



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL DENSIFICADO DE ASERRÍN
COMO UN BIOCOMBUSTIBLE, PELLET, UTILIZANDO TRES DIFERENTES
AGLUTINANTES: ARCILLA, ALMIDÓN Y YESO**

Josué Fernando Tojes Pacheco

Asesorado por el Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus

Guatemala, junio de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL DENSIFICADO DE ASERRÍN
COMO UN BIOCOMBUSTIBLE, PELLET, UTILIZANDO TRES DIFERENTES
AGLUTINANTES: ARCILLA, ALMIDÓN Y YESO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JOSUÉ FERNANDO TOJES PACHECO

ASESORADO POR EL ING. JORGE EMILIO GODÍNEZ LEMUS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, JUNIO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL I	
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

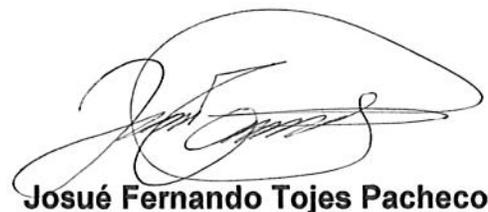
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. César Ariel Villela Rodas
EXAMINADORA	Inga. Adela María Marroquín González
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL DENSIFICADO DE ASERRÍN COMO UN BIOCOMBUSTIBLE, PELLET, UTILIZANDO TRES DIFERENTES AGLUTINANTES: ARCILLA, ALMIDÓN Y YESO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha de noviembre de 2013.



Josué Fernando Tojes Pacheco



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 11 de mayo de 2015

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
Director
Escuela de Ingeniería Química

Respetable Ingeniero Monzón:

Con un cordial saludo me dirijo a su persona para informarle que he asesorado y aprobado el informe final de Trabajo de Graduación titulado: **“CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL DENSIFICADO DE ASERRÍN COMO UN BIOCOMBUSTIBLE, PELLET, UTILIZANDO TRES DIFERENTES AGLUTINANTES: ARCILLA, ALMIDÓN Y YESO”**. Elaborado por el estudiante de Ingeniería Química Josue Fernando Tojes Pacheco con número de carné 201021100. Considero que el informe final de Trabajo de Graduación desarrollado satisface los requisitos exigidos; por lo que solicito se sirva remitirlo para su respectiva revisión.

Agradezco la atención a la presente.

Atentamente,


Ing. Jorge Emilio Godínez Lémus
Colegiado No. 874
ASESOR

Ing. Jorge Emilio Godínez Lémus
INGENIERO QUÍMICO
Colegiado 874



Guatemala, 03 junio de 2015.
Ref. EIQ.TG-IF.031.2015.

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **169-2013** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Josué Fernando Tojes Pacheco**.
Identificado con número de carné: **2010-21100**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

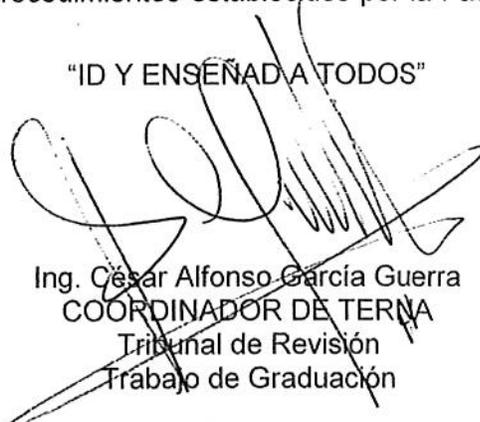
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL DENSIFICADO DE ASERRÍN COMO UN BIOCOMBUSTIBLE, PELLET, UTILIZANDO TRES DIFERENTES AGLUTINANTES: ARCILLA, ALMIDÓN Y YESO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Emilio Godínez Lemus**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑADA TODOS"


Ing. César Alfonso García Guerra
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.084.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **JOSUÉ FERNANDO TOJES PACHECO** titulado: "**CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL DENSIFICADO DE ASERRÍN COMO UN BIOCOMBUSTIBLE, PELLET, UTILIZANDO TRES DIFERENTES AGLUTINANTES: ARCILLA, ALMIDÓN Y YESO**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, junio 2015

Cc: Archivo
VMMV/ale



El Decano 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: **CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL DENSIFICADO DE ASERRÍN COMO UN BIOCOMBUSTIBLE, PELLET, UTILIZANDO TRES DIFERENTES AGLUTINANTES: ARCILLA, ALMIDÓN Y YESO**, presentado por la estudiante universitaria: **Josué Fernando Tojes Pacheco**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'ARS', written over a faint circular watermark of the university seal.

Ing. Angel Roberto Sic Garcia
DECANO

Guatemala, junio de 2015

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por la vida que me ha otorgado y la oportunidad de conocer los misterios de su grandeza.
Mis padres	Orlado Tojes y Gloria Pacheco de Tojes, por su amor, apoyo incondicional y su intachable ejemplo.
Mis hermanos	Christian y Diego Tojes Pacheco, por ser mi apoyo, mi motivación y mi fortaleza.
Mis abuelos	Pedro Pacheco, Román Tojes, Marcela Mencos y Carmen Rodríguez, por ser mi ejemplo a seguir y mis ángeles de la vida.
Mis tíos	Víctor Pérez, Vilma y Alicia Pacheco, por ser una incondicional fortaleza y ayuda durante mi carrera.
Fernando Lorini	Por enseñarme el valor del conocimiento, la vida y el profesionalismo, por ser un gran ejemplo de vida.
Lucia Guerra	Por estar junto a mí en los momentos de triunfos y derrotas, por tu incondicional comprensión.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por forjarme con su inigualable conocimiento, valores y grandeza.
Facultad de Ingeniería	Por ser la responsable de formarme como profesional y ciudadano guatemalteco.
Mis amigos de la Facultad	Por ser, sin lugar a dudas, la mayor fortaleza que pude encontrar, por su paciencia y las noches de estudios.
Sección de Tecnología de la Madera	Por brindarme todas las herramientas necesarias para la realización de este proyecto de investigación.
Ing. Jorge Godínez	Por su invaluable conocimiento y asesorías durante todo el proceso de realización de este proyecto de investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
Hipótesis	XIV
INTRODUCCIÓN	XV
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Bioenergía	5
2.2. Biomasa	6
2.2.1. Tipos de biomasa	6
2.2.1.1. Natural	6
2.2.1.2. Residual	7
2.2.1.3. Biomasa seca y húmeda	8
2.3. Biomasa en Guatemala	8
2.4. Biocombustible	11
2.4.1. Biocombustibles sólidos	11
2.4.1.1. Astillas	12
2.4.1.2. Briquetas	12
2.4.1.3. Pellets	13
2.4.1.4. Carbón vegetal	13
2.5. Densificación de la biomasa	14

2.5.1.	Características energéticas de los densificados	14
2.6.	Pellet	15
2.6.1.	Propiedades	17
2.6.1.1.	Forma y tamaño.....	17
2.6.1.2.	Densidad	18
2.6.1.3.	Humedad	18
2.6.1.4.	Friabilidad	19
2.6.1.4.1.	Friabilidad antes de la combustión	19
2.6.1.4.2.	Método de golpeo contra el suelo	20
2.6.1.4.3.	Método de golpeteo entre sí.....	20
2.6.1.5.	Poder calorífico.....	21
2.6.1.5.1.	Comparación del poder calorífico de los pellets con otros combustibles.....	21
2.7.	Mecanismos de enlace para aglomerados	23
2.8.	Aglutinante	26
2.8.1.	Tipos y propiedades de los aglutinantes	27
2.8.1.1.	Arcilla.....	28
2.8.1.2.	Almidón	29
2.8.1.3.	Yeso	30
2.9.	Proceso de pelletización	30
2.9.1.	Secado	31
2.9.2.	Granulado.....	32
2.9.3.	Pelletizado.....	33
2.9.4.	Enfriado.....	35

2.9.5.	Tamizado	35
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	37
3.1.	Variables	37
3.1.1.	Variables independientes	37
3.1.2.	Variables dependientes.....	38
3.2.	Delimitación del campo de estudio	38
3.3.	Recursos humanos disponibles	39
3.4.	Recursos materiales disponibles	40
3.5.	Técnica cualitativa y cuantitativa.....	41
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	41
3.6.1.	Método de obtención del densificado de aserrín	42
3.6.2.	Método de evaluación de propiedades físicoquímicas y mecánicas.....	43
3.6.3.	Método para determinar calidad de aglutinantes.....	44
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	45
3.7.1.	Tabulación de información	45
3.8.	Análisis estadístico	45
3.8.1.	Determinación del número de repeticiones	46
3.8.2.	Tratamiento estadístico de datos	46
3.8.2.1.	Cálculos estadísticos.....	47
4.	RESULTADOS.....	49
4.1.	Resultado núm.1. Establecer la formulación que proporcione el mejor desempeño de mezclado entre aglutinante-aserrín en la elaboración de pellets.	49
4.2.	Resultado núm. 2. Determinar el poder calorífico del densificado de aserrín como pellet.	53

4.3.	Resultado núm. 3. Evaluar la calidad de los tres aglutinantes a utilizar: almidón, arcilla y yeso.	54
4.4.	Resultado núm. 4. Evaluar las propiedades físicas (densidad y porcentaje de humedad) de los pellets elaborados.	54
4.5.	Resultado núm. 5. Determinar y comparar la cantidad de emisión de ceniza del densificado de aserrín en forma de pellet contra el aserrín sin aglutinantes.	56
4.6.	Resultado núm. 6. Determinar la friabilidad de los pellets, utilizando el método de golpeo entre sí.	57
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	59
	CONCLUSIONES	67
	RECOMENDACIONES	69
	BIBLIOGRAFÍA	71
	APÉNDICES	73
	ANEXOS	85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Pellets.....	16
2.	Tamaño de pellets.....	17
3.	Poder calorífico en función de la humedad.....	22
4.	Mecanismos enlazantes que actúan como dos partículas.....	25
5.	Posibles mecanismos enlazantes que actúan sobre las briquetas	25
6.	Secador.....	32
7.	Molino.....	33
8.	Pelletizadora	34
9.	Enfriador	35
10.	Tamizador	36
11.	Delimitación del campo de estudio.....	39
12.	Obtención del densificado de aserrín	42
13.	Evaluación de propiedades fisicoquímicas y mecánicas	43
14.	Contenido de humedad en función del porcentaje de composición almidón-aserrín	50
15.	Densidad en función del porcentaje de composición almidón-aserrín.....	50
16.	Emisión de cenizas en función del porcentaje de composición almidón-aserrín	51
17.	Friabilidad en función del diámetro de balón	51
18.	Poder calorífico en función del porcentaje de composición almidón- aserrín... ..	52
19.	Aspecto físico de pellets a diferente composición	52

20.	Comparación del poder calorífico de cada porcentaje de composición almidón-aserrín, con el almidón puro y aserrín puro.....	53
21.	Densidad en función del porcentaje de almidón en el pellet.....	55
22.	Contenido de humedad de cada composición de almidón-aserrín, almidón reactivo y aserrín.....	55
23.	Emisión de ceniza de cada porcentaje de composición de almidón-aserrín y aserrín puro	56
24.	Friabilidad de cada porcentaje de composición de almidón-aserrín	57

TABLAS

I.	Energía eléctrica por recurso natural	10
II.	Características físicas, químicas y fisicoquímicas de pellets y briquetas.....	15
III.	Poderes caloríficos y costes indicativos de los combustibles fósiles y de la biomasa	22
IV.	Propiedades generales de pellets	23
V.	Descripción de variables independientes	37
VI.	Descripción de variables dependientes.....	38
VII.	Procedimientos cuantitativos de evaluación.....	44
VIII.	Información de calidad de aglutinantes.....	44
IX.	Tabla de análisis Anova.....	47
X.	Formulaciones elaboradas.....	49
XI.	Composición y características de aglutinantes	54

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
BH	Base húmeda
cm	Centímetro
CH	Contenido de humedad
dm	Decímetro
ρ	Densidad
€	Euro
FR	Friabilidad
gal	Galón
°C	Grados centígrados
kcal	Kilocaloría
kJ	Kilojoule
kJ/kg	Kilojoule por kilogramo
km	Kilómetro
mreal	Masa real
MW	Mega Watt
m	Metro
m³	Metro cúbico
mL	Mililitro
mm	Milímetro
NF	Número de pellets finales
NI	Número de pellets iniciales
Pfinal	Peso final
Pinicial	Peso inicial

P.C.	Poder calorífico
w-%	Porcentaje en peso
s	Segundo
t	Tonelada
Vreal	Volumen real
W	Watt

GLOSARIO

Aeróbico	Vida en un ambiente que contiene oxígeno.
Aglomerante	Se dice de un material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por efectos de tipo exclusivamente físico.
Aglutinante	Material que puede unir, pegar una cosa con otra.
ASTM	Organismo de Normalización de los Estados Unidos de América.
Base húmeda	Se refiere al producto, incluyendo el agua que normalmente posee, en cualquier etapa de un proceso.
Conglomerante	Se dice de un material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por efecto de transformaciones químicas en su masa, que originan nuevos compuestos.
Friabilidad	Cualidad que se disgrega fácilmente.
<i>Fuel oil</i>	Aceite combustible.

Gasóleo	Fracción destilada del petróleo crudo, que se purifica especialmente para eliminar el azufre.
Lignina	Es un polímero presente en las paredes celulares de organismos del reino <i>Plantae</i> .
Lignocelulosa	Es el principal componente de la pared celular de las plantas, esta biomasa producida por la fotosíntesis es la fuente de carbono renovable más prometedora para solucionar los problemas actuales de energía.
Pellet	Es una denominación genérica, utilizada para referirse a pequeñas porciones de material aglomerado o comprimido.
Pirólisis	Descomposición de un compuesto químico por acción del calor.
Polisacárido	Hidrato de carbono formado por una larga cadena de monosacáridos.
Sinterización	Es el tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico o cerámico a una temperatura inferior a la de fusión de la mezcla, para incrementar la fuerza y la resistencia de la pieza creando enlaces fuertes entre las partículas.
Tamiz	Red tensada muy tupida que sirve para hacer pasar por él sustancias y separarlas de las impurezas

RESUMEN

El presente trabajo de graduación tuvo como objetivo principal la caracterización energética de un biocombustible sólido, pellet, por medio del densificado de aserrín, utilizando tres diferentes aglutinantes como la arcilla, almidón y yeso. Se evaluaron las propiedades fisicoquímicas: poder calorífico, densidad, humedad relativa y emisión de ceniza. También, las propiedades mecánicas, como la friabilidad. Por último, se estableció la formulación de mezcla entre aserrín-aglutinante con el mayor desempeño.

Durante la formulación de las mezclas, se obtuvo como resultado que al mezclar el aserrín con el yeso y la arcilla, respectivamente, no se formaba una masa moldeable, ya que no reunía las características de mezclado necesarias para la compresión aplicada con la prensa hidráulica, resultando una formulación sin agua y quebradiza. Por lo tanto solamente se usó el almidón como aglutinante para la elaboración de los pellets.

El densificado de aserrín se llevó a cabo por medio de compresión en frío con una prensa hidráulica, ingresando la mezcla aserrín-almidón en porcentaje v/v, para fines experimentales, de 5 %, 10 % y 20 % de aglutinante por cantidad de biomasa. Sus proporciones homólogas en porcentaje m/m son 15 %, 27 % y 44 %, obteniendo como resultado que la formulación de 27 % es la que mejor desempeño de mezclado homogenizado mostró.

Los pellets se elaboraron utilizando un molde de acero perforado con un diámetro de 1/4 de pulgada, una prensa hidráulica con una fuerza de

compactación de 1,5 toneladas y, luego de obtener el densificado, se cortaron a 4 cm de longitud a temperatura ambiente.

El poder calorífico se evaluó en las instalaciones de Cementos Progreso, en el Laboratorio de Recursos Alternativos. La emisión de ceniza se cuantificó por medio de la combustión, obteniendo como resultado que ambas variables, emisión de cenizas y poder calorífico, tienen un comportamiento decreciente al aumentar el porcentaje de composición aserrín-almidón. La densidad, la friabilidad y el contenido de humedad del pellet también se evaluaron por medio de procedimientos en el Laboratorio Sección de Tecnología de la Madera, ubicado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Se obtuvo un biocombustible sólido, pellet, de aspecto y estructura sólida, uniforme y con una humedad del 13 %, una friabilidad decreciente del 30 % para el porcentaje de composición del 44 % y una friabilidad del 100 % para el porcentaje del 15 %. Una densidad creciente de 672,99 kg/m³ para el porcentaje de composición del 44% y de 483,80 kg/m³ para el porcentaje del 15%. La composición del 27 % fue la que mejor desempeño mostró en las propiedades de poder calorífico y emisión de cenizas.

OBJETIVOS

General

Caracterizar las variables energéticas del densificado de aserrín del pino de ocote (*Pinus tecunumanii*), utilizando tres diferentes aglutinantes: arcilla, almidón y yeso.

Específicos

1. Establecer la formulación que proporcione el mejor desempeño de mezclado entre aglutinante-aserrín en la elaboración de pellets.
2. Determinar el poder calorífico del densificado de aserrín como pellet.
3. Evaluar la calidad de los tres aglutinantes a utilizar, almidón, arcilla y yeso.
4. Evaluar las propiedades físicas (densidad y contenido de humedad) de los pellets elaborados.
5. Determinar y comparar la cantidad de emisión de ceniza del densificado de aserrín en forma de pellet comparado al aserrín sin aglutinantes.
6. Determinar la friabilidad de los pellets, utilizando el método de golpeo entre sí.

Hipótesis

Es posible fabricar un pellet del densificado de aserrín utilizando tres diferentes aglutinantes como arcilla, almidón y yeso.

Hipótesis nula:

H₁: El tipo del aglutinante en la formulación de mezcla del pellet afecta significativamente las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de este.

H₂: El porcentaje de aglutinante en la formulación de mezcla del pellet afecta significativamente las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de este.

Hipótesis alternativa:

H₀: El tipo del aglutinante en la formulación de mezcla del pellet no afecta significativamente las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de este.

H₀: El porcentaje de aglutinante en la formulación de mezcla del pellet no afecta significativamente las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de este.

INTRODUCCIÓN

El aumento considerable de emisiones de gases en la atmósfera a causa de los combustibles fósiles genera una gran contaminación en la atmósfera, haciendo necesaria la formulación de soluciones, una de las más comunes es la utilización de la energía renovable, en específico, la energía a base de biocombustibles.

El pellet es energía renovable (biomasa) que se obtiene de la reconversión de los principales desperdicios de la industria maderera, el aserrín y la viruta.

Durante la última década, se ha desarrollado en Europa y América del Norte un mercado de consumo de bioenergías, amparado principalmente por políticas gubernamentales que priorizan su utilización, en una estrategia de independencia frente a las energías tradicionales y a la sustentabilidad del medio ambiente.

En lo que respecta al mercado europeo de energía para calefacción, el insumo más utilizado es el pellet, que se obtiene a partir del procesamiento industrial de desperdicios de la madera. Este producto logra satisfacer necesidades técnicas, de calidad y conservación del medioambiente.

La quema de pellets no incrementa la emisión de gases del efecto invernadero, incluso reduce esas emisiones porque reemplaza fuentes de energía contaminantes, como el carbón y el petróleo. Los pellets también están siendo muy usados en edificios o residenciales, como hoteles, *resorts*, restaurantes, hospitales, oficinas públicas y escuelas. Incluso, varios países

Europeos, por ejemplo Holanda, tienen normativas que fomentan el uso de pellets en los edificios públicos.

Asimismo, constituye un producto energético renovable y una alternativa de valor a los desperdicios de la industria maderera, debido a que proviene de bosques implantados y renovables.

1. ANTECEDENTES

La investigación y desarrollo de los biocombustibles sólidos ha evolucionado a través del tiempo con mayor incidencia por las condiciones ambientales y el deseo de reducir el uso de combustibles fósiles.

Las investigaciones realizadas específicamente acerca del biocombustible sólido, pellet, se han desarrollado en diferentes partes del continente americano y en España, las cuales se basan en las variables utilizables, los diferentes materiales y la capacidad de poder realizar una planta de pellets.

En el 2000, el Ing. Alejandro Pacheco Quezada realizó una tesis de pregrado en Ingeniería Ambiental titulada *Estudio técnico-económico de la fabricación de pellets de aserrín*. El objetivo de la investigación fue la realización de un estudio técnico-económico sobre fabricación de pellets de aserrín, analizando las variables técnicas y económicas más importantes involucradas para la inversión y operación de una planta de pelletizado de aserrín. Se compararon varios combustibles fósiles con base en el densificado de aserrín. Por último, se determinó y evaluó la inversión requerida para una planta de secado y pelletizado de aserrín, realizando un análisis económico de esta.

En el 2004, el Ing. Ariel Manuel Rojas Valdivia realizó una tesis para optar al título de ingeniero forestal con mención en manejo de recursos forestales titulado *Pre factibilidad técnica y económica para la instalación de una planta de pellets para combustibles a partir de desechos de madera*. El objetivo de la investigación fue la obtención de las variables más importantes y los rubros

financieros necesarios para instalar una fábrica de pellets en Chile, utilizando los residuos obtenidos de la madera.

En el 2008, en Chile, los Ing. Miguel Nuñez y Gerardo Soto, realizaron un artículo titulado *Fabricación de pellets de carbonilla, usando aserrín de Pinus Radiata (D. Don), como material aglomerante*. La investigación se basó en la utilización de carbonilla de carbón vegetal y aserrín de *Pinus radiata* para fabricar pellets, con similares características en peso, volumen y densidad, manteniendo como única variable, la cantidad de aserrín y carbonilla en cada pellet. Además, realizaron estudios de friabilidad y poder calorífico.

En el 2008, en Colombia, las Inga. Gladys Jaramillo Henao y Liliana María Zapata Márquez realizaron una tesis de postgrado de Ingeniería Ambiental con especialización en gestión ambiental titulada *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos*. El estudio se enfocó en la utilización del 70 % del volumen total de desechos generados, potenciando los productos finales de estos procesos y minimizando un gran número de impactos ambientales que conllevan a la sostenibilidad de los recursos naturales. De esta manera, fomentaron el arte sobre el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos.

En el mismo año, en España, el Ing. Luis Ortiz Torres realizó un artículo titulado *Producción de biocombustibles sólidos de alta densidad en España*, este se basa en las principales tecnologías y sistemas existentes en el mercado español para la producción de combustibles biomásicos densificados como las briquetas, los pellets y los gránulos. Asimismo, en este artículo se aportan datos técnicos de productos, características, costes, rendimientos, problemática asociada entre otros.

En Guatemala y realizado en Fiusac, en el 2012, la Inga. Luz María Guevara Abauta realizó una tesis de postgrado en energía y ambiente titulada *Síntesis y cálculos sobre contenido energético, equivalencias energéticas y precios de los combustibles de biomasa en Guatemala, como elemento de decisión para su uso en proyectos energéticos*. Esta trató sobre la síntesis de información disponible en Guatemala sobre combustibles derivados de la biomasa y su situación actual en el mercado energético, utilizando tablas con contenido energético, económico y de equivalencias, con la finalidad de brindar una herramienta que facilite la toma de decisiones objetivas en proyectos energéticos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Bioenergía

La bioenergía o energía de biomasa es un tipo de energía renovable procedente del aprovechamiento de la materia orgánica e industrial formada en algún proceso biológico o mecánico, generalmente, de las sustancias que constituyen los seres vivos (plantas, ser humano, animales, entre otros) o sus restos y residuos. El aprovechamiento de la energía de la biomasa se hace directamente (por ejemplo, por combustión) o por transformación en otras sustancias que pueden ser aprovechadas más tarde como combustibles o alimentos.

No se considera como energía de la biomasa, aunque podría incluirse en un sentido amplio, la energía contenida en los alimentos suministrados a animales y personas, la cual es convertida en energía en estos organismos en un porcentaje elevado, durante el proceso de la respiración celular.

En su más estricto sentido es un sinónimo de biocombustible (combustibles derivados de fuentes biológicas). En su sentido más amplio abarca también la biomasa, el material biológico utilizado como biocombustible, así como la situación social, económica, científica y técnica relacionada con la utilización de fuentes de energía biológica. Hay una ligera tendencia a favor de la bioenergía en Europa, en comparación con los biocombustibles en América del Norte.

2.2. Biomasa

La biomasa puede considerarse como la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. Estos recursos biomásicos pueden agruparse de forma general en agrícolas y forestales. También se considera biomasa a la materia orgánica de las aguas residuales y los lodos de depuradora, así como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) y otros residuos derivados de las industrias.

2.2.1. Tipos de biomasa

Los diferentes tipos de biomasa se clasifican en naturales, residuales, biomasa seca y húmeda.

2.2.1.1. Natural

Es aquella que abarca los bosques, árboles, matorrales, plantas de cultivo, entre otros. Por ejemplo, en las explotaciones forestales se producen una serie de residuos o subproductos con un alto poder energético, que no sirven para la fabricación de muebles ni papel, como las hojas y ramas pequeñas, y que se pueden aprovechar como fuente energética.

Los residuos de la madera se aprovechan para producir energía. De la misma manera, se utilizan como combustible los restos de las industrias de transformación de la madera, como los aserraderos, carpinterías o fábricas de muebles y otros materiales más. Los cultivos energéticos son otra forma de biomasa consistente en cultivos o plantaciones que se hacen con fines exclusivamente energéticos, es decir, para aprovechar su contenido de energía. Entre este tipo de cultivos están, por ejemplo, árboles como los chopos u otras

plantas específicas. A veces, no se suelen incluir en la energía de la biomasa que queda restringida a la que se obtiene de modo secundario a partir de residuos, restos, entre otros.

Los biocarburantes son combustibles líquidos que proceden de materias agrícolas ricas en azúcares, como los cereales (bioetanol) o de grasas vegetales, como semillas de colza o girasol de calabaza (biodiésel). Este tipo también puede denominarse como cultivos energéticos. El bioetanol va dirigido a la sustitución de la gasolina, y el biodiésel trata de sustituir al gasóleo. Se dice que ambos constituyen una alternativa a los combustibles tradicionales del sector del transporte, que derivan del petróleo.

2.2.1.2. Residual

Es aquella que corresponde a los residuos de paja, aserrín, estiércol, residuos de mataderos, basuras urbanas, entre otros.

El aprovechamiento energético de la biomasa residual, por ejemplo, supone la obtención de energía a partir de los residuos de madera y los residuos agrícolas (paja, cáscaras, huesos, entre otros), las basuras urbanas, los residuos ganaderos, como purines o estiércoles, los lodos de depuradora, entre otros. Los residuos agrícolas también se aprovechan energéticamente y existen plantas de aprovechamiento energético de la paja residual de los campos que no se utiliza para forraje de los animales.

Los residuos ganaderos, por otro lado, también son una fuente de energía. Los purines y estiércoles de las granjas de vacas y cerdos pueden valorizarse energéticamente por ejemplo, aprovechando el gas (o biogás) que se produce a partir de ellos, para producir calor y electricidad. De la misma forma, puede

aprovecharse la energía de las basuras urbanas, porque también producen un gas o biogás combustible al fermentar los residuos orgánicos, que se capta y aprovecha energéticamente produciendo energía eléctrica y calor, en plantas de valorización energética de biogás de vertedero.

2.2.1.3. Biomasa seca y húmeda

Según la proporción de agua en las sustancias que forman la biomasa, esta se clasifica en:

- Biomasa seca: madera, leña, residuos forestales, restos de las industrias madereras y del mueble, entre otros.
- Biomasa húmeda: residuos de la fabricación de aceites, lodos de depuradora, purines, entre otros.

Esto tiene mucha importancia respecto al tipo de aprovechamiento y los procesos de transformación a los que es sometida para obtener la energía pretendida.

2.3. Biomasa en Guatemala

Guatemala es un país que cuenta con una gran cantidad de recursos naturales de tipo renovable, los cuales tienen un gran potencial energético. La fuente energética de mayor demanda en el país es la leña; se estima que la cobertura forestal del país alcanza los 37 000 km², o sea, un 34 % de la superficie nacional, con una tasa de deforestación de 2,1 % anual.

En Guatemala se utiliza la biomasa en diversas formas, tal es el caso de la leña, cogeneración con bagazo de caña, biodigestión y otras.

El balance energético nacional muestra que en el consumo nacional de energía, la leña constituye el 63 % del consumo final. Le sigue en importancia el diésel con el 12 %, las gasolinas representan el 8 %, seguidamente están el *fuel oil* y la electricidad con el 4 % respectivamente, y finalmente, el bagazo de caña y el gas licuado de petróleo (gas propano) con el 3 %.

El alto consumo de leña obedece a que la mayor parte de la población vive en el área rural y es, en su mayoría, de escasos recursos económicos, lo que le impide tener acceso y disponibilidad a otras fuentes energéticas. Además, existe una tradición cultural que se refleja en los hábitos alimenticios: la utilización del tipo de estufa denominada Tres Piedras para cocinar, las ollas de barro adecuadas para este fuego abierto, el sabor de los alimentos y la relativa disponibilidad del recurso.

La leña como combustible es utilizada de forma ineficiente, el 81 % de los hogares que la consumen utilizan la estufa de Tres Piedras, la cual desaprovecha casi el 90 % de la energía consumida. Cabe mencionar en este punto que en los poblados con bajas temperaturas, el calor que desaprovecha este tipo de estufa, es aprovechado para mantener una temperatura confortable en el interior de las viviendas.

En materia de biodigestión anaeróbica, se han construido alrededor de 800 biodigestores de tipo familiar en el área rural, pero estos no han sido operados correctamente, y se han aprovechado más los beneficios del bioabono que los propiamente energéticos. La mayoría de estos biodigestores son de tipo chino.

La única fuente biomásica que se ha utilizado para la producción de energía eléctrica en Guatemala, ha sido el bagazo de caña de azúcar.

Se estima que los recursos naturales del país para la generación de energía eléctrica son los siguientes:

Tabla I. **Energía eléctrica por recurso natural**

Recurso	Disponible	Aprovechado
Hidroeléctrico	10.890 MW	424,6 MW
Geotérmico	700 MW	0 MW
Bagazo de caña	3 x 10 ⁶ t	7 x 10 ⁵ t
Alcohol carburante	12 x 10 ⁶ gal	0 gal

Fuente: *Guatemala*. <http://www.fao.org/docrep/T2363s/t2363s0w.htm#TopOfPage>. Consulta: 10 de noviembre de 2013.

Guatemala depende en un 80 % de la energía eléctrica que le provee el sector público, el Instituto Guatemalteco de Electrificación (INDE) y la Empresa Eléctrica de Guatemala, S. A. (EEGSA), quienes suministran en conjunto alrededor de 653 MW. Por otro lado, el sector privado colabora con el restante 20 %, que son 170 MW en este año, totalizando 823 MW de potencia disponible para el país.

En Guatemala, la electricidad se genera básicamente por medio de las centrales hidroeléctricas, con un porcentaje de capacidad instalada del 52 %, las centrales térmicas con un 40 % y los cogeneradores con el restante 8 %.

El servicio eléctrico ha alcanzado una cobertura del 42 %, siendo una de las más bajas de Latinoamérica. El consumo per cápita es de 205 kilovatios-hora anuales.

2.4. Biocombustible

Es el término con el cual se denomina a cualquier tipo de combustible que derive de la biomasa, organismos recientemente vivos o sus desechos metabólicos, como el estiércol de la vaca. Es una fuente renovable de energía, a diferencia de otros recursos naturales como el petróleo, el carbón y los combustibles nucleares.

Los combustibles de origen biológico pueden sustituir parte del consumo de combustibles fósiles tradicionales, con la ventaja de que son renovables y tienen bajo impacto en el deterioro ambiental.

2.4.1. Biocombustibles sólidos

Son aquellos productos derivados de la biomasa sólida que son susceptibles de utilización directa en los procesos de conversión energética y que se obtienen mediante transformaciones, generalmente de naturaleza física, tales como astillado, molienda y secado.

Dentro del grupo de los biocombustibles sólidos, los más importantes son los de tipo primario, constituidos por materias lignocelulósicas procedentes del sector agrícola o forestal y de las industrias de transformación que producen residuos de dicha naturaleza. La paja y los restos de poda de vid, olivo y frutales, la leña, las cortezas y los restos de podas y aclareos de las masas forestales son materia típica para elaboración de biocombustibles sólidos de origen agrario.

También las cáscaras de frutos secos y huesos de aceituna y otros frutos, los orujillos procedentes de la extracción del aceite de orujo en las almazaras y los restos de las industrias del corcho, la madera y el mueble, serían una buena materia prima para la fabricación de biocombustibles sólidos.

Aunque una parte importante de los biocombustibles sólidos se utilizan directamente, como la leña en hogares y chimeneas, la utilización energética moderna de los biocombustibles sólidos requiere un acondicionamiento especial para su uso como combustible. Las formas más generalizadas de utilización de este tipo de combustibles son: astillas, serrín, pellets y briquetas (los dos últimos suponen un proceso de densificación del material molido previamente).

2.4.1.1. Astillas

Constituyen un material adecuado para emplearse en hornos cerámicos y de panadería, viviendas individuales medianas y grandes, calefacción centralizada de núcleos rurales o pequeñas industrias. El astillado es una operación que se realizan en campo y que permite convertir en astillas los restos leñosos de los tratamientos silvícolas, de las operaciones de corte de madera o de la poda de árboles de cultivos leñosos.

La molienda de la biomasa es una operación imprescindible cuando se desea obtener combustibles más finos que las astillas para quemadores específicos (que necesitan inyectores, por ejemplo).

2.4.1.2. Briquetas

Las briquetas son cilindros de 50 a 130 mm de diámetro y de longitud variable de 5 a 30 mm. Tienen una densidad elevada (entre 1 000 y 1 300 kg/m³)

y se fabrican por medio de prensas, en las que el material es sometido a altas presiones y se calienta, produciendo en su interior procesos termoquímicos que generan productos adherentes que favorecen la cohesión del material. También se pueden añadir adherentes artificiales para facilitar la cohesión del material y reducir la presión de prensado. Es una forma normal de tratar el aserrín procedente de las industrias del mueble y la madera.

2.4.1.3. Pellets

Son cilindros más pequeños que las briquetas, con dimensiones entre 7 y 20 mm de diámetro y de 25 a 60 mm de longitud. Se preparan mediante prensas de granulación, análogas a las utilizadas para la fabricación de los piensos compuestos. La compactación se consigue de forma natural o mediante la adición de materiales que no contengan compuestos contaminantes en la combustión. La materia prima, al igual que en el caso de las briquetas, debe tener una granulometría y humedad reducidas. Es un producto muy manejable que sirve para automatizar instalaciones de pequeño o mediano tamaño.

2.4.1.4. Carbón vegetal

El carbón vegetal se obtiene por un tratamiento de la biomasa leñosa, consistente en una combustión lenta y parcial de biomasa con cierto contenido en humedad, a una temperatura variable entre 250 y 600 °C. Como producto de la pirólisis se forma también un conjunto de aceites pesados y de elementos de naturaleza diversa que se aglutinan, denominados breas o aceites de pirólisis, los cuales se utilizan para fines energéticos en sustitución de combustibles líquidos.

2.5. Densificación de la biomasa

La densificación de la madera es un proceso de compresión y compactación de la biomasa residual (aserrines, virutas, astillas y leñas), que permite aumentar su densidad y modificar sus propiedades fisicoquímicas para obtener un combustible de características más eficientes y de fácil almacenamiento.

En vista de que los subproductos generados en las industrias de transformación y elaboración secundaria de la madera ocupan volúmenes de hasta el 25-30 % de la materia prima utilizada, el proceso de densificación permitirá almacenar considerables cantidades de energía reduciendo la necesidad de espacio y posibilitando que se mantenga siempre seca fácilmente.

2.5.1. Características energéticas de los densificados

Los productos obtenidos de la densificación de residuos son principalmente los pellets y las briquetas. Las características energéticas que posee cada uno de estos productos densificados no difieren en consideración.

Las briquetas y pellets de aserrín compactado poseen mayor poder calorífico que la leña tradicional, encienden más rápido, no sueltan humos ni olores y su uso evita la tala indiscriminada de árboles.

Las principales características físicas, químicas y fisicoquímicas que influyen en el comportamiento energético de los densificados están recogidas en la tabla siguiente:

Tabla II. **Características físicas, químicas y físicoquímicas de pellets y briquetas**

Físicas	1. Forma
	2. Tamaño
	3. Aspecto (color, brillo)
	4. Densidades	kg/dm ³
	5. Humedades	%
	6. Friabilidad	índice
Químicas	1. Composición química elemental	%
	2. Composición química por compuestos	%
	3. Poderes caloríficos	kJ/kg, kcal/kg
Físico - químicas	1. Coeficiente de conductividad térmica	W/m.s
	2. Combustibilidad e inflamabilidad: Temperaturas y tiempos de combustión e inflamación	°C, s
	3. Temperatura máxima de llama	°C
	4. Potencia calorífica	J/(kg.s) = W/kg kJ/dm ³
	5. Densidad energética	

Fuente: ARPI, Jorge, CALDERÓN, Cristian. *Diseño de una máquina pellitizadora en base a la disponibilidad de residuos madereros de la ciudad de Cuenca para su aprovechamiento energético.* p. 56.

2.6. Pellet

Es un biocombustible estandarizado, cilíndrico, hecho por la compresión de virutas, aserrines y astillas molidas, procedentes de residuos de madera de aserríos, industrias forestales, industrias agroforestales, empresas de mobiliario de madera e, incluso, molduras y puertas.

Al estar compuesto solo de madera, el balance de emisiones de CO₂ del pellet es neutro, lo que equivale a decir que el CO₂ emitido en la combustión es el que ha absorbido el árbol al crecer y que volverá a absorber el que crezca en su lugar. Por lo tanto, la combustión con pellet colabora en la reducción de los gases de efecto invernadero en la atmosfera, ayudando en el cumplimiento del protocolo de Kyoto.

Además, los pellets son el combustible más estandarizado con alta fiabilidad de operación, debido al menor requerimiento de espacio para el almacenamiento en comparación con otras biomásas. La producción de este biocombustible se realiza con alta presión y vapor de agua, no hay que utilizar ningún tipo de aglutinante (la propia lignina hace de aglutinante), porque de lo contrario no se estaría hablando de un producto ecológico.

El pellet se fabrica mediante prensado de aserrín, donde la propia lignina hace de aglomerante. No se necesita ni pegamento ni ninguna otra sustancia más que la misma madera. Este proceso les da una apariencia brillante como si estuviesen barnizados y los hace más densos.

Figura 1. **Pellets**



Fuente: ARPI, Jorge; CALDERÓN, Cristian. *Diseño de una máquina pelletizadora en base a la disponibilidad de residuos madereros de la ciudad de Cuenca para su aprovechamiento energético*. p. 61.

2.6.1. Propiedades

Las propiedades de los pellets se clasifican en forma, tamaño, densidad, humedad, friabilidad y poder calorífico.

2.6.1.1. Forma y tamaño

El pellet tiene forma cilíndrica y siempre se fabrica de menor tamaño que la briqueta, para ser manipulado con medios mecánicos en forma más rápida y eficiente, y por lo tanto, facilitar y abaratar su movimiento y la carga automática en las calderas.

El diámetro del pellet no debe superar los 25 mm, siendo los diámetros más normales los que oscilan entre 5 y 22 mm. La longitud del pellet es variable y depende de cada fabricante, sin embargo oscila entre 10 y 30 mm, aunque pueden alcanzar longitudes de hasta 7 cm.

Figura 2. Tamaño de pellets



Fuente: ARPI, Jorge, CALDERÓN, Cristian. *Diseño de una máquina pellitizadora en base a la disponibilidad de residuos madereros de la ciudad de Cuenca para su aprovechamiento energético.* p. 6.

2.6.1.2. Densidad

La principal característica de los pellets es que son más densos. Al tener mayor densidad, este producto se transportará ocupando menos volumen (a igualdad de peso) que las leñas y astillas, y será más sencilla su manipulación.

La densidad específica no es una variable cuyo valor pueda modificarse, como ocurre con la humedad o la granulometría. Es una característica propia de cada materia a procesar. Cuanto más denso sea el material, más resistencia a la compresión ofrece, obligando a aplicar más presión para conseguir los mismos grados de compactación.

En los pellets deben considerarse dos valores de la densidad: la densidad real y la densidad aparente.

$$\rho = \frac{m_{Real}}{v_{Real}} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

2.6.1.3. Humedad

La humedad del pellet es muy importante desde el punto de vista del aprovechamiento energético, pues es la que más influye en el poder calorífico de los biocombustibles, junto a la especie a la que pertenecen los residuos. Por encima de un contenido de humedad del 30 % (en base humedad; BH), no es posible formar un densificado cohesionado a partir de residuos forestales o leñosos. Por otra parte, al disminuir la resistencia de la madera a la compresión con la humedad, la energía específica de densificación también disminuye. Por eso, intentar densificar madera con humedad por debajo del 6% (BH), obliga a aplicar mucha energía y con ello un coste energético elevado. La producción de una tonelada de pellets requiere alrededor de 10 m³ de estéreo de virutas cuyo

contenido de humedad varía entre 10-15 %, este contenido de humedad es el óptimo para la producción de pellets. Rangos de humedad por encima o por debajo de estos valores, crean dificultades en el proceso de compactación, donde el exceso o defecto de agua genera grietas y deformaciones en los densificados. Para calcular el contenido de humedad se utiliza la ecuación:

$$CH = \frac{P_{inicial} - P_{seco}}{P_{seco}} * 100$$

2.6.1.4. Friabilidad

Se relaciona con la capacidad de los pellets para resistir los golpes y abrasión sin que se desmoronen durante el proceso de manufactura, empaque, transporte y uso por parte del consumidor.

La friabilidad es una variable muy importante en los pellets pues se están manipulando continuamente y chocando unos con otros. La friabilidad del pellet puede ser considerada en dos casos:

- La resistencia al golpeteo en el movimiento de pellets.
- La resistencia a disgregarse (friabilidad) cuando el pellet está en el hogar, horno o parrilla, también llamada friabilidad en la combustión.

2.6.1.4.1. Friabilidad antes de la combustión

Para evaluar la friabilidad de los pellets, se proponen dos métodos de ensayo:

- Método del golpeo contra el suelo
- Método del golpeteo entre sí

2.6.1.4.2. Método de golpeo contra el suelo

Este método está basado en la rotura de pellets por golpeo contra el suelo. En esencia, consiste en dejar caer sobre el suelo cerámico, desde una altura de 100 cm, 100 pellets y contar el número de pellets que se rompen en 2, 3, 4, 5 o más trozos, y obtener a partir de esos resultados un índice de friabilidad FR_1 . Este método es sencillo pero poco confiable. Para calcular el índice de friabilidad (FR) se utiliza la siguiente ecuación:

$$FR_1 = \frac{NF}{NI}$$

El valor del índice FR_1 es siempre menor o igual a 1. A mayor valor de FR_1 , mayor será la friabilidad y, por lo tanto, menor la resistencia al golpeo.

2.6.1.4.3. Método de golpeteo entre sí

Este método se basa en la rotura de pellets por golpeteo entre ellos. Consiste en introducir en un recipiente de dimensiones estandarizadas pellets o briquetas enteros, contando el número de pellets o briquetas introducidos al inicio del ensayo (NI) y tenerlos vibrando un tiempo determinado en condiciones también estandarizadas en dicho recipiente. Pasado ese tiempo se cuenta el número de pellets finales (NF).

$$FR_2 = \frac{NF}{NI}$$

El valor del índice FR_2 , es siempre menor o igual a 1. A mayor valor de FR_2 mayor será la friabilidad y, por lo tanto, menor la resistencia al golpeteo.

2.6.1.5. Poder calorífico

La cantidad de energía desprendida por un kilogramo de pellets al quemarse, conocida como poder calorífico, es una de las principales características que poseen los pellets.

El poder calorífico está en función del material de procedencia. Si se supone que es madera y corteza sin aditivos, su poder calorífico será el de la madera de la que proviene. Si el pellet incluye restos de lijado, el poder calorífico es menor, pues aparecen los áridos de la lijadora. Estos áridos también darán lugar a un mayor porcentaje de cenizas en la combustión.

Sin embargo, como el poder calorífico es inferior en función de la humedad del pellet y como están más secos que las astillas, se puede concluir que su poder calorífico es mayor. En la figura 3 se puede observar la variabilidad del poder calorífico en función de la humedad.

2.6.1.5.1. Comparación del poder calorífico de los pellets con otros combustibles

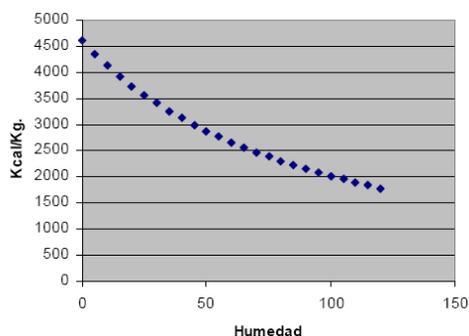
En la tabla III se puede apreciar la diferencia que existe entre el poder calorífico y el costo del pellet en comparación con otros combustibles fósiles y leña en Europa, considerado como el continente con los mayores índices de producción de pellets en el mundo.

Tabla III. **Poderes caloríficos y costes indicativos de los combustibles fósiles y de la biomasa**

Combustibles fósiles	P.C. neto KWh/kg	Coste €/kg	Litro equivalente gasóleo		Litro equivalente GPL		Metro cúbico equivalente metano	
			kg	€	kg	€	kg	€
Gasóleo	11,7	0,990	0,83	0,83	0,62	0,61	0,83	0,82
Metano	13,5	0,720	0,73	0,52	0,54	0,39	0,72	0,52
GPL	12,8	1,097	0,76	0,84	0,57	0,62	0,75	0,83
Combustibles de biomasa	P.C. neto KWh/kg	Coste €/kg	Litro equivalente gasóleo		Litro equivalente GPL		Metro cúbico equivalente metano	
			kg	€	kg	€	kg	€
Leña para quemar 25% humedad	3,5	0,103	2,79	0,29	2,07	0,21	2,76	0,28
Leña para quemar 35% humedad	3,0	0,093	3,31	0,31	2,45	0,23	3,27	0,30
Leña para quemar 45% humedad	2,4	0,077	4,08	0,32	3,02	0,23	4,03	0,31
Pellet de madera humedad máx. 10%	4,9	0,180	2,00	0,36	1,48	0,27	1,98	0,36

Fuente: ARPI, Jorge, CALDERÓN, Cristian. *Diseño de una máquina pellizadora en base a la disponibilidad de residuos madereros de la ciudad de Cuenca para su aprovechamiento energético.* p. 68.

Figura 3. **Poder calorífico en función de la humedad**



Fuente: ARPI, Jorge, CALDERÓN, Cristian. *Diseño de una máquina pellizadora en base a la disponibilidad de residuos madereros de la ciudad de Cuenca para su aprovechamiento energético.* p. 67.

El valor aproximado del poder calorífico del pellets 4 500 kcal/kg, tomando en cuenta un 10 % de humedad.

Tabla IV. **Propiedades generales de pellets**

Propiedades generales *	Pellets
Diámetro (mm)	6
Densidad (Kg/m ³)	650-700
Poder calorífico (MJ/Kg)	>18
Humedad (<)	<10%
Cenizas	<0,5%

* Estas son las propiedades generales de los pellets, no implica que todas las marcas cumplan las mismas condiciones.

Fuente: RODRIGUEZ, Helena. *Calefacción con estufas y calderas de pellets*.
<http://www.mimbrea.com/calefaccion-con-estufas-y-calderas-de-pellets/>. Consulta: 12 de noviembre 2013.

2.7. Mecanismos de enlace para aglomerados

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

Los puentes sólidos se forman entre partículas por medio de la sinterización de minerales, la cristalización de sustancias disueltas durante el secado, como sucede en la granulación de fertilizantes y en el endurecimiento de los agentes de enlace tales como las gomas y resinas. Entre los subgrupos están: puentes minerales, puentes sinterizados, reacción química, fusión parcial, endurecimiento de ligantes, entre otros.

El enlace de líquidos móviles genera la cohesión por medio de fuerzas interfaciales y la succión capilar. Por contraste, los puentes de líquidos inmóviles formados con materiales altamente viscosos, como el asfalto o el alquitrán, generan fallas fisurando el enlace más débil. Entonces, las fuerzas de adhesión y cohesión se aprovechan plenamente, y la capacidad de aglutinación es mucho mayor. Entre los subgrupos están: puentes líquidos y fuerzas capilares en la superficie de agregados rellenos con líquido.

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

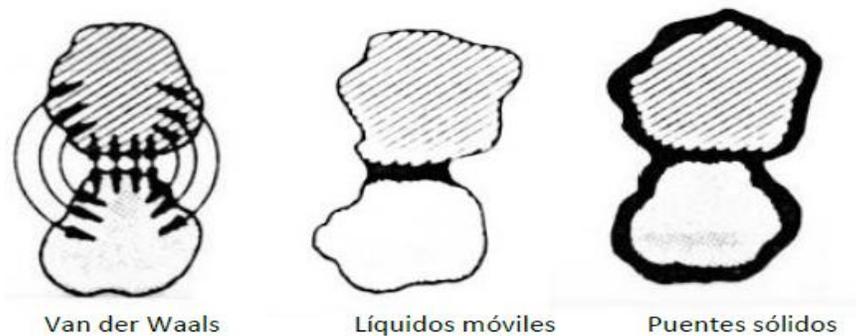
La interconexión mecánica de las partículas ocurre durante la agitación o compresión de partículas fibrosas; pero es probablemente solo un contribuyente menos de la fuerza de conglomeración en la mayoría de los casos.

Figura 4. **Mecanismos enlazantes que actúan como dos partículas**



Fuente: FONSECA, Edison; TIERRA, Luis. *Desarrollo de un proceso tecnológico para la obtención de briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz y pruebas de producción de gas pobre.* p. 28.

Figura 5. **Posibles mecanismos enlazantes que actúan sobre las briquetas**



Fuente: FONSECA, Edison; TIERRA, Luis. *Desarrollo de un proceso tecnológico para la obtención de briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz y pruebas de producción de gas pobre.* p. 29.

2.8. Aglutinante

Los aglutinantes (ligantes, aglomerantes) son sustancias que son capaces de generar fuerzas para unir fragmentos, partículas de una o varias sustancias o materiales y dar cohesión al conjunto por métodos físicos, químicos o térmicos.

Tienen importancia particularmente en la industria aeronáutica, en la construcción, en lugares donde se necesite fiabilidad de las uniones, en la fabricación de briquetas de material orgánico (biomasa) como cascarilla de arroz, aserrín, cáscara de café, entre otros; es muy importante su empleo, en pinturas y en carpintería.

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

- Fácil preparación
- Fácil aplicación
- Fácil obtención
- Costo relativamente bajo
- No ser contaminante durante su combustión
- Al entrar en contacto con la piel no debe ser nocivo
- Facilidad de mezclado con la materia prima
- Debe poseer buenas propiedades de adhesión
- Presentar resistencia mecánica considerable

2.8.1. Tipos y propiedades de los aglutinantes

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

Los aglutinantes pueden clasificarse en: combustibles y no combustibles. Son combustibles: las resinas naturales y sintéticas, alquitrán, estiércol animal, manteca, aguas servidas, residuales o barro, gelatina, papel, restos y residuos de pescado, algas y almidones, entre otros. Entre los no combustibles están: limo, arcilla, barro, cemento, cal, entre otros.

También se pueden clasificar en orgánicos e inorgánicos. Son orgánicos: albuminatos, alcoholes, almidones, alquitranes, azúcares, breas, caseína, cola, dextrina, gelatinas, humatos, ligninas-lignosulfonatos, melazas, papel, aserrín, resinas, turba; y entre los inorgánicos: alumbre, arcillas, bentonita, borato de sodio, cal y cal hidratada, cemento, cloruro de magnesio, escayola, silicato de sodio, sílice y yeso.

De los aglutinantes citados, no todos son adecuados para la fabricación de briquetas combustibles por diversos factores. Generalmente entre los más comunes para este fin están:

- Almidones de yuca, maíz, arroz
- Resinas (cola blanca)
- Melaza

- Parafina
- Arcillas
- Alquitrán

En la briqueta, la misión del aglutinante es mantener unidas las partículas durante su secado, almacenamiento y posterior uso, sin presentar problemas de disgregación.

2.8.1.1. Arcilla

Está constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratados, procedentes de la descomposición de minerales de aluminio. Presenta diversas coloraciones según las impurezas que contiene, siendo blanca cuando es pura. Surge de la descomposición de rocas que contienen feldespato, originada en un proceso natural que dura decenas de miles de años.

Físicamente se considera un coloide de partículas extremadamente pequeñas y superficie lisa. El diámetro de las partículas de la arcilla es inferior a 0,002 mm. En la fracción textural arcilla puede haber partículas no minerales, los fitolitos. Químicamente es un silicato hidratado de alúmina, cuya fórmula es: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

Se caracteriza por adquirir plasticidad al ser mezclada con agua, y también sonoridad y dureza al calentarla por encima de 800 °C. La arcilla endurecida mediante la acción del fuego fue la primera cerámica elaborada por los seres humanos, y aún es uno de los materiales más baratos y de uso más amplio. Ladrillos, utensilios de cocina, objetos de arte e incluso instrumentos musicales, como la ocarina, son elaborados con arcilla. También es utilizada en muchos

procesos industriales, como en la elaboración de papel, producción de cemento y procesos químicos.

2.8.1.2. Almidón

El almidón es un polisacárido, más específicamente un homopolisacárido, de reserva energética predominante en las plantas, constituido por la unión de grandes cantidades de monómeros de glucosa.

El almidón se encuentra en los amiloplastos de las células vegetales, sobre todo en las semillas, las raíces y los tallos, incluidos los tubérculos. También aparece en algunos protocistas.

El almidón está formado por dos compuestos de diferente estructura:

- **Amilosa:** está formada por glucopiranosas unidas por centenares o miles (normalmente de 300 a 3 000 unidades de glucosa) mediante enlaces hemiacetalicos α -(1-4), en una cadena sin ramificar. Esta cadena adopta una disposición helicoidal y tiene seis monómeros por cada vuelta de hélice. Suele constituir del 25 al 30 % del almidón.
- **Amilopectina:** constituye el 70-75 % restante. También está formada por glucopiranosas, aunque en este caso conforma una cadena altamente ramificada en la que hay uniones hemiacetalicos, α -(1-4) y α -(1-6), como se indicó en el caso anterior, y muchos enlaces, α -(1-6), que originan lugares de ramificación cada doce monómeros. Su peso molecular es muy elevado, ya que cada molécula suele reunir de 2 000 a 200 000 unidades de glucosa.

2.8.1.3. Yeso

Es la roca natural denominada aljez (sulfato de calcio dihidrato: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), mediante deshidratación, a la que puede añadirse en fábrica de otras sustancias químicas para modificar sus características de fraguado, resistencia, adherencia, retención de agua, y densidad, que una vez amasada con agua, puede ser utilizada directamente.

También se emplea para la elaboración de materiales prefabricados. El yeso, como producto industrial, es sulfato de calcio hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), también llamado vulgarmente yeso cocido. Se comercializa molido, en forma de polvo. Una variedad de yeso, denominada alabastro, se utiliza profusamente por su facilidad de tallado, para elaborar pequeñas vasijas, estatuillas y otros utensilios.

El yeso proviene del mineral del mismo nombre y se obtiene por medio de un proceso que elimina la mayor parte de la humedad, dando como resultado un polvo blanco y suave que se endurece o fragua al mezclarlo con el agua.

Se suele emplear para recibir los ladrillos de los muros internos, recubrir tabiques y las techumbres (enlucido). Este material proporciona unas superficies suaves y lisas sobre las que se puede pintar y empapelar con facilidad. También se utiliza como aislante térmico y acústico o para construir elementos prefabricados como planchas, paneles, molduras, entre otros.

2.9. Proceso de pelletización

Es un proceso de compactación del material lignocelulósico de determinadas condiciones (granulometría y humedad menor del 12 %) para

obtener cilindros de diámetro entre 7 y 22 mm y de longitud entre 2,2 cm a 7,0 cm. La compactación facilita la manipulación, disminuye los costos de transporte y aumenta el valor energético por unidad de volumen. Cabe destacar que si la manipulación y el transporte fueran problemas menores, sería conveniente utilizar directamente los residuos o leña triturada, evitando el costo de transformación.

El proceso básico de producción de pellets comprende las siguientes etapas: secado de la materia prima, martillado o granulado de la materia prima, pelletizado propiamente dicho, enfriado y separación de partículas finas y embalaje.

2.9.1. Secado

El secado no se necesita si la materia prima consiste de virutas y aserrín seco. Sin embargo, si se usa aserrín húmedo, este debe ser secado previo a ser granulado (afinado). Este secado puede hacerse por diferentes sistemas y los puntos principales a tener en cuenta son el costo de secado, ya que se estaría usando energía para producir energía, y la calidad del secado para preservar las características de la materia prima necesarias para su posterior pelletización.

Otro parámetro muy importante para la producción de pellets es el índice de humedad en la biomasa. El sistema de secado Lippel seca la materia prima antes del proceso de trituración fina, transportando neumáticamente la materia a través de una corriente de gases calientes, asegura un producto homogéneamente seco por un proceso de secado por conducción de calor, hasta alcanzar cerca del 10 % de humedad residual. El secador necesita de un generador para producir aire caliente, más específicamente, el calor para realizar el proceso de secado. Se puede utilizar aserrín o chips como combustible para los quemadores.

Figura 6. **Secador**



Fuente: *Innovación tecnológica*. <http://www.lippel.com.br/es/unidades-de-produccion/unidades-de-produccion/fabrica-de-pellets.html>. Consulta: 15 de noviembre de 2013.

2.9.2. Granulado

En este proceso, la materia prima tiene que ser llevada a un tamaño o granulometría de al menos el diámetro del pellet a producir. Normalmente, se usa en este proceso un molino de martillo y lo que se busca es conseguir un material lo más uniforme posible. El tamaño recomendado de la materia prima a granular suele ser de 20x40x3 mm.

El refinado y secado de la materia prima es combinado. En un molino de secado, el martillado cambia los tamaños de las partículas que a su vez son secadas. El martillado de la materia prima facilita mucho el proceso de secado. Esto permite obtener partículas de igual tamaño y que tengan el mismo contenido de humedad. Al ser el contenido de humedad de todas las partículas homogéneo, los pellets que se producen son más resistentes y durables.

Es recomendado triturar la materia prima en un molino de martillo para obtener pellets homogéneos (2 mm), porque en grandes superficies las fibras de los productos molidos facilitan la absorción de vapor en el mezclador en cascada (condicionador).

Figura 7. **Molino**



Fuente: *Innovación tecnológica*. <http://www.lippel.com.br/es/unidades-de-produccion/unidades-de-produccion/fabrica-de-pellets.html>. Consulta: 15 de noviembre de 2013.

2.9.3. Pelletizado

Este proceso se suele hacer en dados planos o verticales y se suele agregar un porcentaje muy bajo de aditivo natural, ya que el pellet se forma por la cohesión de los rodillos sobre la materia prima que la fuerza sobre los dados, por las partes fibrosas de las partículas y, principalmente, por el aglutinamiento causado por la lignina que es ablandada por el calor que produce la compresión al momento del pelletizado.

La temperatura del material de madera triturado/apretado en la máquina pelletizadora aumenta y el material natural aglutinante, la lignina, se derrite y

aglutina el pellet cuando este es enfriado, de ahí que el pellet no obtiene dureza hasta una vez enfriado. Se debe elegir el tipo de dados caso por caso, dependiendo de la calidad y propiedades de la materia prima que se va a pelletizar (dureza, humedad, composición, entre otros). A este proceso se le puede agregar vapor para facilitar el pelletizado y a efectos de mejorar los rendimientos de las pelletizadoras. El agregado de diferentes tipos de almidones suele ser en proporciones no mayor al 2 %.

Estos se agregan en el proceso de pelletizado para lograr un mejor aglutinamiento del pellet y en la búsqueda de obtener un pellet lo más resistente posible a todo tipo de manipulación que va a experimentar hasta ser consumido. Los almidones a usar pueden ser de papa, maíz, trigo, mandioca, entre otros.

Figura 8. **Pelletizadora**



Fuente: *Innovación tecnológica*. <http://www.lippel.com.br/es/unidades-de-produccion/unidades-de-produccion/fabrica-de-pellets.html>. Consulta: 15 de noviembre de 2013.

2.9.4. Enfriado

Esta etapa es muy importante en todo el proceso de producción de pellets. Luego de la compresión o pelletización, la temperatura de los pellets es alta (usualmente aproximadamente a 90 °C). El enfriado estabiliza a los pellets y endurece la lignina derretida en su superficie, manteniendo la forma de los pellets se mantiene sin cambios. El enfriamiento ocurre a través de la retirada del aire ambiente, provocando una temperatura entre 5 – 10 °C por encima de la temperatura ambiente.

Figura 9. **Enfriador**



Fuente: *Innovación tecnológica*. <http://www.lippel.com.br/es/unidades-de-produccion/unidades-de-produccion/fabrica-de-pellets.html>. Consulta: 15 de noviembre de 2013.

2.9.5. Tamizado

En el tamizado, el polvo de la materia prima, mezclado entre los pellets, es separado y devuelto al proceso de pelletizado. El tamizado y clasificado es usualmente realizado con un tamizador con sistema de vibrado para asegurar un producto homogéneo, para evitar que no cause problemas en el manejo y

traslado del producto, como en los equipos de combustión. Finalmente los pellets son transportados a un silo. Este silo puede variar en sus dimensiones o volúmenes dependiendo si los pellets luego son cargados directamente en camiones, embolsados en bolsas de 15 a 20 kg o en *big bags* (que pueden contener de 500 kg a 1 000 kg.).

Figura 10. **Tamizador**



Fuente: *Innovación tecnológica*. <http://www.lippel.com.br/es/unidades-de-produccion/unidades-de-produccion/fabrica-de-pellets.html>. Consulta: 15 de noviembre de 2013.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

La producción de los pellets estará regida por dos variables las cuales son: el porcentaje de composición aglutinante-aserrín y por la fuerza de compactación con la que se producirá el densificado. Cada una de estas tendrá efecto en la evaluación de las propiedades del densificado las cuales son: poder calorífico, densidad, humedad relativa, emisión de ceniza y friabilidad.

3.1.1. Variables independientes

Son todos los parámetros que varían de acuerdo al experimentador y son controlables a través del desarrollo de la investigación.

Tabla V. Descripción de variables independientes

Descripción de variables independientes						
			Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
No	Variable	Unidad	Constante	Variable	Monitoriable	No monitoriable
1	Tamaño del Pellet	cm	X		X	
2	Porcentaje de composición	% m/m		X	X	
3	Presión de compactación	t	X		X	
4	Tiempo de Prensado	s	X		X	

Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Variables dependientes

Son todos los parámetros que varían de acuerdo a las variables independientes y no son controlables a través del desarrollo de la investigación.

Tabla VI. Descripción de variables dependientes

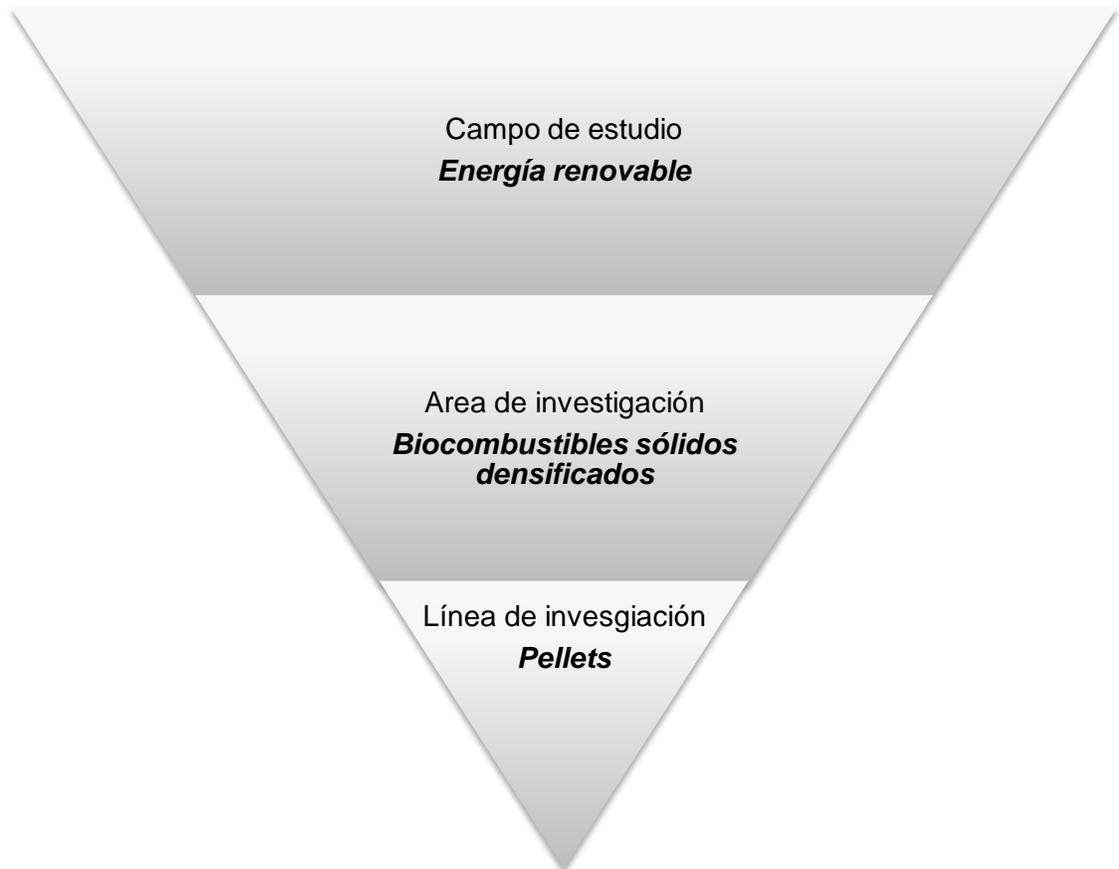
Descripción de variables dependientes						
			Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
No	Variable	Unidad	Constante	Variable	Monitoreable	No monitoreable
1	Humedad de la briqueta	w-%		X	X	
2	Friabilidad	w-%		X	X	
3	Densidad aparente	g/mL		X	X	
4	Cantidad de cenizas	w-%		X	X	
5	Poder calorífico	kJ/kg		X	X	

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

La investigación es de carácter cuantitativo-experimental-comparativo, donde, por medio de la compresión en frío se producirá un densificado, utilizando como biomasa el aserrín del pino de ocote (*Pinus tecunumanii*). Para luego realizar el análisis de sus propiedades como: poder calorífico, humedad relativa, densidad, emisión de cenizas y friabilidad. Por último, compararlas, y encontrar la formulación que proporcione el mejor desempeño de aglutinante-aserrín.

Figura 11. **Delimitación del campo de estudio**



Fuente: elaboración propia.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Josue Fernando Tojes Pacheco.
- Asesor: Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus.
- Técnicos laboratoristas del Laboratorio Sección de Tecnología de la Madera.

3.4. Recursos materiales disponibles

Insumos y materiales para la obtención del densificado de aserrín, pellet y su posterior almacenamiento.

- Aserrín de madera del pino de ocote (*Pinus tecunumanii*)
- Yeso
- Almidón de maíz
- Arcilla
- Molde de acero INOX
- Bolsas medianas Ziplock
- Agua

Equipos auxiliares e instrumentos de medición para la caracterización energética del densificado de aserrín, así como la evaluación de las propiedades físicas, químicas y mecánicas.

- Equipos auxiliares
 - Prensa hidráulica
 - Hornilla eléctrica
 - Mufla Thermolyne, determinación del porcentaje en peso de ceniza
 - Cámara fotográfica
 - Computadora
- Instrumentos de medición
 - Regla de 15 cm.
 - Tamices #100 y #80 W.S. TYLER, clasificación del tamaño de partícula.

- Balanza de humedad RADWAG, determinación del porcentaje de humedad.
- Vernier MITUTOYO, determinación de diámetro y largo de pellet.
- Molde de balines de acero, determinación de fuerza de impacto.
- Calorímetro IkaWerke, determinación del poder calorífico.
- Balanza analítica RAD WAG, determinación de masa.
- Cronómetro.

3.5. Técnica cualitativa y cuantitativa

La producción del densificado de aserrín, como la evaluación de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de este, conlleva la utilización de técnicas del tipo cuantitativas, dado que a través de parámetros y valores numéricos se logra obtener resultados concretos y comparables. Por otro lado, la investigación posee características cualitativas, pero por el tipo de variables que se estudian, no tienen ningún efecto considerable, por lo cual se concluye que el protocolo de investigación es únicamente cuantitativo.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

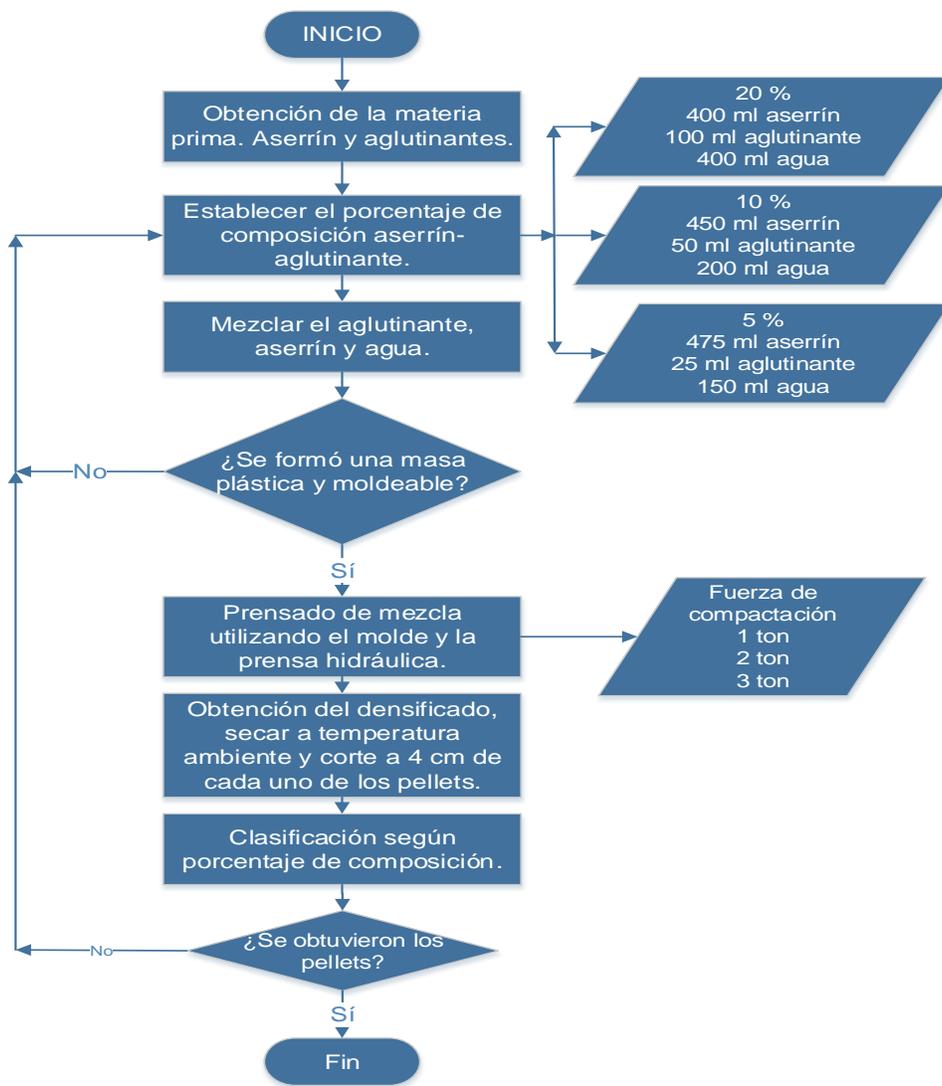
Cada uno de los procesos que se llevaron a cabo para la realización del densificado de aserrín, su caracterización y evaluación de las propiedades físicas, químicas y mecánicas, se presenta a continuación.

- Método de obtención del densificado de aserrín
- Método de evaluación de propiedades físicas, químicas y mecánicas
- Método para determinar calidad de aglutinantes

3.6.1. Método de obtención del densificado de aserrín

El diagrama de flujo a continuación detalla el método de obtención del densificado de aserrín.

Figura 12. Obtención del densificado de aserrín

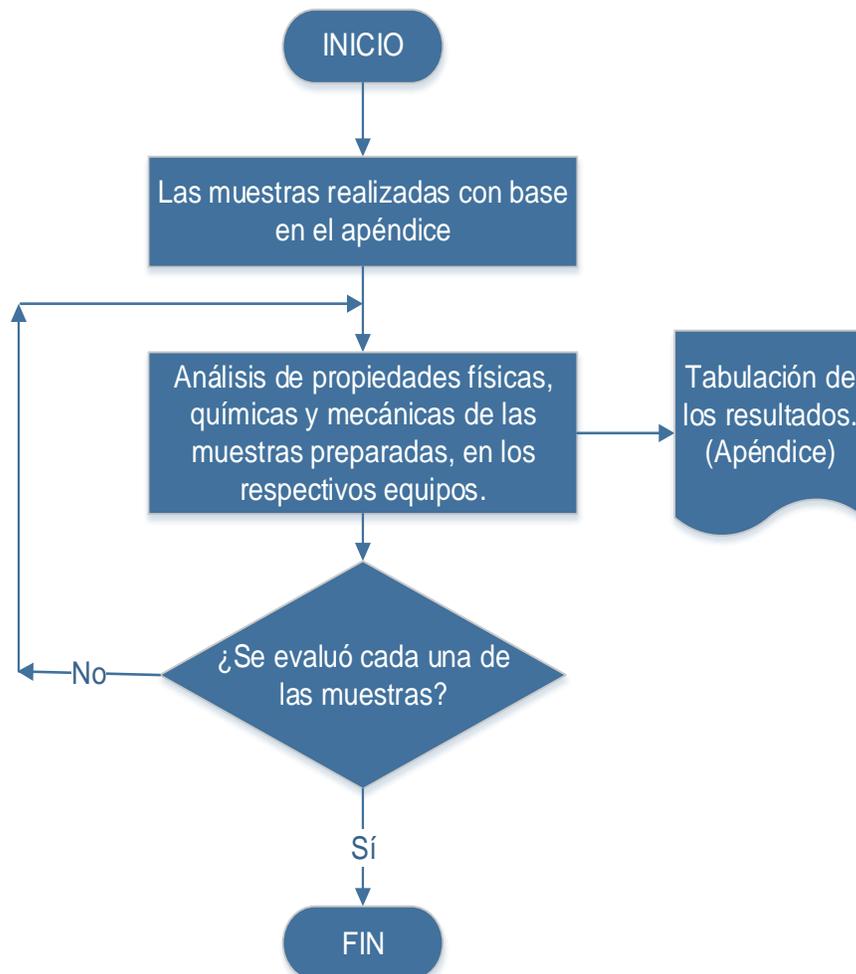


Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2013.

3.6.2. Método de evaluación de propiedades fisicoquímicas y mecánicas

A continuación se detalla el proceso de evaluación de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de los pellets elaborados.

Figura 13. Evaluación de propiedades fisicoquímicas y mecánicas



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2013.

Tabla VII. **Procedimientos cuantitativos de evaluación**

Variables	Norma ASTM
Poder calorífico	E 711-87
Humedad relativa	E 871-82
Densidad	E 873-82
Emisión de ceniza	D 1102-84, E 1534-93, E 1755-01
Friabilidad	Núñez y Soto

Fuente: elaboración propia.

3.6.3. **Método para determinar calidad de aglutinantes**

A continuación, en la tabla VIII, se detalla la información de la calidad de los aglutinantes utilizados en el proyecto de investigación.

Tabla VIII. **Información de calidad de aglutinantes**

Tipo de Aglutinante	Propiedades
Arcilla	Reporte de resultados- Anexo 3
Almidón	Hoja de seguridad- Anexo 4
Yeso	Hoja de seguridad- Anexo 5

Fuente: elaboración propia

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Cada uno de los datos que se recabó durante el proceso de experimentación se tabuló y analizó con base en los objetivos planteados en la presente investigación.

3.7.1. Tabulación de información

Las tablas para la tabulación de los datos experimentales obtenida en la investigación se encuentran en el apéndice, y se mencionan a continuación:

- Resultados de la caracterización de la materia prima: apéndice 1.
- Resultados de características de balines: apéndice 2.
- Resultados de evaluación de propiedades fisicoquímicas de los densificados: apéndice 3.
- Resultados de evaluación de friabilidad de los densificados de aserrín-almidón: apéndice 4.
- Resultados de evaluación de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas del aserrín y almidón: apéndice 5.

3.8. Análisis estadístico

En la búsqueda de poseer representatividad estadística, en el presente trabajo de investigación, se realizaron los siguientes análisis estadísticos.

3.8.1. Determinación de número de repeticiones

Con el fin de establecer el número idóneo de corridas para obtener la mayor exactitud y precisión posible, experimentalmente hablando, se toma la distribución de probabilidad normal de Gauss de la siguiente manera:

- Considerando:
 - Nivel de confianza = 95 %
 - Nivel de significancia = 5 %

$$n = \frac{z_{\alpha/2}^2 * P * Q}{e^2}$$

Donde:

P = probabilidad de éxito = 0,95

Q = probabilidad de fracaso = 0,05

z = variable aleatoria de la distribución normal = 1,96

e = error estimado = 0,25

$$n = \frac{(1,96)^2 * (0,95) * (0,05)}{(0,25)^2} = 2,9196$$

Mediante aproximación, se obtiene que el número ideal de corridas debe ser 3.

3.8.2. Tratamiento estadístico de datos

Los datos obtenidos a lo largo de la evaluación de cada propiedad fisicoquímica y mecánica de los densificados de aserrín-almidón, fueron tratados de la siguiente manera:

3.8.2.1. Cálculos estadísticos

- Cálculo de la media muestral

Media muestral:
$$\bar{X}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Donde:

\bar{X}_i = media muestral

x_i = valor de la repetición i

N = número total de datos x_i

- Cálculo de análisis de varianza de un factor

Tabla IX. **Tabla de análisis Anova**

Propiedad\ Análisis ANOVA	Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de cuadrados	F	Valor teórico de F
X	Tratamientos	SSA	$k - 1$	$s_1^2 = \frac{SSA}{k - 1}$	$\frac{s_1^2}{s^2}$	
	Error	SSE	$k(n - 1)$	$s^2 = \frac{SSE}{k(n - 1)}$		
	Total	SST	$nk - 1$			

Fuente: WALPOLE, Ronald E. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. p. 468.

Nota: El $F_{\text{teórico}}$ se obtiene de las tablas de Anova con un nivel de significancia de $1 - 0,99 = 0,01$ %.

4. RESULTADOS

4.1. Resultado núm. 1. Establecer la formulación que proporcione el mejor desempeño de mezclado entre aglutinante-aserrín en la elaboración de pellets

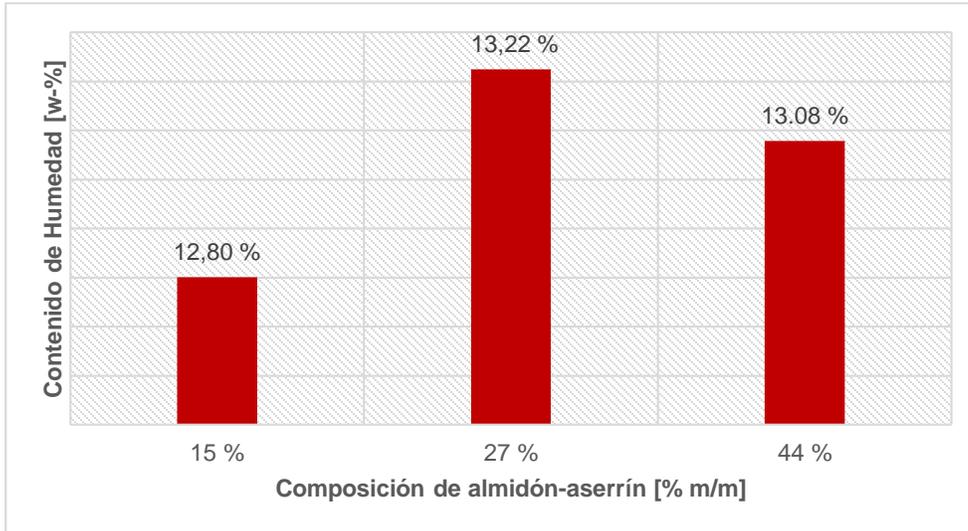
Para establecer la formulación que proporcione el mejor desempeño se evaluó y comparó cada propiedad fisicoquímica y mecánica, además de su aspecto físico, para luego concluir, según un análisis, de cual se obtuvo el mejor resultado. Tal como se muestra en la tabla X, la única formulación que se evaluó fue la de almidón-aserrín, por lo tanto todos los resultados que se presentan están relacionados con esa formulación.

Tabla X. **Formulaciones elaboradas**

Formulación	Características	Aplicación
Arcilla-aserrín	Masa quebradiza y seca. Expulsa el agua de mezcla.	No tuvo éxito la formulación para elaborar los pellets.
Almidón-aserrín	Masa moldeable, húmeda y retiene el agua.	Sí tuvo éxito la formulación para elaborar los pellets.
Yeso-aserrín	Masa quebradiza y seca. Expulsa el agua de mezcla.	No tuvo éxito la formulación para elaborar los pellets.

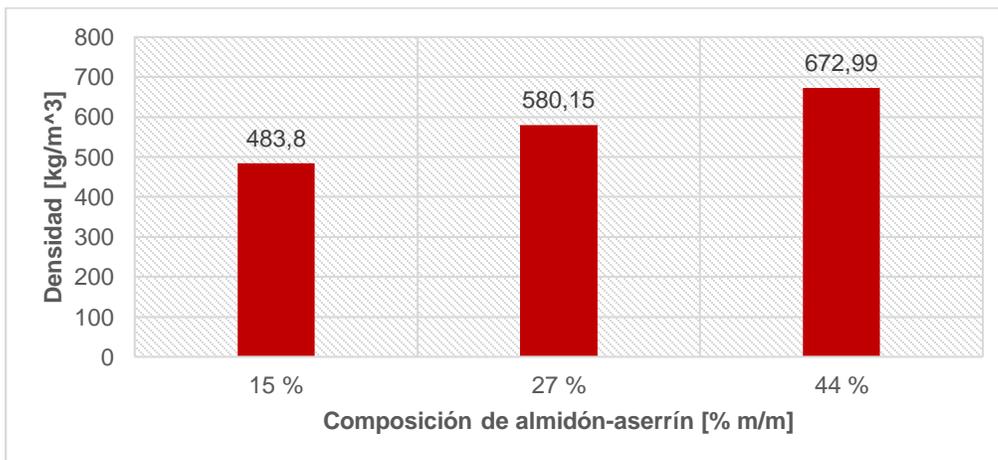
Fuente: elaboración propia con base en la experimentación realizada en el Laboratorio de Sección de Tecnología de la Madera, FIUSAC.

Figura 14. **Contenido de humedad en función del porcentaje de composición almidón-aserrín**



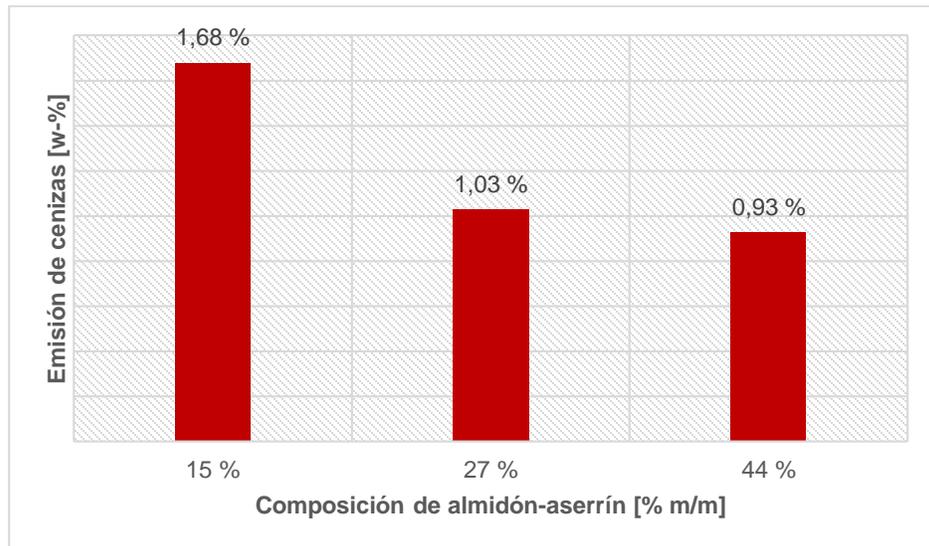
Fuente: elaboración propia, con base en datos del apéndice 3.

Figura 15. **Densidad en función del porcentaje de composición almidón-aserrín**



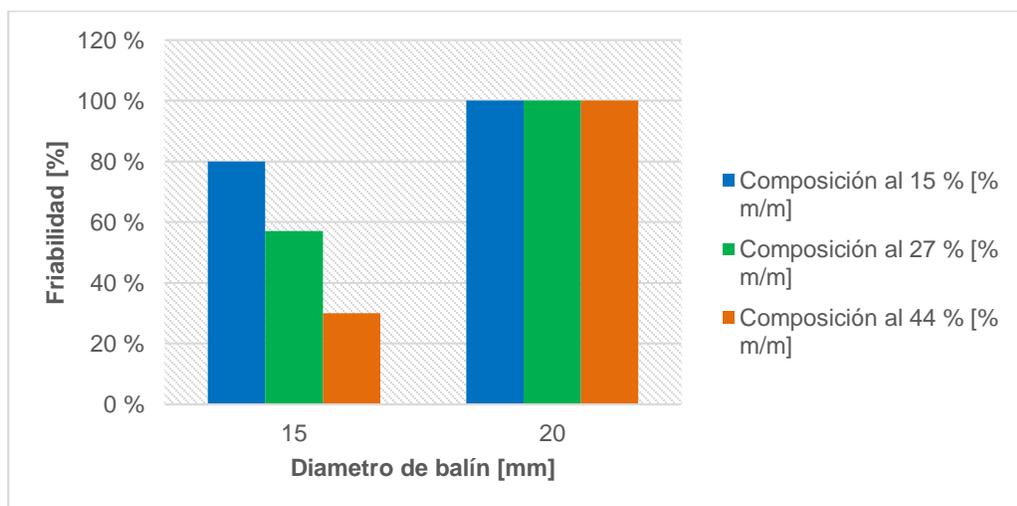
Fuente: elaboración propia, con base en datos del apéndice 3.

Figura 16. **Emisión de cenizas en función del porcentaje de composición almidón-aserrín**



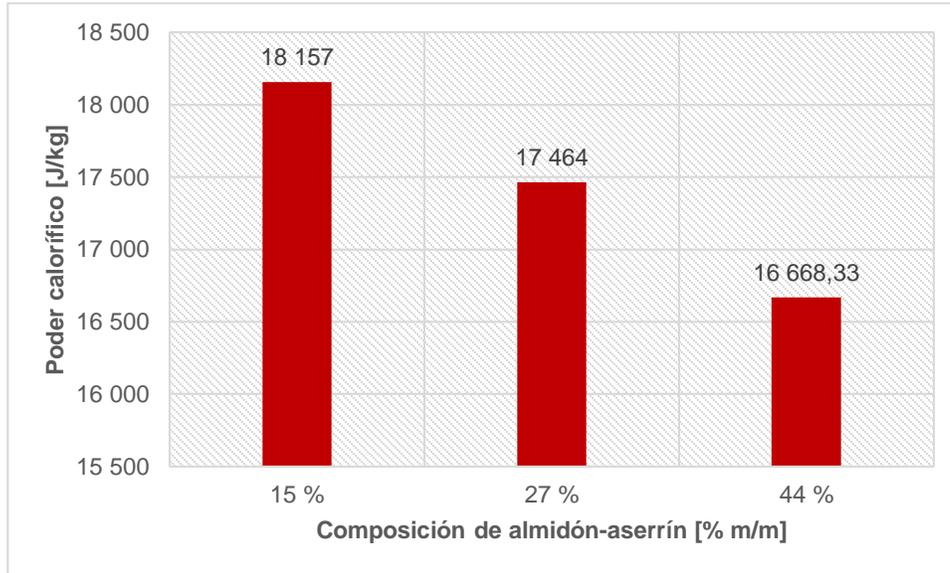
Fuente: elaboración propia, con base en datos del apéndice 3.

Figura 17. **Friabilidad en función de diámetro de balón**



Fuente: elaboración propia, con base en datos del apéndice 4.

Figura 18. **Poder calorífico en función del porcentaje de composición almidón-aserrín**



Fuente: elaboración propia, con base en datos del apéndice 3.

Figura 19. **Aspecto físico de pellets a diferente composición**

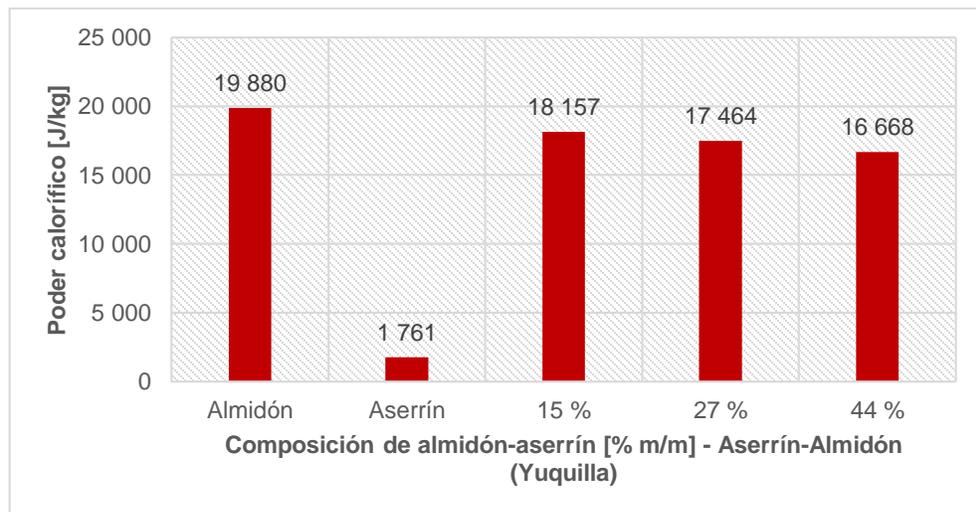


Fuente: Laboratorio de Sección de Tecnología de la Madera, FIUSAC.

4.2. Resultado núm. 2. Determinar el poder calorífico del densificado de aserrín como pellet

Con base en el objetivo 2, se determinó el poder calorífico de cada porcentaje de composición de almidón-aserrín, además del poder calorífico del almidón (yuquilla) y el aserrín sin mezclarse. Estos datos se muestran en la figura 20.

Figura 20. Comparación del poder calorífico de cada porcentaje de composición almidón-aserrín, con el almidón puro y aserrín puro



Fuente: elaboración propia, con base en datos de los apéndices 3 y 5.

4.3. Resultado núm. 3. Evaluar la calidad de los tres aglutinantes a utilizar: almidón, arcilla y yeso

Con base en el objetivo 3, se muestran la composición y las propiedades generales de los aglutinantes utilizados para la formulación de la mezcla con el aserrín.

Tabla XI. **Composición y características de aglutinantes**

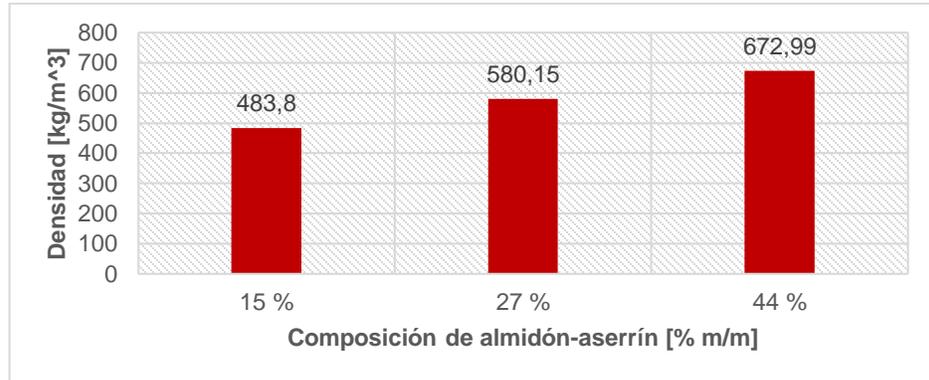
Aglutinantes	Características	Composición
Arcilla	Pasa malla ASTM #150	75,51 % SiO ₂ 15,64 % Al ₂ O ₃
Almidón comercial	Polvo, humedad del 0-12,5 %, pasa malla ASTM #100	Fierro: 0-10 ppm Arsénico: 0-2 ppm Bióxido de azufre:0-50 ppm
Yeso	Polvo, pasa malla ASTM #100.	86 % CaSO ₄ 10 % CaCO ₃

Fuente: elaboración propia, con base en datos de los anexos 3, 4 y 5.

4.4. Resultado núm. 4. Evaluar las propiedades físicas (densidad y porcentaje de humedad) de los pellets elaborados

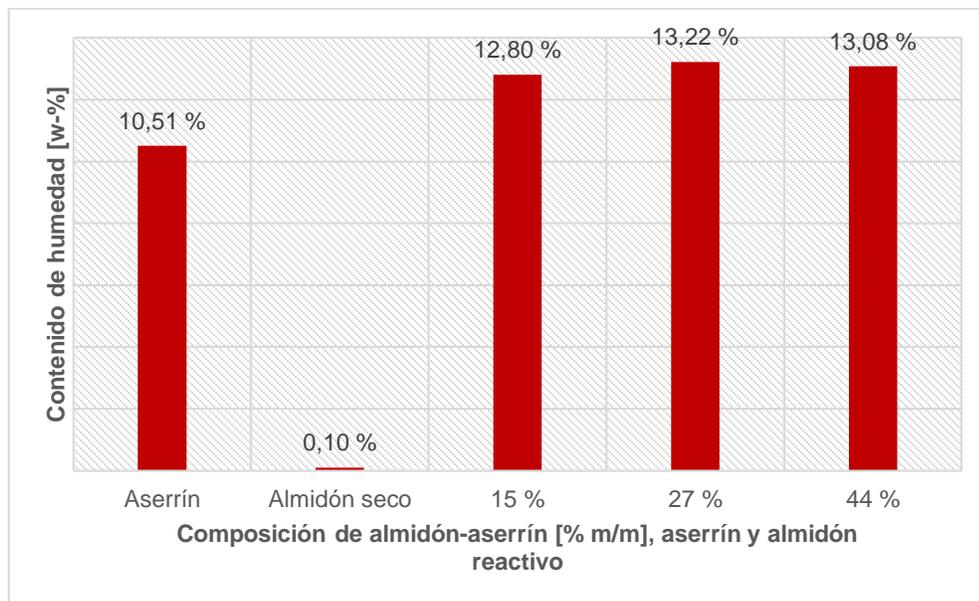
Con base en el objetivo 4, se presentan la densidad y porcentaje de humedad absoluta de cada porcentaje de composición de almidón-aserrín, con respecto al almidón seco y el aserrín sin mezclar también se expone el porcentaje de humedad absoluta.

Figura 21. **Densidad en función del porcentaje de almidón en el pellet**



Fuente: elaboración propia, con base en datos del apéndice 3.

Figura 22. **Contenido de humedad de cada composición de almidón-aserrín, almidón reactivo y aserrín**

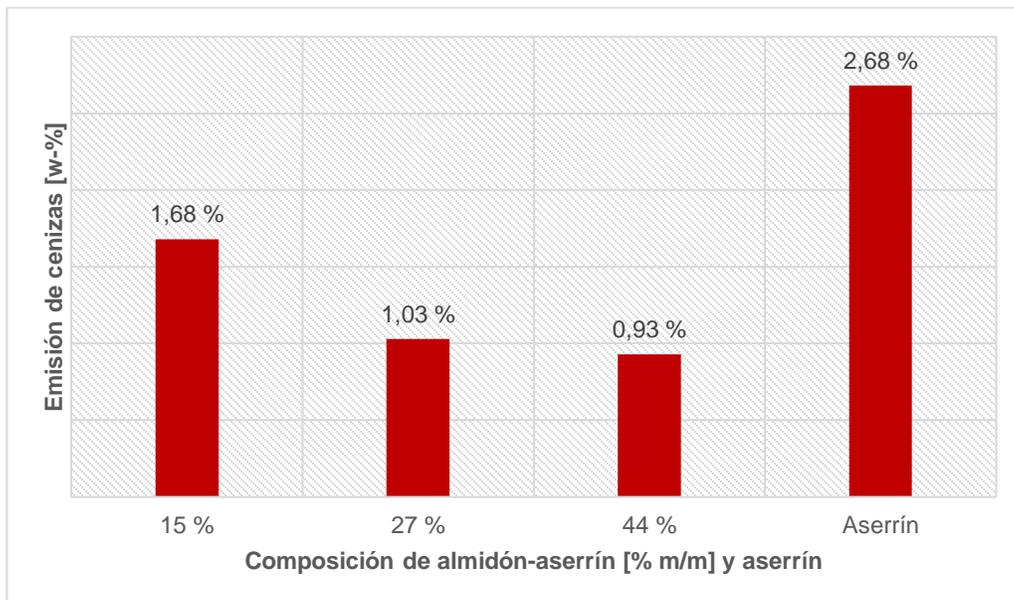


Fuente: elaboración propia, con base en datos de los apéndices 3 y 5.

4.5. Resultado núm. 5. Determinar y comparar la cantidad de emisión de ceniza del densificado de aserrín en forma de pellet contra el aserrín sin aglutinantes

Con base en el objetivo 5 se compara el porcentaje de emisión de ceniza de cada porcentaje de composición almidón-aserrín y el aserrín sin mezclar.

Figura 23. Emisión de ceniza de cada porcentaje de composición de almidón-aserrín y aserrín puro

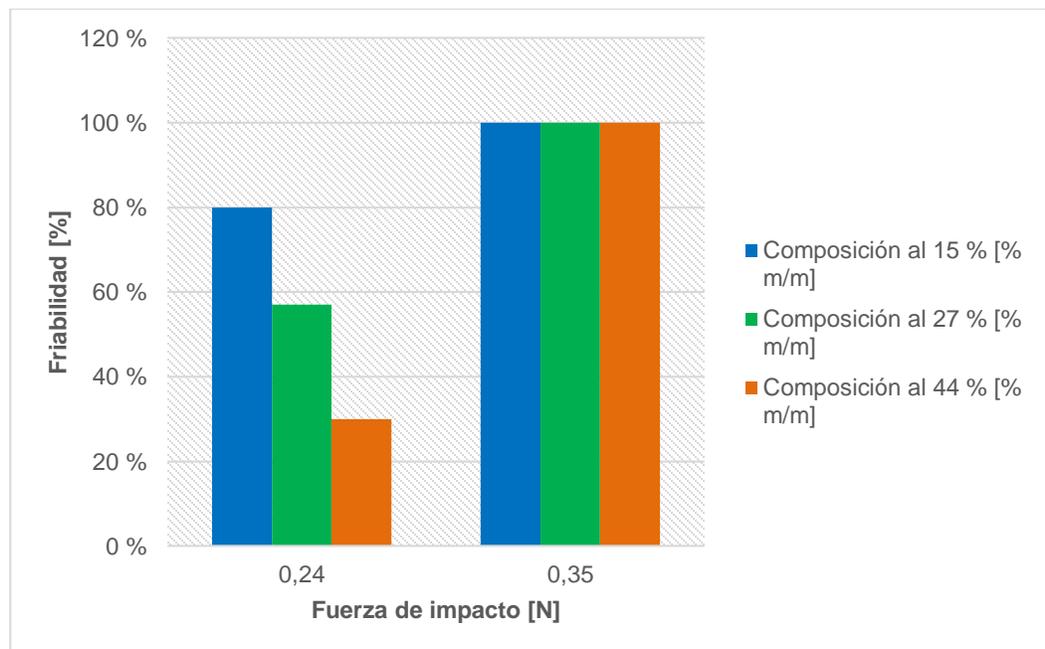


Fuente: elaboración propia, con base en datos de los apéndices 3 y 5.

4.6. Resultado núm. 6. Determinar la friabilidad de los pellets, utilizando el método de golpeo entre sí

El método citado en dicho objetivo no fue elaborado con éxito, ya que no mostró resultados factibles y lógicos. Por lo tanto, se utilizó un método combinado, el cual consistía en dejar caer unos balines de acero inoxidable de diferentes diámetros (10 mm, 15 mm y 20 mm). Utilizando la ecuación de la friabilidad, se determinó la friabilidad de cada porcentaje de composición con diferentes fuerzas de impacto.

Figura 24. Friabilidad de cada porcentaje de composición de almidón-aserrín



Fuente: elaboración propia, con base en datos de los apéndices 2 y 4.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El presente trabajo de graduación consistió en la caracterización energética del densificado de aserrín como un biocombustible, pellet, utilizando tres diferentes aglutinantes: arcilla, almidón y yeso.

La recolección de la materia prima se realizó de la siguiente manera: el aserrín de carpinterías dedicadas al trabajo con madera de pino; la arcilla en bancos de materiales ubicados en la carretera a El Tejar, Chimaltenango; el almidón y el yeso fueron adquiridos como materiales reactivos.

La calidad de cada uno de los aglutinantes que se utilizaron durante el proyecto de investigación se muestra en la tabla XI del resultado 3. La composición y propiedades que posee cada uno de estos aglutinantes con respecto a la composición indicada en las bibliografías, no discrepan en nada. Por lo tanto se evidencia que la calidad de los aglutinantes es la adecuada y no generó ningún efecto durante la formulación de las mezclas.

Luego de recolectar y obtener la materia prima, se elaboró la homogenización del aserrín utilizando tamices #80 y #100, dejando lo que retenía el tamiz #100. Esto permitió reducir el diámetro de la partícula y aumentar el área de contacto cuando se mezclen con los respectivos aglutinantes.

Tanto el almidón como el yeso tenían un diámetro de partícula menor al de aserrín, debido a su grado de reactivo, ambos aglutinantes pasaban el tamiz #100. La arcilla se trituró porque en esta se encontraban piedras y grumos. Ya con la arcilla hecha polvo en su totalidad, se homogenizó con el tamiz #80,

utilizando la arcilla que pasaba este tamiz. Cada aglutinante tenía el mismo o menor diámetro de partícula que el aserrín utilizado en la formulación de las composiciones.

Al mezclar el aserrín con cada uno de los aglutinantes se obtuvieron dos resultados negativos, uno fue con el yeso y el otro con la arcilla. Ambos aglutinantes reaccionaron de manera negativa al mezclarse con el aserrín y el agua, ya que no formaron un material adecuado para la compresión. Ambos aglutinantes repelían el agua, es decir que al elaborar la mezcla, agua-aglutinante-aserrín, esta expulsaba el agua y la masa formada se tornaba quebradiza y débil al contacto. Esto es debido a que la estructura del aserrín en contacto con la estructura de ambos aglutinantes, no tenía la suficiente fuerza de adhesión para lograr unirse y mantener una estructura estable.

Aunque ambos aglutinantes al mezclarse con el agua por separado se adherían perfectamente a la estructura de esta, al entrar en contacto con el aserrín, ambos perdían sus fuerzas intermoleculares y expulsaban el agua al comprimir la pasta. Se concluye que al elaborar ambas formulaciones el aserrín y los aglutinantes, yeso y arcilla, se adicionaban pero no se adherían.

El único aglutinante que se utilizó debido a su estructura polisacárido como el aserrín, fue el almidón. Este aglutinante se mezcló con agua y se calentó, ya que los gránulos de almidón son insolubles en agua fría, pero al aumentar la temperatura pueden contener el agua, sufriendo un proceso llamado gelatinización. Al mezclarlo con el aserrín, se formó una pasta moldeable y de gran plasticidad.

Durante el proceso de prensado, se aplicó una única fuerza de 1,5 toneladas. Esto produjo que el experimento pasara de dos variables

independientes a una sola, la cual es el porcentaje de composición del aserrín-aglutinante. Cuando se introducía la mezcla al molde y se prensaba, el material no necesitaba más de 1,5 toneladas para que saliese y a una presión menor los pellets no podían separarse del molde. El molde tenía una entrada de presión perpendicular a la dirección de salida de los pellets, lo cual no permitía aumentar la presión, ya que arruinaría el molde. Tampoco existía otro método para obtener pellets de 5 toneladas de presión, ya que los pellets necesitaban una presión mayor a la de 1 tonelada y menor a 1,5 toneladas para poder ser elaborados.

El agregar o disminuir la cantidad de agua no era posible ya que el almidón era mezclado previamente con el agua y se calentaba, por lo que, la única forma en que la variable agua afectaría, sería en la gelificación del almidón. Al elaborar las pruebas se percató que la cantidad de agua utilizada en cada formulación era la indicada para lograr que, con las proporciones utilizadas, la pasta fuera la más favorable para la compresión.

La mejor formulación para la elaboración de pellets utilizando aserrín y almidón es la de 10 % v/v o, en su defecto, la de 27 % m/m. Esta se elaboró utilizando 450 ml de aserrín, equivalente a 91,67 g, 50 ml de almidón, equivalente a 33,73 g, y 200 ml de agua. Se utilizó el porcentaje v/v durante la elaboración de los pellets debido a que el aserrín posee una masa muy baja con respecto a su volumen, por lo que, si se utilizaban masas de gran magnitud, el volumen se hacía muy grande y la cantidad de almidón no bastaba para obtener una pasta de buena consistencia y de gran plasticidad. Por motivos de facilidad de producción industrial y realización de los pellets se transformaron los porcentajes v/v en porcentaje m/m. Los porcentajes m/m son los siguientes 15 %, equivalente al 5 % v/v, 27 %, equivalente al 10 % v/v, y 44 %, equivalente al 20 % v/v.

Analizando la gráfica 14 del resultado 1, se hace evidente que la composición que tiene menor contenido de humedad es la de 15 % y la de mayor contenido es la de 27 %. Dado que la humedad es determinante en el poder calorífico, ya que a mayor humedad menor poder calorífico, al estudiar la gráfica 18 se deduce que el porcentaje de composición que mayor poder calorífico posee es el 15 %, 18 157 J/g, el menor el de 44 %, 16 668 J/g. Esto reafirma lo establecido por la relación humedad-poder calorífico.

Las gráficas 15 y 16 demuestran que el porcentaje de composición de mayor densidad es el del 44 %, ya que es la que mayor cantidad de almidón posee. Esto ratifica la característica del aserrín que, aún estando en mayor cantidad en la composición del 15 %, su densidad es la menor de las tres. La gráfica 16 muestra que la composición que mayor emisión de ceniza posee es la del 15 %, debido a la cantidad de aserrín en su composición.

La gráfica 17 muestra la friabilidad de las composiciones. Durante la elaboración del método de golpeteo entre sí, no se obtuvieron resultados efectivos. Por lo tanto se decidió cambiar de método, utilizando el de fuerza de impacto. Se realizó un equipo en el cual se dejó caer 3 balines de diferentes calibres (10 mm, 15 mm y 20 mm respectivamente) sobre los pellets, cada balín proporcionaba una fuerza de impacto mayor que la otra. Se encontró que la composición más friable es la de 15 % y la menos friable, la de 44 %.

Por último, el aspecto físico de los pellets se muestra en la figura 19. Los más regulares y de mejor aspecto son los de 27 %, ya que los de 15 % se disgregan al contacto entre ellos y los de 44 % son irregulares.

La composición de 27 %, a pesar de no liderar ninguna característica, es la única que no tiene una característica desfavorable, tiene un poder calorífico de

17 464 J/s, su emisión de ceniza se compara con la del 44 %, la de menor emisión, y su friabilidad es menor al 50 %. Tomando en cuenta estos resultados, los pellets que mejores características poseen, con respecto a todas las propiedades, es la del 27 %.

El resultado 2 muestra la gráfica 20, la cual relaciona el poder calorífico en función del porcentaje de composición aserrín-almidón. En esta gráfica se agrega el aserrín sin mezclar y el almidón cocinado o calentado. El almidón cocinado presenta un poder calorífico de 1 761 J/g, por lo tanto se puede concluir que la función del almidón es de actuar como ligante o adherente y no como un donante de poder calorífico. Resulta interesante que el aserrín sin mezclar presenta un mayor poder calorífico que los tres porcentajes de composiciones, por lo que también se puede concluir que el almidón, debido a la humedad que le añade al aserrín, provoca la disminución del poder calorífico. El poder calorífico de menor magnitud de las 3 composiciones es el de 44 %, el cual es de 16 668 J/g, y el mayor es de 18 157 J/g, que pertenece a la de 15 %. La variación está relacionada directamente con la cantidad de aserrín que posee cada composición.

El resultado 4 muestra las gráficas 21 y 22, las cuales relacionan la densidad y humedad en función del porcentaje de composición, respectivamente. La densidad se relaciona con la cantidad de aserrín y almidón que posee cada composición, por lo tanto el porcentaje de composición del 15 %, es el de menor densidad, ya que es el que más aserrín posee y el que menor almidón tiene, su densidad es de 483,80 kg/m³. Luego la de 27 % tiene menos aserrín y más almidón, su densidad es de 580,15 kg/m³. Finalmente la de 44 % tiene la menor cantidad de aserrín y la mayor cantidad de almidón, su densidad es de 672,98 kg/m³. El almidón le da un mayor peso al pellet con

respecto a su volumen, y el aserrín le da más volumen con respecto a su peso, por lo que es coherente que las densidades hayan sido las anteriores.

La gráfica 22 muestra el contenido de humedad en función del porcentaje de composición almidón-aserrín. En esta gráfica se compara el aserrín sin mezclar y el almidón grado reactivo. El almidón tiene un porcentaje de humedad de 0,10 %, por lo que, al peptizarlo absorbe la humedad para mezclarse con el aserrín. El aserrín sin mezclar, es decir la materia prima, tiene un porcentaje de humedad de 10,51 %. Al evaluar la humedad de los pellets en las 3 composiciones, se observa que al mezclar el aserrín con el almidón cocinado, estos aumentan su densidad casi al mismo porcentaje. La composición de 15 % tiene una densidad de 12,80 %, la de 27 % de 13,22 % y la de 44 % de 13,08 %.

El resultado 5 muestra la gráfica 23, la cual relaciona el porcentaje de emisión de cenizas en función del porcentaje de composición almidón-aserrín. En esta gráfica se compara también el aserrín sin mezclar. El porcentaje de emisión de ceniza del aserrín sin mezclar es de 2,68 %, al compararse con el de los demás composiciones, el del aserrín es el mayor. El porcentaje de emisión de ceniza de 15 % es de 1,65 %, el de 27 % es de 1,03 % y el de 44 % es de 0,9320 %. Entre menos cantidad de aserrín tenga la composición, menor es la emisión de ceniza, los resultados son lógicos y acorde a la afirmación anterior.

El resultado 6 muestra la gráfica 24, la cual relaciona la friabilidad en función de la fuerza de impacto con cada una de las composiciones realizadas. Como se explicaba anteriormente, el método de Núñez y Soto utilizado varió con respecto al propuesto, la diferencia radicó en la fuerza que se le aplicaba ya que la ecuación utilizada de friabilidad fue la misma. El método consistió en dejar caer el balón y, haciendo uso de ecuaciones de caída libre y conservación de la energía, se encontró la fuerza a la cual colisiona el balón con el pellet. Las fuerzas

utilizadas fueron las siguientes: para, el balín de 10 mm tiene, la fuerza de impacto es de 0,1102 N, el de 15 mm, 0,238 N y el de 20 mm, 0,3506 N.

Al evaluar los pellets con cada balín, se observó que con el balín de 10 mm la friabilidad de las tres composiciones es de 0%, es decir que ninguno se quebró al impacto de 0,1102 J. Al evaluar con el de 15 mm hubo un cambio, el más friable fueron los de 15 %, con una friabilidad del 80 %, el de 27 % una friabilidad del 57 % y el de 44 % una friabilidad del 30 %. Al evaluarlos con el balín de 20 mm, todos tuvieron una friabilidad del 100 %.

Con respecto a los resultados obtenidos, se puede interpretar que a mayor cantidad de aglutinante la friabilidad es menor. Esto es debido a que el almidón que actúa como adhesivo, lo que hace que el pellet tenga más cohesividad, caso contrario con el que tiene menos almidón, que es el de composición del 15 %, cuya friabilidad fue del 80 %. Para lograr que el pellet se pueda empezar a fragmentar se necesita una fuerza mayor a los 0,1102J y para que no se fragmenten una menor al 0,2506 J.

Por último, se elaboró un análisis de varianza Anova de un solo factor con un intervalo de confianza del 99 % para cada una de las propiedades fisicoquímicas que se evaluaron. La friabilidad no se pudo evaluar ya que se cambió el método de evaluación y se incluyó, aparte de la variable de composición, la variable del diámetro del balín, por lo tanto evaluar únicamente el porcentaje de composición no era posible sin tomar en cuenta el tamaño del balín.

El análisis mostró que para el poder calorífico y la densidad existe una variación significativa entre los promedios, debido a la composición química de cada tratamiento. Caso contrario con la humedad y la emisión de ceniza, las

cuales no mostraron variación entre los promedios debido a su composición. Por lo que, para dos propiedades, poder calorífico y densidad, la hipótesis H_0 se rechaza y se concluye que para ambas propiedades sí afecta significativamente el porcentaje de aglutinante en la formulación. Para las otras dos propiedades, humedad y emisión de cenizas, se acepta la hipótesis H_0 y se concluye que para ambas propiedades no afecta el porcentaje de aglutinante en la formulación.

La hipótesis alternativa, H_1 , que consistía en los efectos que producía el tipo de aglutinante en la formulación de mezcla de pellet, no fue evaluada porque no se elaboraron otros pellets aparte de los de aserrín-almidón.

CONCLUSIONES

1. El densificado de aserrín, pellet, que utiliza como aglutinante el almidón, puede ser elaborado con una presión de compactación de 1,5 toneladas y con un porcentaje de composición del 44 %, 27 % y 15 %.
2. El densificado de aserrín, pellet, que utiliza como aglutinante la arcilla y el yeso no puede elaborarse con una presión de compactación de 1,5 toneladas y con un porcentaje de composición del 44 %, 27 % y 15 %.
3. La formulación que proporciona el mejor desempeño de mezclado entre el almidón y aserrín en la elaboración de pellets, es el de 27 %.
4. La formulación del 15 % en almidón proporciona el poder calorífico de mayor magnitud, siendo este el de 18 157 J/g.
5. La formulación del 44 % en almidón proporciona el poder calorífico de menor magnitud, siendo este de 16 666,33 J/g.
6. La densidad de los pellets es creciente con respecto al porcentaje de composición aserrín-almidón. El porcentaje de composición del 44 % es el que tiene la densidad de mayor magnitud, 672,99 kg/m³, y la de menor magnitud, 483,80 kg/m³, la composición de 15 % la cual es pura.
7. El contenido de humedad es constante con respecto al porcentaje de composición almidón-aserrín, con un promedio de 13 % m/m.

8. La emisión de cenizas es decreciente con respecto al porcentaje de composición. El porcentaje de composición del 15 % es el que tiene la emisión de cenizas de mayor magnitud, 1,68 %, y la de menor magnitud, 0,93 %, la composición del 44 %.
9. El aserrín, como materia prima, emite la mayor cantidad de cenizas, 2,68 %, con respecto a la emisión de las tres composiciones evaluadas.
10. La friabilidad es decreciente con respecto al porcentaje de composición aserrín-almidón, fuerza de impacto y diámetro de balín. La menos friable es la composición de 44 %, con una friabilidad del 30 %.
11. Con un intervalo de confianza del 99 % y una *f* de Fisher con valores de 41,23 >10,92, con respecto al poder calorífico y 11,08 >10,92, con respecto a la densidad, se concluye que ambas propiedades fisicoquímicas se ven afectadas significativamente con respecto al porcentaje de composición.
12. Con un intervalo de confianza del 99 % y una *f* de Fisher con valores de 0,41 < 10,92, con respecto a la humedad y 4,48 < 10,92, con respecto a la emisión de cenizas, se concluye que ambas son propiedades fisicoquímicas que no se ven afectadas significativamente por el porcentaje de composición.

RECOMENDACIONES

1. Para la elaboración de un densificado de aserrín se recomienda utilizar los aglutinantes derivados de la celulosa, como etilcelulosa, metilcelulosa, carboximetilcelulosa, entre otros.
2. Se propone la utilización de otros aglutinantes naturales, como yema de huevo, caseína, gomas naturales, glicéridos, ceras animales y vegetales.
3. Se propone fabricar un nuevo molde para la elaboración de los pellets con la siguiente característica: que la salida de los pellets fuese a 45 grados con respecto a la fuerza de compactación.
4. Elaborar un análisis económico de la fabricación a nivel industrial del densificado de aserrín, pellet, utilizando como aglutinante el almidón de maíz a una composición del 27 %.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARPI, Jorge, CALDERÓN, Cristian. *Diseño de una máquina pelletizadora en base a la disponibilidad de residuos madereros de la ciudad de Cuenca para su aprovechamiento energético*. [en línea]. <dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/832/13/UPS-CT001696.pdf>. [Consulta: 18 de noviembre de 2013].
2. FONSECA C., Edison. *Desarrollo de un proceso tecnológico para la obtención de briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz y pruebas de producción de gas pobre*. [en línea]. <dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/1883/1/15T00495.pdf>. [Consulta: 14 de noviembre de 2013].
3. GONZALEZ L., Raúl. *Producción de materiales de construcción y energía a partir de desechos orgánicos: El bloque sólido combustible*. [en línea]. <<http://www.ecosur.org/index.php/publicaciones/category/3-tesis>>. [Consulta: 15 de noviembre de 2013].
4. ROLDÁN VILORIA, José. *Energías renovables: lo que hay que saber*. Toledano, José Carlos (Coord.). España: Ediciones Paraninfo, 2012. 208 p. ISBN: 9788428333122.
5. TRAÑA S., Cristóbal. *Aprovechamiento de la biomasa (raquis) como combustible para incrementar la producción de energía térmica (vapor) en la caldera*. Trabajo de graduación de Ing. Industrial.

Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería.
2009. 33 p.

6. VELÁSQUEZ M., Sergio O. *El contexto de la energía renovable en Guatemala y la matriz energética del país*. [en línea]. <<http://www.cnee.gob.gt/xhtml/prensa/Presentaciones/Contexto%20de%20Energ%C3%ADa%20Renovable%20en%20Guatemala%20y%20Matriz%20Energ%C3%A9tica%20del%20Pa%C3%ADs.pdf>>. [Consulta: 14 de noviembre de 2013].
7. WALPOLE, Ronald E. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. Roig Vásquez, Pablo Eduardo (Editor). 6a ed. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1999. 403 p. ISBN: 9701702646.

APÉNDICES

Apéndice 1. Caracterización de materia prima

Materia prima	Humedad [M] W-%	Tamaño de partícula # de tamiz
Aserrín	10,51	#80---#100
Almidón	0,10	>#100
Arcilla	2,05	>#150
Yeso	0,15	>#100

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Tabulación de características de balines

Diámetro de balín	Diámetro	Tiempo de caída	Masa	Velocidad final	Energía de impacto
mm	m	s	kg	m/s	J
10	0,01	0,75	0,0048	7,35	0,110259
15	0,015	0,6	0,01377	5,88	0,238044
20	0,02	0,4	0,03262	3,92	0,250625

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Tabulación de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de los densificados**

Densificado \ propiedad	Corrida	Poder calorífico bruto	Humedad	Ceniza	Densidad aparente
		J/g	w-%	w-%	kg/m ³
5 %	1	18 049	13,19	2,96052632	545,563258
	2	18 330	12,22		420,981737
	3	18 092	12,99		484,861716
10 %	1	17 387	13,45	3,44827586	574,2461961
	2	17 524	12,86		636,8782017
	3	17 481	13,37		529,3267994
20 %	1	16 708	13,52	1,63265306	661,458283
	2	16 952	12,14		659,525068
	3	16 345	13,58		697,984588

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Tabulación de la friabilidad de los densificados de aserrín-almidón**

Densificado \ propiedad	Diámetro de balín [mm]	Friabilidad
		w-%
5 %	10	0
	15	80
	20	100
10 %	10	0
	15	57
	20	100
20 %	10	0
	15	30
	20	100

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Tabulación de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas del aserrín y almidón**

Materia prima \ propiedad	Corrida	Poder calorífico bruto	Humedad	Ceniza
		J/g	w-%	w-%
Aserrín	1	19 880	10,51	2,68048508
Almidón	1	1 761	0,10	-

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Tabulación de promedio de las propiedades fisicoquímicas del densificado de aserrín**

Densificado \ propiedad	Poder calorífico bruto	Humedad	Ceniza	Densidad aparente
	J/g	w-%	w-%	kg/m ³
5 %	18 157	12,80	2,96052632	483,802237
10 %	17 464	13,22	3,44827586	580,150399
20 %	16 668,333	13,08	1,63265306	672,989313

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Análisis Anova de cada propiedad fisicoquímica**

Propiedad\ Análisis ANOVA	Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de cuadrados	F	Valor teórico de F
Humedad	Tratamientos	0,281955556	2	0,140977778	0,41128039	10,924
	Error	2,056666667	6	0,342777778	-	-
	Total	2,338622222	8	-	-	-
Densidad	Tratamientos	53 692,9548	2	2 6846,4774	11,0806551	10,924
	Error	14 536,9441	6	2 422,82402	-	-
	Total	68 229,8990	8	-	-	-
Emisión de ceniza	Tratamientos	0,979518947	2	0,48975947	4,4761718	10,924
	Error	0,656488904	6	0,10941482	-	-
	Total	1,63600785	8	-	-	-
Poder Calorífico	Tratamientos	3 329 462,89	2	1 664 731,44	41,2367318	10,924
	Error	242 220,667	6	40 370,1111	-	-
	Total	3 571 683,56	8	-	-	-

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Costo del proyecto de graduación**

Detalle	#	Unidad	Sub-total
Materia prima			
Aserrín	100	Q 0,50	Q 50,00
Yeso	10	Q 3,50	Q 35,00
Almidón	10	Q 2,50	Q 25,00
Arcilla	-	-	-
Procesamiento de materia prima			
Prensa hidráulica	1	Q 1 400,00	Q 1 400,00
Equipo: Friabilidad	1	Q 150,00	Q 150,00
Molde	1	Q 500,00	Q 500,00
Bolsas Ziplock	1	Q 40,00	Q 40,00
Análisis fisicoquímicos			
Poder calorífico	11	Q 70,00	Q 770,00
Porcentaje de Humedad	13	Q 120,00	Q 1 560,00
Densidad relativa	-	-	-
Emisión de ceniza	10	Q 190,00	Q 1 900,00
TOTAL			Q 6 430,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Fotografías de la realización de densificados aserrín aglutinante**



Fuente: Laboratorio de Sección de Tecnología de la madera, FIUSAC.

Apéndice 10. **Fotografías de realización de pruebas para cada propiedad fisicoquímica y mecánica**



Fuente: Laboratorio de Sección de Tecnología de la Madera, FIUSAC.

Apéndice 11. **Formato: caracterización de materia prima**

Materia prima	Humedad [M] W-%	Tamaño de partícula # de tamiz
Aserrín		
Almidón		
Arcilla		
Yeso		

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Formato: tabulación de características de balines**

Diámetro de balón	Diámetro	Tiempo de caída	Masa	Velocidad final	Energía de impacto
mm	m	s	kg	m/s	J
10					
15					
20					

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Formato: tabulación de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de los densificados**

Densificado \ Propiedad	Corrida	Poder calorífico bruto	Humedad	Ceniza	Densidad aparente
		J/g	w-%	w-%	kg/m ³
5 %	1				
	2				
	3				
10 %	1				
	2				
	3				
20 %	1				
	2				
	3				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. **Formato: tabulación de la friabilidad de los densificados de aserrín-almidón**

Densificado \ propiedad	Diámetro de balín [mm]	Friabilidad
		w-%
5 %		
10 %		
20 %		

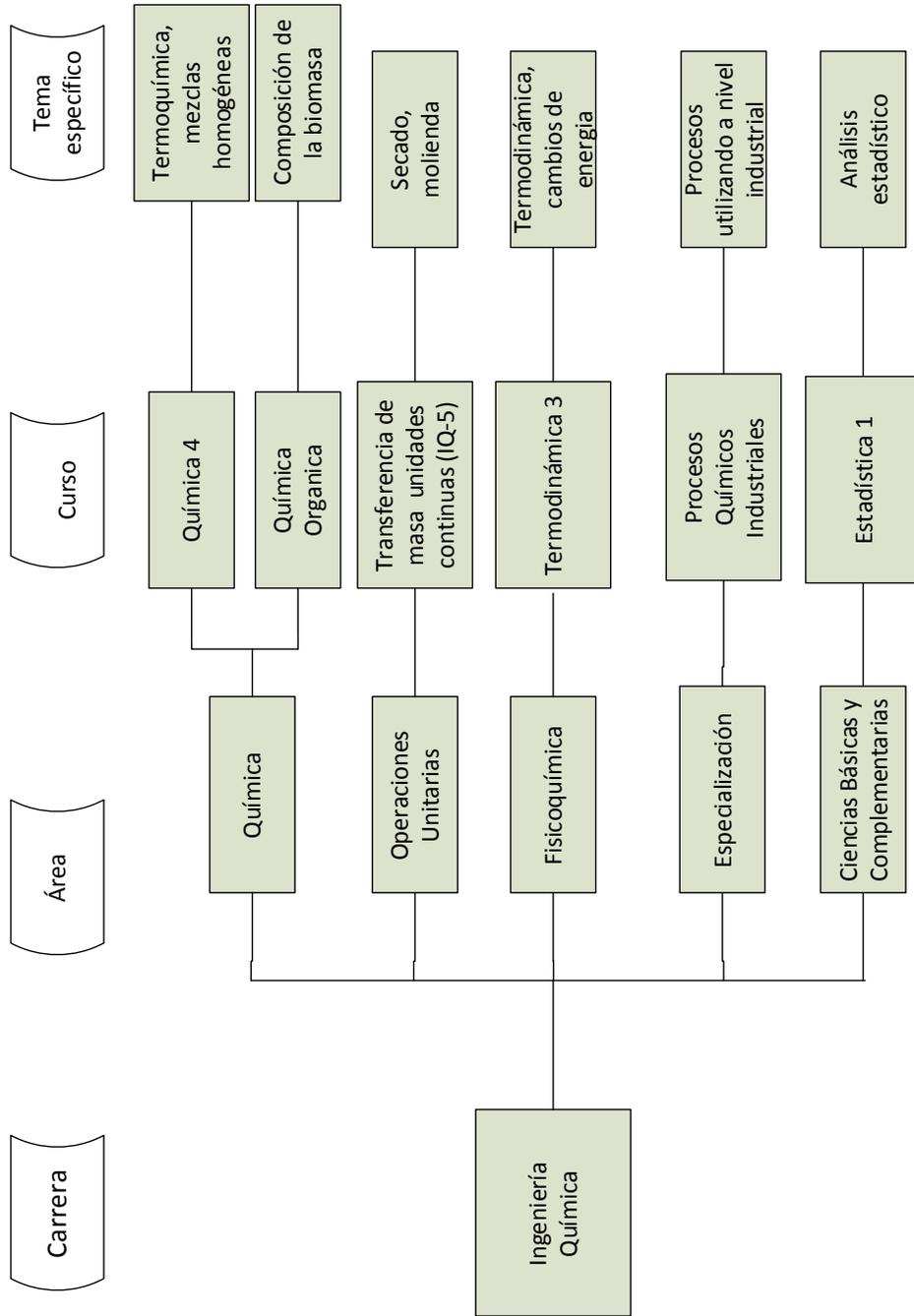
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Formato: tabulación de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas del aserrín y almidón**

Materia prima \ Propiedad	Corrida	Poder calorífico bruto	Humedad	Ceniza
		J/g	w-%	w-%
Aserrín	1			
Almidón	1			

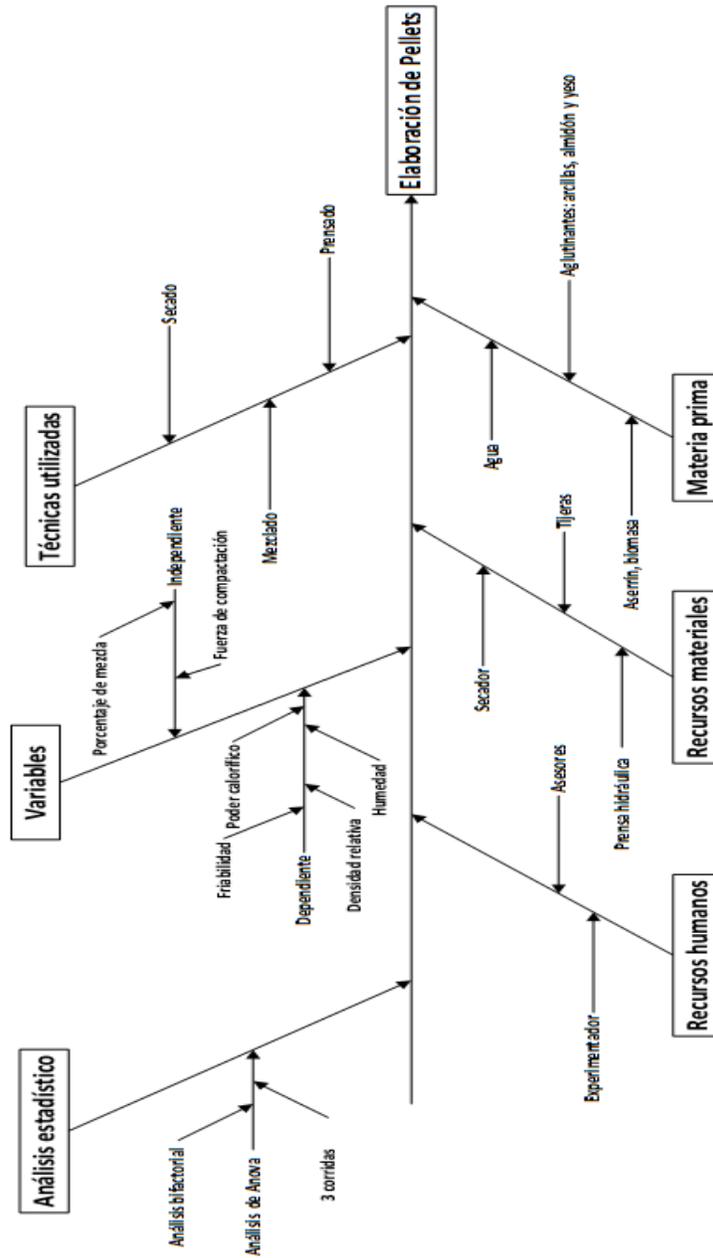
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. Diagrama de requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Informe de resultados obtenidos en Laboratorio de Recursos Alternativos


Laboratorio de Recursos Alternativos (AFR)
Tel (502) 7952 8000 ext. 7553
Fax (502) 2338 9112 y 13

REPORTE

Solicitado: Copias Internas
Josue Fernando Tojes Pacheco

No. : AFR Lab-2015-03_Tesis_USAC
Fecha: 09/02/2015

Asunto: INFORME DE ANALISIS DE COMBUSTIBLES¹

Identificación de Muestra Externa:

Muestra de Aserrín y Muestra de Almidón

Pruebas Solicitadas:

Análisis de Poder calorífico

Resultados de Análisis Solicitados:

FECHA	ID MUESTRA	PODER CALORIFICO BRUTO J/G
20/01/2015	MUESTRA Aserrín	19880
20/01/2015	MUESTRA Almidón	1761

Metodologías Empleadas:
1 ASTM D5468-02(2007)


LIC. SERGIO SANTOS
QUIMICO
COLEGIADO No. 1911
INGENIERO EN RECURSOS Y TECNOLOGIAS DE ASESORAMIENTO
MAESTRIA E INGENIERIA EN GERENCIAL DE EMPRESAS

Revisado por: Sergio Eduardo Santos
Químico. Colegiado 1911
Jefe de Laboratorio AFR

Fuente: Laboratorio de Recursos Alternativos, PROVERDE, Cementos Progreso.

Anexo 2. **Informe de resultados obtenidos en Laboratorio de Recursos Alternativos**



REPORTE

Laboratorio de Recursos Alternativos (AFR)
Tel (502) 7952 8000 ext. 7553
Fax (502) 2338 9112 y 13

Solicitado:	Copias Internas	No. :	AFR Lab-2015-02_Tesis_USAC
Josue Fernando Tojes Pacheco		Fecha:	30/enero/2015

Asunto: **INFORME DE ANALISIS DE COMBUSTIBLES¹**

Identificación de Muestra Externa:

Muestras 1-3 5% Muestras 1-3 10% Muestras 1-3 15%

Pruebas Solicitadas:

Análisis de Poder calorífico

Resultados de Análisis Solicitados:

FECHA	ID MUESTRA	PODER CALORIFICO BRUTO J/G
20/01/2015	MUESTRA #1 5%	18,049
20/01/2015	MUESTRA #2 5%	18,330
20/01/2015	MUESTRA #3 5%	18,092
20/01/2015	MUESTRA #1 10%	17,387
20/01/2015	MUESTRA #2 10%	17,524
20/01/2015	MUESTRA #3 10%	17,481
20/01/2015	MUESTRA #1 15%	16,708
20/01/2015	MUESTRA #2 15%	16,952
20/01/2015	MUESTRA #3 15%	16,345

Metodologías Empleadas:
1 ASTM D5468-02(2007)

Revisado por:  **LIC. SERGIO SANTOS**
Químico. Colegiado 1911
Jefe de Laboratorio AFR

MAESTRIA EN INGENIERIA Y TECNOLOGIA DE ASSEGURAMIENTO
MAESTRIA EJECUTIVA EN DIRECCION DE EMPRESAS

Fuente: Laboratorio de Recursos Alternativos, PROVERDE, Cementos Progreso.

Anexo 3. **Informe de resultados obtenidos en el Laboratorio Técnico del Ministerio de Energía y Minas**

	LABORATORIOS TÉCNICOS	PAGINA 1 DE (1)
		LAB-REP- 0501-15
		ORDEN No. L-215-15
		GUATEMALA, 18-03-15

RESULTADOS DE ANÁLISIS

MUESTRA: ARCILLA
 PRESENTADA POR: Josué Tejos
 RESPONSABLE DEL MUESTREO: Josué Tejos
 LOCALIZACION: 13 Avenida 6-63, Barrio Hospital, Amatlán
 FECHA DE MUESTREO: Desconocida
 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 12-03-15
 FECHA DE ANALISIS: 17-03-15
 PRECIO DE ANALISIS: \$ 7.00
 ANALISTA: Ing. Hugo Argueta

MESH	PESO (g)	% RETENIDO
10	11.40	3.99
35	73.03	23.57
80	63.15	22.11
100	11.54	4.04
150	9.76	3.42
Menor que 150	116.78	48.88

Nota: Resultados válidos para la cantidad de muestra entregada al laboratorio.

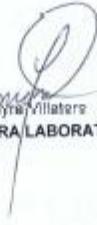

 Ing. Byron Robales
AREA DE MINERALES




 Vo. Bo. Inga. Mayra Viletoro
COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



Continuación del anexo 3.

 <p>Gobierno de Guatemala Ministerio de Energía y Minas</p>	<h2>LABORATORIOS TÉCNICOS</h2>	<p>PAGINA 1 DE (1) LAB-REP-0500-15 ORDEN No. L-215-15 GUATEMALA, 18-03-15</p>													
<h3>RESULTADOS DE ANÁLISIS</h3>															
<p>MUESTRA: ARCILLA PRESENTADA POR: JOSUÉ TOJES RESPONSABLE DEL MUESTREO: Desconocido LOCALIZACION: 13 Avenida 6-63, Barrio Hospital, Amatián FECHA DE MUESTREO: Desconocida FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 12 02 15 FECHA DE ANALISIS: 17-03-15 PRECIO DE ANALISIS: \$ 38.00 ANALISTA: Ing. Hugo Argueta</p>															
<table border="1"> <thead> <tr> <th>DESCRIPCION</th> <th>TECNICA</th> <th>RÉSULTADOS EN FORMA ELEMENTAL</th> <th>ÓXIDOS CALCULADOS (1)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Silicio, % masa</td> <td>E.A.A.</td> <td>35.30</td> <td>75.51 SiO₂</td> </tr> <tr> <td>Aluminio, % masa</td> <td>F.A.A.</td> <td>8.28</td> <td>15.64 Al₂O₃</td> </tr> </tbody> </table>	DESCRIPCION	TECNICA	RÉSULTADOS EN FORMA ELEMENTAL	ÓXIDOS CALCULADOS (1)	Silicio, % masa	E.A.A.	35.30	75.51 SiO ₂	Aluminio, % masa	F.A.A.	8.28	15.64 Al ₂ O ₃			
DESCRIPCION	TECNICA	RÉSULTADOS EN FORMA ELEMENTAL	ÓXIDOS CALCULADOS (1)												
Silicio, % masa	E.A.A.	35.30	75.51 SiO ₂												
Aluminio, % masa	F.A.A.	8.28	15.64 Al ₂ O ₃												
<p>Notas: Resultados válidos para la cantidad de muestra entregada al laboratorio. E.A.A. = Espectrometría de absorción atómica. 1) Los óxidos se calcularon por estequiometría.</p>															
<p> Ing. Byron Rosales AREA DE MINERALES</p>															
<p> Yo. Do. Ing. Maira Villatoro COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS</p>															

Fuente: Laboratorios Técnicos del Ministerio de Energía y Minas, Guatemala.

Anexo 5. Hoja de seguridad del yeso



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD HDS Yeso Express Volcán®

IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO Y DEL PROVEEDOR

Proveedor	:	Compañía Industrial El Volcán S.A.
Dirección	:	Concha y Toro 0602, Puente Alto Santiago - Chile.
Web	:	www.volcan.cl
Teléfono	:	(56-2) 483 0500
Contacto	:	asistencia@volcan.cl
Producto	:	Yeso Express Volcán®

INFORMACIÓN SOBRE LA SUSTANCIA O MEZCLA

Descripción: Yeso Express Volcán® es principalmente sulfato de calcio Hemihidratado.

INFORMACIÓN DE LOS COMPONENTES

Nombre de los componentes	Número CAS	% Peso
Sulfato de Calcio Hemihidratado (CaSO ₄ x 2 H ₂ O)	10034-76-1	77-94
Carbonato de Calcio	1317-65-3	5-15

IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

Marca en la etiqueta según NCh 2190: Ninguna, el producto Yeso Express® no es un producto peligroso.

- a) **Efectos negativos sobre la salud de las personas:** El producto no daña la salud de las personas.
- b) **Efectos sobre el medio ambiente:** El producto no daña el medio ambiente.
- c) **Riesgos de naturaleza física o química:** El producto no presenta riesgos físicos ni tampoco químicos.
- d) **Riesgos específicos:** No tiene.
- e) **Inhalación (efectos agudos):** La respiración del polvo puede causar irritación en la nariz, la garganta o los pulmones, e incluso asfisia, según el grado de exposición.
- f) **Inhalación (efectos crónicos):** El riesgo de sufrir lesiones depende de la duración y el nivel de exposición. El polvo aéreo puede causar irritación o inflamación inmediata o demorada. El contacto ocular con grandes cantidades de yeso puede causar irritación moderada, enrojecimiento y abrasiones en los ojos. Las exposiciones oculares requieren primeros auxilios inmediatos. El polvo podría causar piel seca, molestias e irritación.
- g) **Ingestión:** No ingerir yeso. Aunque no conste que la ingestión de pequeñas cantidades sea nociva, la ingestión de grandes cantidades puede causar una obstrucción, provocando dolor y problemas en el tracto digestivo.
- h) **Afecciones médicas agravadas por la exposición:** Las personas afectadas por enfermedad pulmonar pueden empeorar como consecuencia de la exposición.

Continuación del anexo 5.



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD HDS Yeso Express Volcán®

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Estado físico	Sólido (polvo)
Forma en que se presenta	Polvo blanco
Gravedad específica	3,00 – 6,00
Superficie específica	4.000 – 8.000 cm ² /g
Porosidad	0,37 – 0,47
Diámetro de partícula	2,50 – 6,50 micrones
Consistencia	< 72 cc/ 100g de yeso (Gillmore)
Inicio fraguado	21 – 29 min (Gillmore)
Fin fraguado	30 – 40 min (Gillmore)
Granulometría húmeda	90 – 100% Pasa Malla ASTM #100
Resistencia flexotracción	30 – 40 kg/cm ²
Resistencia compresión	130 – 150 kg/cm ²
Ley (CaSO ₄ ·2H ₂ O)	> = 86% (base muestra re-hidratada)
Agua libre	< 0,05%
Agua combinada	5,5%
Dióxido de Silicio y materias insolubles	< 2%
Cloruro de Sodio (NaCl)	< 0,05%
Carbonato de Calcio (CaCO ₃)	< 12%
Carbonato de Magnesio (MgCO ₃)	< 0,1%

ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Estabilidad: El producto es estable.

Condiciones que deben evitarse: Presencia de humedad.

Materiales que se deben evitar: Ácidos.

Polimerización peligrosa: No ocurre.

Temperatura de descomposición peligrosa: 1.450°C.

Productos de descomposición peligrosos: Es posible que la descomposición térmica produzca óxidos de azufre y humos de óxido cálcico.

Fuente: Transmerquim de Guatemala, S.A.

