



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

**USO DE CHIP DE BAMBÚ PARA LA REDUCCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE  
CARBÓN EN EL ÁREA INDUSTRIAL DE UN INGENIO AZUCARERO DEL DEPARTAMENTO  
DE ESCUINTLA**

**Ing. Angel Armando Tejada Medina**

Asesorado por el MBA Ing. Juan Amilcar López Ramos

Guatemala, marzo 2022



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**USO DE CHIP DE BAMBÚ PARA LA REDUCCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE  
CARBÓN EN EL ÁREA INDUSTRIAL DE UN INGENIO AZUCARERO DEL DEPARTAMENTO  
DE ESCUINTLA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ING. ANGEL ARMANDO TEJADA MEDINA**  
ASESORADO POR EL MBA ING. JUAN AMILCAR LÓPEZ RAMOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN ARTES EN ENERGÍA Y AMBIENTE**

GUATEMALA, MARZO DE 2022





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

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

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

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



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

**USO DE CHIP DE BAMBÚ PARA LA REDUCCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE CARBÓN EN EL ÁREA INDUSTRIAL DE UN INGENIO AZUCARERO DEL DEPARTAMENTO DE ESCUINTLA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 12 de noviembre de 2020.

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned above the name of the author.

**Ing. Angel Armando Tejada Medina**



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

LNG.DECANATO.OI.142.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **USO DE CHIP DE BAMBÚ PARA LA REDUCCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE CARBÓN EN EL ÁREA INDUSTRIAL DE UN INGENIO AZUCARERO DEL DEPARTAMENTO DE ESCUINTLA**, presentado por: **Angel Armando Tejada Medina**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Energía y ambiente después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova 

Decana

Guatemala, marzo de 2022

AACE/gaoc





**Guatemala, marzo de 2022**

LNG.EEP.OI.142.2022

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

**“USO DE CHIP DE BAMBÚ PARA LA REDUCCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE CARBÓN EN EL ÁREA INDUSTRIAL DE UN INGENIO AZUCARERO DEL DEPARTAMENTO DE ESCUINTLA”**

presentado por **Angel Armando Tejada Medina** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Energía y ambiente** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*

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

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









Guatemala, 16 de octubre 2021

Como coordinador de la **Maestría en Artes en Energía y Ambiente** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“USO DE CHIP DE BAMBÚ PARA LA REDUCCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE CARBÓN EN EL ÁREA INDUSTRIAL DE UN INGENIO AZUCARERO DEL DEPARTAMENTO DE ESCUINTLA”** presentado por el Ingeniero **Angel Armando Tejada Medina** quien se identifica con carné **202090353**.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*

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





Guatemala, 09 octubre 2021.

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

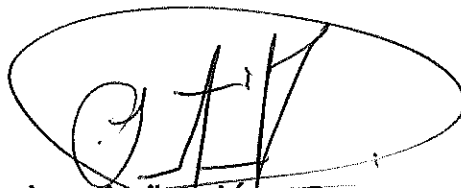
**Distinguido Ingeniero Álvarez:**

Atentamente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que como asesor del trabajo de graduación del estudiante Angel Armando Tejada Medina, Carné número 202090353, cuyo título es **"USO DE CHIP DE BAMBÚ PARA LA REDUCCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE CARBÓN EN EL ÁREA INDUSTRIAL DE UN INGENIO AZUCARERO DEL DEPARTAMENTO DE ESCUINTLA"**, para optar al grado académico de Maestro en Energía y Ambiente, he procedido a la revisión del INFORME FINAL y del ARTÍCULO.

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

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.

Atentamente,



**Ing. Juan Amilcar López Ramos**  
Magister Artium en Administración de Empresas  
Asesor

**Juan Amilcar López Ramos**  
INGENIERO ELECTRICISTA  
COLEGIADO No. 6657



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por ser la única fuente de sabiduría infinita, gracia, amor y la más importante influencia en mi carrera para culminar esta meta.
- Mis padres** Armando Tejada y Laura Medina de Tejada. Por su amor que será siempre mi inspiración.
- Mis hermanos** Kenny y Fernanda Tejada Medina por su compañía y ser dos ángeles en mi vida.
- Mi familia** Por su cariño, apoyo y ser una importante influencia en mi carrera, entre otras cosas.
- Mis amigos** A mis amigos que están lejos, pero la amistad ha perdurado y me han apoyado en los buenos y malos momentos.
- Mis compañeros** A todos mis compañeros que fueron parte de este proceso de formación académica, en especial a mi grupo de trabajo Pablo García, Edinson Hernández, Mario Castellanos y Merary Marroquín.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por ser mi casa de estudios que me ha permitido formarme con ética y alto compromiso social.

**Escuela de Estudios de  
Postgrado de Ingeniería**

Por brindarme los conocimientos y permitirme desarrollar mis aptitudes técnicas y científicas, como apoyo necesario para culminar con esta meta.

**La empresa**

Por darme la oportunidad de aplicar el conocimiento en sus instalaciones.

**Mi asesor**

MBA. Ing. Amílcar López, por la amistad, por motivarme y haberme acompañado con su experiencia y profesionalismo en la realización de este trabajo.

**Dr. José A. Rosal**

Por su orientación académica, su paciencia y confianza para culminar con mi proyecto de tesis.





## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIII
OBJETIVOS.....	XVII
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Antecedentes de la investigación.....	1
1.2. Bambú.....	4
1.2.1. Características del bambú.....	4
1.2.1.1. Planta.....	7
1.2.1.2. Rizoma.....	8
1.2.1.3. Tallo, crecimiento y fisiología.....	10
1.2.1.4. Hojas y floración.....	10
1.2.1.5. Clasificación del bambú.....	11
1.2.2. Características de la planta de bambú.....	12
1.2.3. ¿Qué es la biomasa?.....	13
1.2.4. La biomasa como fuente energética.....	14
1.2.5. Bambú en Guatemala.....	15
1.2.6. Estudios del bambú en Guatemala.....	17
1.3. Transformación del bambú a chip.....	19
1.3.1. Almacenamiento de la biomasa.....	20

1.3.2.	Transporte de la biomasa .....	21
1.3.3.	Secado de la biomasa.....	22
1.3.4.	Proceso de trituración de la biomasa.....	23
1.3.5.	Pesaje y control de dosificación de la biomasa .....	24
1.4.	Calderas de carbón y biomasa .....	24
1.4.1.	Calderas de combustión de carbón .....	25
1.4.2.	Calderas de combustión de biomasa.....	25
1.4.3.	Fases del proceso de combustión de biomasa.....	28
1.4.4.	Tipos de calderas por su disposición de fluidos.....	29
1.4.4.1.	Calderas acuotubulares .....	29
1.4.4.2.	Calderas pirotubulares.....	30
1.4.5.	Tipos de calderas por su tecnología .....	31
1.4.5.1.	Calderas de parrillas .....	31
1.4.5.2.	Calderas de lecho fluidizado.....	32
1.4.5.3.	Calderas de inyección.....	33
1.5.	Consumo energético en ingenios azucareros.....	33
1.5.1.	Energía eléctrica .....	34
1.5.2.	Eficiencia energética.....	35
1.5.3.	Pérdidas de energía eléctrica .....	35
2.	PREPARACIÓN Y RECOLECCIÓN DEL BAMBÚ .....	37
2.1.	Biomasa disponible .....	37
2.2.	Concentración de biomasa del cultivo de bambú .....	39
2.3.	Transporte hacia la central energética.....	40
3.	PROCESAMIENTO DEL CHIP DE BAMBÚ .....	43
3.1.	Almacenamiento de la materia prima.....	43
3.2.	Reducción de humedad del bambú .....	44
3.3.	Análisis de propiedades del chip de bambú.....	46

3.4.	Proceso de chipeo del bambú.....	49
3.4.1.	Traslado de materia prima .....	51
3.4.2.	Reducción de la granulometría .....	51
3.4.3.	Chipeo de bambú .....	51
4.	PRUEBA DE COMBUSTIÓN DE BAMBÚ .....	53
4.1.	Proceso para la combustión de bambú.....	54
4.2.	Eficiencia y consumos de la caldera .....	60
4.3.	Estimación del carbón reemplazado por chip de bambú .....	64
4.4.	Comparativo de combustibles en la producción de energía ....	65
5.	BENEFICIO ECONÓMICO DEL USO DE CHIP DE BAMBÚ .....	67
5.1.	Estimación de costos de chipeo de bambú.....	67
5.2.	Ahorro económico de carbón por el uso de chip de bambú.....	69
6.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....	71
6.1.	Disponibilidad del chip de bambú para la generación de energía eléctrica.....	71
6.2.	Consumos de combustible en la producción de energía eléctrica .....	75
6.3.	Uso del bambú como combustible sustituto del carbón .....	77
6.4.	Cálculo de costos y ahorro energético del uso de bambú .....	81
6.5.	Cálculo de emisiones de CO <sub>2eq</sub> .....	83
7.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	85
	CONCLUSIONES .....	91
	RECOMENDACIONES.....	93
	BIBLIOGRAFÍA.....	95

APÉNDICES..... 101  
ANEXOS..... 105

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Características típicas del bambú .....	6
2.	Partes comerciales de Guadua Angustifolia Kunth.....	8
3.	Partes de una central termoeléctrica de biomasa.....	26
4.	Calderas de parrilla .....	32
5.	Esquema de transporte de biomasa a la central energética.....	41
6.	Área de almacenamiento de la materia prima .....	43
7.	Bambú antes del proceso de secado natural.....	45
8.	Bambú después del proceso de secado natural.....	45
9.	Muestra de bambú chipeado (triturado).....	46
10.	Análisis de poder calorífico en equipo AC500 .....	47
11.	Comportamiento del poder calorífico y humedad del bambú.....	48
12.	Máquina chipeadora de bambú.....	49
13.	Chip de bambú.....	50
14.	Proceso de alimentación de bambú chipeado .....	52
15.	Biomasa almacenada en forma de chip bambú.....	53
16.	Resumen de etapas del proceso .....	54
17.	Diagrama del proceso de producción de energía utilizando chip de bambú .....	55
18.	Pantalla de control del circuito de biomasa.....	56
19.	Combustión de bambú en el hogar de la caldera de vapor .....	57
20.	Muestras del sistema de ceniza 1 y banda húmeda .....	58
21.	Medición de gases del analizador Bacharach.....	59
22.	Comportamiento de eficiencias al mínimo técnico.....	62

23.	Comportamiento de eficiencias a máxima potencia .....	64
24.	Precio del carbón mineral .....	70
25.	Estimación de materia prima de bambú disponible .....	73
26.	Comportamiento de la producción de chip de bambú .....	75
27.	Sustitución de carbón por el uso de chip a mínimo técnico.....	79
28.	Sustitución de carbón por el uso de chip a máxima potencia.....	81

## TABLAS

I.	Clasificación de bambúes según las características de los rizomas .....	9
II.	Pendientes en terrenos de cultivos en Suchitepéquez.....	39
III.	Resultados de análisis de chip de bambú .....	48
IV.	Porcentaje de inquemados en la ceniza .....	58
V.	Lecturas de Bacharach.....	60
VI.	Eficiencia y consumos de la caldera a mínimo técnico .....	61
VII.	Eficiencia y consumos de la caldera a máxima potencia .....	63
VIII.	Carbón reemplazado por tonelada de chip de bambú.....	65
IX.	Análisis comparativo de combustibles.....	65
X.	Comparación de propiedades de chip de bambú vs bagazo.....	66
XI.	Consumo y costo de energía del chipeo de bambú .....	67
XII.	Costo total de chipeo del bambú por tonelada .....	68
XIII.	Ahorro económico de carbón sustituido por chip de bambú.....	69
XIV.	Disponibilidad de materia prima de bambú .....	72
XV.	Producción de chip de bambú .....	74
XVI.	Consumos de combustible a mínimo técnico de potencia.....	76
XVII.	Consumos de combustible a máxima potencia .....	77
XVIII.	Sustitución de carbón por chip de bambú a mínimo técnico .....	78
XIX.	Sustitución de carbón por chip de bambú a máxima potencia .....	80
XX.	Ahorro energético del chip de bambú .....	82

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>°C</b>	Grado celsius
<b>°F</b>	Grado fahrenheit
<b>g</b>	Gramo
<b>g/cm<sup>3</sup></b>	Gramo por centímetro cúbico
<b>h</b>	Hora
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	Kilogramo por centímetro cuadrado
<b>kW</b>	Kilovatio
<b>kWh</b>	Kilovatio-hora
<b>lb</b>	Libra
<b>PSI</b>	Libras por pulgada cuadrada
<b>MW</b>	Megavatio
<b>m</b>	Metro
<b>m<sup>2</sup></b>	Metro cuadrado
<b>mg</b>	Miligramo
<b>mm</b>	Milímetro
<b>nm</b>	Nanómetro
<b>%</b>	Porcentaje
<b>t</b>	Tonelada métrica
<b>t/h</b>	Tonelada métrica por hora
<b>BTU</b>	Unidad británica térmica
<b>BTU/lb</b>	Unidad térmica británica por libra





## GLOSARIO

<b>Biocombustible</b>	Combustible derivado de fuentes renovables y obtenido mediante el tratamiento físico o químico de materia vegetal o residuos orgánicos.
<b>Caldera</b>	Es un equipo capaz de generar calor por la combustión de un combustible en su interior para transferir a un fluido (agua).
<b>Ceniza</b>	Es el producto final de la combustión de un material, que regularmente está compuesto por sustancias inorgánicas no combustibles.
<b>Chip</b>	Pequeño fragmento de biomasa que posee apariencia de astilla.
<b>Chipeo</b>	Proceso de trituración de la biomasa en pequeños fragmentos.
<b>Densidad</b>	Se refiere a la relación que existe entre el peso de un material o sustancia y el volumen que ocupa el mismo.
<b>Energía eléctrica</b>	Es el movimiento de cargas eléctricas a través de un conductor eléctrico.

<b>Generador eléctrico</b>	Es una máquina eléctrica rotativa, capaz de convertir la energía mecánica en energía eléctrica.
<b>Humedad</b>	Es la cantidad o porcentaje de agua que presenta un cuerpo o material.
<b>Poder calorífico</b>	Es la cantidad de calor que libera un combustible cuando logra un proceso de combustión completa.
<b>Poder calorífico inferior</b>	Es la cantidad de calor desprendido en la combustión completa de combustible, sin contar la parte correspondiente al calentamiento y vapor de agua originado en los gases de combustión.
<b>Poder calorífico superior</b>	Es la cantidad máxima de calor que puede entregar la combustión completa del combustible, cuando el vapor de agua originado en la combustión está condensado.
<b>Potencia eléctrica</b>	Es un parámetro que indica la proporción de energía eléctrica que se transfiere por una fuente generadora.
<b>Turbina de vapor</b>	Es un equipo utilizado para transformar la energía térmica del vapor en energía mecánica para transferir un movimiento rotativo a un generador.
<b>Stacker</b>	Es una maquinaria cuya función principal es apilar materiales a granel como el carbón mineral.

## RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo, aportar una alternativa para la reducción de la demanda energética de carbón mineral en el área industrial de un ingenio azucarero del departamento de Escuintla, a través del uso de bambú como una fuente de biocombustible para la producción de energía eléctrica, ya que es una planta de rápido crecimiento y costo relativamente bajo, lo cual contribuye a estimar su disponibilidad y ahorro energético en reemplazo del carbón mineral para ofrecer una solución más sostenible.

El estudio se realizó en una central térmica de un ingenio azucarero del departamento de Escuintla, iniciando con una logística efectiva para la recolección y almacenamiento de bambú, por medio de equipos y maquinaria que facilitan el proceso de descarga, por lo cual se estableció apilar la biomasa a alturas superiores a los cuatro metros de alto, para el mejor aprovechamiento del espacio disponible en área de descarga y almacenar el bambú de manera inclinada, para que drene su contenido de agua antes de ser procesado en forma de chip y transportado hacia los alimentadores de biomasa en las calderas.

Para el manejo adecuado del bambú se consideraron algunos factores que afectan su transporte y combustión en calderas, como la humedad y la baja densidad, ya que elevan el costo de transporte por tonelada y afecta su rendimiento para la producción de energía eléctrica. Por lo cual, se evaluó por medio de análisis de laboratorio la composición de las muestras de bambú chipeado, determinando principalmente que su porcentaje de humedad en promedio fue de 23.29 % y su poder calorífico obtenido en promedio fue de 6,041

BTU/lb; dichas características brindaron resultados satisfactorios para la combustión en la operación de las calderas.

En el estudio se realizó una prueba de combustión de chip de bambú en la cual se demostró que a máxima potencia se consume en promedio 44.15 t/h, lo que equivale al reemplazo de 21.7 t/h de carbón para producir 46,000 kWh de energía eléctrica. Durante la prueba de combustión también se analizaron las emisiones de gases procedentes de la combustión del chip de bambú para determinar los niveles de CO<sub>2</sub> que se descargan por la chimenea de la caldera y la concentración de otros gases.

En relación al carbón reemplazado por chip de bambú y en base a los análisis de las propiedades del chip de bambú obtenidos de laboratorio, esencialmente por su poder calorífico y consumos de combustibles durante la prueba de combustión, se estimó que por cada 1.86 toneladas de chip de bambú se sustituye 1 tonelada de carbón mineral.

Este estudio también aporta datos en el aspecto financiero, para disminuir el rubro de costos en el pago de la factura por consumo de carbón mineral en un ingenio azucarero, por lo cual se presenta un ahorro energético de 4.52 % obtenido por la utilización de chip de bambú como combustible alternativo para reducir el consumo de carbón mineral, lo cual se traduce a un ahorro económico directo de Q. 43.55 por tonelada de carbón sustituido por chip de bambú.

Por último, el estudio realizado demuestra la viabilidad del uso de chip de bambú como fuente de combustible renovable en sustitución del carbón mineral, ya que brinda un ahorro energético y contribuye a la reducción de gases de efecto invernadero provocados por fuentes energéticas a base de combustibles fósiles.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El uso de la energía y los servicios que ella provee han sido considerados como instrumentos para alcanzar el desarrollo sostenible. Sin embargo, la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) procedentes de la generación de energía con combustibles fósiles es parte del problema del cambio climático y el explotar fuentes renovables también tiene consecuencias ambientales, económicas y sociales.

En el área industrial de los ingenios azucareros de Guatemala, la tecnología predominante para la combustión son las calderas acuotubulares y el carbón utilizado para la generación de electricidad es la hulla bituminosa, importada regularmente de Colombia. La hulla bituminosa posee un menor contenido de carbón que la antracita y un poder calorífico más bajo; la eficiencia de combustión reportada para esta tecnología es de 35 %. Los precios de este combustible dependen hasta cierto punto del valor del petróleo, lo cual hace que la generación de energía a través de carbón sea económicamente competitiva.

Los ingenios azucareros producen energía térmica con bagazo de caña durante la época de zafra, la cual se aprovecha en los procesos de producción de azúcar. Adicionalmente, también producen electricidad que venden al Sistema Nacional Interconectado (SNI), por lo cual los ingenios son conocidos como cogeneradores. Durante la época de no zafra, la mayoría de ellos produce energía con carbón. Sin embargo, es un tanto difícil cuantificar la cantidad exacta de carbón que se consume, así como la energía que se genera con esta fuente energética, considerando el uso de calor de los equipos.

La generación de energía eléctrica que utiliza combustibles fósiles se produce usando plantas térmicas. Por lo general, una planta térmica tiene cuatro componentes, la primera una caldera, como segundo una turbina de vapor para transformar el calor en energía mecánica, en tercero un generador de electricidad, y por último un condensador para enfriar el vapor y reciclar el agua. En estos sistemas, el principal componente es el calor proveniente de la combustión del combustible fósil. La mayoría de las plantas térmicas que funcionan utilizando combustibles fósiles se encuentran en los departamentos de Escuintla y Guatemala.

A pesar de las oportunidades que la energía renovable proporciona en Guatemala, dos estudios recientes, demuestran la falta de inversión de recursos financieros para incentivar la descentralización energética y cerrar las brechas para la implementación de sistemas energéticos renovables.

Importante mencionar que las consecuencias para la salud por la sobreexposición al polvo respirable de carbón, consiste en partículas de polvo de un tamaño de menos de 10 micrones, que son lo suficientemente pequeñas para que se inhalen y permanezcan en los pulmones. Se sabe desde hace mucho tiempo que la exposición al polvo respirable es una amenaza grave para la salud de los trabajadores de muchos sectores.

Se comprende que el carbón es un combustible fósil, que al quemarse libera un alto contenido de CO<sub>2</sub>, cuyos gases incrementan el efecto invernadero natural del planeta. Las emisiones de GEI en Guatemala son muy bajas comparadas con las emisiones mundiales; según el Banco Mundial indica que, al año 2012, equivalían al 0.06 % de las emisiones globales. Si son tan bajas, ¿Por qué debemos mitigarlas? Porque es la única forma de abordar la causa del calentamiento global y del cambio climático a largo plazo.

Lo anterior repercute también en el hecho de que el consumo de combustibles fósiles (carbón) sea reducido significativamente, y a la vez evitar el aumento de costos que provocan una baja eficiencia energética. Esto combinado con el poco uso de las biomásas alternativas, por ejemplo, el bambú, debido principalmente al desconocimiento de su manejo adecuado para el transporte y combustión en calderas acuotubulares, no ayuda a sustituir por completo el consumo de carbón para la generación de energía eléctrica.

En los ingenios azucareros el uso intensivo de energía es evidente, lo cual conlleva a que los costos asociados a combustibles sean elevados principalmente en época no zafra y con el consecuente impacto ambiental. Por ello se plantea la pregunta principal: ¿En qué medida se podrá reducir el consumo de carbón usando chip de bambú como biomasa alternativa, para incrementar la eficiencia energética en la generación de energía en un ingenio azucarero?

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

- ¿Cuál es la cantidad de consumo energético de carbón en la generación de energía en un ingenio azucarero?
- ¿De cuánto es el consumo equivalente de tonelada de bambú por tonelada de carbón?
- ¿Cuál es la disponibilidad de chip de bambú para la generación de energía eléctrica?
- ¿De cuánto es el ahorro energético obtenido para la utilización de chip de bambú como combustible alternativo?





# OBJETIVOS

## General

Evaluar la conveniencia de la utilización del bambú como biomasa-combustible para reducir el carbón mineral en la generación de energía eléctrica.

## Específicos

- Definir la cantidad de consumo de carbón que se utiliza para la generación de energía eléctrica.
- Determinar la cantidad de toneladas de carbón que se pueden reemplazar por toneladas de bambú.
- Identificar cuánta disponibilidad de chip de bambú hay para la generación de energía eléctrica.
- Calcular el ahorro energético obtenido por la utilización de chip de bambú como combustible alternativo.



## RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

El estudio realizado es de tipo cuantitativo descriptivo, ya que se evaluó el uso de la biomasa de bambú en forma de chip, como combustible a través de la combustión en calderas acuotubulares de parrillas viajeras, para generar energía eléctrica y reducir el consumo energético del carbón.

Por lo que en esta investigación se obtuvieron datos para establecer el uso del bambú como biocombustible para las calderas de biomasa; ya que en general, por su poder calorífico, bajo contenido de ceniza y bajo contenido de azufre; el bambú se consideró, como una fuente de biomasa adecuada para su conversión a energía y a la vez se obtienen cero emisiones de acuerdo a los mecanismo de desarrollo sostenible, puesto que lo que se emite, se vuelve a capturar con un nuevo cultivo; lo cual hace al proyecto sostenible y de bajo impacto para el medio ambiente.

Se inició con la preparación y recolección del bambú, ya que uno de los factores más influyentes en este estudio fue la disponibilidad de la biomasa de bambú, por lo que fue necesario un análisis del potencial del cultivo en la región sur, para determinar aquellas zonas más propicias que presentan una mayor aptitud para el aprovechamiento del recurso y su viabilidad para recolección, transporte y almacenamiento de la biomasa de bambú.

Se realizó un cuidadoso tratamiento de secado natural del bambú, el cual optimizó la capacidad de almacenamiento y ayudó a tener una combustión libre de problemas (bajo porcentaje de humedad), con una mínima generación de ceniza.

Luego se realizó el procesamiento del chip de bambú en la central energética del sector industrial del ingenio azucarero, a través de una máquina chipeadora con una malla de 1 pulgada de diámetro para evitar el reproceso y las astillas largas; con la finalidad de no provocar atoros en las caídas de los conductores de biomasa.

Una vez obtenido el chip de bambú a partir del procesamiento físico directo de la biomasa, se obtuvieron pequeños fragmentos de bambú con un tamaño de entre 20 y 50 milímetros; con lo cual se consiguió aumentar la densidad del bambú, poder calorífico y facilitó el transporte del bambú en los conductores de biomasa hacia la caldera de vapor.

Posteriormente el chip de bambú luego de ser recolectado y procesado fue analizado por medio de varias muestras tomadas de forma diaria en el laboratorio de combustibles, donde se determinó el contenido de humedad, volátiles, ceniza y poder calorífico en BTU/lb. Los datos obtenidos del análisis de laboratorio sobre el chip de bambú se compararon con el carbón mineral, para determinar la relación de la cantidad de toneladas de bambú que equivalen a una tonelada de carbón.

Se procedió con la prueba de combustión de chip de bambú en la central energética del ingenio azucarero, para determinar la viabilidad de utilizar biomasa de bambú chipeado al 100 % en la caldera de vapor al mínimo técnico y máxima carga. Previo a la combustión, se realizaron pruebas de circulación de chip de bambú en los conductores de biomasa para ajustar la capacidad de estos y se alimentó la cantidad adecuada de chip de bambú. Se chipearon cientos de toneladas de bambú y se suministró combustible hacia la caldera a través de un circuito de conductores de biomasa.

A través de los datos de las gráficas del sistema de automatización industrial de la caldera de vapor, se evaluaron los resultados obtenidos de la prueba de combustión de chip de bambú, la eficiencia de la caldera y sus respectivos consumos con los diferentes tipos de combustibles. Por lo que con dichos resultados se pudo determinar la cantidad de carbón reemplazado por el uso de biomasa de bambú.

Por último, se estimó el beneficio económico de la producción de energía eléctrica a través de la utilización del chip de bambú como combustible alternativo; lo cual se determinó con la producción de kWh/t y el precio de la energía comparado con el costo total desde la recolección, procesamiento y producción de energía.



## INTRODUCCIÓN

Los ingenios azucareros de Guatemala en el sector industrial presentan una tecnología predominante para la combustión por medio de plantas térmicas a través de calderas acuotubulares, utilizando en cierta medida como combustible el carbón mineral para la generación de electricidad. Sin embargo, la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) que provienen de la generación de energía con combustibles fósiles, es parte del problema del cambio climático. Esto combinado con el poco uso de las biomásas alternativas, por ejemplo, el bambú, debido al desconocimiento de su manejo adecuado para el transporte y combustión en calderas acuotubulares, no ayuda a sustituir por completo el consumo de carbón para la generación de energía eléctrica.

El estudio presenta una metodología que aporta datos para establecer el uso del bambú como biocombustible para las calderas de biomasa; ya que en general, por sus propiedades de poder calorífico y bajo contenido de ceniza, el bambú puede contribuir con la diversificación de las fuentes de producción de biomasa, para su conversión a energía y ser una alternativa para la explotación de la energía renovable en la industria azucarera, ya que a la vez se obtiene cero emisiones de acuerdo a los mecanismo de desarrollo sostenible, puesto que lo que se emite, se vuelve a capturar con un nuevo cultivo; lo cual hace al proyecto sostenible y de bajo impacto para el medio ambiente.

Para la realización del estudio, se consideró una fase inicial de preparación y recolección de bambú, para identificar las zonas con mayores recursos de biomasa para la extracción de bambú. Posteriormente se llevó a cabo el procesamiento de chip de bambú, iniciando con un tratamiento de secado natural

y luego se trituró el bambú en pequeños fragmentos. Después de ser recolectado y procesado el chip de bambú, se tomaron varias muestras que fueron analizadas en laboratorio de combustibles para determinar sus propiedades de humedad, ceniza y poder calorífico.

El estudio también consideró la realización de una prueba de combustión para determinar la viabilidad de utilizar chip de bambú en las calderas de vapor. Al finalizar la prueba se obtuvieron las eficiencias y consumos de la caldera, para estimar el carbón reemplazado por bambú y determinar el ahorro energético por el uso de chip de bambú como biocombustible.

Los resultados obtenidos fueron evaluados por medio de un análisis técnico y financiero adecuado, para el aprovechamiento del uso de bambú como una fuente de combustible para la producción de energía eléctrica, ya que es una planta de rápido crecimiento y costo relativamente bajo que ofrece una solución más sostenible. Se analizaron los factores que pueden afectar el manejo adecuado del bambú para su transporte y combustión en calderas, como la humedad y la baja densidad, que elevan el costo de transporte por tonelada y afecta su rendimiento para la producción de energía. También se evaluó la composición de las muestras de bambú chipeado y se determinó principalmente su porcentaje de humedad y poder calorífico. Posteriormente se presentó un ahorro energético obtenido por la utilización de bambú como combustible alternativo para reducir el consumo de carbón mineral.

En el capítulo 1, se presentan los antecedentes más importantes para esta investigación y una revisión bibliográfica de los fundamentos teóricos de este estudio en particular, tales como, descripción y características de la planta de bambú, la biomasa como fuente energética, transformación del bambú a chip, transporte y almacenamiento de la biomasa. Seguidamente en el capítulo 2, se



muestra el proceso de preparación y recolección de bambú que se utilizó como materia prima.

En el capítulo 3, se detalló el procesamiento para la obtención de chip de bambú y los diferentes análisis que se realizaron para determinar las propiedades del bambú chipeado. Posteriormente en el capítulo 4, se presenta de forma detallada la prueba de combustión de bambú, analizando eficiencias y consumos de combustibles en la caldera.

En el capítulo 5, se proyectaron los beneficios económicos que se obtienen por el uso de chip de bambú como biocombustible. En los capítulos 6 y 7 se presentan los resultados más significativos de la investigación y la discusión de los mismos respectivamente. Finalmente se muestran las conclusiones obtenidas de la investigación y las recomendaciones pertinentes.



# **1. MARCO TEÓRICO**

## **1.1. Antecedentes de la investigación**

La utilización de biomasa proveniente principalmente de madera brinda un interesante ahorro energético para la sustitución de los combustibles fósiles, por lo cual surge el interés de evaluar la posibilidad de utilizar el bambú como combustible para la producción de energía eléctrica, ya que presenta características de ser una planta rápido crecimiento y fácil obtención en Guatemala considerada una grama, que actualmente no tiene legislación en su manejo.

Actualmente en Guatemala, no se tiene una cifra aproximada de la producción de bambú, lo que se puede mencionar es que cada vez va en aumento, esto por la importancia que ha cobrado el bambú en el país por los diferentes estudios y el interés que las universidades e instituciones gubernamentales y empresas privadas le han puesto. Además de ello los distintos proyectos que se han realizado para fomentar e incentivar la producción, transformación, comercialización e investigación técnica y de mercados del bambú en Guatemala.

Según estadísticas del Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola (1990), indican que en Guatemala se reconocen alrededor de 22 especies de bambú las cuales equivalen aproximadamente a 12,000 hectáreas de cultivo, se estima que el 50 % es de uso comercial.

El bambú se empezó a trabajar con mayor énfasis en el país con el apoyo de la misión de la República de China, que ha trabajado con el Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola (ICTA) desde varios años, encontrando que la mayor densidad de producción de bambú está en la costa sur.

Según ICTA (1990) en Guatemala las autoridades de la embajada de la República de China descubrieron el potencial que hay en el cultivo del bambú, así que dispusieron enviar al especialista Taiwanés en bambú, el doctor Wei Chin Lin, dicho especialista realizó sus recomendaciones para la producción de bambú en los años de 1950, posteriormente se trabajó con el Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas ICTA y desde entonces se encuentran trabajando principalmente en la recopilación de información, investigaciones y algo importante la transferencia de esa tecnología a la nación Guatemalteca.

En Guatemala, actualmente la principal importancia económica que representa el bambú en la industria es como una fuente de materia prima para la elaboración de artesanías, puentes rurales, pisos, muebles, enseres del hogar, ornato, alimento, invernaderos, conducción de agua y construcciones de viviendas (Fernández, 2004).

Por lo mencionado anteriormente, se considera que el bambú es una especie que cumple las mayores necesidades de la comunidad rural, para realizar explotaciones de forma sostenible que ayuden a mejorar la calidad de vida, contribuyendo a disminuir la pobreza en Guatemala y en las demás regiones donde se establecerá el cultivo. El impacto social más evidente se refleja en una mayor facilidad de la obtención de madera, la cual es de mayor accesibilidad y representa un bajo costo.

Para Fernández (2004) es importante también mencionar el impacto ecológico del bambú como fuente conservacionista en los ambientes naturales, debido a su fácil propagación, rápido crecimiento, producción de oxígeno cuatro veces más que otras plantas, captura de bióxido de carbono, son aspectos de alta importancia en la implementación del Protocolo de Kioto.

Es evidente que en Guatemala aún no se ha aprovechado el recurso renovable de la planta de bambú como combustible alternativo para la producción de energía eléctrica, considerando que el bambú puede ser un buen recurso para detener la deforestación del planeta por ser la planta de mayor crecimiento. Es un defensor del ambiente, debido a que es un procesador de bióxido de carbono (12 t/ha por año), mucho más eficiente que la mayoría de los árboles del bosque tropical por lo que con una correcta planificación de reforestación se puede aprovechar dicho recurso en la matriz energética de forma amigable con el medio ambiente (Torres, 2006).

En Japón, la provincia de Kumamoto es el segundo mayor productor de bambú después del territorio de Kagoshima. En 2015, se instauraron tres empresas en Nankan con fondos de empresas locales, con la intención de crear un modelo de negocio bajo el cual la planta de bambú podría utilizarse mientras se revitaliza la economía. Uno de ellos maneja la cosecha de bambú y la primera etapa de procesamiento, mientras que los otros dos se ocupan de procesar el bambú en material de construcción, generar electricidad y suministrar calor con la utilización de bambú como combustible de biomasa.

En una instalación que se finalizó en agosto, el bambú se combustiona para calentar y evaporar el aceite y girar las turbinas, obteniendo como resultado una producción máxima de aproximadamente 1,000 kilovatios. Además de la producción de energía eléctrica, se suministra calor, en parte con agua caliente.

La mayor proporción de la energía y el calor se transfieren a la fábrica de Bamboo Material, una compañía que participa en el proyecto que procesa los materiales de construcción, minimizando así los costos de esa compañía (González, 2019).

Según INBAR (2017) es importante mencionar que la gasificación de bambú se puede convertir en una innovadora forma de electrificar a las comunidades rurales que viven fuera de la red. En Madagascar, INBAR se ha enfocado en construir un gasificador de bambú de 25 kW, que tiene como finalidad generar electricidad para un centro de capacitación y alrededor de 250 hogares. En Indonesia, se está promoviendo a través de una compañía el uso de biomasa obtenida de la planta de bambú para la producción descentralizada de energía, con el objetivo de brindar energía eléctrica en algunas de los 10 millones de casas que viven sin electricidad. Y en Japón, una compañía de electricidad dio a conocer recientemente sus planes para construir la primera central eléctrica de bambú del país.

## **1.2. Bambú**

Para McClure (1955) bambú es el nombre común que se le da al conjunto de plantas que pertenecen a la familia de las Poaceae herbáceas, las cuales se identifican por ser de porte arbustivo, de tallos largos, leñosos y que desarrolla culmos (cañas) de buen tamaño y diámetro.

### **1.2.1. Características del bambú**

El cultivo de bambú ofrece importantes aportes ambientales, principalmente la fijación de CO<sub>2</sub> atmosférico, lo cual contribuye a la reducción de gases de efecto invernadero. Además, las plantas de bambú también se caracterizan por presentar una foto metabolismo de tipo C<sub>4</sub>, que las convierte en especies muy

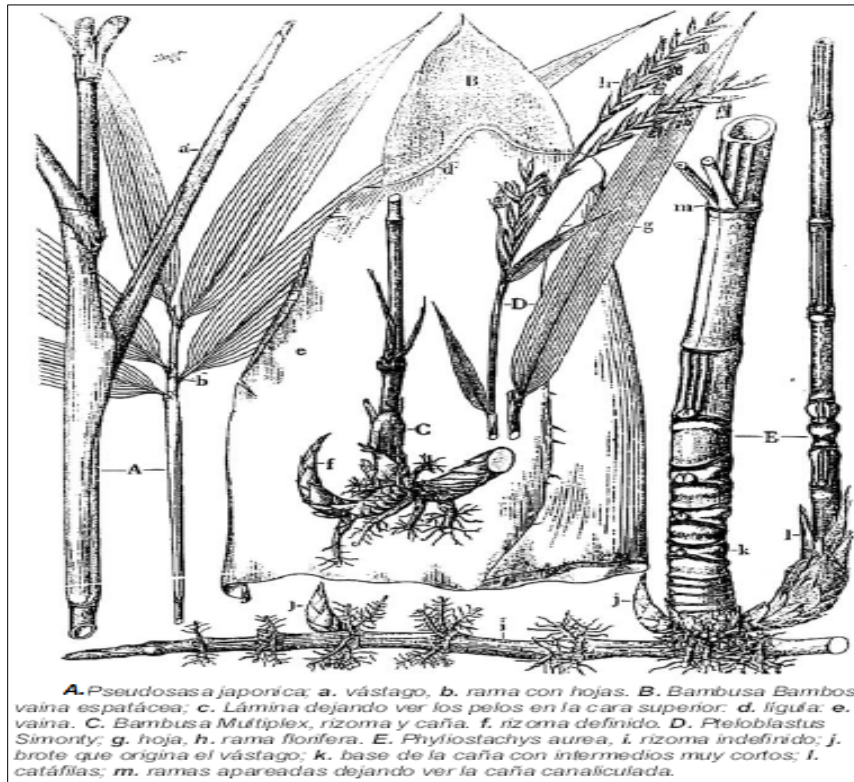
eficientes para la producción de biomasa. Se desarrolla especialmente en las zonas subtropicales y tropicales, que van desde el nivel del mar hasta alturas de cuatro mil metros como en el Himalaya y algunas zonas de China. El bambú no es una madera, sin embargo, se le puede considerar como una madera con fibras, que posee cualidades superiores al hierro por ser tan resistente como él, pero mucho más flexible y económico, por lo que se le considera el acero vegetal (McClure, 1955).

Para Mercedes (2006) la planta de bambú es considerada una de las más grandes fuentes naturales renovables del mundo, debido a que provee una alta variedad de productos forestales de múltiples usos, los cuales tienen un rol importante en la economía. Los bambúes presentan facilidad para cultivar, utilizar, transportar, cortar y moldear, tienen un rápido crecimiento y alcanzan la madurez relativamente en un período de tiempo corto. Por lo cual, debido a su rápido crecimiento, sus diversas aplicaciones, grado de protección que ofrece al suelo y su adaptación a diferentes condiciones ecológicas, el bambú es considerado como una especie de gran importancia para los proyectos de reforestación y su efectiva utilización como biomasa de manera sostenible.

Por su parte Dimitri (1978), indica que las características que hacen a los bambúes diferentes del resto de las gramíneas son las siguientes:

- Poseen hábito perenne.
- Los rizomas mayormente se presentan bien desarrollados.
- Los tallos o culmos son siempre fuertes y lignificados.
- Las hojas se caracterizan por un pseudopécíolo.
- El antecio tiene tres lodículas.
- Su período de florecimiento puede llevar muchos años, en algunas especies hasta alrededor de cien años.

Figura 1. Características típicas del bambú



Fuente: Dimitri. (1972). *Algunas características típicas del bambú*.

Para Mercedes (2006):

La subfamilia Bambusoideae contiene dos tribus, las denominadas Olyreae las cuales incluyen todos los llamados bambúes herbáceos y que no poseen las características antes mencionadas; y la tribu, Bambuseae, son los llamados bambúes verdaderos o simplemente bambúes. Los bambúes poseen dos características biológicas que los hacen ser plantas extraordinarias: la floración y su rápido crecimiento. Es bien difundido que algunas especies de bambú pueden llegar a crecer 1.25 m cada 24 horas, y esto se ha observado experimentalmente en una de las especies más



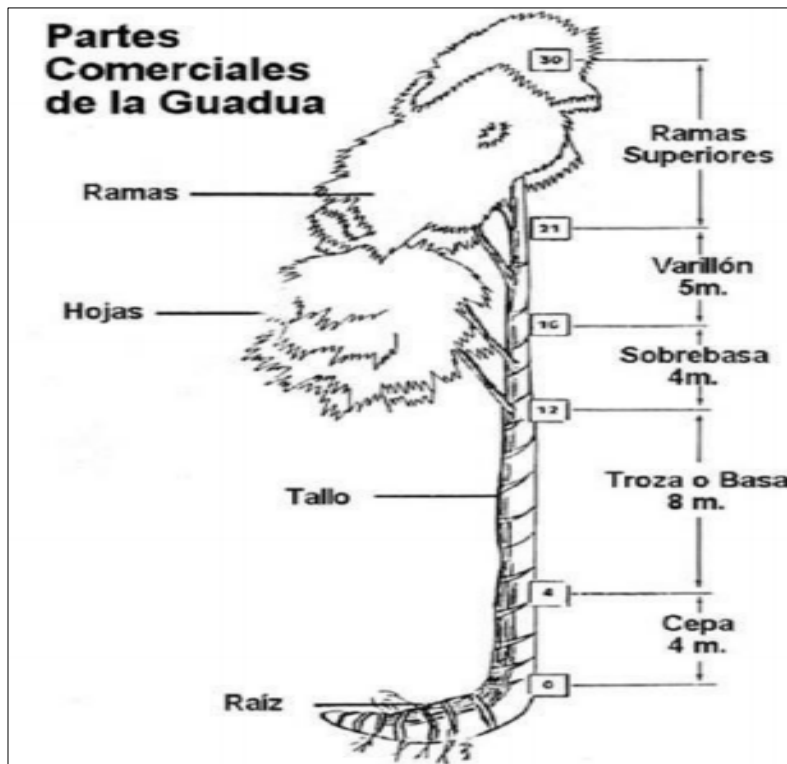
utilizadas como ornamental en el mundo que es *Phyllostachys bambusoides*, No obstante, también existen especies que tardan muchos años en crecer hasta llegar a ser plantas adultas. (p. 12)

La floración de los bambúes es algo muy importante: principalmente porque la gran parte de las especies demoran algunos años en florecer, a diferencia de las otras gramíneas, las cuales florecen por lo general anualmente. Se han registrado dos tipos de florecimiento en los bambúes: el primer tipo es la floración esporádica, en las cuales sólo una o varias plantas de una misma población tiene florecimiento, y el otro tipo es la floración gregaria, la cual se presenta cuando todos los individuos que pertenecen a una especie florecen al mismo tiempo y en distintos lugares; es decir, si se llegan a tener plantas que pertenecen a una misma especie en distintas regiones o áreas, cuando llegue el tiempo de florecimiento, estas lo harán dondequiera que se encuentren plantadas (Soderstrom y Calderón, 1979).

#### **1.2.1.1. Planta**

Estructuralmente el bambú está formado por un sistema de ejes vegetativos segmentados, que forman alternamente nudos y entrenudos, que varían en su morfología según que correspondan al rizoma, al tallo o a las ramas. Tanto los nudos como los entrenudos varían de una especie a otra, principalmente los tallos, sirviendo esta característica para su clasificación. Algunos tienen espinas y otros no. (Mercedes, 2006, p.13)

Figura 2. Partes comerciales de *Guadua Angustifolia* Kunth



Fuente: Mercedes (2006). *Partes comerciales de la Guadua*.

### 1.2.1.2. Rizoma

La raíz del Bambú se denomina rizoma y se diferencia por la forma y hábito de ramificación. El rizoma tiene una gran importancia, no sólo como órgano en el cual se almacenan los nutrientes que luego distribuye a las diversas partes de las plantas, sino como un elemento básico para propagación del bambú, que asexualmente, se realiza por ramificación de los rizomas. Esta ramificación se presenta en dos formas diferentes con hábitos de crecimiento distintos, lo que permite clasificarlos en dos grandes grupos principales y uno intermedio. Cada grupo comprende géneros y especies distintas. (Mercedes, 2006, pp.13-14)

Liese (1985) indica que existen formas intermedias a las que denomina metamórficas. Sin embargo, de acuerdo a la morfología de los rizomas estos se clasifican en dos grupos principales conocidos como paquimorfo y leptomorfo. Importante mencionar que en cada uno de los nudos del rizoma puede manifestarse un nuevo rizoma o un tallo; considerando que los tallos presentan un mayor diámetro que el rizoma. Otro dato importante es que los rebrotes o ahijamientos de las plantas de bambú son continuos y permanentes. Lo cual permite que puedan ser aprovechados en todo su ciclo biológico, al mismo tiempo que se tiene el beneficio de su función como protección al suelo.

Tabla I. **Clasificación de bambúes según las características de los rizomas**

<b>Nombre genérico del rizoma (Extensible al bambú)</b>	<b>Tipo de rizoma</b>	<b>Origen del brote, tallo o caña</b>	<b>Desarrollo de los brotes</b>
Paquimorfo Simpodial	Corto, grueso y aglutinado	En la yema del ápice del rizoma	En forma aglutinada, formando mandras, matorrales o macollas. En el campo se ven las plantas en densos grupos.
Metamórficas Antipodial (Grupo intermedio, poco frecuente)	Combina los dos grupos	Indistintamente en una yema del ápice o lateral del rizoma	Ramificación combinada de los dos grupos.
Leptomorfo Monopodial	Forma cilíndrica alargados y separados	En una de las yemas laterales del rizoma, el brote sale invadiendo el terreno	En forma aislada o independiente. En el campo se ven los tallos distanciados. Son llamados invasores por esta forma de crecimiento.

Fuente: Mercedes (2006). *Clasificación de los bambúes según las características de los rizomas.*

### **1.2.1.3. Tallo, crecimiento y fisiología**

“El tallo del Bambú es propiamente dicho el culmo, al que también se llama caña o vara. Normalmente presenta una forma cilíndrica; los entrenudos pueden ser huecos o macizos y los nudos pueden ser prominentes” (Mercedes, 2006, p. 14). El crecimiento de la planta de bambú está fundamentado en la elongación de los entrenudos. En general los llamados entrenudos medios maduran antes que los demás. Por lo tanto, este alargamiento no ocurre ni a la misma velocidad, ni al mismo tiempo.

El color del tallo varía desde verde, amarillo, rojo, blanco, púrpura a negro. Algunos son verdes con rayas amarillas o amarillos con rayas verdes. Los Bambúes son las únicas plantas a las que se les puede moldear el tallo longitudinal o transversalmente por medios artificiales mientras están en crecimiento o desarrollo. (Mercedes, 2006, p. 15)

“El período de crecimiento de un tallo desde el momento en que emerge del suelo hasta adquirir su altura total, es de 80-110 días en especies del grupo Paquimorfo y de 30-80 en los del grupo Leptomorfo” (Mercedes, 2006, p. 15). La mayor fase de los bambúes es cuando el culmo brota de los rizomas para crear el nuevo tallo. Al finalizar su desarrollo longitudinal, se empieza la formación de sus hojas y ramas, la cual se completa al concluir el primer año.

### **1.2.1.4. Hojas y floración**

“Las hojas son muy variables en tamaño y forma. En la primera etapa del crecimiento; pueden ser ovales, lanceoladas y oblongo-lanceoladas; son lisas o casi lisas en la superficie superior” (Mercedes, 2006, p. 17).

Las hojas de los bambúes también varían de las del resto de las gramíneas. La presencia de un pseudopecíolo que conecta a la vaina de la lámina puede considerarse como una cualidad en el grupo; así, se tiene que las láminas de *Arthrostyidium Capillifolium* de Sudamérica, poseen sólo 3 mm de ancho, mientras que las láminas grandes de *Neurolepis Elata* pueden lograr un ancho de 40 cm y un largo de 5 m.

Es normal que durante la primavera se noten hojas caídas o amarillas en el tallo. Esto es un proceso normal de renovación de sus hojas, aunque lo más común es que el bambú posea una mezcla de hojas en desarrollo, verdes amarillentas y secas. (Mercedes, 2006, p. 17)

#### **1.2.1.5. Clasificación del bambú**

Según Mercedes (2006):

La clasificación, nomenclatura e identificación del bambú, constituye un problema para la mayoría de los botánicos debido a la gran cantidad de variedades existentes y a los cruces naturales entre ellas. Se ha indicado antes que también existe dificultad de los botánicos para obtener plantas en floración, sin embargo, de manera general la siguiente es la clasificación más aceptada:

- División: Spermatophyta
- Subdivisión: Angiosperma
- Clase: Monocotiledónea
- Orden: Glumiflorae o gramínea, Poales
- Familia: Poaceae
- Sub-Familia: Bambusoideae

- Nombre Vulgar: Bambú, Guadua y Caña Brava

Se diferencian de otras gramíneas por el predominio de ciertos caracteres estructurales bambusoideos, algunos de los cuales pueden considerarse primitivos, tales como: el desarrollo de un sistema de rizomas, la lignificación, la pronunciada ramificación de los cormos, la presencia de pseudopécíolos y la teselación de las hojas ramales, el dimorfismo entre las vainas de las hojas caulinares y las hojas ramales, las características florales, como lodículas vascularizadas bien desarrolladas (en general tres), un estilo consistente en una columna, dos a tres estigmas, y un embrión pequeño. (p. 18)

### **1.2.2. Características de la planta de bambú**

Algunos autores según Mercado y Molina (2015) describen algunas de las características principales de la planta de bambú:

- No necesita del uso de pesticidas en el sembradío.
- No es atacado por plagas, ni infectado por hongos.
- Tiene agentes naturales desodorizantes y bactericidas.
- Totalmente biodegradable mediante luz solar y microorganismos.
- Ayuda a la preservación de los suelos y a su recuperación, impidiendo la erosión; por la presencia de sus copiosos rizomas.
- Optimización del agua, ya que los guaduales que se ubican en las riberas acumulan altas cantidades de agua en su sistema radicular, tanto en su segmento aéreo como en el suelo.
- Mejoramiento y preservación de la calidad del aire por la captura de CO<sub>2</sub> en el proceso de fotosíntesis, de tal manera que un guadual produce una

cantidad de oxígeno mayor a cualquier sistema forestal sobre la misma área de terreno.

- Su peso y resistencia se puede comparar únicamente con el acero.
- Se diferencia de especies madereras por ser un recurso sostenible.

“El bambú está compuesto por celulosa, hemicelulosa y lignina” (Chacón, 2012, p. 7). La celulosa es un carbohidrato que es parte esencial de todas las plantas, en cambio la lignina es un polímero de fenilpropano. Se sabe que provee rigidez al tallo. Hace viable su evolución y ayuda a mejorar su capacidad de duración ante ciertos microorganismos. El módulo de elasticidad es alrededor de 18,354.90 kg/cm<sup>2</sup> con una relación de Poisson de aproximadamente 0.3. Por lo tanto, “en términos generales el bambú está compuesto de: 55 % de celulosa, 25 % de lignina, y 20 % de hemicelulosa y otros” (Chacón, 2012, p. 7).

### **1.2.3. ¿Qué es la biomasa?**

La biomasa es aquella materia orgánica biodegradable de origen vegetal o animal, incluyendo los residuos y desechos orgánicos, susceptible de ser aprovechada energéticamente. Las plantas convierten la energía radiante proveniente del sol en energía química por medio de la fotosíntesis, y parte de esta energía es recolectada en forma de materia orgánica.

Según la directiva de la Unión Europea 2003/30/CE, la biomasa es fragmento biodegradable de productos de desecho y residuos procedentes de la silvicultura, la agricultura y de las industrias relacionadas, así como de la fracción biodegradable de residuos municipales e industriales.

De forma general se puede decir, que esta definición tiene un carácter muy amplio, ya que dentro de ella se engloba una diversidad de fuentes energéticas

que comparten determinadas características, pero que difieren entre sí en cuanto a las tecnologías para su obtención y aplicación para la producción energética.

Según Cerdá (2012):

Las características principales de la biomasa son:

- Humedad que afecta tanto a la cantidad y la calidad de la materia como al proceso.
- Poder calorífico ya que una gran parte se concentra en los compuestos volátiles de la biomasa. Esta característica depende mucho del tipo de biomasa considerada y de su humedad, ya que normalmente estos valores de poder calorífico de la biomasa se pueden dar en base seca o en base húmeda.
- Tamaño y forma por presentar gran variedad de formas y tamaños.
- Densidad real y aparente: varía considerablemente dependiendo de la presentación de la biomasa. (p. 27)

#### **1.2.4. La biomasa como fuente energética**

Según García (2012), indica que desde tiempos remotos el hombre ha utilizado la biomasa como fuente energética para realizar sus tareas cotidianas. Cuando la utilización de combustibles fósiles inició a tomar fuerza, la biomasa se vio olvidada a un plano muy inferior, donde su aporte a la producción de energía primaria era intrascendente. En la actualidad debido a diversos factores se ha presentado un resurgimiento de la biomasa como fuente energética y los factores responsables de favorecer la biomasa como fuente energética son:

- El aumento en el precio del petróleo.



- El incremento de la producción agrícola.
- La necesidad de encontrar usos alternativos a la producción agrícola.
- Cambio climático.
- Posibilidad de usar los conocimientos técnicos y científicos para mejorar el proceso de producción de energía.
- Marco económico propicio para el progreso de plantas industriales que usan la biomasa como combustible.
- Dificultad de normativa para realizar otro tipo de proyectos, estableciendo a la biomasa como la alternativa más acertada para beneficiar una inversión económica.

En cuanto a los usos de la energía producida con biomasa, éstos pueden ser para calefacción, refrigeración y producción de agua caliente en el sector doméstico (viviendas unifamiliares, comunidades de vecinos, barrios o municipios enteros), calor para procesos industriales y generación de electricidad. En resumen, todo el conjunto de fuentes energéticas que comprende la biomasa puede tener tanto aplicaciones térmicas como eléctricas.

### **1.2.5. Bambú en Guatemala**

Según Torres (2006) en Guatemala desde el año 1988 se enfocaron en el cultivo, manejo y usos del bambú en distintos lugares del país. Actualmente en Guatemala se dedican a elaborar artesanías, muebles y también a la construcción de viviendas de bambú, lo cual es por el momento la base de la economía de algunas familias.

La importancia económica que significa dicha especie de bambú como fuente de materia prima radica en la industria de artesanías, pisos, muebles, construcción de casas, enseres del hogar, puentes rurales, invernaderos,

conducción de agua y en la industria alimenticia, lo cual conlleva a tomar en cuenta que las inversiones con el recurso de bambú se recuperan en un corto plazo. Actualmente en Guatemala existen familias que laboran en la construcción de viviendas de bambú, ya que su economía se basa en ingresos procedentes de esa actividad (Fernández, 2004).

No existen cifras recientes de los indicadores de producción internacional y nacional de este producto. No obstante, ante la difusión cada vez mayor, se han desarrollado las zonas de cultivo en las regiones de Asia y Sudamérica. La producción a nivel mundial se centraliza en países asiáticos como India, Japón, Tailandia, China, Indonesia y Taiwán. Otros países que cultivan bambú son Israel y Sudáfrica. En el continente de América, la producción se da esencialmente en Colombia, Costa Rica, Ecuador y Brasil. Los países principales que exportan con un cierto grado de transformación son China y la India, ya que controlan el 80 % de la producción en el mundo.

Según Fernández, (2004) el cultivo del bambú para producción de brotes es actualmente significativo en las actividades comerciales y se producen tanto como para uso local como para el mercado internacional en los países que se dedican a esa producción. El líder exportador de productos de bambú es China, ya que presenta un valor de sus exportaciones alrededor de los 300 millones de dólares americanos. En cuanto a la industria de los muebles en bambú es un negocio en propagación dentro de varios países; por ejemplo, las exportaciones de muebles de bambú en el país de Filipinas durante el año de 1998 lograron un valor de 1.4 millones de dólares Americanos.

La comercialización del bambú es de aproximadamente 14 billones de dólares anuales en el mundo. Además, casi mil millones de personas habitan en viviendas de bambú. En la India, la reciente industria papelera utiliza 2.2 millones

de toneladas de bambú. El bambú puede llegar a significar una fuente alterna de ingresos dependiendo de su uso. Es importante mencionar que esta planta no maderable tiene significativas propiedades que la hacen única para optimizar la calidad de vida de los productores en el campo.

Se considera que el bambú es una planta que cumple con las más importantes necesidades de la población rural logrando realizar explotaciones que de forma sostenible ayudan a mejorar la calidad de vida, contribuyendo a disminuir la pobreza en el país y en los lugares donde se establecerá el cultivo. El impacto social más llamativo es que representa una mayor facilidad para la obtención de madera, ya que estará a un bajo costo muy accesible cuando no se presente un mercado forzado (Fernández, 2004).

#### **1.2.6. Estudios del bambú en Guatemala**

En el año de 1950, se efectuó un inventario de las diferentes especies bambú en Guatemala y se comprobó que existían 50 especies que pertenecen a plantas nativas introducidas en diferentes épocas y que también forman parte de la flora guatemalteca.

El inventario se llevó a cabo por la secretaría de Agricultura de los Estados Unidos quien envió al Dr. McClure, especialista en ésta gramínea para que, también instaurara dos viveros de especies de bambú, las cuales fueron establecidas en el Valle del Polochic, del departamento de Alta Verapaz y en la finca Chicolá del municipio de San Pablo Jocopilas del departamento de Suchitepéquez, en la actualidad solo existen unas especies en Chicolá y en el Polochic no se registra ninguna, la razón de esos viveros era para implantar un proyecto de cultivo de bambú para la producción de papel (Torres, 2006).

Según Fernández (2004) en los años de 1980 se comenzó un proyecto de desarrollo del bambú en Guatemala, con un acuerdo elaborado por el Ministerio de Agricultura y la Misión técnica Agrícola de la República de China en Taiwán. Luego la responsabilidad fue asignada al INTECAP, quien en cooperación con La Misión China realizó algunos viveros para enviar ese material producido a los dueños de fincas, especialmente de la Región Sur de Guatemala y otros lugares en pequeñas cantidades, en la actualidad se estima que existen alrededor de 350 fincas que han cultivado bambú en variables cantidades, la mayor parte de producción de bambú se ubica en las fincas Panamá de Santa Bárbara Suchitepéquez, principalmente la especie *Guadua Angustifolia*, así mismo hay otras fincas que han cultivado bambú como protección en fuentes de agua y riachuelos especialmente.

Según el Centro Educativo y Desarrollo Integral del Bambú (CEDIB) en el país de Guatemala, se ha brindado asesoría a más de 2,000 personas interesadas en el cultivo, a 119 en la creación de invernaderos y 121 en construcción de viviendas, lo que representa que cada día hay más guatemaltecos interesados en la artesanía, construcción y elaboración de muebles de bambú. En la actualidad no hay registros estadísticos de la oferta del bambú, solamente de plantaciones en fincas que se encuentran en la Costa Sur, principalmente en Santa Lucía Cotzumalguapa, Mazatenango, Suchitepéquez, Huehuetenango y Retalhuleu.

Estas fincas han contado con el apoyo de INTECAP para educar tanto a productores como fabricantes de viviendas en la utilización adecuada del bambú, así como el adecuado proceso de plantación y tratamiento de la planta de bambú.

Mediante un convenio de cooperación el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación y el Gobierno de Taiwán establecerán 85 nuevas

hectáreas del cultivo de bambú, como una fuente de desarrollo para las familias de San Juan Chamelco en Alta Verapaz y en Quetzaltenango. Taiwán ha aportado diferentes tipos de bambú que ha permitido la industrialización y comercio de la planta, al ser una fuente de materia prima con nuevas oportunidades para el sector rural del país, pues su transformación permite la construcción de viviendas, pisos, puertas, entre otros productos (ICTA, 1990).

### **1.3. Transformación del bambú a chip**

Los procesos de transformación física de la biomasa residual en general, y especialmente el proceso de compactación en forma de astillas o chips presenta un reto tanto económico como técnico para el beneficio energético de estos recursos de naturaleza heterogénea, formas y tamaños dispares, ya que los altos costos de manejo y la puesta a punto de las tecnologías más convenientes en cada caso encarecen, dificultan y limitan algunos proyectos innovadores que serían potencialmente viables en el sector de las energías renovables.

En base a la propia naturaleza de las fuentes de biomasa residuales utilizadas como materia prima y de su presentación y propiedades intrínsecas determinadas, será justo realizar una o varias fases de transformación física y preparación previa, siempre que el mayor valor añadido de los productos que se consiguen admiten la introducción de los mismos en mercados, donde el precio de los combustibles de recursos renovables suplan los costos producidos por la administración y manipulación a la que son sometidos (Arroyo, 2016).

Según Brown (2003) en definidas circunstancias, es imprescindible, o incluso beneficioso, deshidratar la biomasa de bambú y someterla a una o más fases de disminución granulométrica y preparación estructural; o inclusive es viable compactar la biomasa residual lignocelulósica, con el fin de conseguir

productos combustibles de alta densidad entre 600 a 1300 kg/m<sup>3</sup>, que se usan como sustitutos de la leña y el carbón.

### **1.3.1. Almacenamiento de la biomasa**

Un buen sistema de almacenamiento logra garantizar desde 15 días hasta un período de 3 meses de autonomía. Se suele poner el combustible bajo techo para protegerlo de la lluvia, pero con la posibilidad de hacer circular el aire, ya que el buen almacenamiento y secado de los tallos de bambú es importante, para que no pierdan sus propiedades físicas y mecánicas, por lo cual se recomienda reducir al máximo el porcentaje de humedad de la biomasa. La disponibilidad en el almacén dependerá de la época del año, cantidad y necesidad de acondicionamiento de la biomasa, ya que existen posibilidades de acondicionamiento tales como el cribado, secado, molienda y granulado; según condiciones establecidas con el cliente por las cantidades a suministrar (Renovetec, 2018).

Según Becerra (2018), antes del proceso de combustión de la biomasa, es necesario someterla a un proceso o tratamiento previo de preparación, que facilite el proceso de reacción entre combustible y comburente, con el objetivo de:

- Homogeneizar y densificar (briquetado o chipeado) la entrada de biomasa en la caldera.
- Disminuir su granulometría al máximo para disminuir la cantidad de biomasa que no reacciona (inquemados).

- Disminuir la humedad que contiene, evitando que parte del calor que libera en la combustión se utiliza como calor de vaporización del agua.

### **1.3.2. Transporte de la biomasa**

Según Cerdá (2012):

Los combustibles de pequeña granulometría, como pellets, astillas (chip) y huesos de aceituna, se distribuyen en distintos formatos:

- Granel: todo el combustible es alimentado solamente desde el camión de abastecimiento al silo de almacenamiento, a través de una cisterna con bomba neumática.
- Bolsas: el repartimiento se ejecuta en dos tamaños regularmente, una en pequeñas bolsas de 15 o 25 kg para estufas y calderas pequeñas con silo intermedio o con silo de carga manual. El otro tamaño en bolsas grandes es de 1,000 kg para sistemas de almacenamiento con silo o para recarga manual de tolvas. (p. 39)

Las características del combustible pudieran ser afectadas negativamente si no se cierran convenientemente o si se almacenan en sectores inapropiados o al aire libre. El medio de transporte más adecuado para la distribución depende de la forma y del tipo de biomasa, el tipo de cliente, el trayecto a recorrer y la cantidad a trasladar. Sin importar el método de transporte escogido, conviene que éste abastezca siempre el mismo tipo de biomasa para asegurar la pureza del combustible, impidiendo mezclas entre la biomasa y la anterior mercadería transportada, debido a que es inevitable la presencia de restos de otros productos o mercadería (Mercado y Molina, 2015).

Dependiendo del tipo de sistema de transporte destinado y la diligencia con la que se efectúa su manipulación, el combustible puede contaminarse con arena o tierra, lo cual hace incrementar su contenido de silicio y cenizas, o con cortezas, aumentando su contenido en azufre, cloro y nitrógeno. Se recomienda que los camiones de abastecimiento de biomasa cumplan ciertos requisitos mínimos para que aseguren una apropiada humedad en su entrega al usuario, así como también que contengan equipamientos adecuados para el pesaje del combustible suministrado.

Entre los medios de transporte de la biomasa para su combustión se puede incluir equipos como cintas transportadoras de caucho, elevadores de cangilones, tornillos sinfín y el transporte neumático. Entre los tipos de almacenes se pueden tener de intemperie, bajo techo cerrada, bajo techo, pero abierta y en silos o depósitos.

### **1.3.3. Secado de la biomasa**

Según Becerra (2018), un alto grado de humedad en la biomasa tiene tres tipos de consecuencias:

- **Termodinámicas:** el poder calorífico inferior (PCI) se reduce bruscamente, disminuyendo la eficiencia de la combustión.
- **Mecánicas:** pueden producirse atascamientos y problemas en el transporte desde el almacén hasta la caldera.
- **Químicas:** el agua contenida puede dificultar el proceso de combustión, hasta el punto de que determinadas tecnologías de combustión tienen límites muy estrictos en el contenido de humedad.



Para evitar lo anterior es necesario en muchos casos proceder al secado de la biomasa. En la industria los procesos de secado de la biomasa pueden realizarse de dos maneras, natural o forzada. Siendo esta última de mayor costo por el uso de equipos que aplican aire seco y calor a la biomasa, para reducir su grado de humedad.

#### **1.3.4. Proceso de trituración de la biomasa**

La trituración de la biomasa es un proceso por el cual se consigue una primera fase de disminución granulométrica, que permite tener astillas (chips) con un tamaño máximo de astilla que permite el almacenaje, carga, transporte y manejo de los residuos de una manera técnicamente viable ya que, de otra forma, estos productos residuales no se podrían manejar usando técnicas convencionales.

Los problemas principales durante la trituración radican principalmente en el derramamiento de los residuos, que hace un tanto difícil su agrupación en puntos definidos, donde se efectúan los trabajos forestales y que, en varios casos, se forman en lugares de difícil acceso, debido a las altas pendientes del terreno, propiedades estructurales de éste y baja densidad de vías de saca, caminos forestales, pistas, cortafuegos y en general vías por las que se pueda ingresar por medio de maquinaria pesada hasta los lugares de concentración de la biomasa residual (Brown, 2003).

Por esta razón, las chipeadoras que existen en el mercado mundial son de cualidades muy diferentes, por lo que para cada tipología de aprovechamiento se puede optar por equipos sofisticados, que cuenta con sistemas automáticos para realizar los ciclos de suministro, fragmentación y recolección de astillas o chips de las cuales consta el proceso de trituración de biomasa.

### **1.3.5. Pesaje y control de dosificación de la biomasa**

La logística para abastecer de combustible biomasa una central térmica, es la principal etapa, que define la economía del proceso global. Consiste en la recogida de la cosecha de biomasa desde el suelo, su trituración, compactación y envío a un contenedor provisional, antes del transporte por camión hasta la planta y posterior almacenamiento en la central (Aldomá y Massagués, 2012).

Según Nuñez (2017) el sistema de recepción para el pesaje de la biomasa está formado por un conjunto de descarga de camiones, generalmente, mediante plataformas basculantes, báscula y medidor de humedad, ya que la biomasa se mide por cantidad y humedad de la misma. Al tener un sistema de alimentación constituido por un patio o lugar de almacenamiento y un sistema de traslado de biomasa, se entiende que este traslado está comprendido desde el patio de almacenamiento al sistema de alimentación autónomo de la caldera, por lo cual se pueden utilizar tornillos sin fin o cintas transportadoras.

## **1.4. Calderas de carbón y biomasa**

La disposición general de una planta con calderas de combustión de biomasa y carbón consiste en el uso de un separador previo para reducir la concentración de partículas tras pasar por la caldera, especialmente el polvo más grueso, que es más rico en sílice ( $\text{SiO}_2$ ). Este es el caso de diversos tipos de biomasa, como el eucalipto, fibras y cáscaras de palma, racimos de frutas vacías, cascarillas de arroz y todo tipo de carbón. El Diámetro de Volumen Medio (DVM) de las cenizas volátiles derivadas claramente de los hornos por lo regular es de 11  $\mu\text{m}$ . El DVM de las partículas que se escapan del separador previo normalmente se sitúa entre 6 y 8  $\mu\text{m}$  (Canalís y Royo, 2012).

#### **1.4.1. Calderas de combustión de carbón**

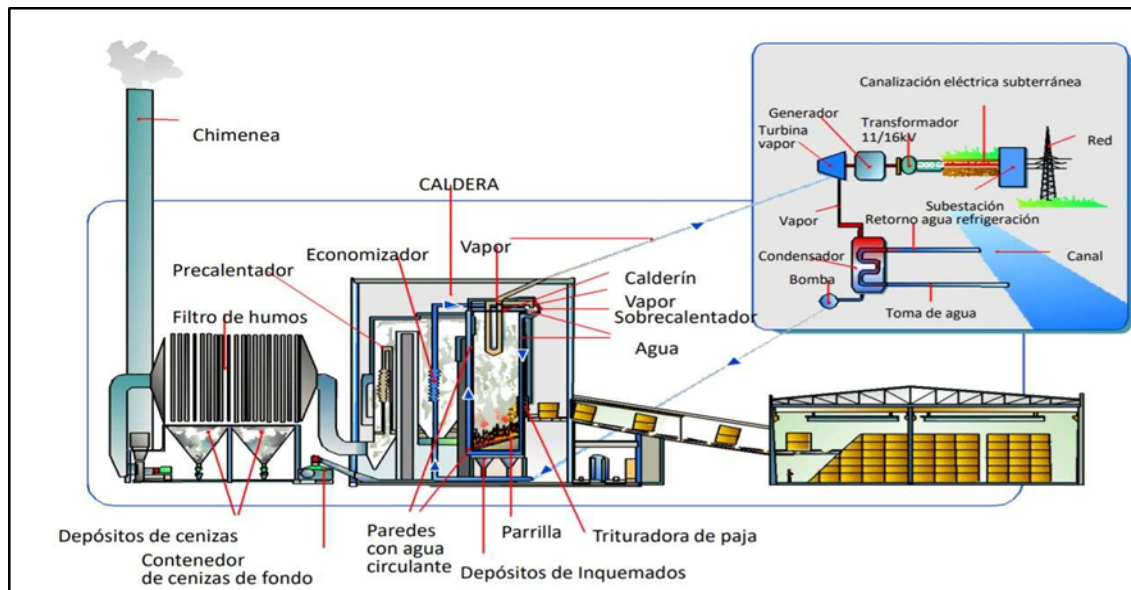
Las calderas diseñadas para quemar carbón tienen un hogar amplio, por lo cual se originan pérdidas importantes de calor por convección y radiación, siendo imprescindible un buen aislamiento en el hogar. Estas calderas se pueden utilizar también para la combustión de otros combustibles sólidos. Según el combustible sea carbón o un combustible líquido o gaseoso la forma de los hogares varían, pero en ambos tipos, los gases de combustión son obligados a pasar por el interior de unos tubos que se encuentran sumergidos en el interior de una masa de agua.

En la industria generalmente el calor proviene de la energía química almacenada por los combustibles fósiles, como el carbón, hidrocarburos, gases combustibles la cual se libera al reaccionar éstos con el oxígeno.

#### **1.4.2. Calderas de combustión de biomasa**

Una caldera de biomasa es un intercambiador de calor que emplea como fuente de calor y energía materia orgánica por medio de su combustión. En países como Francia y España son ampliamente usadas como un medio de calefacción doméstica y para la producción de vapor en procesos industriales. En el proceso de combustión de la biomasa se libera  $\text{CO}_2$  hacia la capa gaseosa de la atmósfera, el mismo  $\text{CO}_2$  que se captó de la atmósfera durante su desarrollo, lo cual aplica siempre que se trate de materia orgánica vegetal, si se trata de materia orgánica animal: balance neutro de sus emisiones de  $\text{CO}_2$  (Gas Natural Fenosa, 2014).

Figura 3. Partes de una central termoeléctrica de biomasa



Fuente: García (2006). *Centrales termoeléctricas de biomasa*.

Según Arroyo (2016):

En un sistema de combustión de biomasa por lo menos se debe contar con los subsistemas que se mencionan a continuación:

- Una bodega para el almacenamiento del combustible.
- Un equipo de transporte y alimentación del combustible desde el punto donde se almacena hasta el lugar de combustión.
- Un medidor de gases de combustión y equipos auxiliares.
- Una caldera para producción de vapor de alta o baja presión.
- Optimizadores de calor (Economizadores).
- Un sistema de captadores de gases de combustión, para la precipitación de la ceniza.
- Un lugar específico para la extracción de ceniza. (p. 51)

Según los autores Riaño y Yesid (2012), toda caldera de biomasa posee características especiales en cuanto a su funcionamiento que las diferencian de las calderas de bunker o diésel que típicamente se encuentran en la industria. Un buen conocimiento de las mismas es fundamental para su correcta operación. Algunas de las características especiales son las siguientes:

- El tiempo suficiente para incrementar la presión de vapor en una caldera de biomasa es un factor a considerar, ya que algunas de ellas poseen una capacidad de elevar este valor en el interior del domo de vapor un 1 % por minuto, por lo tanto, ante una caída de presión la línea de vapor no tiene una capacidad rápida de reacción.
- Cuando se apaga una caldera de biomasa se requiere de varias horas hasta que la temperatura en el interior de la misma disminuya ya que al usar un combustible sólido como las briquetas, las cuales se mantienen ardiendo en el interior de la cámara de combustión mucho tiempo después de haber cortado el abastecimiento de combustible y aire. Este tipo de calderas presentan eficaces sistemas de seguridad, ya que en caso de alguna emergencia no es viable apagarlas y eliminar instantáneamente la fuente de calor.
- Es necesario también contar con un sistema de filtrado de cenizas de los residuos de la combustión del combustible, normalmente a través de ciclones, los cuales precipitan la ceniza hasta su punto de recolección. En cuanto a las normativas de emisiones de partículas en los gases de combustión en cada país limitan el accionar de este tipo de calderas, haciendo obligatorio el uso de dichos filtros.

- Importante también mencionar que las calderas de biomasa necesitan intervalos de limpieza de los depósitos de ceniza o de la cámara de combustión, debido a que se acumula producto de la ignición del combustible, afectando su eficiencia y funcionamiento si transcurre demasiado tiempo entre ciclos de sustracción de la ceniza.

### **1.4.3. Fases del proceso de combustión de biomasa**

La combustión es básicamente el conjunto de procesos físico-químicos en los que un elemento combustible se mezcla con otro elemento comburente (por lo regular oxígeno en forma de O<sub>2</sub> gaseoso), desprendiendo calor, luz y productos químicos que resultan de la reacción (oxidación).

Como resultado de la reacción de combustión se presenta la formación de una llama; la cual es una masa gaseosa resplandeciente que emite calor y luz. Las reacciones básicas de combustión corresponden a las reacciones de oxidación del hidrógeno (H) y del carbono (C) por medio de oxígeno que puede presentarse en forma pura (oxicombustión) o también a través del aporte de aire que lo contiene en una proporción media del 21 % (García, 2012).

Según Arroyo (2016), el proceso de combustión no es precisamente una única reacción química, ya que se pueden diferenciar tres fases en la reacción de combustión:

- Fase de pre reacción: en esta fase el combustible se descompone cediendo lugar a la formación de radicales, los cuales son unos compuestos intermedios inconsistentes y muy dinámicos, para que, de esta manera, el hidrógeno y el carbono puedan reaccionar con el oxígeno.

Estos radicales son del tipo O-, H+, OH-, CO-, CH<sub>3</sub>+ (para el caso del metano).

- Fase de oxidación: es la fase donde se produce la combinación entre el oxígeno y radicales de manera exotérmica. Por lo tanto, es cuando tiene lugar la expansión de la llama.
- Fase de terminación: es aquella fase en donde se forman los compuestos estables finales. Por lo que, el conjunto de dichos compuestos es lo que se conoce como gases de combustión.

Cabe mencionar que aun estando en el conjunto de estas reacciones; algunas exotérmicas y otras endotérmicas, el balance total es netamente exotérmico.

#### **1.4.4. Tipos de calderas por su disposición de fluidos**

Las calderas de vapor pueden clasificarse de acuerdo a la circulación de los fluidos en el interior o exterior de los tubos de transferencia de calor.

##### **1.4.4.1. Calderas acuotubulares**

Según Arroyo (2016) en estas calderas el fluido (agua) de trabajo se transporta por la parte interna de tubos durante su calentamiento y los gases de combustión transitan por la parte externa de los mismos. Son de aplicación cuando se necesita una presión de trabajo superior a los 22 bar.

Debido a su diseño constructivo, lógicamente presentan un reducido volumen de agua, por lo cual, gran número de ellas pueden ser clasificadas como

calderas de primera clase, en base a lo indicado por el Reglamento de Equipos a Presión en su Instrucción Técnica Complementaria ITC EP-1 capítulo II artículo 3.

Las exigencias de la calidad del agua de alimentación a estas calderas suelen ser superior al requerido para otro tipo de calderas. Los denominados generadores instantáneos, también constituyen parte del tipo de calderas acuotubulares.

#### **1.4.4.2. Calderas pirotubulares**

Según Arroyo (2016) las calderas pirotubulares son aquellas en las que los gases de combustión transitan por la parte interna de los tubos y el líquido (agua) se encuentra en un depósito que es atravesado por dichos tubos. Su aplicación principal es cuando la presión de trabajo es menor a los 22 bar.

Debido a su diseño, presentan un gran volumen de agua; por lo tanto, dichas calderas suelen estar clasificadas como de segunda clase, de acuerdo con lo establecido en el Reglamento de Equipos a Presión en su instrucción técnica complementaria ITC EP-1 capítulo II, artículo 3.

Por su volumen de agua les admite ajustarse mejor a las variaciones de la instalación comparadas con las calderas acuotubulares. El vapor generado por las mismas suele presentar un título de vapor cercano al 1, es decir, que el contenido de agua por unidad de masa es pequeño (3 %), no siendo obligatorio instalar equipos auxiliares adicionales. Las exigencias de la calidad del agua de alimentación son menores a las requeridas por las calderas acuotubulares (García, 2012).



Además, las calderas pirotubulares se pueden clasificar en base a la disposición del haz tubular en: calderas horizontales, las cuales poseen su haz tubular está dispuesto de la parte delantera a la trasera de la caldera; y calderas verticales, donde el haz tubular está dispuesto de la parte inferior a la parte superior de la caldera (Canalís y Royo, 2012).

#### **1.4.5. Tipos de calderas por su tecnología**

Según Nuñez (2017), las calderas o generadores son equipos que, aplicando el calor de un combustible gaseoso, líquido o sólido mediante quemador especialmente diseñado para cada combustible, calientan el agua hasta 95 °C (calderas de agua caliente), por encima de los 100 °C (calderas de agua sobrecalentada), calientan agua y producen su cambio de estado de fase líquida a fase gaseosa (calderas de vapor), o calientan un fluido caloportador diferente al agua (calderas de fluido térmico).

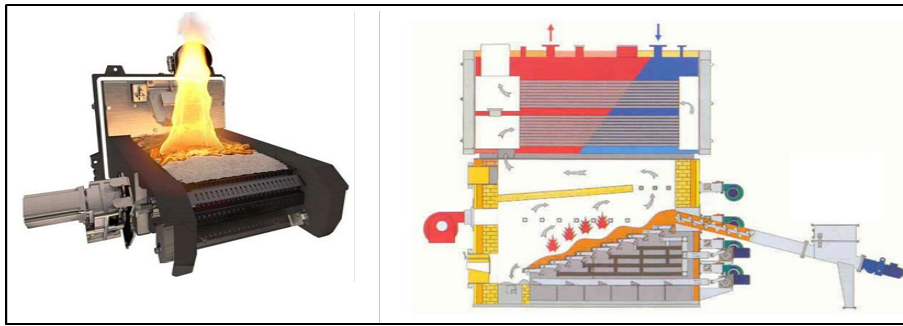
##### **1.4.5.1. Calderas de parrillas**

Este tipo de calderas son las más amplias en la industria, siendo cerca del 90 % de las calderas de este tipo. Poseen los precios más económicos del mercado y son fáciles de operar; sin embargo, tienen la desventaja de ser exigentes con la granulometría y condiciones de humedad que debe tener la biomasa para ser combustionada (García, 2012).

Según Arroyo (2016), su funcionamiento es muy simple. Se basan en el desplazamiento de la biomasa por medio de una serie de parrillas en donde se realiza la combustión. En función de cómo sea ese desplazamiento, se distingue entre parrillas fijas, móviles y mixtas. La más frecuente dentro de las móviles es la parrilla viajera, la cual usa cintas rotativas. Para esta parrilla es fundamental

calcular con gran exactitud el tiempo que debe estar la biomasa sobre ella para que la combustión sea completa. Con respecto a las parrillas fijas, se encuentran las inclinadas o escalonadas. También existen sistemas mixtos que agregan la vibración para facilitar el desplazamiento de la biomasa. Un modelo de calderas de parrillas se puede ver en la figura 4.

Figura 4. **Calderas de parrilla**



Fuente: García (2006). *Centrales termoeléctricas de biomasa*.

#### 1.4.5.2. **Calderas de lecho fluidizado**

En estas calderas se agrega a la biomasa un componente inerte, como suele ser la arena. Además, se suministra una corriente de aire ascendente, de tal manera que se logra mantener partículas en suspensión con un comportamiento parecido al de un líquido. Por tal razón, se le denomina caldera de lecho fluidizado. Otra de las ventajas que presenta este tipo de calderas es que logran mantener una temperatura muy pareja dentro de la cámara de combustión (Renovetec, 2018).

Las calderas de lecho fluidizado son empleadas para la ignición de combustibles de poca densidad energética. En estas calderas, la biomasa puede mantenerse en la cámara de combustión el tiempo que sea necesario. Por tal

razón, muestran un excelente rendimiento, pero por el contrario no son fáciles de operar y su precio es más alto que las de tecnología de parrilla. Hay dos tipos principales de calderas de lecho fluidizado, y se clasifican dependiendo esencialmente de la velocidad con la que se suministre el aire ascendente, las cuales son: lecho burbujeante y lecho circulante (Gas Natural Fenosa, 2014).

#### **1.4.5.3. Calderas de inyección**

Según Nuñez (2017) son las calderas más usadas en centrales energéticas convencionales de carbón, por lo que se pueden identificar como una tecnología conocida y estabilizada. Tienen el condicionante de que el combustible debe estar muy bien pulverizado en finas partículas (tamaño máximo de 5 mm), y debe poseer una humedad menor al 15 %.

El combustible es dosificado a la caldera por medio del arrastre de una corriente de aire. Una vez en la caldera, se pueden disponer de diversos quemadores a distintas alturas. También se distinguen tres áreas de combustión. La primera es la denominada primaria, que es el lugar donde se efectúa la combustión principal. La segunda área es la llama secundaria, en donde la temperatura de la llama es inferior y se agrega el aire secundario para prolongar la combustión. Por último, se presenta la combustión de volátiles en las áreas más separadas de los quemadores.

#### **1.5. Consumo energético en ingenios azucareros**

Según Fernandez (2011) en la generación de energía eléctrica, los ingenios usan la caldera para quemar el bagazo, el cual es un combustible renovable subproducto de la molienda de caña. En el proceso de combustión, se calienta el agua osmotizada hasta producir vapor de alta temperatura y presión. Los gases

generados durante la combustión pasan por medio de separadores ciclónicos que tienen la función de extraer gruesas partículas de ceniza.

El vapor que se produce en la caldera después es conducido hacia las turbinas donde se transforma en movimiento rotativo, reduciendo la temperatura y la presión del vapor que es transferido a los distintos procesos de la fábrica: evaporación, cocción de jugos y calentamiento de mieles para la producción de alcohol carburante. El vapor que se produce también se usa en la producción de alcohol carburante. El vapor producido en las calderas es conducido por medio de tuberías y llega hacia las turbinas, que consisten en tres etapas; alta, media y baja (Corporativa Rural de Electrificación, 2012).

Es importante considerar que la energía mecánica de la turbina entrega el movimiento rotativo a un generador por medio de un reductor de velocidad. Además, los generadores producen energía necesaria para accionar todos los motores eléctricos de la fábrica, iluminar y alimentar los sistemas de control. Por lo tanto, la energía que no se consume se entrega a la red pública con capacidad para abastecer una ciudad.

### **1.5.1. Energía eléctrica**

La energía eléctrica es la más usada. Por ejemplo, todos aquellos electrodomésticos, equipos electrónicos, luminarias, motores, entre otros, la usan. Este comportamiento de energía demuestra la ventaja de poder convertirse de forma sencilla a otros tipos de energía, como por ejemplo la luz en las bombillas, energía mecánica en motores y ventiladores; en calor, como calentadores de ducha. Por lo tanto, la energía eléctrica se define como la potencia empleada en un tiempo definido.

### **1.5.2. Eficiencia energética**

Según Fernández (2011) la eficiencia energética se refiere a la relación de energía generada sobre la energía utilizada y para lograrlo se debe generar un mayor trabajo con igual o menor energía empleada, de esta forma disminuir las pérdidas de energía. En la última década el costo de la energía ha presentado una tendencia de incremento por su valor de adquisición, ya que, en la energía eléctrica, la dependencia de los combustibles fósiles como el carbón mineral, es un factor que la afecta. Por lo tanto, la demanda creciente de energía hace que paulatinamente las empresas están afrontando responsablemente la importancia de la eficiencia energética.

Para presentar una eficiencia energética se debe tener un desempeño que pueda generar más con el mínimo consumo de energía posible, sin afectar la producción, generando un resguardo al medio ambiente, garantizando el cumplimiento y provocando un comportamiento sostenible en su utilización, lo que se expresa en disminución de costos.

Es fundamental que la energía se utilice de manera racional generando concientización en las personas y el adecuado manejo de los equipos eléctricos, administrando y utilizando todos los recursos disponibles eficazmente, ya que un mejor control permite desplegar procesos que optimizan la energía.

### **1.5.3. Pérdidas de energía eléctrica**

Según Cartagena (2012) las pérdidas de energía eléctrica se ven expresadas principalmente por las caídas de tensión en la red de transmisión del sistema nacional interconectado (SIN), el cual está compuesto por interruptores, aisladores, líneas de transmisión de alta tensión 69 kV, pararrayos,

transformadores de potencial y de corriente y otros componentes eléctricos útiles para recibir la energía eléctrica que es producida por las distintas plantas generadora.

La energía generada es suministrada a la red nacional por medio de un ente regulador del Mercado Eléctrico Mayorista, quien es responsable de distribuir, organizar y hacer llegar la energía eléctrica a donde se solicite; esta función se realiza durante las 24 horas, en los 365 días del año. El objetivo a cumplir es la de proveer el servicio de energía eléctrica en condiciones de calidad, continuidad, cantidad y seguridad a todos los clientes (García, 2012).

Importante mencionar que las pérdidas de la energía eléctrica se pueden presentar desde el punto de generación hasta la utilización de los consumidores finales. Las pérdidas de energía eléctrica se dividen de dos formas en función de su naturaleza: la primera es ocasionada por las pérdidas físicas como cualidades de las líneas de electricidad, pérdidas por efecto joule, entre otras; y la segunda por pérdidas no técnicas relacionadas con ineficiencias comerciales y administrativas y las altas corrientes para suministrar la reactiva para los campos magnéticos de los motores eléctricos.

## **2. PREPARACIÓN Y RECOLECCIÓN DEL BAMBÚ**

Uno de los factores que mayor influyó en este estudio es la disponibilidad de la biomasa de bambú, por lo que se consideró necesario un análisis del potencial del cultivo de bambú en la región sur, para determinar aquellas zonas más propicias que presentan una mayor aptitud para el aprovechamiento del recurso y su viabilidad para recolección, transporte y almacenamiento de la biomasa.

### **2.1. Biomasa disponible**

En la selección de biomasa disponible se consideró obtener la mayor cantidad posible de biomasa de bambú, ya que se trata de un recurso sostenible y renovable porque se automultiplica vegetativamente, es decir, que no necesita de semilla para reproducirse como ocurre con algunas especies maderables. Además, la biomasa de bambú es considerada como un recurso muy abundante comparado con otros recursos utilizados forestalmente.

Con base en la revisión bibliográfica, según MAGA (2017), se determinó que en Guatemala se tienen tecnificadas 600 hectáreas del cultivo de bambú, ubicadas en la región sur del país principalmente en Escuintla y Retalhuleu; así como también en los lugares de Quetzaltenango, Petén y entre otras áreas del país con condiciones climáticas húmedas. Por consiguiente, las áreas estimadas para el presente estudio como zonas con alto potencial de biomasa de bambú son principalmente: Escuintla, Retalhuleu y Suchitepéquez.

Una vez concretadas las zonas con mayores recursos para la obtención de bambú, se identificaron los criterios energéticos que se tomaron en cuenta para la selección de zonas óptimas en la extracción de biomasa de bambú, los cuales son los siguientes:

- Pendiente del terreno de cultivo: es un factor que influye en la obtención del recurso de bambú, debido a que involucra el uso de maquinaria que aumenta el costo de extracción. Considerando que pendientes superiores al 50 % el aprovechamiento del recurso deja de ser rentable.
- Proximidad a centros urbanos importantes: se estimó la distancia entre el área de extracción de la materia prima a la localidad o ciudad importante más próxima a la central térmica, dónde se utilizará la biomasa de bambú como fuente de combustible renovable para la producción de energía eléctrica.
- Conexión por carretera: una buena infraestructura de carreteras proyecta una disminución del costo de energía y acrecienta el área accesible para la recolección de la materia prima. Por lo que, cierta parte de la zona evaluada se determinó en base a la calidad de las carreteras (mala, regular, óptima) entre el centro urbano importante más próximo y el centro cercano al área forestal de bambú.

La planta de bambú seleccionada como combustible para la generación de energía eléctrica es la especie *Guadua Angustifolia*, ya que es una planta de rápido crecimiento, fácil obtención en nuestro país y de costo relativamente bajo. Con respecto a lo ambiental, se estima que puede captar entre 50 a 100 % más de CO<sub>2</sub> que las especies de arboledas maderables y generar 35 % más de



oxígeno que dichas especies, con base a lo establecido en la Red Internacional del bambú y el roten.

Se determinó realizar la compra de bambú traído de San Francisco Zapotitlán, Suchitepéquez; ya que, entre las principales carreteras, a parte de las rutas nacionales, se encuentra la ruta Internacional del Pacífico CA-2. Otros accesos también son las carreteras departamentales, autopistas y veredas que conectan a la cabecera con sus municipios y propiedades rurales, lo cual facilita el transporte de la recolección de bambú. El departamento de Suchitepéquez en su región sur presenta una morfología que se identifica por mostrar pendientes menores al 1 %, lo cual favorece la labor para los cultivos del lugar.

Tabla II. **Pendientes en terrenos de cultivos en Suchitepéquez**

<b>Pendiente</b>	<b>Descripción</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>
<b>&lt; 4%</b>	Plano	170,175	71.09
<b>4 a 8 %</b>	Suavemente inclinado	33,023	13.81
<b>8 a 16 %</b>	Moderadamente inclinado	18,320	7.65
<b>16 a 32 %</b>	Inclinado	12,407	5.18
<b>&gt; 32 %</b>	Fuertemente inclinado	5,445	2.27
<b>TOTALES</b>		<b>239,370</b>	<b>100.00</b>

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de MAGA. (2017). *MAGA y Taiwán incrementan cultivo de bambú en Guatemala.*

## 2.2. **Concentración de biomasa del cultivo de bambú**

Los cultivos de bambú para este caso de estudio son plantas cultivadas con el objetivo de ser aprovechados como recursos energéticos para ser transformados en combustible. Siendo el bambú (*Guadua Angustifolia*) un

recurso natural sostenible debido a que el impacto ecológico es reducido comparado con otros materiales como la madera, se estima un rendimiento o concentración de biomasa de hasta 50 toneladas por hectárea al año.

Se consideró que la especie de bambú *Guadua Angustifolia* llegan a tener entre 6 a 20 m de altura. Próspera de 15 a 20 metros en el transcurso de 120 días; su diámetro máximo alcanza los 20 cm, se produce entre 4 a 5 años de plantado; su altitud ideal oscila entre los 400 y 800 msnm; en suelos profundos, arcillosos y areno-limosos; con una precipitación mayor a 1200 mm y una humedad relativa aproximadamente de 80 %.

Posteriormente a la etapa de cultivo, los bambúes de la especie *Guadua Angustifolia* deben cortarse por encima del primer nudo del tallo, a nivel del suelo; y se recomienda hacerlo de forma anual luego de los cuatro a cinco años de plantados, para cuidar la actividad de la planta. El ciclo e intensidad de cosecha es en relación al tamaño de la plantación y puede variar de 1 a 4 años.

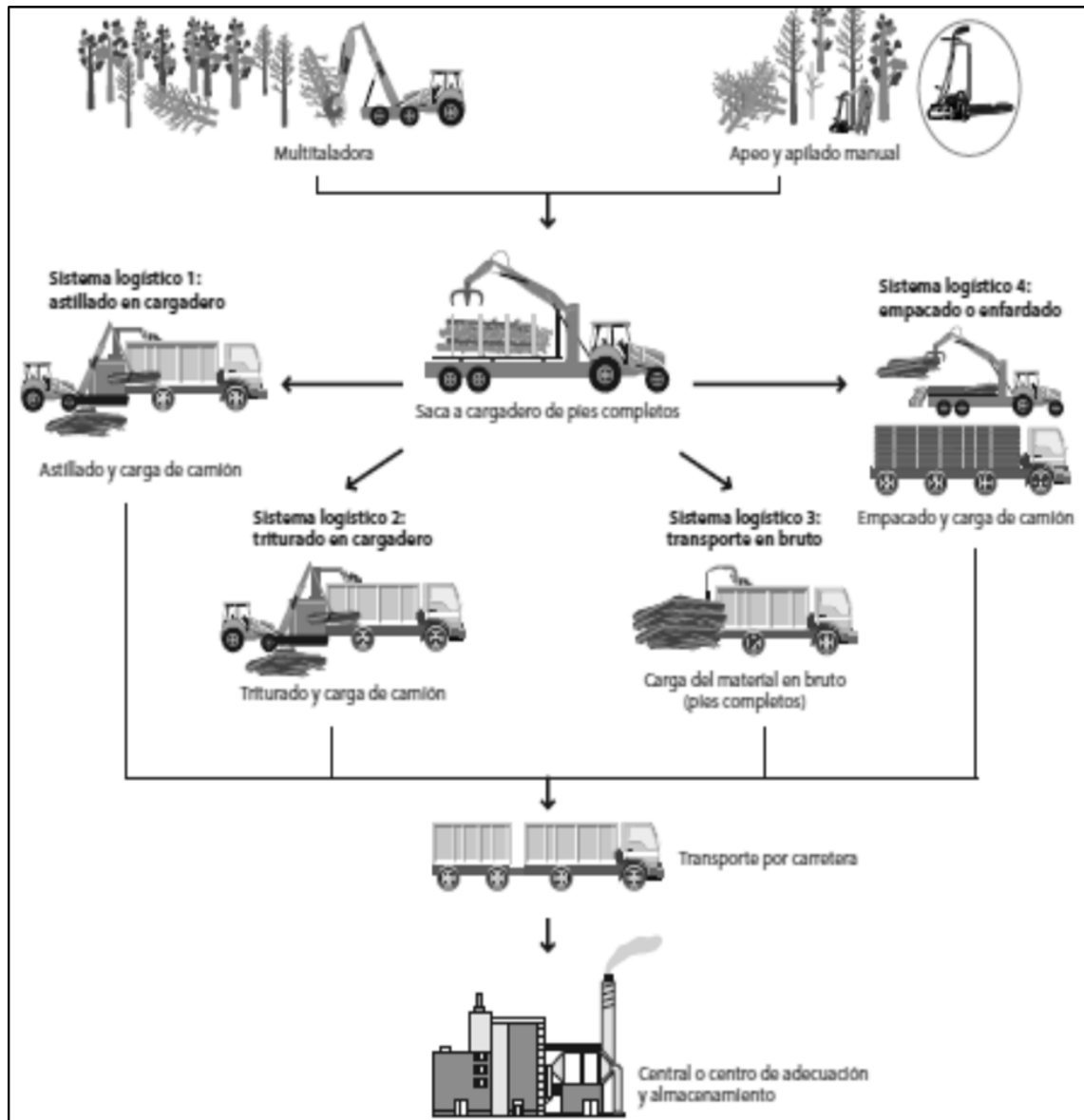
### **2.3. Transporte hacia la central energética**

En esta etapa previo al transporte de la especie de bambú *Guadua Angustifolia*, se recomienda realizar la cosecha en época de verano en Guatemala; es decir, durante los meses de noviembre a abril, ya que durante ese período no existen brotes que puedan estropearse, se disminuye la presencia de insectos y enfermedades debido a una menor cantidad de almidón y agua en sus fibras, favoreciendo su transporte debido a un menor peso.

Una vez identificada la biomasa disponible del cultivo de bambú para el proceso de combustión para la generación de energía eléctrica, se determinó la logística para la recolección de la biomasa en el entorno natural, transporte y

preparación para ser utilizado en la central energética del ingenio azucarero, como se ilustra en la siguiente figura:

Figura 5. **Esquema de transporte de biomasa a la central energética**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Paint.



### 3. PROCESAMIENTO DEL CHIP DE BAMBÚ

La producción y gestión del chip de bambú; también conocido como astilla, se llevó a cabo en la central energética del sector industrial del ingenio azucarero. La utilización del chip de bambú como combustible, producirá una energía renovable que no contribuye a aumentar las emisiones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Por lo cual, se procesaron cientos de toneladas de bambú para usar este tipo de recurso natural, como combustible en forma de chip de biomasa para la generación de energía.

#### 3.1. Almacenamiento de la materia prima

En esta fase la central energética cuenta con un área de descarga principal A, de aproximadamente 8,000 m<sup>2</sup> y un área B de aproximadamente 8,000 m<sup>2</sup> junto a la bodega de carbón y el área C con 30,000 m<sup>2</sup>, tal como se ilustra en la siguiente figura.

Figura 6. Área de almacenamiento de la materia prima



Fuente: Google Earth Pro (2020). Consultado el 12 de agosto de 2020. Recuperado de Lansat/Copernicus 2020 INEGI.

Por lo tanto, se determinó que se tiene una capacidad disponible de almacenamiento de hasta 32,000 toneladas de biomasa de bambú en época de Zafra, para ser procesadas en forma de chip para su combustión en la caldera. Se consideró que el espacio disponible de almacenamiento (ver apéndice 1), es el adecuado para que previo al procesamiento de chip de bambú, la biomasa pueda tener un proceso de secado natural mientras es monitoreada de forma diaria, a través de análisis de laboratorio.

### **3.2. Reducción de humedad del bambú**

Una vez almacenado el bambú *Guadua Angustifolia* (ver apéndice 2) en la central energética, se realizó un secado natural previo al chipeo inicial con el fin de reducir su contenido en humedad y aumentar el poder calorífico.

Normalmente el secado del bambú necesita más tiempo que la madera de densidad semejante, debido a que el bambú tiene materiales higroscópicos (compuestos que atraen con facilidad la humedad), que pueden tener de 50 % a 60 % de humedad, dependiendo de las especies, área de crecimiento y temporada de cosecha. El bambú cuando se seca se contrae, este proceso inicia desde el momento en que el bambú se corta y puede reducir su espesor de pared hasta un 17 %, y su diámetro de un 10 % a 16 %.

Figura 7. **Bambú antes del proceso de secado natural**



Fuente: [Fotografía de Angel Armando Tejada]. (Masagua, Escuintla. 2020). Colección particular. Guatemala.

El método de secado natural es el más utilizado para secar bambú con fines comerciales. Una vez que el bambú se cosecha y se transporta a su lugar de almacenamiento, todos deben ser apilados y almacenados de forma inclinada (aproximadamente 15 °) para que drene el contenido de agua.

Figura 8. **Bambú después del proceso de secado natural**



Fuente: [Fotografía de Angel Armando Tejada]. (Masagua, Escuintla. 2020). Colección particular. Guatemala.

Es muy recomendable que el proceso de secado sea de forma lenta para reducir gradualmente el porcentaje de humedad hasta obtener por lo menos un 20 %; por lo tanto, se determinó un tiempo de 2 semanas para el proceso de secado natural y posteriormente tomar muestras diarias para hacer análisis de laboratorio, con el objetivo de monitorear el porcentaje de humedad y poder calorífico del bambú hasta obtener los valores adecuados previo al procesamiento del chip de bambú.

### 3.3. Análisis de propiedades del chip de bambú

Para analizar el aprovechamiento del chip de bambú se consideró una serie de características que influyen sobre su potencial energético, a través del análisis de laboratorio y su respectivo comparativo con otra fuente de combustible para la producción de energía.

Figura 9. **Muestra de bambú chipeado (triturado)**



Fuente: [Fotografía de Angel Armando Tejada]. (Masagua, Escuintla. 2020). Colección particular. Guatemala.



Figura 10. **Análisis de poder calorífico en equipo AC500**



Fuente: [Fotografía de Angel Armando Tejada]. (Masagua, Escuintla. 2020). Colección particular. Guatemala.

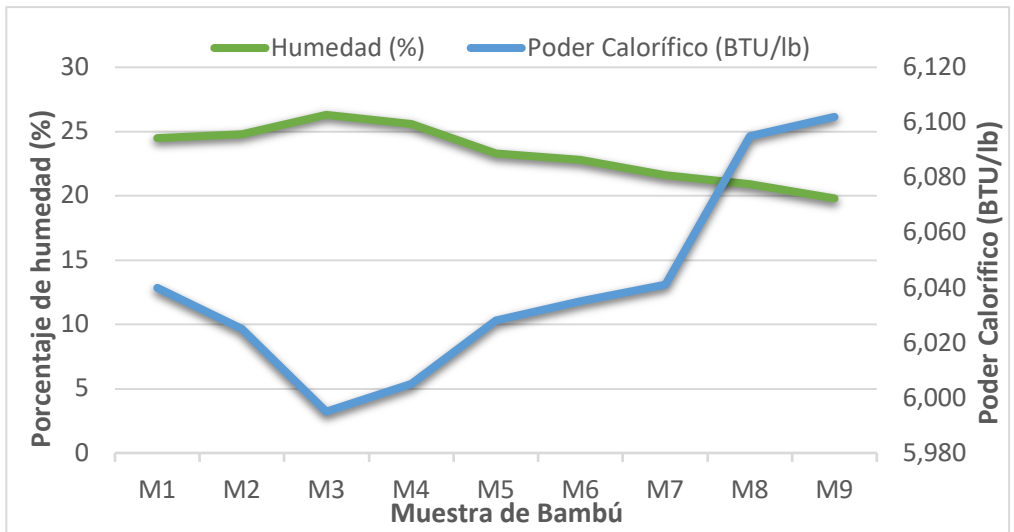
En esta etapa se analizaron y determinaron las propiedades del chip de bambú luego de ser recolectado y procesado, ya que se tomaron varias muestras de forma diaria y se analizaron en el laboratorio de combustibles mediante el método de análisis ASTM D7582, donde se determinó el contenido de humedad y poder calorífico en BTU/lb y se tabularon los datos a través de la tabla III y se graficaron los datos como se ilustra en la figura 11, en la cual se refleja que el comportamiento del poder calorífico del bambú es inversamente proporcional a su contenido de humedad.

Tabla III. **Resultados de análisis de chip de bambú**

<b>Muestra bambú</b>	<b>Fecha</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Poder calorífico (BTU/lb)</b>
M <sub>1</sub>	05/08/2020	24.5	6040
M <sub>2</sub>	06/08/2020	24.8	6025
M <sub>3</sub>	07/08/2020	26.3	5995
M <sub>4</sub>	08/08/2020	25.6	6005
M <sub>5</sub>	09/08/2020	23.3	6028
M <sub>6</sub>	10/08/2020	22.8	6035
M <sub>7</sub>	11/08/2020	21.6	6041
M <sub>8</sub>	12/08/2020	20.9	6095
M <sub>9</sub>	13/08/2020	19.8	6102
<b>PROMEDIOS</b>		<b>23.29</b>	<b>6,040.67</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 11. **Comportamiento del poder calorífico y humedad del bambú**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

### 3.4. Proceso de chipeo del bambú

La producción y gestión del chip de bambú, se realizó en la central energética del sector industrial del ingenio azucarero (ver apéndice 3). En base al cuidadoso tratamiento de secado natural del bambú, se optimizó la capacidad de almacenamiento y también a una combustión libre de problemas con una mínima generación de ceniza, así como bajas emisiones. La utilización del chip de bambú como combustible, brinda una energía renovable que no contribuye a aumentar las emisiones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Por lo cual, se procesaron 1,080 toneladas de bambú para usar este tipo de recurso natural como combustible en forma de chip de biomasa para la generación de energía eléctrica.

Figura 12. **Máquina chipeadora de bambú**



Fuente: [Fotografía de Angel Armando Tejada]. (Masagua, Escuintla. 2020). Colección particular. Guatemala.

El chip de bambú que se procesó es un biocombustible primario obtenido a partir del procesamiento físico directo del bambú, el cual se obtuvo triturando el bambú en pequeños fragmentos con un tamaño de entre 20 y 50 mm. Por lo tanto, es evidente que la uniformidad del tamaño como su poder calorífico, definen la calidad del chip de bambú. Ya que el poder calorífico está definido por

la humedad contenida y el tipo de bambú. Fue evidente que, para obtener un buen chip de bambú es necesario una buena gestión de cultivo, con un proceso de secado idóneo y una elaboración correcta.

Entre las condiciones de éxito del proceso de producción de chip de bambú se destacaron:

- La calidad de producción, es decir, su homogeneidad y la no contaminación del chip de bambú con agentes externos, lo cual se aseguró mediante adecuados procedimientos.
- La capacidad de brindar estabilidad en el flujo de producción de biomasa y evitar paros continuos por falta de alimentación de combustible.

Figura 13. **Chip de bambú**



Fuente: [Fotografía de Angel Armando Tejada]. (Masagua, Escuintla. 2020). Colección particular. Guatemala.

A continuación de manera resumida se describe el proceso de producción para el chip de bambú.

#### **3.4.1. Traslado de materia prima**

Por medio de maquinaria de cargador frontal, el bambú es almacenado en forma de troncos o tallos, los cuales se trasladan hacia una tolva trituradora para ser abatidos y procesados en forma de chip. Por lo cual, la biomasa de bambú por naturaleza propia fue sometida a una sucesión de varias transformaciones para alcanzar un aprovechamiento energético eficiente.

#### **3.4.2. Reducción de la granulometría**

Consiste en la reducción del tamaño de la biomasa por medio de una malla con orificios de 1 pulgada de diámetro, para facilitar el transporte para su combustión en la caldera. Este proceso se realiza en el mismo lugar dónde se encuentra la chipeadora de bambú. Para ello se utilizaron procesadoras mecánicas cuya función es picar y/o trocear las plantas de bambú.

#### **3.4.3. Chipeo de bambú**

Con el chipeo se consiguió aumentar la densidad del residuo facilitando su secado natural, y economizando en su transporte. Se utilizó una chipeadora estática fija con abastecimiento por medio de banda transportadora. La chipeadora es una máquina diseñada para reducir la biomasa sólida a partículas mediante un mecanismo de corte con cuchillas o martillos. Los martillos se acoplan sobre elementos rotativos con altas velocidades angulares.

### Ventajas:

- Máxima calidad del chip de bambú, ya que es un valor añadido que la máquina chipeadora de biomasa aporta.
- Comparada con las trituradoras, tiene menor requerimiento de potencia y menos consumo de energía.

### Inconvenientes:

- Poca tolerancia a la presencia de piedras u objetos metálicos, para ello se realizó limpieza constantemente.
- Coste y tiempo de mantenimiento de las cuchillas o martillos elevados.

Figura 14. **Proceso de alimentación de bambú chipeado**



Fuente: [Fotografía de Angel Armando Tejada]. (Masagua, Escuintla. 2020). Colección particular. Guatemala.

#### 4. PRUEBA DE COMBUSTIÓN DE BAMBÚ

Esta fase se realizó en la central energética del ingenio azucarero, la cual consiste en la prueba de combustión para determinar la viabilidad de utilizar biomasa de bambú chipeado al 100 % en la caldera de vapor acuotubular. Previo a la combustión, se realizaron pruebas de recirculación de chip de bambú en los conductores de biomasa para ajustar la capacidad de estos y alimentar la cantidad adecuada de chip de bambú.

Las calderas de biomasa no presentan un límite de tamaño y son casi completamente automatizadas, combinadas con los turbogeneradores alcanzan potencias eléctricas muy altas. En esta prueba se chipearon 1,080 de toneladas de bambú y se alimentó combustible hacia la caldera a través de un circuito de conductores de biomasa.

Figura 15. **Biomasa almacenada en forma de chip bambú**



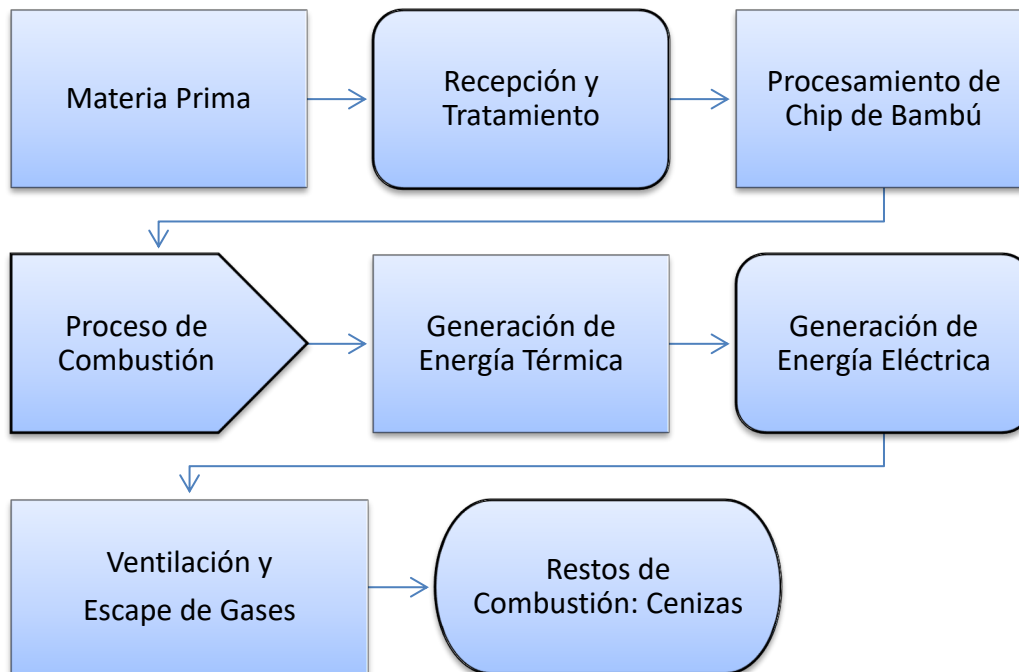
Fuente: [Fotografía de Angel Armando Tejada]. (Masagua, Escuintla. 2020). Colección particular. Guatemala.

#### 4.1. Proceso para la combustión de bambú

El diagrama del proceso es una forma gráfica de presentar las actividades involucradas en el proceso de producción de energía eléctrica utilizando biomasa de chip de bambú.

En el diagrama del proceso se representan todas las actividades que se ejecutaron durante el proceso en secuencia como se ilustra en la figura 16, registrando todas las etapas que se desarrollaron, desde la recolección de la materia prima hasta la obtención del producto final, que es la generación de energía eléctrica.

Figura 16. Resumen de etapas del proceso

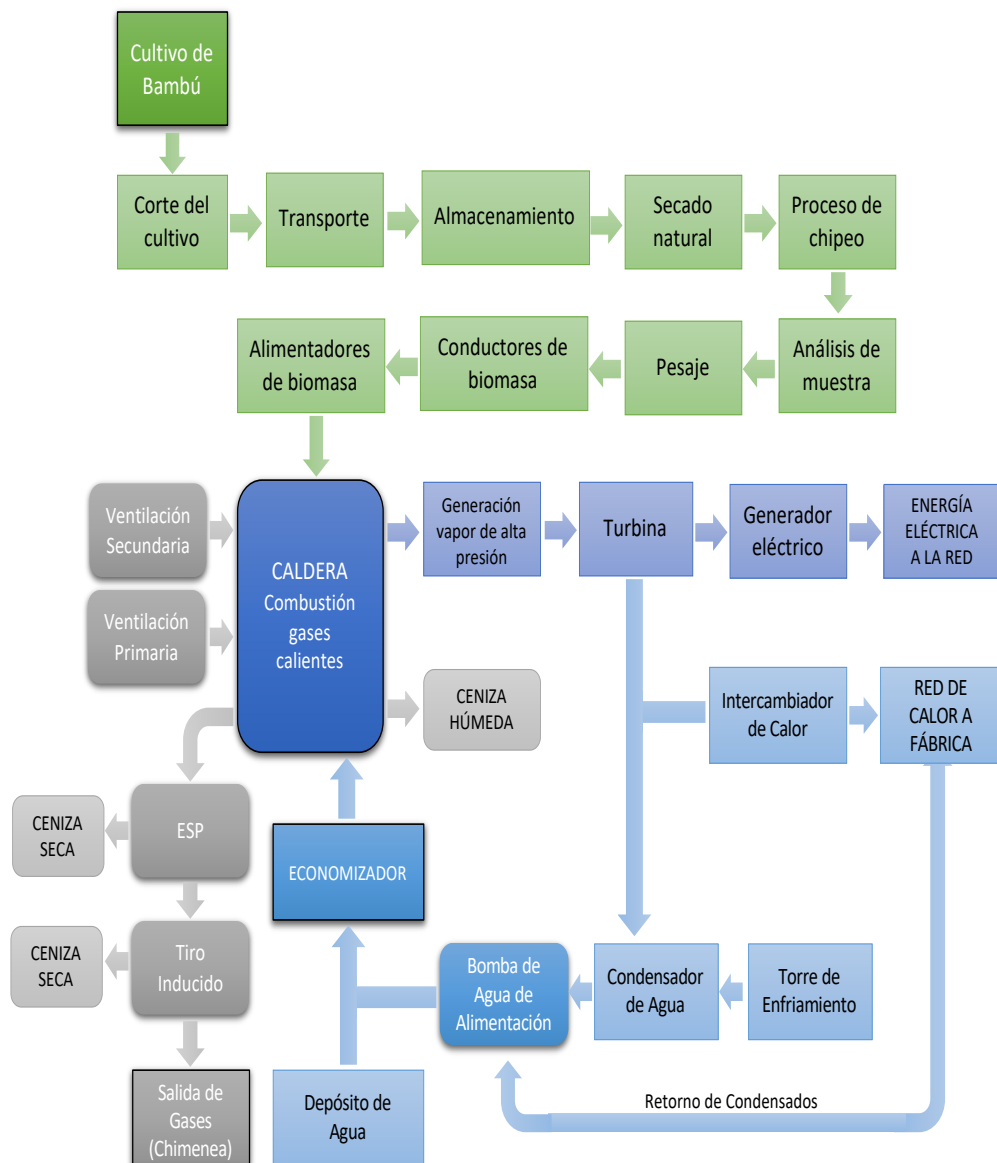


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.



A continuación, en la figura 17, se presenta el diagrama del proceso de producción de energía utilizando de chip de bambú.

Figura 17. **Diagrama del proceso de producción de energía utilizando chip de bambú**

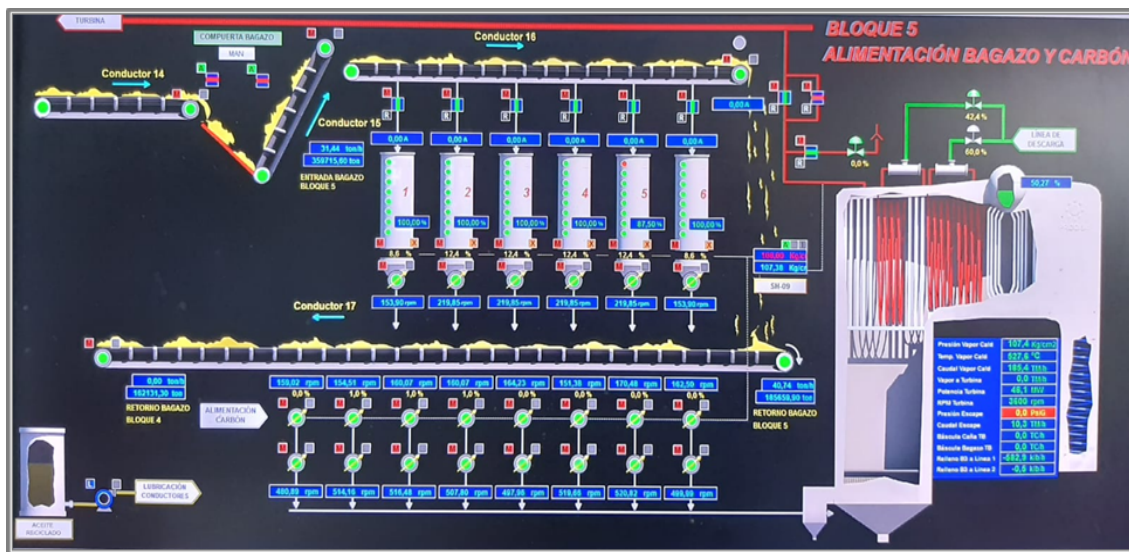


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Paint.

Previo al proceso de combustión de chip de bambú, este debe ser trasladado a través de un circuito de conductores (ver apéndice 4) que abastecen de combustible a los seis alimentadores de biomasa que utiliza la caldera, por lo cual fue necesario recircular el chip de bambú en todo el circuito de conductores, con la finalidad de mantener una alimentación constante de biomasa y establecer los parámetros operativos adecuados para obtener una combustión eficiente del chip de bambú en la caldera de vapor.

En la figura 18 se ilustra la pantalla del sistema de control del circuito de biomasa que se utilizó para alimentar chip de bambú a la caldera y producir vapor para la producción de energía eléctrica.

Figura 18. **Pantalla de control del circuito de biomasa**



Fuente: [Fotografía de Angel Armando Tejada]. (Masagua, Escuintla. 2020). Colección particular. Guatemala.

Durante el proceso de combustión de chip de bambú, se monitoreo constantemente el nivel de las parrillas del hogar de la caldera, para verificar la

correcta alimentación de combustible y mantener en condiciones estables la combustión de chip de bambú como se ilustra en la figura 19.

Figura 19. **Combustión de bambú en el hogar de la caldera de vapor**



Fuente: [Fotografía de Angel Armando Tejada]. (Masagua, Escuintla. 2020). Colección particular. Guatemala.

En el proceso de combustión se producen inquemados (LOI); los cuales, son el producto de una combustión incompleta. Su formación se puede atribuir al incorrecto funcionamiento del proceso de combustión en la caldera de vapor.

A continuación, en la figura 20, se presentan las muestras de inquemados tomadas principalmente del sistema de ceniza 1 y de la banda húmeda de la caldera de vapor:

Figura 20. **Muestras del sistema de ceniza 1 y banda húmeda**



Fuente: [Fotografía de Angel Armando Tejada]. (Masagua, Escuintla. 2020). Colección particular. Guatemala.

Por lo tanto, en la tabla IV se presentan los porcentajes de inquemados (LOI) obtenidos del proceso de combustión del chip de bambú.

Tabla IV. **Porcentaje de inquemados en la ceniza**

Ubicación	Porcentaje de inquemados (%)			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Banda Húmeda	5.29	-	5.44	-
Sistema 1	11.11	18.79	3.61	4.17
Silo de ceniza	28.63	27.69	19.66	19.57

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Para verificar la correcta combustión de chip bambú se realizó una medición de gases de escape por medio de un analizador portátil Bacharach, para determinar el porcentaje de oxígeno (O) y el exceso de aire (EA) en los gases de combustión, teniendo como resultado los valores que se muestran en la figura 21.

Figura 21. **Medición de gases del analizador Bacharach**



Fuente: [Fotografía de Angel Armando Tejada]. (Masagua, Escuintla. 2020). Colección particular. Guatemala.

En base a los resultados obtenidos del analizador de gases portátil Bacharach, se estimó también de forma teórica el exceso de aire (EA) en la combustión de gases, a través de la siguiente expresión matemática:

$$\text{Exceso de Aire (EA)} = \frac{O_2\%}{21 - O_2\%} \times 100\% \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

EA = Exceso de aire (25 % - 35 %)

O = Oxígeno (4 % - 7 %)

Por lo tanto, en la siguiente tabla V se registran las lecturas del Bacharach y se determina el valor de exceso de aire (EA) en la combustión de chip de bambú.

Tabla V. **Lecturas de Bacharach**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
O (%)	5.90
CO (ppm)	1894
CO <sub>2</sub> (%)	14.70
T. Gases (°F)	120
T. Aire (°F)	81.80
Eficiencia (%)	91.7
<b>EA (%)</b>	<b>39.0</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

#### 4.2. **Eficiencia y consumos de la caldera**

Durante la prueba de combustión se recopilaron datos de variables del proceso a través de instrumentos de medición de flujo de agua, flujo de vapor, temperatura de agua, temperatura de vapor y consumos de combustibles, para determinar la eficiencia de la caldera de vapor utilizando chip de bambú.

Después de la prueba de combustión del chip de bambú en la caldera de vapor, en base a la relación de los datos de consumo de combustibles, flujos de vapor y agua; se procede a calcular la eficiencia térmica (%) de la caldera mediante la siguiente expresión matemática:

$$\text{Eficiencia Térmica}_{\text{Caldera}} = \frac{(M_{\text{vap}} \times H_{\text{vap}}) - (M_{\text{cond}} \times H_{\text{cond}})}{(M_{\text{comb}} \times \text{HHV})} \times 100 \% \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

- $M_{vap}$  = Flujo de vapor hacia turbogenerador (t/h)  
 $H_{vap}$  = Entalpía del vapor (BTU/lb)  
 $M_{cond}$  = Flujo de agua al economizador (t/h)  
 $H_{cond}$  = Entalpía de agua al economizador (BTU/lb)  
 $M_{comb}$  = Flujo de alimentación combustible (t/h)  
 $HHV$  = Poder calorífico superior del combustible (BTU/lb)

Se evaluó según los resultados obtenidos de la prueba de combustión de chip de bambú, la eficiencia de la caldera y sus respectivos consumos con los diferentes tipos de combustibles, con un poder calorífico de 6,041 BTU/lb para el chip de bambú y 11,217 BTU/lb para el carbón mineral según resultados obtenidos de análisis de laboratorio; por lo tanto, la eficiencia térmica de la caldera (mínimo técnico) se ilustra en la tabla VI, a través de los datos obtenidos de las gráficas del sistema de automatización del proceso.

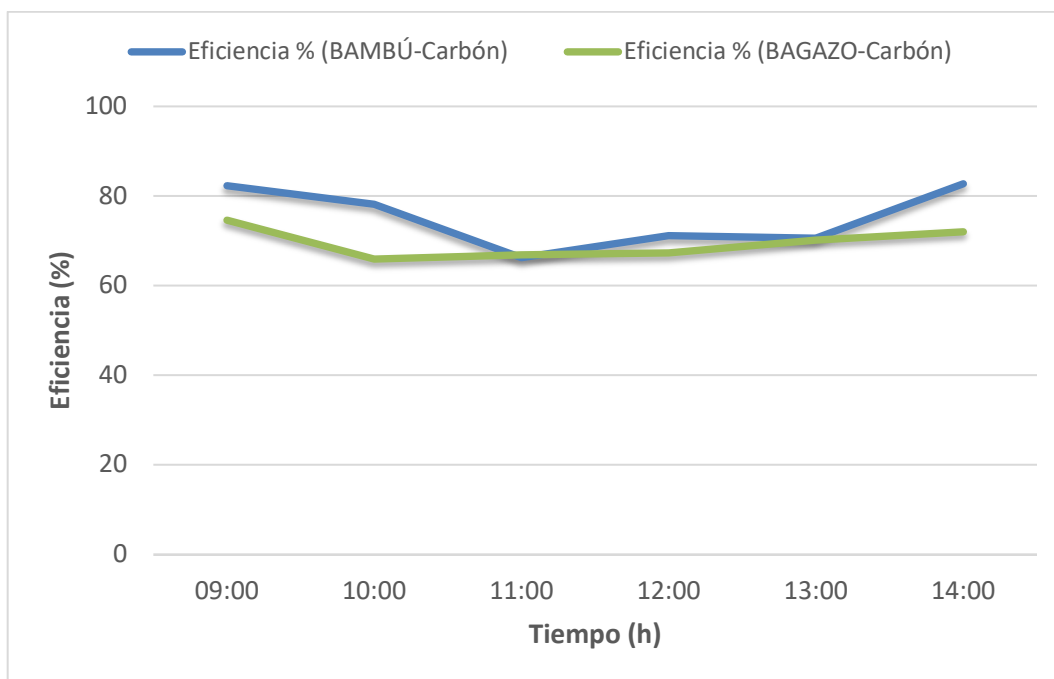
Tabla VI. **Eficiencia y consumos de la caldera a mínimo técnico**

Fecha	Hora	VAPOR			AGUA			COMBUSTIBLE		EFICIENCIA		Potencia (MW)
		Flujo de Vapor (t/h)	Temp Vapor (°C)	Presión Vapor (kg/cm <sup>2</sup> )	Flujo Agua Econo (t/h)	Temp Entrada Econo (°C)	Presión Entrada Econo (kg/cm <sup>2</sup> )	Carbón (t)	Bambú (t)	Eficiencia térmica % (BAMBÚ-Carbón)	Eficiencia térmica % (BAGAZO-Carbón)	
		FT7830XA	TT7831XA	PT7830XC	FT7820Y	TE78308	PT78308					
12/08/20	09:00	102	512	108	103	177	113	12.5	0	<b>82.32</b>	74.62	24
	10:00	102	512	108	103	177	113	8.2	9.2	<b>78.22</b>	65.94	24
	11:00	102	513	109	103	177	113	5.9	17.9	<b>66.25</b>	66.87	24
	12:00	101	532	109	102	177	113	0	27.1	<b>71.14</b>	67.35	24
	13:00	101	529	107	104	177	113	0	27.1	<b>70.60</b>	70.21	24
	14:00	106	493	100	108	177	113	12.7	0	<b>82.74</b>	72.08	24

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la figura 22 se presenta de forma gráfica que la eficiencia que se obtiene al sustituir carbón mineral por chip de bambú a la potencia de mínimo técnico (24 MW), es ligeramente mayor a la eficiencia obtenida de sustituir carbón mineral por bagazo.

Figura 22. **Comportamiento de eficiencias al mínimo técnico**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En base a los datos obtenidos de la prueba de combustión de chip bambú y analizando los valores de flujo de vapor, flujo de agua y consumos de combustibles que se muestran en la tabla VII, se determinó la eficiencia térmica de la caldera a máxima potencia (46 MW).



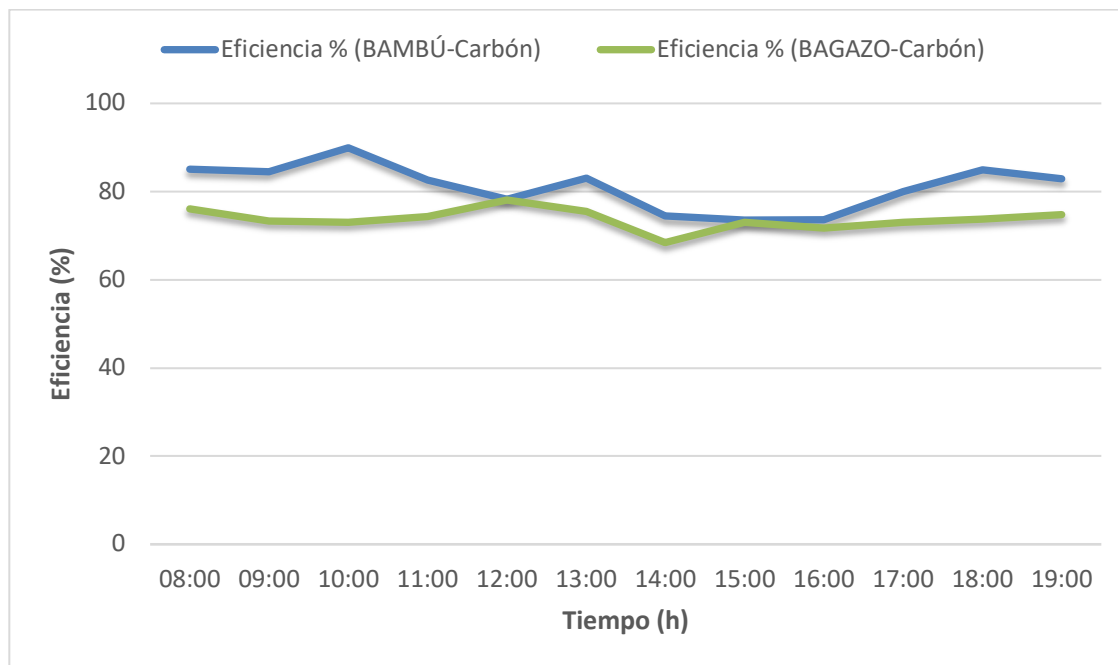
Tabla VII. Eficiencia y consumos de la caldera a máxima potencia

Fecha	Hora	VAPOR			AGUA			COMBUSTIBLE		EFICIENCIA		Potencia (MW)
		Flujo de Vapor (t/h)	Temp Vapor (°C)	Presión Vapor (kg/cm <sup>2</sup> )	Flujo Agua Econo (t/h)	Temp Entrada Econo (°C)	Presión Entrada Econo (kg/cm <sup>2</sup> )	Carbón (t)	Bambú (t)	Eficiencia térmica % (BAMBÚ-Carbón)	Eficiencia térmica % (BAGAZO-Carbón)	
		FT7830XA	TT7831XA	PT7830XC	FT7820Y	TE78308	PT78308					
13/08/20	08:00	186.35	528	109	187	201	122	21.6	0	<b>85.03</b>	76.06	46
	09:00	186.35	530	108	189	201	121	16.5	9.7	<b>84.44</b>	73.26	46
	10:00	187.31	516	107	190	201	119	10.8	17.5	<b>89.93</b>	73.06	46
	11:00	186.39	522	107	179	203	121	1.9	38	<b>82.63</b>	74.27	46
	12:00	186.36	538	109	191	202	120	0	43.6	<b>78.31</b>	78.09	46
	13:00	186.31	530	109	189	202	120	0	40.9	<b>83.08</b>	75.54	46
	14:00	185.83	532	109	188	202	121	0	45.6	<b>74.52</b>	68.43	46
	15:00	185.71	534	106	186	202	121	0	46.5	<b>73.54</b>	72.98	46
	16:00	186.10	531	108	193	202	120	3.8	38.8	<b>73.56</b>	71.67	46
	17:00	185.41	528	108	186	202	120	7.9	27.7	<b>79.99</b>	73.02	46
	18:00	184.41	522	108	186	202	120	19.7	2.8	<b>84.93</b>	73.74	46
	19:00	183.41	528	108	186	202	120	21.7	0	<b>82.90</b>	74.75	46

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la siguiente figura 23 se muestra de forma gráfica que la eficiencia que se obtiene al sustituir carbón mineral por chip de bambú a máxima potencia (46 MW), es mayor a la eficiencia obtenida de sustituir carbón mineral por bagazo.

Figura 23. Comportamiento de eficiencias a máxima potencia



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

#### 4.3. Estimación del carbón reemplazado por chip de bambú

Se determinó que la cantidad de carbón reemplazado por el uso de biomasa de bambú depende de los resultados obtenidos en los análisis de las propiedades del chip de bambú; principalmente de su poder calorífico y humedad, así como también de los resultados de consumo de combustible obtenidos durante la prueba de combustión de bambú. Por lo tanto, en la tabla VIII se ilustra la estimación de carbón reemplazado por tonelada chip de bambú.

Tabla VIII. **Carbón reemplazado por tonelada de chip de bambú**

<b>Fecha</b>	<b>Combustible</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>PCS (BTU/lb)</b>
13/08/2020	Chip de Bambú	23.29	6,041
	Carbón	13.45	11,217
<b>Relación Bambú/Carbón</b>		<b>1.86 t Chip de Bambú equivalen a 1 t de Carbón</b>	

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

#### 4.4. **Comparativo de combustibles en la producción de energía**

Los datos obtenidos del análisis de laboratorio sobre el chip de bambú se compararon con el carbón mineral, por medio de la siguiente tabla IX.

Tabla IX. **Análisis comparativo de combustibles**

<b>Parámetro</b>	<b>Chip de bambú</b>	<b>Carbón mineral</b>
Poder Calorífico (BTU/lb)	6,041	11,217
Humedad (%)	23.29	13.45
Ceniza (%)	19.66	38.63

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

El chip de bambú procesado también fue sometido a un análisis de laboratorio externo por medio de AgriLab (ver anexo 1), por lo que los principales resultados obtenidos se compararon directamente con las propiedades del bagazo como se ilustra en la tabla X.

Tabla X. **Comparación de propiedades de chip de bambú vs bagazo**

<b>Parámetro</b>	<b>Chip de bambú</b>	<b>Bagazo</b>
Carbono orgánico total	57.3 %	54.4 %
Densidad relativa	0.09 g/cm <sup>3</sup>	0.07 g/cm <sup>3</sup>
Materia seca	114 %	55.4 %
Humedad	18.17 %	44.6 %
Hierro	57.3 mg/kg (0.0057 %)	472 mg/kg (0.0472 %)
Cloro	329 mg/kg (0.0329 %)	38.6 mg/kg (0.00386 %)
Aluminio	40 mg/kg (0.0040 %)	461 mg/kg (0.0461 %)

Fuente: elaboración propia en base a resultados analíticos de AgriLab (2020). *FT-20/001211 Bambú.*

En base a los datos obtenidos del análisis de laboratorio por medio de AgriLab, se puede identificar que en general el chip de bambú presenta mejores propiedades que el bagazo, lo cual también contribuye a tener una mejor eficiencia térmica en la combustión de la caldera de vapor, utilizando chip de bambú como fuente de combustible alternativo.

## 5. BENEFICIO ECONÓMICO DEL USO DE CHIP DE BAMBÚ

El beneficio económico de la producción de energía eléctrica a través del uso de chip de bambú se determinó definiendo inicialmente el precio de la tonelada (t) de bambú como materia prima, el consumo de energía eléctrica (kWh) y costo (Q) por el uso de la máquina chipeadora para el procesamiento del chip de bambú. Luego se analizó el costo de chipeo de bambú para compararlo con el precio del carbón mineral y definir el precio equivalente de las toneladas de chip de bambú por sustitución de tonelada de carbón.

### 5.1. Estimación de costos de chipeo de bambú

Para estimar los costos de chipeo de bambú se inició determinando el consumo de energía, por lo que en la tabla XI se presentan los consumos de energía eléctrica de forma detallada de la máquina chipeadora de bambú.

Tabla XI. Consumo y costo de energía del chipeo de bambú

Motor	Potencia Máxima (kW)
Motores de molino de martillos	373
Motor de la bomba hidráulica	56
Motor del ventilador	1.5
Motor de la bomba hidráulica de la cargadora	75
Motor de impulsión del acondicionador de aire	2.2
Motor Banda 10	45
Motor Banda 12, 13 y 17	120
kW total	672.7
Potencia a 40 % (20 t/h)	269.08

Continuación tabla XI.

<b>Consumo de energía (kWh)</b>	<b>269.08</b>
<b>Precio de energía (Q/kWh)</b>	<b>0.4680</b>
<b>Costo por energía consumida (Q/h)</b>	<b>125.92</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En base a los datos obtenidos del consumo de energía de la chipeadora y otros criterios importantes como el mantenimiento del equipo, maquinaria, operadores y cantidad de toneladas procesadas en chip de bambú, se calculó el costo de chipeo de bambú como se ilustra en la tabla XII.

Tabla XII. **Costo total de chipeo del bambú por tonelada**

<b>Descripción</b>	<b>Costo x Hora</b>	<b>Costo x Día (8 h)</b>	<b>Costo x Semana</b>
Costo consumo de energía	Q125.92	Q1,007.33	Q7,051.34
Servicios/Repuestos de mantenimiento	Q516.74	Q4,133.93	Q28,937.49
Operador	Q20.83	Q166.67	Q1,166.67
Auxiliar operador	Q12.50	Q100.00	Q700.00
Chipeadora	Q291.67	Q2,333.33	Q16,333.33
Maquinaria ( <i>Stacker</i> )	Q393.13	Q3,145.00	Q22,015.00
<b>Total</b>	<b>Q1,360.78</b>	<b>Q10,886.26</b>	<b>Q76,203.83</b>
Toneladas chipeadas de bambú			1,080
<b>Costo de Chipeo de Bambú (Q/t)</b>			<b>Q70.56</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Por lo tanto, el costo de chipeo de bambú es de Q70.56 por tonelada, para las 1,080 toneladas de chip de bambú procesadas durante una semana con jornadas operativas de 8 horas diarias. Estos datos obtenidos son fundamentales para estimar el beneficio económico del uso de chip de bambú.

## 5.2. Ahorro económico de carbón por el uso de chip de bambú

Se determinó que para estimar el ahorro económico de carbón que se puede obtener a través del uso de chip de bambú como combustible para la producción de energía eléctrica, se debe comparar el beneficio del uso de chip de bambú con el precio del carbón mineral (precio de compra del carbón en el ingenio); por lo cual en la tabla XIII se muestran los datos que definen el ahorro económico por tonelada de carbón sustituido por chip de bambú.

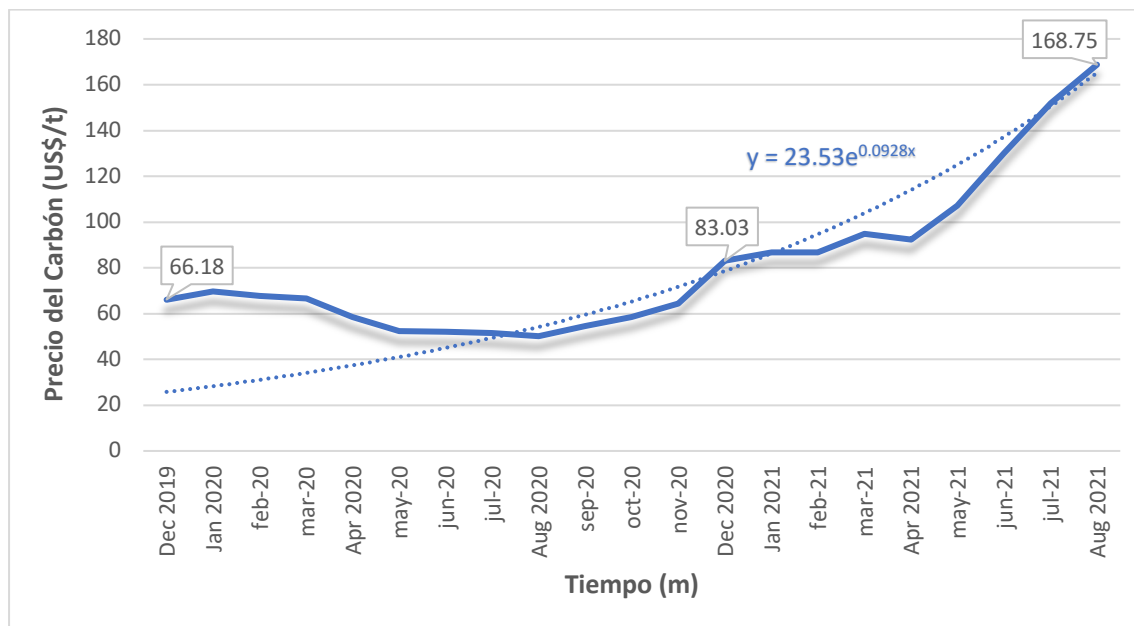
Tabla XIII. **Ahorro económico de carbón sustituido por chip de bambú**

<b>Descripción</b>	<b>Costo/Precio</b>
Precio tonelada de bambú (materia prima)	Q423.50
Costo chipeo de bambú por tonelada	Q70.56
Costo por tonelada Chip de bambú	Q494.06
Precio Chip de bambú equivalente a 1 tonelada de carbón	Q918.95
Precio tonelada de Carbón	Q962.50
<b>Ahorro económico por tonelada de carbón sustituido</b>	<b>Q43.55</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En base a los resultados obtenidos en la tabla anterior, es importante mencionar que el ahorro económico de carbón sustituido por chip de bambú puede incrementar significativamente dependiendo del precio del carbón mineral en el mercado, ya que, en los últimos dos años, el precio del carbón ha tenido un comportamiento exponencial como se ilustra en la figura 24, según información consultada en la página web IndexMundi.com.

Figura 24. Precio del carbón mineral



Fuente: elaboración propia, en base a datos de IndexMundi (2021). *Precios de los productos básicos, carbón térmico.*

El precio del carbón como se muestra claramente en la figura 24, en los últimos dos años ha presentado un incremento de forma exponencial; por consiguiente, con estos precios de carbón mineral en el mercado, la utilización de chip de bambú como fuente de combustible para la producción de energía eléctrica es una buena alternativa.



## **6. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS**

En función al estudio realizado se presentan los resultados obtenidos conforme a las etapas del proceso del chip de bambú, para su utilización como fuente de combustible en las calderas de producción de vapor y su posterior aprovechamiento para la generación de energía eléctrica.

### **6.1. Disponibilidad del chip de bambú para la generación de energía eléctrica**

La selección de biomasa disponible se estimó en 600 hectáreas de cultivo de bambú en Guatemala, parte del cultivo se encuentra ubicado principalmente en la región sur del país en las zonas de San Francisco Zapotitlán, Suchitepéquez; de donde se consideró obtener la mayor cantidad posible de biomasa de bambú, ya que se trata de un recurso sostenible y renovable porque se auto multiplica vegetativamente, es decir, que no necesita de semilla para reproducirse como ocurre con algunas especies maderables.

En la tabla XIV, se presenta el registro de control de ingreso de la materia prima de bambú para obtener el resultado total del bambú recolectado y almacenado, después de realizar los distintos viajes de transporte desde su punto de cultivo hasta la central térmica del ingenio azucarero.

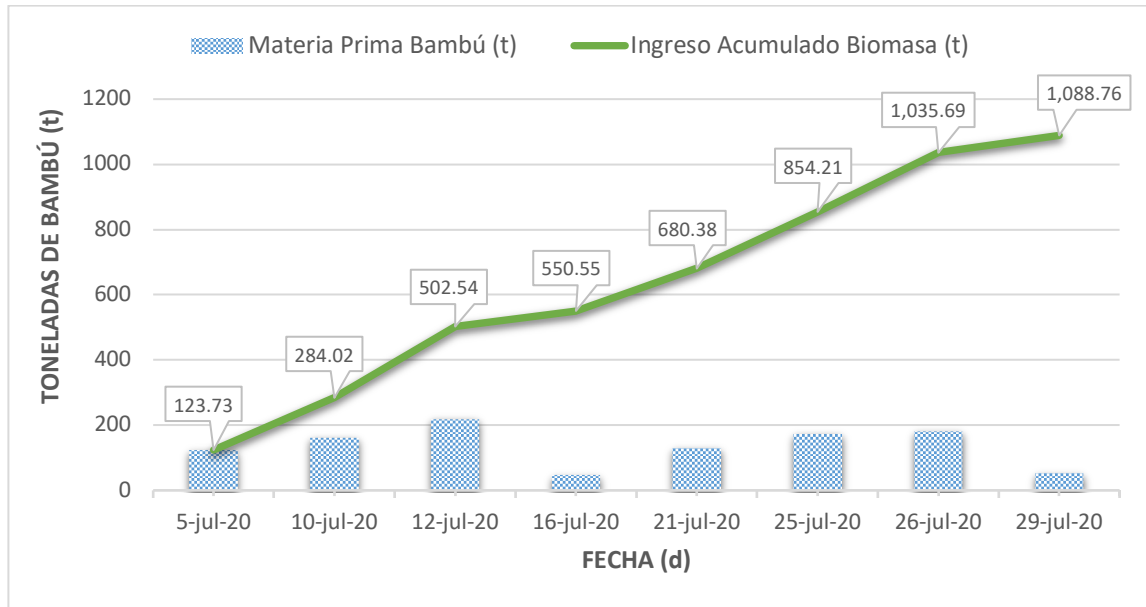
Tabla XIV. **Disponibilidad de materia prima de bambú**

<b>Fecha de Ingreso</b>	<b>Cantidad de Viajes</b>	<b>Materia Prima Bambú (t)</b>	<b>Ingreso Acumulado Biomasa (t)</b>	<b>Porcentaje Acumulado de Biomasa (%)</b>
5-jul-20	15.00	123.73	123.73	11.36
10-jul-20	20.00	160.29	284.02	26.09
12-jul-20	25.00	218.52	502.54	46.16
16-jul-20	12.00	48.01	550.55	50.57
21-jul-20	18.00	129.83	680.38	62.49
25-jul-20	22.00	173.84	854.21	78.46
26-jul-20	20.00	181.48	1,035.69	95.13
29-jul-20	8.00	53.07	1,088.76	100

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la figura 25 con base a los valores registrados de la tabla anterior, se muestra de forma gráfica las cantidades de bambú ingresadas diariamente, hasta almacenar en el área de materia prima un total de 1,088.76 toneladas de bambú para su posterior transformación en chip de bambú. Se estimó que el espacio disponible de almacenamiento es el adecuado para que previo al procesamiento de chip de bambú, la biomasa tenga un proceso de secado natural mientras es monitoreada diariamente, a través de análisis de laboratorio.

Figura 25. Estimación de materia prima de bambú disponible



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La capacidad de chipeado de bambú en planta es de 20 t/h con una capacidad de almacenamiento de hasta 32,000 toneladas en época de Zafra. Considerando que se cuenta con la disponibilidad de un operador de la máquina chipeadora, se estima una producción de chip de bambú durante 8 horas operativas diarias a una razón de 20 t/h; por lo tanto, durante el día se procesan en promedio 160 toneladas de chip de bambú.

En la tabla XV, se presentan las producciones diarias de chip de bambú, utilizando la máquina chipeadora a un 40 % (20 t/h) de su capacidad, para no saturar las cintas transportadoras de biomasa y evitar atoros que provoquen tiempos perdidos en la producción de chip de bambú.

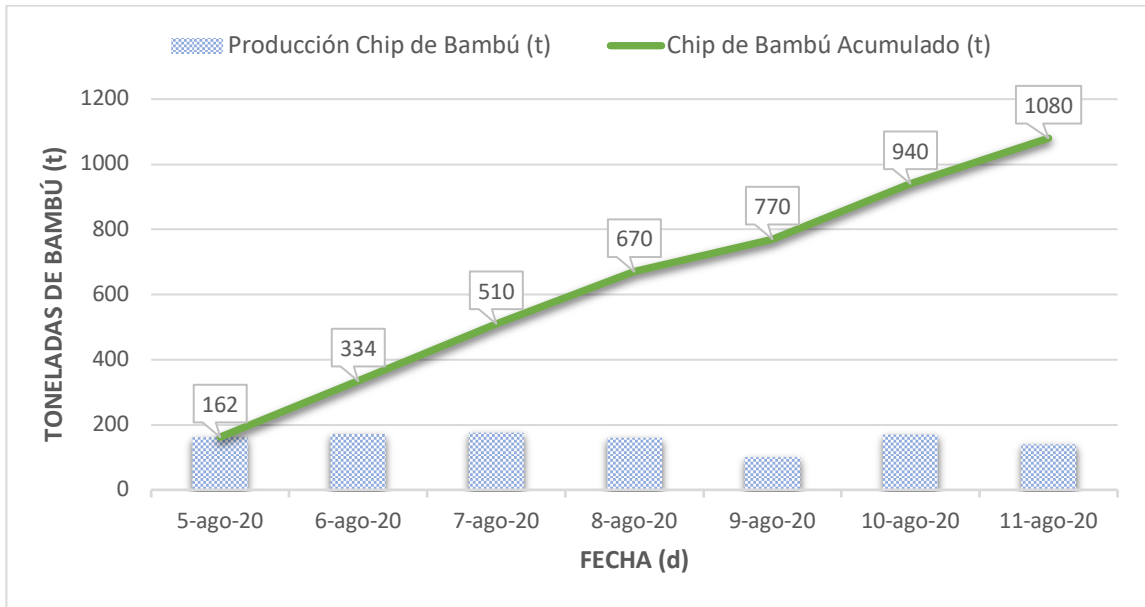
Tabla XV. **Producción de chip de bambú**

<b>Fecha</b>	<b>Horómetro Inicial</b>	<b>Horómetro Final</b>	<b>Chipeadora (%)</b>	<b>Producción Chip Bambú (t)</b>	<b>Acumulado Chip Bambú (t)</b>
5-ago-20	2812.5	2820.6	40	162	162
6-ago-20	2820.6	2829.2	40	172	334
7-ago-20	2829.5	2838.3	40	176	510
8-ago-20	2839.7	2847.7	40	160	670
9-ago-20	2848.2	2853.2	40	100	770
10-ago-20	2854.1	2862.6	40	170	940
11-ago-20	2863.1	2870.1	40	140	1,080

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La producción diaria de chip de bambú se refleja de forma gráfica en la figura 26, en donde se muestra que en una semana se lograron procesar 1,080 toneladas de chip de bambú de las 1,088.76 toneladas de materia prima de bambú disponible; por lo tanto, se estima que se tiene una pérdida por desperdicios en el procesamiento del bambú del 0.8 % de materia prima luego de ser transformada en forma de chip.

Figura 26. Comportamiento de la producción de chip de bambú



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

## 6.2. Consumos de combustible en la producción de energía eléctrica

Durante la prueba de combustión de biomasa de bambú se ajustaron parámetros de la caldera de vapor, principalmente para poder realizar la transición de un combustible de carbón a biomasa de bambú, con el objetivo de mantener las condiciones de nominales de presión, temperatura y flujo de vapor de la caldera según los requerimientos del fabricante, para operar de manera eficiente los equipos durante todo el proceso de combustión y producción de energía eléctrica.

En la tabla XVI se reflejan los consumos de combustible que se obtuvieron en la prueba de combustión, para determinar la viabilidad de utilizar biomasa de

bambú chipeado en una caldera de vapor al mínimo técnico de la potencia del generador eléctrico.

Tabla XVI. **Consumos de combustible a mínimo técnico de potencia**

Fecha	Hora	Generación Bruta (kWh)	Venta (kWh)	Carbón (t/h)	Bambú (t/h)
12-ago-20	09:00	24,000	21,573.44	12.50	0.00
	10:00	24,000	21,698.71	8.20	9.20
	11:00	24,000	21,560.42	5.90	17.90
	12:00	24,000	21,544.05	0.00	27.10
	13:00	24,000	21,799.15	0.00	27.10
	14:00	24,000	21,788.49	12.70	0.00

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Con base a los datos obtenidos, se logró determinar que durante la prueba de combustión consumiendo únicamente bambú y al mínimo técnico de la potencia del generador, el consumo de bambú es de 27.10 t/h; lo que equivale al consumo de 12.70 t/h de carbón para producir 24,000 kWh de energía eléctrica.

Importante mencionar que, durante todo el proceso de prueba de combustión de biomasa de bambú, la caldera de vapor se mantuvo en condiciones estables de presión (108 kg/cm<sup>2</sup>), temperatura (535 °C) y flujo vapor (102 t/h), lo cual contribuyó para obtener resultados certeros del consumo de combustible.

Se estimó en la tabla XVII los consumos de combustible de biomasa de bambú chipeado, que se obtuvieron en la prueba de combustión, para determinar la viabilidad de utilizar biomasa de bambú chipeado en una caldera de vapor a máxima potencia del generador eléctrico.

Tabla XVII. **Consumos de combustible a máxima potencia**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Generación Bruta (kWh)</b>	<b>Venta (kWh)</b>	<b>Carbón (t/h)</b>	<b>Bambú (t/h)</b>
12-ago-20	08:00	46,000	41,350.82	21.60	0.00
	09:00	46,000	41,550.58	16.50	9.70
	10:00	46,000	41,005.53	10.80	17.50
	11:00	46,000	41,271.54	1.90	38.00
	12:00	46,000	41,555.20	0.00	43.60
	13:00	46,000	41,364.61	0.00	40.90
	14:00	46,000	38,907.85	0.00	45.60
	15:00	46,000	41,488.17	0.00	46.50
	16:00	46,000	41,024.62	3.80	38.80
	17:00	46,000	41,167.15	7.90	27.70
	18:00	46,000	40,519.59	19.70	2.80
	19:00	46,000	42,929.65	21.70	0.00

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Con base a los resultados obtenidos en la prueba de combustión consumiendo únicamente bambú a máxima potencia del generador, el consumo promedio de bambú es de 44.15 t/h; lo que equivale al consumo de 21.70 t/h de carbón para producir 46,000 kWh de energía eléctrica. Por lo tanto, a máxima potencia se obtiene un mejor rendimiento del combustible de biomasa de bambú.

### **6.3. Uso del bambú como combustible sustituto del carbón**

El bambú procesado para la obtención del chip de bambú en sustitución del carbón mineral en la caldera de vapor se estimó en base a los resultados obtenidos en laboratorio del poder calorífico de cada combustible y la venta de energía eléctrica con biomasa de bambú; por lo tanto, en la tabla XVIII se presentan los resultados obtenidos al mínimo técnico de la potencia del generador.

Tabla XVIII. **Sustitución de carbón por chip de bambú a mínimo técnico**

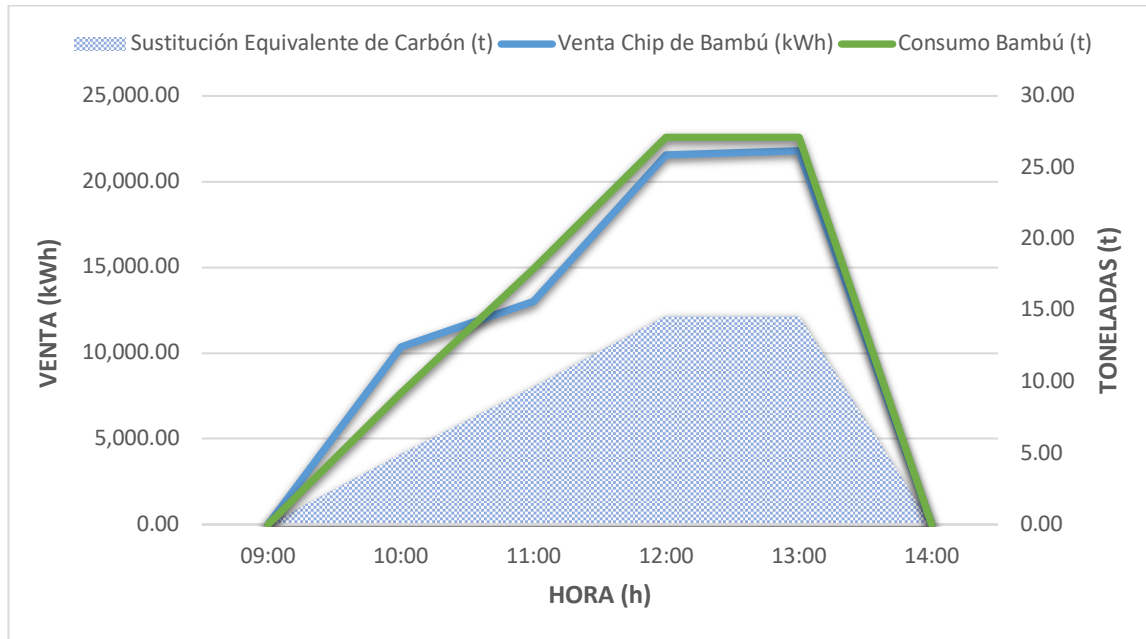
FECHA	HORA	VENTA TOTAL (kWh)	VENTA CHIP DE BAMBÚ (kWh)	kWh VENTA/t CARBÓN	PROMEDIO BTU/lb CARBÓN	PROMEDIO BTU/lb BAMBÚ	CONSUMO CARBÓN (t)	CONSUMO BAMBÚ (t)	SUSTITUCIÓN EQUIVALENTE DE CARBÓN (t)
12/09/20	09:00	21,573.44	0.00	1,725.88	11,217	6,041	12.50	0.00	<b>0.00</b>
	10:00	21,698.71	10,341.56	1,385.02	11,217	6,041	8.20	9.20	4.95
	11:00	21,560.42	13,025.83	1,446.54	11,217	6,041	5.90	17.90	9.64
	12:00	21,544.05	21,544.05	0.00	11,217	6,041	0.00	27.10	14.59
	13:00	21,799.15	21,799.15	0.00	11,217	6,041	0.00	27.10	14.59
	14:00	21,788.49	0.00	1,715.63	11,217	6,041	12.70	0.00	<b>0.00</b>
<b>TOTALES</b>								<b>81.30</b>	<b>43.78</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la gráfica de la figura 27, se muestra la sustitución equivalente de carbón mineral por el uso de chip de bambú, como resultado de los análisis de combustible y la venta de energía eléctrica, aportada por el uso de chip de bambú como fuente de combustible para producción de vapor de la caldera, según prueba de combustión al mínimo técnico de la potencia del generador.



Figura 27. **Sustitución de carbón por el uso de chip a mínimo técnico**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La gráfica anterior refleja que debido a la relación del poder calorífico entre el carbón mineral y el chip de bambú; la cual define que 1.86 toneladas de chip de bambú equivalen a una tonelada de carbón mineral. Por lo tanto, se determinó que la sustitución total equivalente de carbón al mínimo técnico de la potencia del generador es de 43.78 toneladas.

El chip de bambú procesado y empleado para la sustitución del carbón mineral en la caldera de vapor a máxima potencia del generador se estimó en base a los resultados obtenidos en laboratorio del poder calorífico de cada combustible y la venta de energía eléctrica con biomasa de bambú; por lo tanto, en la tabla XIX se presentan los resultados obtenidos.

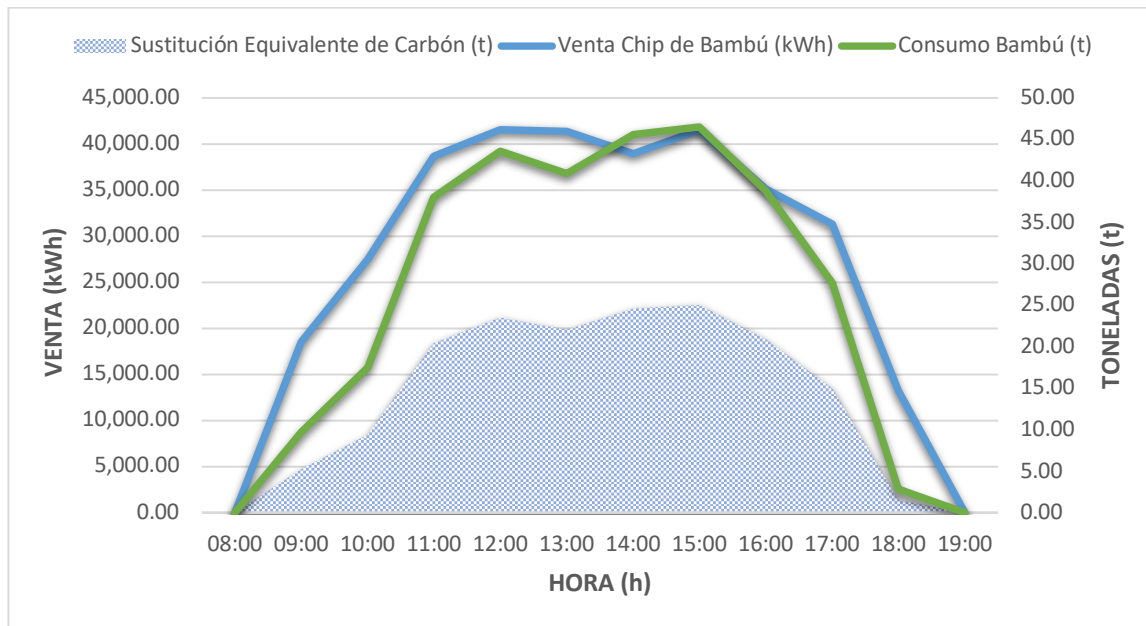
Tabla XIX. **Sustitución de carbón por chip de bambú a máxima potencia**

FECHA	HORA	VENTA TOTAL (kWh)	VENTA CHIP DE BAMBÚ (kWh)	kWh VENTA/t CARBÓN	PROMEDIO BTU/lb CARBÓN	PROMEDIO BTU/lb BAMBÚ	CONSUMO CARBÓN (t)	CONSUMO BAMBÚ (t)	SUSTITUCIÓN EQUIVALENTE DE CARBÓN (t)
13/09/20	08:00	41,350.82	0.00	1,923.64	11,217	6,041	21.60	0.00	<b>0.00</b>
	09:00	41,550.58	18,498.80	1,397.08	11,217	6,041	16.50	9.70	5.22
	10:00	41,005.53	27,499.53	1,250.56	11,217	6,041	10.80	17.50	9.42
	11:00	41,271.54	38,640.00	1,385.02	11,217	6,041	1.90	38.00	20.47
	12:00	41,555.20	41,555.20	0.00	11,217	6,041	0.00	43.60	23.48
	13:00	41,364.61	41,364.61	0.00	11,217	6,041	0.00	40.90	22.03
	14:00	38,907.85	38,907.85	0.00	11,217	6,041	0.00	45.60	24.56
	15:00	41,488.17	41,488.17	0.00	11,217	6,041	0.00	46.50	25.04
	16:00	41,024.62	35,126.35	1,552.18	11,217	6,041	3.80	38.80	20.90
	17:00	41,167.15	31,287.76	1,250.56	11,217	6,041	7.90	27.70	14.92
	18:00	40,519.59	13,234.73	1,385.02	11,217	6,041	19.70	2.80	1.51
	19:00	42,929.65	0.00	1,978.32	11,217	6,041	21.70	0.00	<b>0.00</b>
<b>TOTALES</b>								<b>311.10</b>	<b>167.55</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la gráfica de la figura 28, se puede realizar un análisis sobre la sustitución equivalente de carbón mineral por el uso de chip de bambú, como fuente de combustible para la producción de vapor de la caldera, como resultado de los análisis de combustible y la venta de energía eléctrica, aportada por el uso de chip de bambú según prueba de combustión a máxima potencia del generador.

Figura 28. **Sustitución de carbón por el uso de chip a máxima potencia**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La gráfica anterior muestra que a medida que se incrementa la potencia y por consiguiente la venta de energía eléctrica debido a la relación del poder calorífico entre el carbón mineral y el chip de bambú; se puede determinar que a mayor potencia en el generador eléctrico se presenta un mejor rendimiento del chip de bambú como fuente de combustible, provocando una mayor sustitución o reemplazo de carbón equivalente, ya que según la prueba de combustión a máxima potencia se ahorraron hasta 167.55 toneladas de carbón mineral para la producción de 327,603 kWh de energía eléctrica.

#### 6.4. **Cálculo de costos y ahorro energético del uso de bambú**

El análisis económico realizado para este proyecto se enfoca en estimar los costos de la utilización del chip de bambú, como recurso energético para la

producción de energía eléctrica y en función del ahorro en el consumo de combustible de carbón sustituido por biomasa de bambú. Por lo cual se determinó el ahorro energético que se puede obtener a través del uso de chip de bambú como combustible para la producción de energía eléctrica.

En relación con lo anterior y haciendo referencia al costo que tuvo el proyecto al implementarlo, considerando los costos de materia prima, mano de obra, mantenimiento y transporte; se estimó el ahorro expresado en quetzales por toneladas de carbón mineral sustituidas por toneladas de chip de bambú. En la siguiente tabla XX, se evidencia el ahorro energético del proyecto al utilizar chip de bambú como una alternativa de fuente energética renovable.

Tabla XX. **Ahorro energético del chip de bambú**

Descripción	Costo/ Precio (Q)	Relación Equivalente	Toneladas (t)
Precio tonelada de Bambú	Q423.50		
Costo chipeo de bambú por tonelada	Q70.56		
Costo por tonelada de Chip de Bambú	Q494.06		
Relación de toneladas Chip Bambú/Carbón		1.86	
Precio equivalente a tonelada de Carbón	Q918.95		
Precio tonelada de Carbón	Q962.50		
Diferencia de precio t Carbón/t Bambú	Q539.00		
Cantidad toneladas de Bambú			1,088.76
Cantidad toneladas Carbón Sustituido			585.355
Costo Total Chip de Bambú	Q537,911.79		
Costo Carbón Sustituido	Q563,404.03		
Ahorro Total	Q25,492.24		
<b>Porcentaje (%) de ahorro</b>		<b>4.52 %</b>	

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Respecto a los resultados obtenidos en la tabla anterior, el ahorro energético que representa el uso de chip de bambú en sustitución del carbón mineral es de 4.52 %, considerando que el precio de la tonelada de carbón mineral en el mercado es de \$125 (Q. 962.50). Por lo tanto, es importante mencionar que a medida que el precio del carbón tienda a incrementar, el ahorro energético aumentará significativamente utilizando chip de bambú como una fuente de combustible renovable para la generación de energía eléctrica.

#### **6.5. Cálculo de emisiones de CO<sub>2eq</sub>**

Los gases de efecto invernadero (GEI) principalmente registrados en el sector energético son: el metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Por lo tanto, para disponer de valores agrupados, las emisiones de cada gas se normalizan conforme a su potencial de calentamiento global en un horizonte de tiempo determinado, con la intención de mostrar los valores en unidades equivalentes de dióxido de carbono (CO<sub>2eq</sub>).

Para determinar las emisiones de GEI en el sector de energía (ver anexo 2), estos se estiman a través del consumo de combustibles como referencia al dato de actividad (DA) y la cantidad de carbono por unidad de combustible utilizado como factor de emisión (Fe).

Por lo tanto, con respecto al Dato de Actividad, básicamente es la cantidad y tipo de combustible incinerado, es decir, se refiere precisamente al volumen en barriles americanos que se consigue del balance petrolero (energía bruta). En cuanto a los factores de emisión por el tipo de combustible que es carbón mineral, este se define según las guías metodológicas del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC).

Por consiguiente, los coeficientes de emisión del sector eléctrico en Guatemala son prácticamente indicadores de la eficiencia que establecen el total de emisiones de GEI liberadas por el consumo o generación de energía eléctrica (ver anexo 3). Las dimensionales de los coeficientes de emisión son:

$$\text{Coeficientes de emisión} = \frac{\text{kg CO}_{2\text{eq}}}{\text{kWh}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Los coeficientes de emisión son determinados en función de la cantidad de emisiones de GEI por el tipo de combustible, indicadas en CO<sub>2eq</sub>, y su relación con la producción total de energía eléctrica. Por consiguiente, en Guatemala según lo establecido por el MEM en el balance energético 2019, el factor de emisión por el uso de combustible de carbón mineral es de 1.1682 kg CO<sub>2eq</sub>/kWh (ver anexo 4).

Los resultados obtenidos por el uso de chip de bambú para la generación de energía eléctrica presentaron una sustitución de carbón mineral de 585.355 toneladas (585,355 kg); lo que equivale a una producción de energía eléctrica de 1,144,518.38 kWh. Por lo tanto, aplicando el coeficiente de emisión por el uso de carbón mineral se determinó que, el proyecto de utilizar chip de bambú como fuente de combustible para la generación de energía eléctrica, evita la emisión de 1,337,026.37 kg CO<sub>2eq</sub>, lo cual contribuye considerablemente a reducir la cantidad de dióxido de carbono liberado a la atmósfera.

## 7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos del estudio realizado sobre la utilización del chip de bambú, como fuente de combustible alternativo en las calderas de vapor para la producción de energía eléctrica, han sido muy aceptables para reducir o sustituir el uso de carbón mineral en el proceso del área industrial del ingenio azucarero, ya que principalmente se estima una disponibilidad de 600 hectáreas de cultivo de bambú en Guatemala y en las instalaciones del complejo industrial del ingenio azucarero se pueden procesar hasta 20 t/h de chip de bambú con una capacidad de almacenamiento de hasta 32,000 toneladas por zafra.

Para una logística eficiente en el almacenamiento de bambú, se requiere la elección de equipos y maquinaria que faciliten el proceso de descarga, por lo cual para aprovechar el área de 8,000 m<sup>2</sup> de almacenamiento se debe apilar la biomasa a alturas superiores a los 4 metros de alto, para tener un mejor aprovechamiento del espacio disponible en el área de descarga y lograr almacenar el bambú de manera inclinada, para que drene su contenido de agua antes de ser procesado en forma de chip hacia los alimentadores de biomasa en las calderas.

La producción diaria de chip de bambú se debe realizar posterior al proceso de secado natural de la materia de prima de bambú; el cual debe ser al menos de una semana en condiciones favorables para reducir el porcentaje de humedad alrededor de un 20 %, ya que con estas condiciones se lograron procesar 1,080 toneladas de chip de bambú de las 1,088.76 toneladas de materia prima comprada de bambú disponible. Por lo tanto, en la transformación de la materia

prima a chip de bambú, la pérdida que se tiene por desperdicios en el procesamiento del bambú es mínima, ya que es inferior al 1 %.

Para la utilización del bambú como biomasa combustible, es necesario que luego de su procesamiento en forma de chip, no contenga astillas muy largas y/o gruesas. Para lograrlo se utilizó una máquina chipeadora a 40 % de su capacidad, la cual posee una malla con orificios de 1 pulgada de diámetro evitando que el bambú sea reprocesado; con la finalidad de facilitar el transporte para su combustión en la caldera y sin provocar atoros en las caídas de los conductores de biomasa.

Las propiedades del chip de bambú procesado que se determinaron mediante análisis de muestras en laboratorio, fue en base a una serie de características que definen la calidad del chip de bambú como lo es la uniformidad en el tamaño, el cual se obtuvo triturando el bambú en pequeños fragmentos con un tamaño de entre 20 y 50 mm. El poder calorífico que esencialmente se determinó por el tipo de bambú fue de 6,041 BTU/lb y una humedad contenida de 23.29 %. Por lo tanto, es evidente que, para obtener un buen chip de bambú es necesario una buena gestión de cultivo, con un proceso de secado natural y un adecuado procesamiento del chip de bambú.

En los análisis realizados para determinar las propiedades del chip de bambú, es importante mencionar que, el comportamiento del poder calorífico del chip de bambú es inversamente proporcional a su contenido de humedad, ya que la primera muestra analizada presentó una humedad de 24.5 % con un poder calorífico de 6,040 BTU/lb, en cambio la última muestra analizada en el séptimo día de secado presentó un 19.80 % de humedad con un poder calorífico de 6,102 BTU/lb; por lo tanto, a menor contenido de humedad se obtiene un mejor poder calorífico en el chip de bambú.



Para la estimación de carbón reemplazado por chip de bambú se determinó que, depende de los resultados obtenidos en el análisis de las propiedades del chip de bambú; principalmente de su poder calorífico y humedad, así como también de los resultados de consumo de combustible obtenidos durante la prueba de combustión de bambú. Por lo tanto, con un poder calorífico de 6,041 BTU/lb para el chip de bambú y 11,217 BTU/lb para el carbón mineral, se obtiene que 1.86 toneladas de chip de bambú equivalente a 1 tonelada de carbón.

En la prueba de combustión de chip de bambú al mínimo técnico de la potencia del generador, se obtuvo un consumo de 27.10 t/h, lo que equivale a la sustitución de 12.70 t/h de carbón para la producción de 24,000 kWh de energía eléctrica. Además, la eficiencia que se obtiene al sustituir carbón mineral por chip de bambú a la potencia de mínimo técnico (24 MW), esta es ligeramente mayor a la eficiencia obtenida de sustituir carbón mineral por bagazo, ya que utilizando chip de bambú se alcanza una eficiencia máxima de 78.22 %.

Respecto a la prueba de combustión de chip de bambú a máxima potencia del generador, el consumo promedio es de 44.15 t/h, lo cual equivale a la sustitución de 21.7 t/h de carbón para producir 46,000 kWh de energía eléctrica. Por lo tanto, es evidente que a máxima potencia se obtiene un mejor rendimiento del chip de bambú como fuente de combustible para la caldera, ya que se alcanza una eficiencia térmica de hasta 89.93 %.

Durante la prueba de combustión del chip de bambú tanto al mínimo técnico como a máxima potencia, la caldera de vapor se mantuvo estable y no presentó problemas de inquemados (LOI) en la ceniza, ya que según los análisis LOI realizados en el laboratorio de combustibles, determinaron 5.44 % en la banda húmeda, 4.17 % en los sistemas de ceniza y tan solo un 19.57 % en el silo de ceniza, lo cual representó una buena combustión en la caldera de vapor.

Las emisiones de gases procedentes de la combustión del chip de bambú, se analizaron para determinar principalmente el porcentaje de oxígeno (O) y el exceso de aire (EA) en los gases de combustión. Por medio de un analizador portátil Bacharach se obtuvieron resultados de 5.9 % de oxígeno y 39 % de exceso de aire; lo cual brinda condiciones operativas estables en la caldera de vapor utilizando chip de bambú como biocombustible.

Con respecto a las emisiones de CO<sub>2eq</sub> que evitó el uso de chip de bambú en sustitución del carbón mineral se ha realizado un análisis importante, ya que la quema de combustibles fósiles genera una cantidad determinada de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por cada unidad de energía producida; por lo que, en base a la cantidad de carbón que se sustituyó se logra evitar la emisión de 1,337.02 tCO<sub>2eq</sub>, por lo tanto a mayor uso de chip de bambú como fuente de combustible para la producción de energía se puede tener una significativa disminución de emisiones de GEI en el sector energético.

En relación al beneficio económico que se obtiene a través del uso de chip de bambú en sustitución del carbón mineral, se determinó un ahorro económico directo de Q. 43.55 por tonelada de carbón sustituido por chip de bambú. Por consiguiente, el ahorro energético que representa el uso de chip de bambú en sustitución del carbón mineral es de 4.52 %, considerando que el precio de la tonelada de carbón en el mercado es de \$125 (Q. 962.50).

En base a los resultados obtenidos, es importante mencionar que el ahorro económico de carbón sustituido por chip de bambú, puede incrementar significativamente dependiendo del precio del carbón mineral en el mercado, ya que en los últimos dos años ha incrementado con un comportamiento exponencial; alcanzando un precio actual de \$ 168.75 (Q. 1,299.38), con este

precio la utilización de chip de bambú como fuente de combustible para la producción de energía eléctrica se convierte en una excelente alternativa.

El estudio en base a los resultados obtenidos definitivamente beneficia el sector industrial del ingenio azucarero, al ambiente y las comunidades cercanas al sitio. También el uso de chip de bambú como biocombustible, tiene un importante impacto en la matriz energética al poder reducir la dependencia de combustibles fósiles, ya que se obtiene una huella de carbono de 0 CO<sub>2</sub> al año, lo que hace sostenible y de bajo impacto ambiental el proyecto, orientándolo hacia la eficiencia y el correcto uso de los recursos de biomasa para la generación de energía eléctrica.



## CONCLUSIONES

1. Se presentó un estudio para utilizar bambú como una fuente de combustible de biomasa para la generación de energía eléctrica en el área industrial de un ingenio azucarero, determinando que se puede sustituir el 100 % de consumo actual de carbón mineral por chip de bambú para producir hasta 46 MWh.
2. Se estimó que actualmente se consume en promedio 21.7 t/h de carbón mineral para la producción de energía eléctrica a máxima potencia de 46 MW. Esto representa un alto costo en la generación de energía a medida que el precio del carbón en el mercado tiende al alza, por lo que ante estas condiciones el bambú como fuente de combustible renovable es una buena alternativa.
3. Se determinó que la cantidad de carbón reemplazado por el uso de biomasa de bambú depende de las propiedades del chip de bambú; principalmente de su poder calorífico que en promedio fue de 6,041 BTU/lb, lo que representa que, para reemplazar 1 tonelada de carbón se requiera de 1.86 toneladas de chip de bambú.
4. Debido al aprovechamiento de 600 hectáreas de cultivo de bambú en Guatemala, principalmente en la región sur del país, la disponibilidad del chip de bambú como recurso energético dentro del complejo industrial del ingenio azucarero, es de procesar hasta 20 t/h de chip de bambú con una capacidad de almacenamiento de hasta 32,000 toneladas por zafra.

5. El ahorro energético que se obtiene por la utilización de chip de bambú como fuente de combustible renovable alternativo equivale a 4.52 %, esto se traduce a un ahorro económico directo de Q. 43.55 por tonelada de carbón sustituido por chip de bambú, siendo una alternativa técnica y económicamente viable.

## RECOMENDACIONES

1. Utilizar el chip de bambú como fuente de combustible alternativa en época seca, ya que su contenido de humedad y poder calorífico será de mayor beneficio, tanto para un mejor almacenamiento de la biomasa de bambú como para el proceso de combustión.
2. Implementar el uso de chip de bambú como recurso energético para la generación de energía eléctrica en sustitución del carbón mineral, ya que brinda una alternativa para la reducción de gases de efecto invernadero, con un costo relativamente bajo comparado con las tendencias del alto precio del carbón mineral.
3. Establecer un lugar determinado cerca de la ubicación del cultivo de bambú para realizar el procesamiento de chip de bambú, ya que de esta manera se reduce su volumen y se logra transportar mayor cantidad de biomasa para obtener un mejor aprovechamiento del recurso renovable.
4. Analizar el presente estudio para ser utilizado como una fuente de consulta para el desarrollo de proyectos energéticos innovadores, principalmente para la elaboración de briquetas a base de chip de bambú, ya que al comprimirlo mejora su potencial energético para ser utilizado como un combustible alternativo.





## BIBLIOGRAFÍA

1. Aldomá, G., y Massagués, L. (2012). *Diseño de una central de biomasa de 1 MW ampliable a 2 MW* (Tesis de licenciatura). Universitat Rovira i Virgili, España. Recuperado de <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/1531pub.pdf>.
2. Arroyo, J. (2016). *Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor* (Tesis de licenciatura). Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
3. Becerra, J. (1 de septiembre, 2018). Calderas de vapor y centrales térmicas de biomasa. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://joseangelbecerra.com/2017/09/01/calderas-de-vapor-centrales-termicas-de-biomasa>.
4. Brown, V. (2003). *Proceso de producción de la celulosa. Movimiento mundial por los bosques tropicales*. Montevideo, Uruguay: Pima Página.
5. Calo, N. (2018). *Caracterización física y mecánica de tres especies de bambú aptas para la construcción en Guatemala*. (Tesis de doctorado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://biblioteca.ingenieria.usac.edu.gt/>.
6. Canalís, P., y Royo, F. (2012). *Co-combustión de biomasa forestal en una central térmica de carbón pulverizado de bajo rango: Influencia*

*del tamaño de partícula en el comportamiento de la caldera* (Tesis de doctorado). Universidad de Zaragoza, España.

7. Carreteño, A., y García, J. (2012). *Gestión de la eficiencia energética: Cálculo del consumo, indicadores y mejora*. Madrid, España: Asociación Española de Normalización y Certificación.
8. Cartagena, J. (2012). *Eficiencia energética en los edificios de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador* (Tesis de licenciatura). Universidad de El Salvador, El Salvador.
9. Castaño, F. (marzo, 1989). Resumen de estudios sobre la *Guadua angustifolia* realizados por parte de la C.V.C. *IV Simposio Nacional Bambú / Guadua Inciva*. Simposio llevado a cabo en Tlúa, Colombia.
10. Cerdá, E. (2012). *La biomasa en España: Una fuente de energía renovable con gran futuro*. Madrid, España: Fundación Ideas.
11. Corporativa Rural de Electrificación. (2012). *Manual de eficiencia energética*. Santa Cruz, Bolivia: Autor.
12. Chacón, D. (2012). *Efecto del bambú laminado como refuerzo de vigas laminadas de Pino Radiata* (Tesis de licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Recuperado de [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6221/bamb%C3%BA\\_laminado\\_como\\_%20refuerzo\\_vigas\\_%20laminadas.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6221/bamb%C3%BA_laminado_como_%20refuerzo_vigas_%20laminadas.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

13. Dimitri, J. (1972). *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería*. Buenos Aires, Argentina: Editorial ACME S.A.C.I.
14. Fernández, H. (2004) *Proyecto de inversión de bambú Guadua angustifolia*. Guatemala, Guatemala: Autor.
15. Fernández, J. (2011). *Eficiencia energética en edificios: Certificación y auditorías energéticas*. España: AMV Ediciones.
16. García, S. (2012). *Centrales Termoeléctricas de Biomasa*. Madrid, España: Renovetec.
17. Gas Natural Fenosa. (15 de febrero, 2014). Calderas de Biomasa. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://www.empresaeficiente.com/es/catalogo-de-tecnologias/calderas-de-biomasa#ancla>.
18. González, P. (5 de noviembre, 2019). Bambú quemado como combustible de biomasa en el suroeste de Japón. Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://agroavances.com/noticias-detalle.php?idNot=2326>.
19. IndexMundi. (17 de agosto, 2021). Precios de los productos básicos, carbón térmico. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=coal-australian&commodity=colombian-coal>.
20. Instituto de Ciencia y Tecnologías Agrícolas. (1990.) *Tecnología del cultivo de bambú*. Guatemala, Guatemala: Autor.

21. Instituto Técnico de Capacitación y Productividad (2007). *Manual Técnico. Cultivo del Bambú*. Guatemala: Autor.
22. International Bamboo and Rattan Organisation. (noviembre, 2017). Inspirar el desarrollo sostenible con bambú. *INBAR*, 1(1), 1-64. Recuperado de <https://www.unsouthsouth.org/2017/11/14/inspiring-sustainable-development-with-bamboo-inbar-2017/?lang=es>.
23. Jaquez, F. (1990). *Guía técnica para el fomento del bambú en la República Dominicana*. República Dominicana: UASD/INDRHI.
24. Klose, W., Rincón, S., y Gómez, A. (2016). *Procesos de transporte de biomasa y carbonizados en hornos rotatorios*. Bogotá, Colombia: Kassel University Press. Recuperado de <https://www.uni-kassel.de/upress/online/OpenAccess/978-3-86219-950-1.OpenAccess.pdf>.
25. Liese, W. (1985). *Bamboos-Biology, silvics, properties, utilization*. Alemania: TZ Verlagsgesellschaft.
26. McClure, F. (1955). *Flora de Guatemala, Bamboos*. Guatemala: Fieldiana Botany.
27. Mercado, M., y Molina, R. (2015). *Estudio de factibilidad para la producción de caña Guadua en el recinto de Río Chico, cantón Paján de la provincia de Manabí y propuesta de plan de exportación para el mercado Chileno*. (Tesis de licenciatura). Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

28. Mercedes, R. (2006). *Guía técnica cultivo del Bambú*. Santo Domingo, República Dominicana: CEDAF.
29. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. (2017). *MAGA y Taiwán incrementan cultivo de bambú en Guatemala*. Guatemala: Autor. Recuperado de <https://www.maga.gob.gt/maga-y-taiwan-incrementan-cultivo-de-bambu-en-guatemala/>.
30. Ministerio de Energía y Minas (2019). Balance Energético 2019. Guatemala: Autor. Recuperado de <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2020/11/BALANCE-ENERGETICO-2019-1.pdf>.
31. Nuñez, J. (2017). *Diseño de una central eléctrica de biomasa conectado a la red eléctrica Puno, en el cerro de Cancharani departamento de Puno* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional del Altiplano – Puno, Perú.
32. Renovetec. (2018). *Biomasa: Calderas de Biomasa*. Madrid, España: Renove Tecnología S.L. Recuperado de <http://www.renovetecingenieria.com/biomasa/calderasbiomasa.html>.
33. Riaño, J., y Yesid, Q. (2012). *Evaluación de la eficiencia de remoción de material particulado y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en un lavador tipo venturi para una caldera que emplea carbón como combustible* (Tesis de doctorado). Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
34. Salgado, J. (2010). *Guía completa de la biomasa y los biocombustibles*. Madrid, España: Madrid Vicente.

35. Sanchez, F. (1995). Presente y futuro de las energías renovables. Madrid, España: Fronteras de la ciencia y la tecnología.
36. Soderstrom, R. y Calderón, E. (enero, 1979). A Commentary on the Bamboos. (Poaceae: Bambusoideae). *Biotropica*, 11(3), 161-172.
37. Torres, E. (2006). *El bambú como alternativa para solucionar múltiples problemas en Guatemala*. Guatemala: INTECAP.
38. Valdez, D. (2013). *Manual para el cultivo de bambú experiencias en Guatemala*. Guatemala: Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas.
39. Widmer, I. (1990). *Los bambúes biología, cultivo, manejo y usos*. Costa Rica: Autor.

## APÉNDICES

### Apéndice 1. Área de almacenamiento de materia prima de bambú



Fuente: [Fotografía de Angel Armando Tejada]. (Masagua, Escuintla. 2020). Colección particular. Guatemala.

## Apéndice 2. **Bambú Guadua Angustifolia**



Fuente: [Fotografía de Angel Armando Tejada]. (Masagua, Escuintla. 2020). Colección particular. Guatemala.

## Apéndice 3. **Área de procesamiento de chip de bambú**



Fuente: [Fotografía de Angel Armando Tejada]. (Masagua, Escuintla. 2020). Colección particular. Guatemala.



#### Apéndice 4. Principales conductores de biomasa de la caldera



Fuente: [Fotografía de Angel Armando Tejada]. (Masagua, Escuintla. 2020). Colección particular. Guatemala.



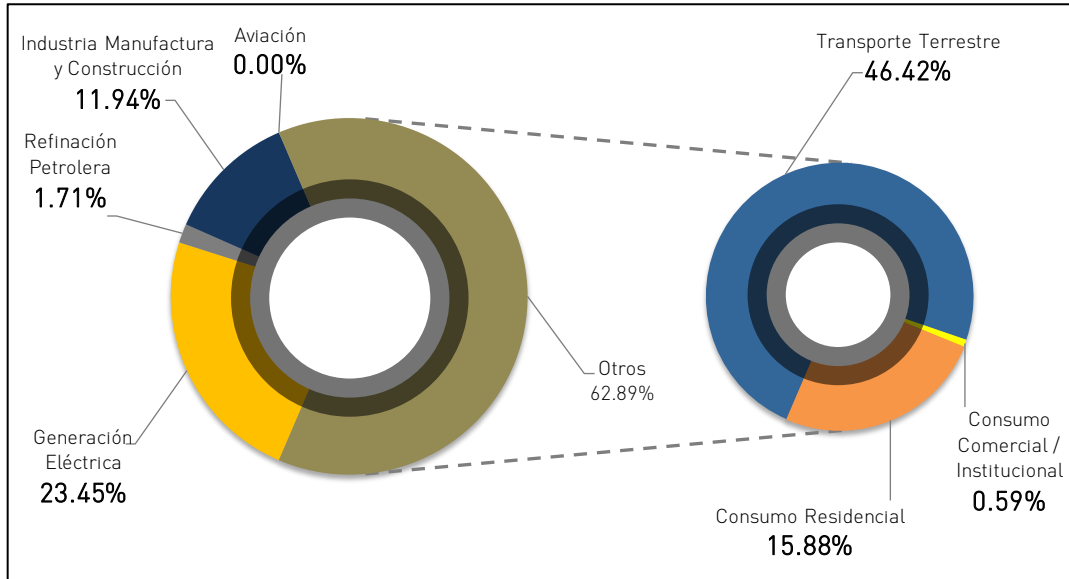
## ANEXOS

### Anexo 1. Resultados analíticos del laboratorio AgriLab

AGQLABS	FT-20/001211	Tipo Muestra:	Materia
No. De Referencia	Bambú	Fecha Fin:	Organica
Descripción:			28/05/2020
<b>RESULTADOS ANALITICOS</b>			
<b>Parámetro Resultado Unidades Incert CMA</b>			
<b>Propiedades Físicas</b>			
* Densidad Aparente	0,09	g/cm3	
* Materia Seca	114	%	
<b>Metales Pesados</b>			
* Antimonio Total s.m.s.	< 1,000	mg/kg	
* Arsénico Total s.m.s.	< 5,00	mg/kg	
* Cadmio Total s.m.s.	< 0,10	mg/kg	
* Cobalto Total	< 0,05	mg/kg	
* Cobre Total s.m.s.	3,67	mg/kg	
* Cromo Total s.m.s.	< 1,00	mg/kg	
* Manganeso Total s.m.s.	< 5,00	mg/kg	
* Mercurio Total s.m.s.	< 0,20	mg/kg	
* Molibdeno Total	< 0,50	mg/kg	
* Níquel Total s.m.s.	< 1	mg/kg	
* Plomo Total s.m.s.	0,2	mg/kg	
Potasio Total	0,55	%	
* Titanio Total	< 5,000	mg/kg -	
* Vanadio Total s.m.s.	< 5,000	mg/kg -	
* Zinc Total s.m.s.	< 50,0	mg/kg -	
<b>Parámetros Físicos</b>			
Humedad	8,17	%	
<b>Parámetros Químicos</b>			
* Azufre s.m.s.	0,09	%	
Relación C/N	< 0,005 -		
pH (Extracto 1/10) s.m.s.	5,71		
* <b>Carbono Orgánico Total s.m.s.</b>	<b>57,3</b>	<b>%</b>	
Materia Orgánica Total s.m.s.	98,8	%	
Nitrógeno Total s.m.s.	< 0,10	% N	
Magnesio s.m.s.	< 0,06	%	
Sodio s.m.s.	< 250	mg/kg -	
* <b>Hierro s.m.s</b>	<b>57,3</b>	<b>mg/kg -</b>	
Fósforo s.m.s.	0,05 % -		
* <b>Cloruros s.m.s.</b>	<b>329</b>	<b>mg/kg -</b>	
<b>Metales Pesados</b>			
* <b>Aluminio Total</b>	<b>40</b>	<b>mg/kg</b>	

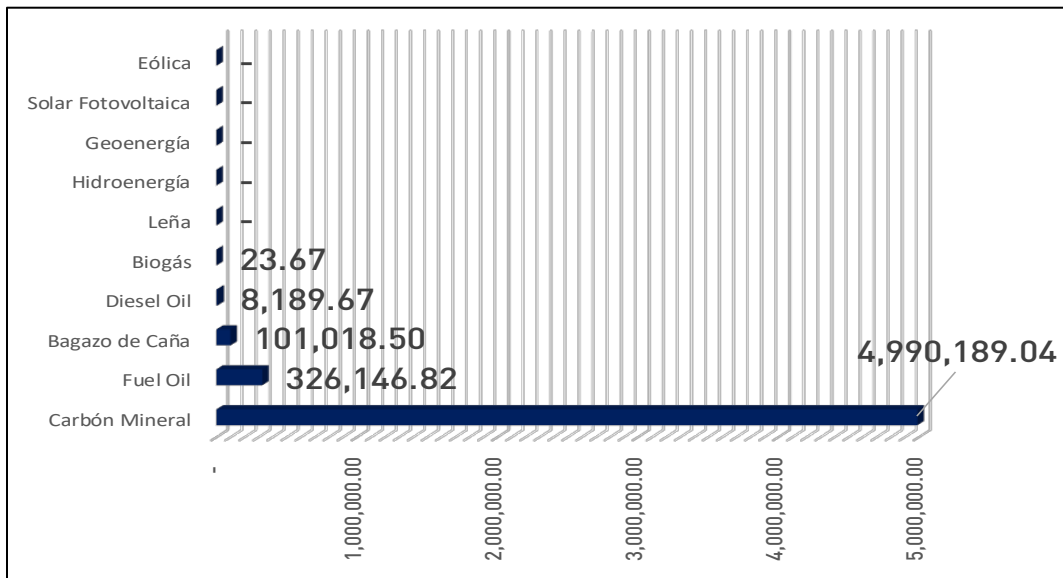
Fuente: Laboratorio AgriLab (2020). FT-20/001211 Bambú.

## Anexo 2. Emisiones de GEI (%) del sector energético año 2019



Fuente: Ministerio de Energía y Minas - MEM (2019). *Balance Energético de Guatemala*.

## Anexo 3. Emisiones de GEI en la generación eléctrica en tCO<sub>2eq</sub>



Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2019). *Balance Energético de Guatemala*.

**Anexo 4. Coeficientes de emisión de CO<sub>2eq</sub> de la generación eléctrica por tipo de combustible**

Generación por tipo de Combustible 2019	Factor de Emisión [Kg CO <sub>2e</sub> / KWh]
Carbón Mineral	1.1682
Fuel Oil	0.6143
Bagazo de Caña	0.0260
Biogás	0.0007
Diesel Oil	4.7148
Leña	0.000
Hidroenergía	0.0000
Geoenergía	0.0000
Solar Fotovoltaica	0.0000
Eólica	0.0000

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2019). *Balance Energético de Guatemala*.