas para el experimento utilizó la siguiente ecuación:

$$n = \frac{z^2 PQ}{E^2} (\dagger)$$

- Donde:
 - n: número de muestras
 - Z: valor obtenido, mediante niveles de confianza. Se toma en relación con el 95 % de confianza que equivale a 1.96
 - E: límite aceptable de error.
 - Q: probabilidad de fracaso
 - P: probabilidad de éxito

9.3.3. Recolección de datos

Determinación kilogramos de biomasa residual seca

Para conocer la cantidad de los residuos que se generan en el mercado de la Terminal, es necesario realizar una cuantificación estratificada por método de muestreo directo el cual consiste en pesar la biomasa residual en el lugar de origen para lo cual se selecciona una muestra representativa de la población. (Girón, 2017; Lorente et al., 2018)

El procedimiento para la cuantificación de la población se realizará por medio de estimación de la generación de los diferentes tipos de residuos en un tiempo establecido de una hora.

A continuación, se describe el procedimiento:

- Se colocará un recipiente específico, con una medida de un metro cúbico, para colocar la biomasa residual en cada puesto de muestreo establecido durante un período de una hora.
- Se retirará el recipiente y se procederá a pesar, con una báscula electrónica de 40kg.
- Se repetirá el proceso durante una semana.
- Se recolectarán datos del número de puestos total de cada tipo de biomasa residual establecida para la elaboración de briquetas.
- Se identificará el total de horas diarias de trabajo en el mercado.
- Para determinar el total de biomasa residual generada por día se aplicará la siguiente ecuación:

$$gpp = \frac{W_h * t}{N_t (2)}$$

Donde:

- Y para determinar el total de biomasa residual generada en un día en el mercado de La Terminal se utilizará la siguiente ecuación.

$$\frac{\text{Generación diaria (kg)}}{\text{día}} = gpp * Nt \quad (3)$$

Donde:

gpp: Generación por puesto diaria de biomasa residual
(kg/puesto*día)

Nt: Total de puestos (puestos)

Con base en la literatura se establecieron algunas biomazas residuales secas con potencial energético, las cuales son de interés para la presente investigación.

Estas se detallan en el cuadro siguiente:

Tabla II. **Características de biomasa residuales**

Tipo de Biomasa Residual	Poder Calorífico teórico (kJ/g)	Porcentaje de cenizas (%)
Finos de Carbón	18.9 ± 3.5	42.6 ± 4.8
Caparazón de coco	20.0 ± 2.2	0.4 ± 0.2
Cáscara de coco	18.5 ± 4.7	1.9 ± 2.5
Cáscara de arroz	13.38	19.5
Olote de maíz	15.23	8.1

Fuente: Dinesha, *et al.*, (2019). Briquetas de biomasa como combustible alternativo: Una revisión integral.

Proceso de fabricación de briquetas

Preparación de la biomasa residual

La humedad y tamaño de partícula son variables importantes que afectan la calidad de las briquetas fabricadas con biomasa residual, por lo que es necesario establecer un valor de referencia con base en la literatura.

Humedad: es una variable que afecta directamente al poder calorífico de la biomasa residual, debido a que incide en la cantidad de energía necesaria para evaporar el agua presente en el material.

Para adecuar la materia prima existen diferentes técnicas de secado como el secado natural en la cual se expone la biomasa a condiciones

cortes repetidamente en la materia hasta obtener el tamaño deseado. El procedimiento se describe a continuación:

Biomasa residual entera:

- Se realizarán cortes a la materia con un machete, hasta dejarlo a un tamaño de 50mm aproximadamente.
- Con un mazo se seguirá triturando hasta dejar la biomasa a un tamaño aproximado de 10mm.
- Luego la materia se pasará por un tamiz para homogenizar la biomasa a utilizar para la fabricación de briquetas.
- Si hay biomasa residual con un tamaño mayor a 10mm, se repetirá el proceso de triturado con mazo hasta alcanzar la medida adecuada.

Biomasa residual de polvo

- Se procederá a pasar la biomasa residual de polvos en un tamiz de malla menor a 4.
- La materia residual depositada en la malla se triturará hasta alcanzar un tamaño menor a la medida del tamiz.

Luego de reducir el tamaño de la partícula para la biomasa residual, se almacenará en un lugar sin humedad y fresco, hasta ser utilizada posteriormente.

Preparación del aglutinante

El aglutinante es un componente clave para la fabricación de las briquetas, debido a que ayuda a mejorar las propiedades térmicas y mecánicas en el proceso de la densificación de la biomasa residual.

La calidad del aglutinante tiene un efecto directo en la resistencia, el rendimiento de la combustión, la estabilidad térmica y el costo de la briqueta. Una recomendación para determinar el aglutinante adecuado es que este debe de ser plástico y elástico para mejorar la densidad, durabilidad y las otras características.

A causa de ello y de su importancia en el proceso de fabricación se ha investigado diferentes tipos de conglomerados, como almidones, pasta de mandioca, pulpa de papel usado, melaza, entre otros. (Kpalo *et al.*, 2020) Para esta investigación se realizará la experimentación de dos diferentes tipos de biomasa residual como posibles aglutinantes, la cáscara de papa y la cáscara de plátano, evaluando las características físicas de las briquetas para determinar su calidad.

El proceso de obtención del aglutinante se describe a continuación según Magnago *et al.*, (2020):

- Se molerá las cáscaras de papa o de plátano hasta obtener un polvo muy fino.

- Se mezclará manualmente en 100 mL de agua destilada.
- Se calentará la mezcla hasta una temperatura de 90 °C durante 10 minutos aproximadamente, hasta obtener un aspecto parecido al gel.

Posteriormente a obtener la mezcla adherente se definirá la proporción con respecto a los demás componentes, ensayando las siguientes proporciones:

Tabla III. Proporciones de la mezcla para elaboración de briquetas

Muestra	Aglutinante (%)	Residuos de coco (%)	Olote de maíz (%)	Residuos de carbón (%)	Polvo de granos (%)
CP1	30	40	10	10	10
CP2	20	50	10	10	10
CP3	10	60	10	10	10
CC1	30	40	10	10	10
CC2	20	50	10	10	10
CC3	10	60	10	10	10

Fuente: Dinesha, *et al.*, (2019). *Briquetas de biomasa como combustible alternativo: Una revisión integral.*

Briquetaje

Para aplicar la técnica de densificación se definirán algunas variables importantes como lo son la presión, tiempo de prensado y temperatura. Estas variables son de importancia debido a que afectan a la calidad de las briquetas.

Debido a la adición de aglutinante la briquetación puede darse a presiones bajas en un rango de 5 a 15 MPa, obteniendo buenos resultados en la prueba de durabilidad, comprensión al corte entre otras. (Kpalo *et al.*, 2020)

El procedimiento para la elaboración de las briquetas es el siguiente:

- Se realizará la mezcla de acuerdo con las proporciones establecidas anteriormente en la tabla III de esta sección, a una temperatura de 90 °C aproximadamente.

- Se colocará un parte de la mezcla preparada en una probeta o molde.
- Se realizará la compactación con una presión de entre 5 y 15 MPa por un tiempo de 40-60 segundos.
- Se realizará el des moldaje de la briqueta.
- Se pesará la briqueta elaborada, al inicio del tiempo de secado y al final, para comparar la pérdida de humedad que presenta.
- Se calculará la densidad de las briquetas, de la siguiente forma:

$$Densidad \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{m}{v} \quad (4)$$

Donde:

m: Peso de la briqueta (kg).

v: Volumen de la briqueta (m³).

Donde:

Reducción: Porcentaje de reducción del peso de la briqueta (%)
 Pi: Es el peso inicial de la briqueta (kg).

Pc: Peso de la briqueta después de la caída (kg).

Cálculo del poder calorífico

El poder calorífico de un material puede determinarse de dos formas, la forma analítica que es un promedio ponderado de los componentes constituyentes del material, y la segunda forma es el método práctico que consiste en la utilización de calorímetros. (Calderón, 2018)

Para la determinación del poder calorífico se realizará con base en la Norma ASTM D 240, a través de una prueba en el laboratorio de Hidrocarburos

del Ministerio de Energía y Minas. Para lo cual se prepararán las muestras de la siguiente forma:

- Se realizará la mezcla de acuerdo con las proporciones establecidas en la Tabla III.
- Se molerá cada una de las mezclas ensayadas.
- Se almacenará la briqueta en un lugar seco y fresco, para que se realice el secado de forma correcta, aproximadamente 7 días.
- Luego se procederá a realizar las pruebas mecánicas para evaluar la calidad de las briquetas.

Cálculo de la eficiencia energética

Prueba de durabilidad

Esta prueba se realizará para evaluar el desempeño del aglutinante, debido a que se observará la pérdida de materia de las briquetas luego de una caída a la altura de 5 pies (1.8m) aproximadamente. (Khorasgani *et al.*, 2020) El procedimiento que se seguirá es el siguiente:

- Tomar el peso inicial de las briquetas de a ensayar, se evaluarán las proporciones de la tabla III.
- Para tener una altura estándar y evitar el traslado residuos por el lugar de la prueba se colocará una tubería.
- Se procederá a colocar la briqueta en la tubería y se soltará.
- Se pesará la briqueta, o la parte que tenga mayor tamaño.
- Se calculará el porcentaje de pérdida de masa de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Reducción}(\%) = \frac{P_i - R}{P_i} * 100 \quad (5)$$

- Se tamizará cada muestra por un tamiz número 60.
- Se prepararán 3 muestras de cada mezcla ensayada, con un peso de media libra.
- Se llevarán al Laboratorio de hidrocarburos del MEM.

Proceso del Protocolo WBT (Water Boiling Test)

El proceso del protocolo de ebullición de agua consiste en el calentamiento de 5 litros de agua hasta su punto de ebullición. Este ensayo comúnmente utilizado para determinar la eficiencia de una estufa ahorradora consta de 3 fases, inicio en frío, inicio en caliente y baja potencia. Para realizar la comparación entre diferentes combustibles se puede realizar solamente la fase de inicio en frío. (Calderón, 2018; Hernández, 2018)

El procedimiento para llevar a cabo se detalla a continuación:

- Se pesarán 4 kg del combustible a utilizar.
- Se pesará 0.10 kg de ocote, que será el material iniciador.3- Se medirán 5 kg de agua en la olla para calentar.
- Se colocará un termómetro digital dentro del agua contenida en las ollas
- Se anotará la temperatura inicial del agua.6- Se procederá a encender el fuego,
- Se apuntará al inicio del ensayo la hora, la temperatura y la humedad del ambiente.

- Se monitoreará el ensayo hasta alcanzar el punto de ebullición local, el cual es de 93 °C.
- Se anotará la temperatura final del agua y la hora del inicio de ebullición del agua.
- Se pesarán los recipientes con agua.
- Se anotará el peso del carbón después de la combustión y las briquetas restantes sin quemar.

Para la prueba de eficiencia del combustible se utilizará la fórmula de eficiencia energética de la leña para diferentes tipos de biomasa leñosa. (Hernández, 2018)

$$Eficiencia = \Delta m * PC \quad (6)$$

En donde:

- Δm : Diferencia de masas entre pesos inicial y final del combustible en la combustión (kg)
- PC: Poder calorífico del combustible (MJ/kg)

Y para terminar la medición de eficiencia del combustible se realizará la comparación entre la cantidad de ceniza producidas por las diferentes briquetas ensayadas, así como para la leña de referencia.

$$Contenido\ de\ cenizas = m_i - m_f \quad (7)$$

En donde:

- m_i : Masa inicial del combustible (kg)
- m_f : Masa final del combustible (kg)

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE DATOS

Para el desarrollo del análisis de información se utilizarán las siguientes herramientas de recolección de datos y se analizarán con las herramientas estadísticas descritas a continuación:

10.1. Herramientas de recolección

Para cada etapa metodológica se utilizarán diferentes tablas de recolección de datos, las cuales se enlistan abajo:

Tabla de registro de peso de residuos generados en una hora por puesto

Tabla de porcentaje de biomasa en la elaboración de briquetas

Tabla de características fisicoquímicas de las briquetas
Tabla de resultado de Poder calorífico de las briquetas
Tabla de resultados de parámetros de la Prueba WBT

10.2. Herramientas estadísticas

Se realizará un análisis estadístico para obtener una investigación objetiva, se trabajará una comparación múltiple de medias utilizando el criterio propuesto por Tukey, análisis de varianza y estadística descriptiva.

Se analizarán por métodos estadísticos las variables más relevantes las cuales son: volumen de biomasa residual seca producida, porcentaje de reducción, poder calorífico, eficiencia del combustible y cenizas producidas.

Para el cálculo del método de análisis de Tukey y análisis de varianza, se utilizará el programa InfoStat y la estadística descriptiva se realizará el programa Microsoft Excel.

Tabla IV. Resumen de los análisis estadísticos por variable

Variable	Análisis estadístico
Volumen biomasa residual seca	Media, desviación estándar y análisis de varianza
Porcentaje de reducción	Media, desviación y Análisis de varianza
Poder calorífico	Análisis de Varianza y prueba de Tukey
Eficiencia de combustible	Análisis de Varianza y prueba de Tukey
Cenizas producidas	Análisis de Varianza y prueba de Tukey

Fuente: elaboración propia.

11. CRONOGRAMA

A continuación, se presentan las actividades a realizarse para la investigación, se estima un tiempo aproximado de 9 meses, comenzando desde el mes de diciembre de 2022 hasta agosto de 2023.

Tabla V. Cronograma de la investigación



Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

A continuación, se presentan las actividades a realizarse para la investigación detallando los recursos necesarios, se estima un tiempo de 9 meses para realizar la investigación, desde la toma de datos hasta su análisis.

Tabla VI. Presupuesto

Tipo de Recurso	Descripción	Proveedor	Costo Unitario	Cantidad	Monto	Fuente de financiamiento
Insumo	Recipiente plástico de un metro cubico de capacidad	No especificado	Q 50.00	12	Q 600.00	Investigador
Equipo	Báscula electrónica de capacidad de 40 kg	Pretul	Q 420.00	1	Q 420.00	Investigador
Equipo	Medidor de humedad	No especificado	Q 340.00	1	Q 340.00	Investigador
Equipo	Machete de 12 plg	Truper	Q 80.00	1	Q 80.00	Investigador
Equipo	Mazo ablandador	George Home	Q 45.00	1	Q 45.00	Investigador
Equipo	Tamizador de cedazo	No especificado	Q 46.00	2	Q 92.00	Investigador
Equipo	Molino manual	No especificado	Q 330.00	1	Q 330.00	Investigador
Equipo	Termómetro	No especificado	Q -	1	Q -	Investigador
Equipo	Estufa	No especificado	Q -	1	Q -	Investigador
Equipo	Gato Hidráulico	No especificado	Q -	1	Q -	Investigador
Servicio	Asesoría por 9 meses	/	Q -	1	Q -	Asesoría profesional
Servicio	Determinación del poder calorífico	Ministerio de Energíay Minas	Q 20.00	21	Q 420.00	Investigador
Total					Q 2,327.00	

Fuente: elaboración propia.

La investigación será financiada por el investigador, mientras que el espacio físico que se utilizará está constituido por dos fases, la recolección de datos sobre la generación de biomasa residual se realizará en el mercado de la Terminal y para el proceso de elaboración de las briquetas se utilizará el espacio brindado en un taller de madera que está en construcción.

Con base en el presupuesto presentado con anterioridad se establece que el estudio es factible.

REFERENCIAS

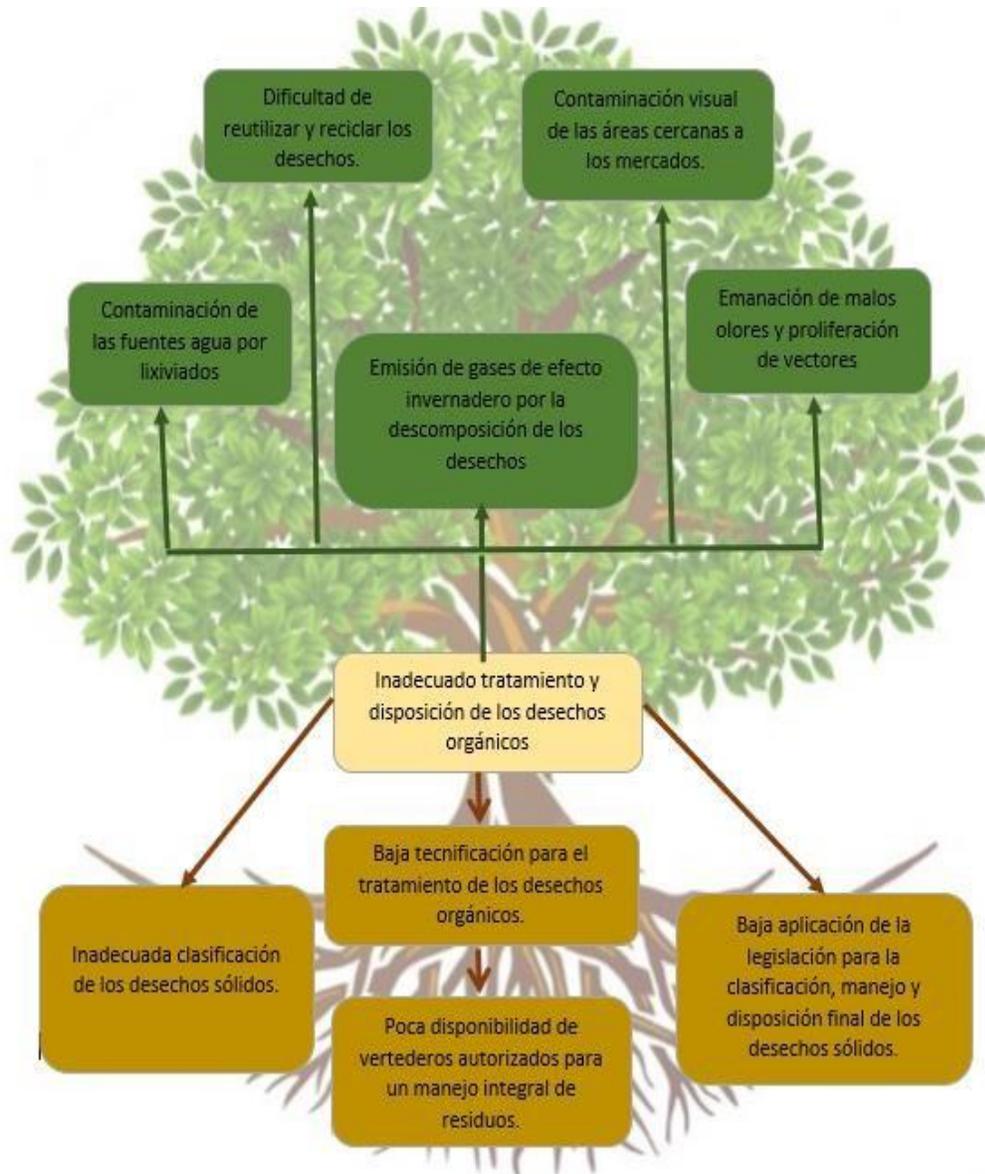
1. Alvarado, C. (2017). *Potencial de producción de biogás de los residuos orgánicos biodegradables de La Terminal zona 4*. (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
2. Alvarez, E. (2018). *Análisis técnico financiero en la implementación de briquetas de aserrín, cáscara de café y olote, para disminuir el consumo de leña en San Juan Sacatepéquez*. (Tesis de maestría). Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala.
3. Calderón, D. (2018). *Análisis técnico-económico del uso de la biomasa generada por la palma de coco (Cocos nucifera) para la reducción del consumo de leña en el municipio de Patulul, Suchitepéquez*. (Tesis de maestría). Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/12114>
4. Dinesha, P., Kumar, S., y Rosen, M. (2019). *Briquetas de biomasa como combustible alternativo*. Estados Unidos: Wiley. Recuperado de doi: <https://doi.org/10.1002/ente.201801011>
5. García, J. P. (2019). *Potencial de biogás producido por la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos en Guatemala*. (Tesis de maestría). Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala.

6. Girón, E. J. (2017). *Elaboración de un plan de manejo integral de residuos sólidos para el vertedero controlado, ubicado en el km22, carretera al Pacífico, Villa Nueva, Guatemala.* (Tesis de maestría). Universidad San Carlos, Guatemala. Guatemala.
7. Hernández, K. R. (2018). *Análisis de eficiencia energética a través de la determinación deñ poder calorífic de la biomasa forestal en forma de briqueta de la especie Eucalyptus Grandis para la región del municipio de Palencia, departamento de Guatemala.* (Tesis de maestría). Universidad San Carlos, Guatemala. Guatemala.
8. Khorasgani, N., Sengul, A., y Asmatulu, E. (junio 2019). *Fabricación de briquetas de biomasa de hierba y hojas de árboles para la producción sostenible de combustibles futuros. Conversión de biomasa y biorefinería,* 2 (1) 915-924. Recuperado de doi: <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00465-7>
9. Kpalo, D. Y., Zainuddin, M., Manaf, L., y Roslán, A. M. (febrero 2021). Evaluación de briquetas híbridas de mazorca de maíz y corteza de tronco de palma aceitera en una aplicación de cocina doméstica para comunidades rurales en Nigeria. *Revista de producción más limpia,* 2 (84), 124-745. Recuperado de doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124745
10. Kpalo, S., Zainuddin, M., Manaf, L. y Roslan, A. (abril 2020). Una revisión de los aspectos técnicos y económicos de la fabricación de briquetas de biomasa. *Sostenibilidad,* 12(11), 46- 49.

11. Lopez, J. y Robalino, M. (2021). *Obtención de biocombustibles sólido a partir de residuos de frutas*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Iquitos. Perú.
12. Lorente, L., Collaguaza, G., Herrera, I., Lastre, A. M. y Cordovés, A. (septiembre 2018). Metodología para la caracterización de los desechos sólidos municipales y asimilables: Caso de estudio Ciudad de Ibarra, Ecuador. *DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, 11(33) 120-138.
13. Magnago, R., Costa, S., Ezirio, M., Saciloto, V., Parma, G., Gasparotto., E., Barcelos, R. (diciembre 2020). Briquetas de cáscara de cítricos y cascarilla dearroz. *Producción más limpia*, (276), 123-135. Recuperado de doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123820>
14. Nikiema, J., Asamoah, B., Egblewogbe, M. N., Akomea-Agyin, J., Cofie, O. O., Hughes, A. F. y Njenga, M. (noviembre 2022). Impacto de la composición del material y la descomposición de los desechos de alimentos en las características de las briquetas de combustible. *Avances en recursos, conservación y reciclaje*, 15 (20), 78-101. Recuperado de doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200095>
15. Pérez, W. E., Menéndez, J. M. y Liquez, C. E. (2017). *Estudio de factibilidad para el aprovechamiento de la biomasa a partir de los desechos sólidos recibidos en el relleno sanitario*. (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Árbol del problema**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Matriz de coherencia

Preguntas de investigación	Objetivos	Variables	Diseño metodológico	Plan de acción
Pregunta principal	Objetivo general			
¿Cuál es el potencial energético que tiene la biomasa residual seca generado en el mercado de la Terminal para la elaboración de briquetas?	Analizar el potencial energético que tiene la biomasa residual seca generada en el mercado de la Terminal para la elaboración de briquetas.	Poder calorífico(kJ/kg)	Método comparativo experimental	
1. ¿Cuánto es el volumen generado de biomasa residual seca con potencial energético?	1. Cuantificar la biomasa residual seca con potencial energético para la formación de briquetas en el mercado La Terminal.	Tipo de desechos generados (kg)	Determinar la biomasa residual seca con potencial energético a través de la revisión bibliográfica.	Realizar una revisión de las referencias bibliográficas (22 días) Compra de equipo necesario (1 día)
		Volumen total de los desechos generados (m ³)	Realizar una cuantificación de la biomasa residual seca generados en una 1 semana en el mercado de La Terminal, a través de la técnica estratificada por muestreo directo	Determinación puestos muestreo (5 días) Muestreo aleatorio (25 días) Cálculo biomasa por día (10 días)
2. ¿Qué proceso es el óptimo para la elaboración de briquetas a partir de biomasa residual seca?	2. Evaluar el proceso de producción de briquetas para el aprovechamiento de la biomasa residual seca.	Humedad de los desechos (%)	Preparación de la biomasa residual *Secado	Preparación biomasa residual (20 días) Equipo: Higrómetro
		Tamaño de partícula (mm)	*Adecuación de tamaño de partícula	Molino
		Tipo de aglutinante (%)	Preparación aglutinante: Trituración de cáscara de papa y plátano. Ensayo de dos aglutinantes	Tamizador Preparación aglutinante (15 días) Equipo: Molino manual Estufa Termómetro
3. ¿Cuál es la eficiencia de las briquetas fabricadas con biomasa	3. Calcular la eficiencia de las briquetas fabricadas con biomasa	Densidad de la briqueta	Briquetaje: Preparación mezcla Realización de briquetas	Briquetaje (20 días) Equipo: Molde para briquetas Gato hidráulico
		Poder calorífico(kJ/kg)	Determinación de la durabilidad de las briquetas	Prueba de durabilidad Equipo: Balanza digital
		Eficiencia de		

Continuación apéndice 1.

residual seca como posible combustible doméstico?	residual seca, como potencial fuente de combustible para uso doméstico.	combustible	Determinación del poder calorífico real de las briquetas fabricadas.	Cálculo del poder calorífico
		Contenido Cenizas		Análisis en el Ministerio de Energía y minas
		Durabilidad	Prueba de WBT Eficiencia energética Contenido de cenizas	Proceso del protocolo WBT Estufa de leña Balanza digital

Fuente: elaboración propia.

