



**Universidad de San Carlos de Guatemala**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica**

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA, A PARTIR DE BIOMASA DE EUCALIPTO**

**Juan Sebastián de León Regil Wald**  
**Asesorado por el Ing. Erick Leonel Deleón Recinos**

**Guatemala, marzo 2010**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA, A PARTIR DE BIOMASA DE EUCALIPTO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JUAN SEBASTIAN DE LEON REGIL WALD**

ASESORADO POR EL ING. ERICK LEONEL DELEÓN RECINOS  
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, MARZO DE 2010

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola López
VOCAL III	Ing. Miguel Angel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortiz de León
VOCAL V	Br. José Alfredo Ortiz Herincx
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Julio César Solares Peñate
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier González López
EXAMINADOR	Ing. Armando Gálvez Castillo
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

### **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA, A PARTIR DE BIOMASA DE EUCALIPTO,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha marzo 2010.



Juan Sebastián de León Regil Wald

Guatemala 2 de octubre 2009

Ingeniero  
Guillermo Bedoya  
Coordinador del Área de Potencia  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería USAC

Estimado Ingeniero Bedoya.

Me permito dar aprobación al trabajo de graduación titulado: **Estudio de Factibilidad para la producción de Energía Eléctrica a partir de biomasa de Eucalipto**, del señor **Juan Sebastián de León Regil Wald**, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

Por tanto, el autor de este trabajo de graduación y, yo, como su asesor, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Erick', with a long horizontal stroke underneath.

Ing. Erick Leonel Deleón Recinos  
Colegiada 6639  
Asesor



Ref. EIME 04. 2010  
Guatemala, 2 de FEBRERO 2010.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director  
Ing. Mario Renato Escobedo Martinez  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

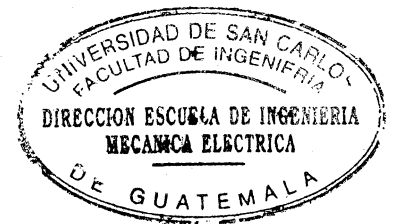
Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA PRODUCCIÓN DE  
ENERGIA ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOMASA DE  
EUCALIPTO, del estudiante Juan Sebastián de León Regil Wald  
que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,  
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. José Guillermo Bedoya Barrios  
Coordinador del Área de Potencia



JGBB/sro



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 07. 2010.

**El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Juan Sebastián de León Regil Wald titulado: ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOMASA DE EUCALIPTO, procede a la autorización del mismo.**

**Ing. Guillermo Antonio Puente Romero**



**GUATEMALA, 05 DE FEBRERO 2,010.**



Ref. DTG.099.2010

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA, A PARTIR DE BIOMASA DE EUCALIPTO**, presentado por el estudiante universitario **Juan Sebastián De León Regil Wald**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, marzo 2010



## **DEDICATORIA**

**A:**

### **Mis padres**

Ricardo(+) y Anelia, por su apoyo incondicional, ejemplo, sacrificio y esfuerzo a lo largo de mi vida. Por resguardarme y orientarme al camino correcto.

### **Mis hermanos**

Ricardo, Eliana y Anayansi, por haber compartido conmigo los momentos alegres y tristes de mis estudios y de mi familia. A mi sobrinos Kevin, Camila, Victoria, Ely y Patricia, a mi novia María del Rosario, la quiero mucho.

### **A mis compañeros y amigos:**

Edgar Arnoldo, Eugenio, Diana, Pedro, Paty, Freddy, Roberto, Carlos Antonio(+), porque sin ustedes el camino hubiera sido más difícil.

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b> .....	V
<b>GLOSARIO</b> .....	IX
<b>RESUMEN</b> .....	XV
<b>OBJETIVOS</b> .....	XVII
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	XIX
<b>1. BIOMASA</b> .....	1
1.1. Definición.....	1
1.1.1. Fuentes de biomasa.....	3
1.1.2. Plantaciones energéticas.....	4
1.2. Clasificación.....	4
1.2.1. Residuos forestales.....	4
1.2.2. Residuos agrícolas.....	5
1.2.3. Residuos de industria agrícola.....	6
1.2.4. Desechos urbanos.....	6
1.3. Características de biomasa de eucalipto.....	7
1.3.1. Preparación del suelo.....	8
1.3.2. Actividades culturales.....	10
1.3.3. Producción de plantas.....	12
1.3.4. Características de la planta de eucalipto ideal.....	12
1.3.5. Tipo de suelo .....	14
1.3.6. Plagas .....	15
<b>2. PODER CALORÍFICO</b> .....	17
2.1. Calor de combustión y ahorro de energía.....	17
2.2. Comparación de valor calorífico del bunker ( <i>fuel oil</i> ) y chip de madera.....	20
2.2.1. Bunker ( <i>fuel oil</i> ).....	20

2.2.2	Chip de madera.....	25
2.3.	Combustión en calderas.....	28
2.3.1.	Combustión con aire.....	31
2.3.2.	Aire teórico.....	32
2.3.3.	Relación entre el aire y combustible.....	32
2.4.	Combustión en calderas de bagazo .....	33
2.5.	Combustión en calderas de bunker.....	34
<b>3.</b>	<b>ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO.....</b>	<b>41</b>
3.1.	Programa de producción de biomasa.....	41
3.2.	Inversión fija.....	41
3.3.	Capital de trabajo.....	42
3.4.	Costos de generación de bunker y chip de madera.....	43
3.5.	Resultado de análisis económico.....	46
3.6.	Costos actuales de producción de energía en Guatemala.....	50
<b>4.</b>	<b>GENERADORES DE VAPOR ACUOTUBULARES DE BIOMASA</b>	
	<b>DE EUCALIPTO.....</b>	<b>55</b>
4.1.	Alimentación biomasa de eucalipto .....	55
4.2.	Equipo de combustión .....	56
4.3.	Tipos de horno .....	56
4.3.1.	Horno distribuidor o alimentación por aspersion .....	57
4.4.	Cámara de combustión.....	58
4.4.1	Volumen de la cámara de combustión.....	58
4.5.	Dimensiones de hogar.....	59
4.6.	Área de parrilla .....	59
4.7.	Peso de chip de eucalipto quemado por unidad el área de la parrilla por hora.....	60
4.8.	Superficie de calentamiento .....	60
4.9.	Tiros.....	60

4.10. Principales controles automáticos en una caldera de vapor acuotubular de biomasa de eucalipto.....	61
4.10.1. Control del agua de alimentación.....	61
4.10.2. Control de la presión.....	62
4.10.3. Control de tiro en el hogar.....	64
4.11. Eficiencia de un generador de vapor acuotubular de chip de eucalipto .....	65
<b>5. GENERADORES DE VAPOR ACUOTUBULARES DE BUNKER.....</b>	<b>67</b>
5.1. Alimentación de bunker.....	67
5.2. Equipo de combustión.....	67
5.2.1. Precalentamiento de bunker.....	69
5.2.2. Hogar.....	69
5.2.3. Quemador.....	69
5.3. Tipos de quemadores.....	70
5.3.1. Quemadores de vaporización.....	70
5.3.2. Quemadores de atomizadores de aceite.....	70
5.3.3. Quemador de vaporización del tipo a presión.....	71
5.3.4. Quemadores de atomización de aire o de vapor de alta presión, tipo inyector o venturí.....	71
5.3.5. Quemadores de petróleo atomizador horizontal de traza giratoria.....	72
5.3.6. Quemador atomizador de aire a baja presión tipo de presión variable.....	72
5.3.7. Quemador mecánico o atomizador a presión de aceite, del tipo de flujo de regreso.....	72
5.3.8. Unidad quemadora completa mecánica o de atomización de aceite a presión.....	73
5.4 Ubicación de los quemadores .....	73
5.4.1 Fuego opuesto.....	73

5.5. Características de la flama.....	75
5.6. Superficie de calentamiento.....	75
5.7. Tiro.....	76
5.8 Eficiencia de un generador de vapor acuotubular de aceite de combustible.....	76
<b>6. CARACTERÍSTICAS COMUNES Y DIFERENCIAS ENTRE LOS GENERADORES DE VAPOR ACUOTUBULAR DE BIOMASA DE EUCALIPTO Y DE ACEITE COMBUSTIBLE.....</b>	<b>79</b>
6.1. Características comunes.....	79
6.1.1 Componentes del generador de vapor acuotubular.....	79
6.1.2 Refractario y/o aislamiento.....	79
6.1.3 Sistema de alimentación y circulación de agua hacia y en la caldera .....	79
6.1.4 Dispositivos de seguridad de las calderas .....	80
6.2 Diferencias.....	80
6.2.1 Alimentación de combustible.....	80
6.2.2 Suministro y distribución de aire para la combustión...	81
6.2.3 Dimensiones del hogar.....	81
6.2.4 Horno.....	82
6.2.5 Superficie calórica.....	82
6.2.6 Producción de gases .....	83
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>87</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>89</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>91</b>

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1. Toneladas de carbono por hectárea en el bosque primario	3
2. Origen de la biomasa	3
3. Modo de abonar correctamente la planta	11
4. Calor total de combustión versus densidad	22
5. Relación de viscosidad y temperatura para combustibles de petróleo típico	23
6. Porcentaje de aire en exceso vrs porcentaje por volumen	38
7. Calor de combustión vrs la gravedad	39
8. Alimentadores biomasa de eucalipto	55
9. Spreader Stoker	58
10. Diagrama del sistema del control del agua de alimentación	61
11. Diagrama del sistema de control de la presión	63
12. Diagrama del sistema de control del tiro en el hogar	64
13. Accesorios necesarios para el bombeo de bunker	68
14. Tipos de quemadores	71
15. Quemador de gas de flama direccional. Fuego opuesto	74
16. Flujo de vapor vrs. % de oxígeno en chip de madera	83
17. Flujo de vapor vrs. monóxido de carbono en chip de madera	84
18. Flujo de vapor vrs. de oxígeno	84
19. Flujo de vapor vrs. monóxido de carbono en bunker	85

## TABLAS

I. Estado de la biomasa	5
II. Etapas de preparación y siembra del suelo	9
III. Calor específico en materiales combustibles	19
IV. Requisitos de ASTM	25
V. Composición química porcentual de la leña en función del contenido de humedad, en porcentaje y en peso	26
VI. Poder calorífico inferior de la leña seca	27
VII. Poder calorífico inferior de la leña en función del contenido de humedad	27
VIII. Eficiencia total de calderas bajo condiciones de operación	34
IX. Análisis finales típicos de combustibles de petróleo	35
X. Escorias en calderas alimentadas por bunker	36
XI. Valores caloríficas del bunker	36
XII . Volumen de aire requerido	37
XIII. Relación de 1% aire en exceso	37
XIV. Presupuesto de inversión fija	42
XV. Costos de generación de bunker	43
XVI. Costos de generación con chip de madera	44
XVII. Requerimientos y costos de la mano de obra directa	45
XVIII. Ingresos de facturación industria azucarera	46
XIX. Costo de proyecto (U\$)	47
XX. Flujo de caja (Q)	48
XXI. Costo variable en generación de bunker y diesel	51

XXII. Costo variable en generadora de bunker y diesel	52
XXIII. Precios US\$/MWH en generadoras de Guatemala	53
XXIV. Eficiencia en caldera No.6 operando con chip de madera	65
XXV. Eficiencia en caldera No.6 operando con bunker	76





## GLOSARIO

<b>Aislamiento</b>	Es cuando se cubre un elemento de una instalación eléctrica con un material que no es conductor de la electricidad, es decir, un material que resiste el paso de la corriente, a través del elemento que recubre y mantiene en trayectoria a lo largo del conductor.
<b>ASTM</b>	Asociación Internacional Americana Medición de Materiales (American Section of the International Association for Testing Materials), es un organismo de normalización de los Estados Unidos de América
<b>Bagazo</b>	Es el residuo de materia después de extraído su jugo de caña
<b>Beneficio</b>	Es la riqueza que obtiene el actor de un proceso económico. Se calcula como los ingresos totales menos los costes totales de producción y distribución.
<b>Biomasa</b>	Materia orgánica originada en un proceso biológico, utilizable como fuente de energía.
<b>Bunker</b>	Una fracción del petróleo que se obtiene como residuo en la destilación fraccionada.
<b>Caldera</b>	Es una máquina o dispositivo de ingeniería que está diseñado para generar vapor saturado. Este vapor se genera a través de una transferencia de calor a presión

constante, en la cual el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta y cambia de estado.

**Calor específico** Magnitud física que indica la capacidad de un materia para almacenar energía interna en forma de calor. De manera formal es la energía necesaria para incrementar en una unidad de temperatura una cantidad de sustancia.

**Capital** Cantidad de dinero que se presta o se impone, de la cual se distingue el interés cobrado por el préstamo.

**Combustión** Reacción química en la que un elemento combustible se combina con otro comburente desprendiendo calor y produciendo un óxido; la combustión es una reacción exotérmica que produce: Calor al quemar y luz al arder.

**Congelación** Forma de conservación que se basa en la solidificación del agua contenida en estos.

**Corriente** Flujo de carga por unidad de tiempo que recorre un material.

**Costo** Sacrificio o esfuerzo económico que se debe realizar para lograr un objetivo.

**Densidad** Magnitud referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen, y puede utilizarse en términos absolutos o relativos.

**Desbrozador** Maquina que sirve para cortar diferentes tipos de cultivos.

<b>Dámper</b>	Compuerta hidráulica que sirve para paso de flujo de aire o gas.
<b>Economizador</b>	Es cuando el calor perdido en los gases de chimenea se recupera para calentar líquidos, con el propósito de suministro doméstico de agua caliente.
<b>Eficiencia</b>	Relación entre los resultados obtenidos (ganancias, objetivos cumplidos, productos, etc.) y los recursos utilizados (horas hombre, capital invertido, materias primas, etc.)
<b>Energía</b>	Magnitud física abstracta, ligada al estado dinámico de un sistema cerrado y que permanece invariable con el tiempo.
<b>Eucalipto</b>	Árbol perene, de porte recto, pueden llegar a medir más 60 metros de altura, se habla de ejemplares ya desaparecidos que han alcanzado los 150 metros.
<b>Fertilización</b>	Acción el cual se le aplica abono a la plantación.
<b>Gases</b>	El estado de agregación de la materia que no tiene forma ni volumen propio.
<b>Generador</b>	Es todo dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial eléctrico entre dos de sus puntos, llamados polos, terminales o bornes. El generador eléctrico es una máquina destinadas a transformar la energía mecánica en eléctrica.

<b>Hogar</b>	También se denomina fogón y actúa de manera muy semejante a una cámara de combustión. Dentro de él se debe producir una combinación íntima entre el combustible y el comburente (aire).
<b>IVA</b>	Es un impuesto indirecto sobre el consumo, es decir financiado por el consumidor final. Un impuesto indirecto es el impuesto que no es percibido por el fisco directamente del tributario. El IVA se debe cobrar por las empresas obligadamente en el momento de toda venta de productos (transferencia de bienes y servicios).
<b>Joule</b>	Unidad del Sistema Internacional para energía, trabajo y calor. Se define como el trabajo realizado por la fuerza de un newton en un desplazamiento de 1 metro. Es la unidad del Sistema Internacional para esfuerzo y trabajo
<b>kW</b>	Kilowatio es una unida de medida que se utiliza para mediana o gran potencia y equivale a 1000 vatios.
<b>Masa</b>	Magnitud que cuantifica la cantidad de materia de un cuerpo.
<b>Matorral</b>	Es un arbusto a una planta leñosa de cierto porte cuando, a diferencia de lo que es propio de un árbol, no se yergue sobre un solo tronco o fuste, sino que se ramifica desde la misma base.
<b>Mantenimiento</b>	Todas las acciones que tienen como objetivo mantener un artículo o restaurarlo a un estado en el cual pueda llevar a cabo alguna función requerida.

<b>Motor eléctrico</b>	Es una máquina eléctrica que transforma energía eléctrica en energía mecánica, por medio de interacciones electromagnéticas.
<b>MW</b>	Megavatio es una unidad de medida que se utiliza para gran potencia y equivale a 1000 kilovatios.
<b>Platt's</b>	Es una división de la multinacional McGraw-Hill. Esta división es la sociedad rectora (dirige y gestiona) del "mercado financiero" de "futuros" y "opciones" de "productos derivados" que son negociados (contratación y liquidación) en los "mercados de origen" de los productos energéticos de todo el mundo.
<b>Presión</b>	Magnitud que mide la fuerza por unidad de superficie, y sirve para caracterizar como se aplica una determinada fuerza resultante sobre una superficie.
<b>PSI</b>	Se denomina psi (Pounds per Square Inch) a una unidad de presión cuyo valor equivale a 1 libra por pulgada cuadrada.
<b>Potencia</b>	Cantidad de trabajo efectuado por unidad de tiempo. Esto es equivalente a la velocidad de cambio de energía en un sistema o al tiempo empleado en realizar un trabajo.
<b>Quemador</b>	Dispositivo para quemar combustible líquido, gaseoso o ambos (excepcionalmente también sólido) y producir calor generalmente mediante una llama.

<b>Refractario</b>	Material capaz de soportar elevadas temperaturas. El material refractar por excelencia es cerámico.
<b>TIR</b>	Tasa interna de retorno es una herramienta de toma de decisiones de inversión utilizada para conocer la factibilidad de diferentes opciones de inversión.
<b>VAN</b>	Valor actual neto es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión.
<b>Vapor</b>	Es un gas que se obtiene por evaporación o ebullición del agua líquida o por sublimación del hielo.
<b>Inducido</b>	Parte de la caldera que extrae los gases de la cámara de combustión y los expulsa hacia la chimenea
<b>Tiro</b>	Es un sistema que hace entrar aire a la caldera mediante ventiladores.
<b>Viscosidad</b>	Es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales.
<b>Volátil</b>	Se mueve ligeramente y anda por el aire.
<b>Voltaje</b>	Es una magnitud física que impulsa a los electrones a lo largo de un conductor en un circuito cerrado.
<b>Zafra</b>	Período el cual se cosecha caña de azúcar.

## RESUMEN

Debido a las condiciones actuales del azúcar en el mercado mundial, las industrias azucareras han detectado la necesidad de producir otros productos que generen valor agregado para mantener los mismos niveles de rentabilidad de los años pasados. Uno de esos productos es la energía eléctrica. Las industrias azucareras en promedio tienen contratos establecidos con el Mercado Mayorista para generar energía eléctrica en tiempo de zafra. Cuando el periodo de zafra termina, ya no tienen disponibilidad de bagazo, buscan otras combustibles alternos que tenga el mismo poder calorífico el cual se encuentra la madera de eucalipto.

El proyecto tiene como fin realizar una comparación entre la generación de electricidad a partir de madera desfibrada de eucalipto y la generación por medio de bunker. Para ello se han realizado cálculos de costos y pruebas de operación para analizar qué combustible tiene mejor eficiencia y rentabilidad en la producción de energía eléctrica. Las pruebas se están realizando en calderas de las industrias azucareras para ver que comportamiento tiene en producción.

Adicionalmente, el proyecto tiene como beneficio dar oportunidades de trabajo a personal que ha elaborado en tiempo de zafra, evitando la migración laboral hacia otras empresas, cubriendo plazas en la operación y mantenimiento de todos los equipos involucrados en el proceso de producción de electricidad.

Los bosques energéticos renovables de eucalipto será la principal fuente de alimentación para la industria azucarera, teniendo un programa de logística para el suministro de madera a las calderas y mantener constante la producción de electricidad.





## **OBJETIVOS**

### **GENERAL:**

- Garantizar una generación continua de energía eléctrica durante la época de no zafra con biomasa a un bajo costo.

### **ESPECIFICOS:**

1. Proponer una alternativa para la generación eléctrica a bajo costo por medio de bosques energéticos renovables.
2. Evitar migración laboral con personal con proyecto de biomasa de madera.
3. Mantener la disponibilidad para producción de energía por medio de un combustible eficiente.
4. Determinar la rentabilidad del proyecto de generación por medio de biomasa.



## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la industria azucarera utiliza el bagazo de caña de azúcar como fuente de energía en tiempo de zafra. El bagazo tiene un alto poder calorífico capaz de producir cada kilogramo en una libra de vapor.

En tiempo de no zafra se utiliza bunker, combustible derivado del petróleo. Los costos de operación han aumentado y los precios internacionales no son estables, haciendo que la industria azucarera busque alternativas para tener operaciones estables con bajos costos.

El proyecto de producción de electricidad por medio de biomasa tiene como principal fuente de energía en época no zafra es la madera de eucalipto. Se estarán haciendo pruebas en la caldera para ver qué modificaciones se deben realizar para mantener una operación estable.

En operación, al producir el calor dentro de la caldera, el agua que se encuentra dentro de las tuberías se calienta hasta llegar al punto de ebullición, produciendo vapor sobrecalentado, este es enviado a las turbinas que están acopladas al generador girándolo para producir energía eléctrica.

Se hizo un estudio de factibilidad para ver qué rentable va a ser el proyecto, utilizando herramientas económicas y qué tiempo se va a recuperar la inversión. Se tiene previsto que el proyecto sea un modelo a seguir a los demás Industrias Azucareras, con el fin de mantener costos bajos de electricidad y sea de beneficio a pueblos, introducir con bosques energéticos como pulmones de oxígeno en el país, para ayudar el medio ambiente y mantener oportunidades de trabajo a la población que vive en pueblos cercanos a la industria.



# 1. BIOMASA

## 1.1 Definición:

Existen fuentes de energía renovable como la biomadera, que proveen un alto porcentaje de la energía consumida en el mundo y tienen potencia para suplir mayores volúmenes. La biomasa se refiere a toda materia orgánica que proviene de la biosfera, tales como árboles, plantas, desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz, macadamia), del aserradero (podas, ramas aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros).

Los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de procesos más eficientes y limpios para la conversión de biomasa en energía, transformándola, por ejemplo, en combustibles líquidos o gaseosos, los cuáles son más convenientes y eficientes. Así aparte de la combustión directa, se pueden distinguir otros dos tipos de procesos como por ejemplo el termo-químico y el bio-químico.

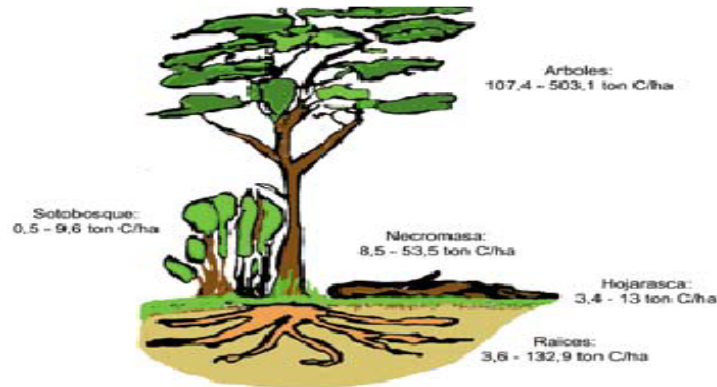
Las fuentes más importantes de biomasa son los campos forestales y agrícolas en ellos se producen residuos que normalmente son dejados en el campo, al consumirse sólo un bajo porcentaje de ellos con fines energéticos. En la agroindustria, los procesos de secado de granos generan subproductos que son usados para generación de calor en sistemas de combustión directa; tal es el caso del bagazo de caña de azúcar y la cascarilla de café. Por otro lado, los centros urbanos generan grandes cantidades de basura compuestas en gran parte, por materia orgánica que puede ser convertida en energía, después de procesarla adecuadamente.

En economías de orientación agrícola, como las de los países centroamericanos, el uso apropiado de la biomasa ofrece una alternativa para reducir los costos de operación por concepto de insumos energéticos, ya que dependen de una gran parte del consumo de combustibles fósiles, además, es una solución para los problemas higiénico-ambientales que, en muchos casos, presentan los desechos orgánicos. Las denominadas “granjas energéticas” pueden suplir un porcentaje significativo de los requerimientos energéticos mundiales y al mismo tiempo revitalizar las economías rurales, proveyendo energía en forma independiente y segura así poder lograr importantes beneficios ambientales. Las comunidades rurales pueden ser, entonces, energéticamente autosuficientes en un alto grado, a partir del uso racional de los residuos y administrando inteligentemente la biomasa disponible en la localidad.

Actualmente, los procesos modernos de conversión solamente suplen aproximadamente el 3% del consumo de energía primaria en países industrializados. Sin embargo, gran parte de la población rural en los países subdesarrollados que representa cerca del 50% de la población mundial, aún depende de la biomasa tradicional, principalmente de leña, como fuente de energía primaria. Esta suple, aproximadamente, 35% del consumo de energía primaria en países subdesarrollados y alcanza casi un 14% del total de la energía consumida en el nivel mundial.

Se considera que la biomasa es una fuente renovable de energía porque su valor proviene del Sol, a través del proceso de fotosíntesis. La clorofila de las plantas captura su energía convirtiendo el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) del aire y el agua del suelo en carbohidratos, para formar la materia orgánica. Cuando estos carbohidratos se queman, regresan a su forma de dióxido de carbono y agua, liberando la energía que contienen. En la figura 1 se muestran los contenidos de carbono en la biomasa existente en un bosque primario. De esta forma, la biomasa funciona como una especie de batería que almacena la energía solar.

**Figura 1. Toneladas de carbono por hectárea en el bosque primario**

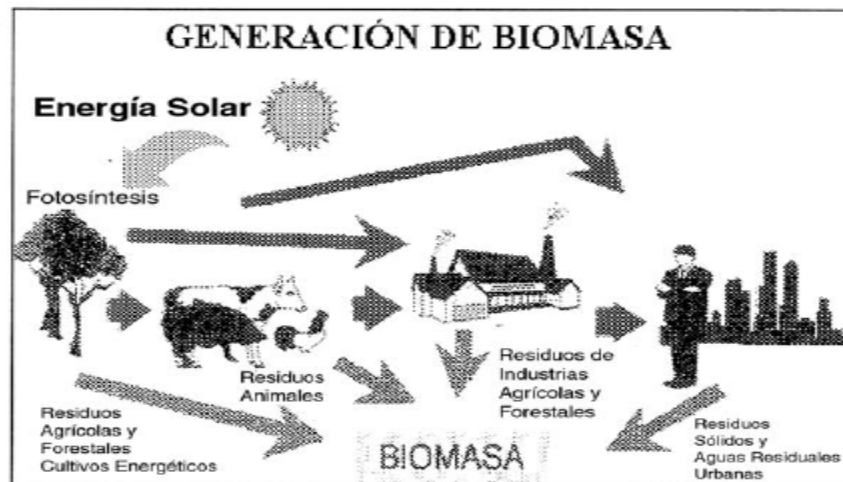


Fuente: [www.tecnu.es/plnatacarbon/170enbiom.htm](http://www.tecnu.es/plnatacarbon/170enbiom.htm)

### 1.1.1 Fuentes de biomasa

Las fuentes de biomasa que pueden ser usadas para la producción de energía cubren un amplio rango de materiales y fuentes: entre ellos están los residuos de la industria forestal y la agricultura, los desechos urbanos y las plantaciones energéticas (ver Figura 2), estos se usan generalmente, para procesos modernos de conversión que involucran la generación de energía a gran escala, hacia la sustitución de combustibles fósiles.

**Figura 2. Origen de la biomasa**



Fuente: [www.tecnu.es/plnatacarbon/170enbiom.htm](http://www.tecnu.es/plnatacarbon/170enbiom.htm)



Los residuos agrícolas, como la leña y el carbón vegetal, han sido usados en procesos tradicionales en los países en vías de desarrollo y a usos primarios en pequeña escala; por ejemplo, la cocción de alimentos o las pequeñas actividades productivas como panaderías, caleras, secado de granos, etc.

### **1.1.2 Plantaciones energéticas**

Estas son grandes plantaciones de árboles o plantas cultivadas con el fin específico de producir energía. Para ello se seleccionan árboles o plantas de crecimiento rápido y bajo mantenimiento, las cuales usualmente se cultivan en tierras de bajo valor productivo. Su período de cosecha varía entre los tres y los diez años. También se utilizan arbustos que pueden ser podados varias veces durante su crecimiento, para extender la capacidad de cosecha de la plantación.

## **1.2 Clasificación**

La fuente de biomasa se puede clasificar de la siguiente forma según su origen:

### **1.2.1 Residuos forestales**

Los residuos de procesos forestales son una importante fuente de biomasa, que actualmente es poco explotada en el área centroamericana. Se considera que de cada árbol extraído para la producción maderera sólo es utilizado comercialmente un porcentaje cercano al 20%, desaprovechando casi un 40 % que es dejado en el campo en las ramas y raíces, teniendo estas últimas un potencial energético mayor que el que comercialmente se utiliza. El otro 40% restante se obtiene en el proceso de aserrín, en forma de astillas, corteza y aserrín. La mayoría de estos desechos son utilizados para generación de calor, en sistemas de combustión directa. Solo en algunas

industrias esto es aprovechado para la generación de vapor. Los residuos como la leña y el carbón vegetal, han sido usados en procesos tradicionales como la cocción de alimentos o pequeñas actividades productivas como panaderías, caleras y secado de granos entre otras. Los desechos de campo, en algunos casos, son usados como fuente de energía por comunidades aledañas, pero la mayor parte no es aprovechada debido al alto costo del transporte.

**Tabla I. Estado de biomasa**

<b>Recursos de biomasa</b>	<b>Tipo de residuo</b>
Residuos forestales	Restos de aserrín: corteza, aserrín, astillas
	Restos de ebanistería: aserrín, trozos, astillas
	Restos de plantaciones: ramas, corteza, raíces
Residuos agropecuarios	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales
	Cáscara y polvo de granos secos (café)
	Estiércol
	Residuos de cosechas: tallos y hojas, cáscaras
	maleza, pastura
Residuos industriales	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales
	Residuos de procesamiento de carnes
	Aguas de lavado y precodio de carnes y vegetales
	Grasas y aceites vegetales
	Aguas negras
	Desechos domésticos orgánicos
	Basura orgánica

Fuente: [www.elblogverde.com/energia-procedente](http://www.elblogverde.com/energia-procedente)

### **1.2.2 Residuos agrícolas**

La agricultura genera cantidades considerables de desechos, se estima que, en cuanto a desechos de campo, el porcentaje es más del 60%, y en desechos de proceso, entre 20% y 40%. Al igual que en la industria forestal,

muchos residuos de la agroindustria son dejados en el campo. Aunque es necesario reciclar un porcentaje de la biomasa para proteger el suelo de la erosión y mantener el nivel de nutrientes orgánicos, una cantidad importante puede ser recolectada para la producción de energía. Ejemplo común de este tipo de residuos es bagazo de la caña de azúcar. Los campos agrícolas también son una fuente importante de leña para uso doméstico: representan más del 50% del volumen total consumido. Por otro lado, las granjas producen un elevado volumen de “residuos húmedos” en forma de estiércol de animales. La forma común de tratar estos residuos es esparciéndolos en los campos de cultivo, con el doble interés de disponer de ellos y obtener beneficio de su valor nutritivo. Esta práctica puede provocar una sobre fertilización de los suelos y la contaminación de las cuencas hidrográficas. Ver tabla I.

### **1.2.3 Residuos de industria agrícola**

La industria alimenticia genera una gran cantidad de residuos y subproductos, que pueden ser usados como fuentes de energía, los provenientes de todo tipo de carnes (avícola, vacuna, porcina) y vegetales (cáscaras, pulpa) cuyo tratamiento como desechos representan un costo considerable para la industria. Estos residuos son sólidos y líquidos con un alto contenido de azúcares y carbohidratos, los cuales pueden ser convertidos en combustibles gaseosos. Ver tabla I.

### **1.2.4. Desechos urbanos**

Estos generan una gran cantidad de biomasa por ejemplo: residuos alimenticios, papel, cartón, madera y aguas negras. La mayoría de los países centroamericanos carecen de adecuados sistemas para su procesamiento, provocando grandes problemas de contaminación de suelos y cuencas; principalmente por la inadecuada disposición de la basura y por sistemas de recolección y tratamiento con costos elevados de operación. Por otro lado, la

basura orgánica en descomposición produce compuestos volátiles (metano, dióxido de carbono, entre otros) que contribuyen a aumentar el efecto invernadero. Estos compuestos tienen un considerable valor energético pudiendo ser utilizado para la generación de energía “limpia”. La planificación urbana deberá incluir sistemas de tratamiento de desechos que disminuyan eficazmente las emanaciones nocivas al ambiente, dándoles un valor de retorno por medio del aprovechamiento de su contenido energético, pues aproximadamente el 80% de toda la basura orgánica urbana puede ser convertida en energía. Ver tabla I.

### **1.3 Características de biomasa de eucalipto**

Existen fuentes de energía renovable como la biomadera, que provee un alto porcentaje de la energía consumida en el mundo, teniendo un potencial para suplir volúmenes de energía de combustión directa a gran escala. El árbol de eucalipto, entre otras especies forestales, posee un alto valor calorífico; siendo este una opción factible en poder desarrollar proyectos de cogeneración eléctrica y programas de conformación de bosques de eucalipto para uso energético en la industria azucarera guatemalteca, estas utilizan el subproducto de la caña de azúcar en tiempo de cosecha (zafra) para producir su propio combustible, y en tiempo de no cosecha (no zafra) se utiliza combustible bunker.

La principal característica de utilizar biomasa de eucalipto (especie eucalipto camaldulenses) es su alto valor energético y resaltar su facultad para brotar vigorosamente de cepa, es decir que es un árbol de crecimiento rápido y bajo mantenimiento como lo requerido en este tipo de plantaciones energéticas.

En general es un árbol de climas secos, cálidos (desde el nivel del mar, hasta 1200 metros), con pluviosidad entre 200 y 1250 mm. es muy tolerante en suelos pero no soporta la competencia de hiervas. Hay entre 90,000 y 400,000

semillas por kilo. Se puede producir por estacas de árboles jóvenes. La madera es pesada, dura y buena para postes, herramienta y construcciones.

En la Industria azucarera lugar donde se realiza este proyecto, se encuentra ubicado en la región Costa Sur del país en el departamento de Escuintla, las características climáticas son favorables para desarrollar un programa de Bosque energético de Eucalipto, y se evaluó la factibilidad de utilizar biomasa de eucalipto en tiempo de no-zafra para la producción de combustible.

Dentro de la misma finca se seleccionó un área para sembrar bosque de eucalipto, haciendo un estudio físico de la parcela para planificar la siembra y ejecutar el cultivo. Se recomendó que los sitios a seleccionar son uniformes en cuanto a sus condiciones agro climáticas para evitar diferencias en el comportamiento de los materiales. Previo a utilizar el área de bosque fue necesario solicitar el permiso correspondiente a la subregión IX-2 del INAB-Escuintla, quien fue el responsable de extender las notas de envío para el aprovechamiento del bosque, luego de realizar la inspección correspondiente y revisar el expediente bajo que condiciones fue registrado el bosque.

Una vez obtenido el permiso se inició el proceso de siembra del mismo.

### **1.3.1 Preparación del suelo**

Todos los trabajos que conlleva la plantación de (limpieza previa, preparación, plantación, abonado) pueden resultar infructuosos si no se realizan trabajos periódicos de limpieza. Estas tareas de mantenimiento han de ser planificados adecuadamente. La plantación ha de ser limpiada una o varias veces hasta que los eucaliptos dominen al matorral.

Para mayor calidad de la parcela antes se necesitaran estas operaciones de limpieza. Se ha de tener en cuenta que la preparación del terreno para la plantación también facilita la proliferación posterior del matorral. El motivo primordial de efectuar limpiezas de mantenimiento es ayudar al eucalipto a

competir por el espacio físico del suelo que esta ocupado por las raíces de otras plantas. Las especies como tojos, escobas, gramíneas o cenizas, están preparadas para aprovechar las condiciones que se dan después de finalizar los trabajos de plantación. Tanto la planta adulta como la semilla de estas especies compiten ventajosamente por la luz y los nutrientes del suelo con las plantas jóvenes de eucalipto.

La limpieza de la plantación es tanto más eficaz y económica cuanto antes se realice. En ocasiones puede ser necesario efectuarla nada más terminar de plantar, dependiendo de la época de plantación y el desarrollo de la competencia.

La limpieza manual hecha con moto desbrozadoras portátiles es costosa, y poco eficaz. Aún así, es el único trabajo posible en sitios muy pendientes o en épocas muy húmedas. El uso de tractor con desbrozadora de cadenas o martillos entre calles es un trabajo útil, especialmente si se complementa con limpieza manual al lado de las plantas, donde no se puede arrimar el tractor. Si no se hace así, el matorral sin desbrozar se podría beneficiar más del desbroce efectuado que los mismos eucaliptos. Este problema se da incluso cuando se hacen limpiezas con calles cruzadas. La siguiente tabla indica los pasos que se necesitan para la preparación y limpieza de la tierra. (Tabla II.)

**Tabla II. Etapas de preparación y siembra del suelo**

No.	Actividad	Cantidad	Etapas
1	Delimitar área	1	30 días antes siembra
2	Rastra	2	Antes siembra
3	Subsolado	1	Antes siembra (si lo requiere)
4	Traza y estaquillado	1	Antes siembra
5	Ahoyado	0.2x0.2x0.2 m	Pre siembra

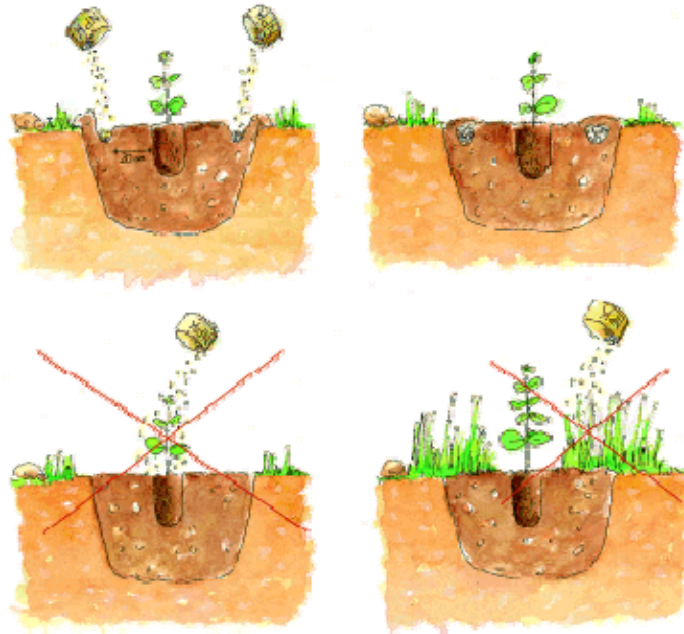
6	Aplicación cachaza	8 lt/hoyo	Pre siembra
7	Distribución Siembra	2x3 m	Momento siembra
8	Siembra de árboles	400/material	Momento siembra
9	Plateo	2	Momento siembra y 30 DDS
10	Fertilización	2	30 DDS y 120 DDS
11	Limpia manual	3	Según presión
12	Desbejudado	2	Entrada y Salida invierno
13	Chapeo mecánico	2	Durante lluvias
14	Control equipo/malezas	2	Entrada y salida invierno
15	Riesgo	5	C/mes a partir de diciembre

Fuente: [www.elblogverde.com/energia-procedente](http://www.elblogverde.com/energia-procedente)

### 1.3.2 Actividades culturales

El abonado debe realizarse inmediatamente después de la plantación y sobre el terreno limpio. La fertilización o abonado de la planta en el momento de la plantación es esencial para mejorar su desarrollo y crecimiento de los primeros años. Los efectos durante los primeros meses son muy patentes, y en el caso de especies como el eucalipto, esta etapa inicial se traduce en un menor tiempo de cosecha (reducción de la edad de corte) o más madera al final del turno. (Fig. 3)

**Figura 3. Modo de abonar correctamente la planta**



Fuente: [www.elblogverde.com/energia-procedente](http://www.elblogverde.com/energia-procedente)

La finalidad principal de la fertilización es ayudar a la planta a desarrollarse rápidamente en los dos primeros años, tanto en su parte aérea como radicular, lo que le permitirá aprovechar la preparación del suelo y competir ventajosamente por los nutrientes del mismo con el matorral que brote o germine posteriormente.

Aun no siendo una operación complicada hay que tener cuidado con el tipo de abono y el modo de obrar. Por lo general, resulta suficiente añadir un abono sólido granulado de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), como por ejemplo, 8:24:16 (N8-P24-K16). Si bien el nitrógeno es fundamental para el crecimiento de la planta, un exceso puede ser muy perjudicial, por lo que hay que evitar los abonos ricos en nitrógeno como el triple 15 (N15-P15-K15). Respecto otro tipo de fertilizantes, hasta el momento no hay estudios suficientemente contrastados que demuestren que la utilización de abonos de lenta incorporación o liberación gradual en la plantación de eucaliptos sean una alternativa rentable al uso de



los abonos tradicionales agrícolas, mucho más baratos y fácilmente asimilables por la planta. Debe fertilizarse en el momento de la plantación. En cualquier caso debe realizarse antes de 30 días tras la plantación. No deben emplearse cantidades superiores a 100 gramos por planta, evitando siempre que el abono toque directamente la raíz. No hay que abonar encima de la hierba o maleza viva. Por ello es imprescindible mantener completamente limpio un círculo de unos 70 cm de diámetro alrededor de la planta.

### **1.3.3 Producción de plantas**

La manipulación de la planta a lo largo del período de producción va a incidir sobre su calidad final y por tanto sobre su comportamiento en campo. Con el fin de minimizar dicha manipulación, debe ser semillada en contenedores con celdas individuales. El número de semillas por alvéolo dependerá de su capacidad germinativa manteniendo como objetivo una planta por envase. En caso de que germine más de una semilla hay que dejar una única plántula, la más vigorosa y que esté centrada en el alvéolo. La selección de la planta se realizará cuando empiecen a tener el primer par de hojas ya que de lo contrario las raíces se enredan y se puede provocar daños a la que permanece. La plántula eliminada nunca debe ser trasplantada a otro alvéolo ya que los daños, a pesar de ser imperceptibles, repercuten en la estructura de la raíz con efectos muy negativos en la reforestación.

### **1.3.4 Características de la planta de eucalipto ideal**

El tamaño de la planta debe oscilar entre 15 y 20cm. de altura. No obstante, una planta puede ser apta si cumple los requisitos mencionados a continuación.

- Las raíces no deben presentar enrollamientos ni deformaciones especialmente en la base del cepellón. El sistema radicular del cepellón no debe ser excesivamente denso, ni amarillento.

- La disposición de las hojas en el tallo o la distancia internados no debe ser menor de unos 2 cm. La presencia de muchos pares de hojas rojizo/marrón y muy juntos unos de otros, es síntoma de la planta muy envejecida y excesivamente dura.
- La planta debe presentar una sola guía principal no muy tierna ya que sería más sensible a daños físicos (transporte y manipulación) como de tipo fitosanitario.
- El estado fitosanitario de la planta ha de ser controlado de forma rigurosa desechándose toda planta con daños en tallo, raíces o inserciones de las hojas al tallo bien sea por hongos o cualquier otro tipo de agente patógeno, en cualquier caso ha de salir revisada y tratada preventivamente.

El eucalipto es una especie con períodos cortos de producción en vivero si la comparamos con pinos o robles. La planta no debe salir demasiado tierna o débil ni excesivamente endurecida. El período de producción varía entre 3 y 5 meses dependiendo de la especie. Una vez adquirida, la planta debe de ser tratada con sumo cuidado hasta que sea puesta en el campo, siguiendo las instrucciones que reciba de su proveedor habitual. De lo contrario, una manipulación errónea o deficiente traerá como consecuencia una pérdida de calidad. El origen de la semilla y el estado de la planta es uno de los aspectos más importantes para obtener unos buenos crecimientos. La producción de planta de Eucalipto tiene un certificado de garantía con Ingenieros Agrónomos de la Corporación Pantaleón especializados en esa rama para asegurar el mejor resultado.

### **1.3.5 Tipo de suelo**

El eucalipto, a diferencia de otras especies, no resulta especialmente exigente con el tipo de suelo, siendo capaz de crecer en sustratos pobres y ácidos. Los mejores crecimientos se observan sobre suelos arcillosos, silíceos, sueltos y profundos, con una acidez moderada o neutra (con valores de pH entre 5 y 7). Los suelos forestales, debido a la pluviosidad y al tipo de rocas, suelen ser más bien ácidos. Por el contrario, el eucalipto no se desarrolla bien en suelos excesivamente calcáreos, muy alcalinos, o en suelos encharcados o mal drenados. La profundidad del suelo es otro factor importante, observándose mayores crecimientos cuanto mayor es la profundidad. No obstante, debido a su vigor y plasticidad es capaz de crecer satisfactoriamente en suelos escasos o poco profundos, siempre que se realicen las labores adecuadas.

Una extensión similar está cubierta por esquistos y pizarras. Hay además zonas con rocas básicas y otras de origen sedimentario como la Finca Pantaleón, Las Mojarras y California donde los suelos tienen bastante roca y presentan bajos valores de fósforo y de potasio. Ambos elementos son muy necesarios para un buen desarrollo inicial del eucalipto, por lo que debe realizarse al menos una fertilización en el momento de la plantación.

Para analizar la profundidad y composición de los suelos pueden realizarse zanjas, esto permite identificar el perfil del suelo. El horizonte A o superficial, sobre el que se halla la materia orgánica en descomposición, es el más rico en nutrientes. El horizonte B está formado por una mezcla de tierra y rocas, siendo menos rico en materia orgánica y nutriente que el horizonte A. Finalmente, el horizonte C está formado por la roca madre alterada. Frecuentemente, los perfiles de suelos forestales muestran un horizonte A escaso, seguido del horizonte C o incluso de la roca madre.

### 1.3.6 Plagas

Una de las ventajas que existen en la utilización del cultivo del eucalipto es la escasa presencia de enfermedades y plagas que mermen su productividad. No obstante, existen algunas que conviene que sean conocidas para atajarlas y evitar que, por su desconocimiento, se conviertan en un problema se citan el goníptero y algunas enfermedades provocadas por hongos. La *Phoracanta* o perforador del eucalipto no está presente en la costa sur de Guatemala debido a las características climatológicas. El goníptero (*Gonipterus scutellatus* Gyll) es un insecto coleóptero originario de Australia. Su aparición en distintos países ha seguido a las plantaciones de eucalipto. A lo largo de su vida el insecto cambia de aspecto y de hábitos. Tras la salida del huevo la larva, con aspecto de oruga, es blanca de aproximadamente 1 cm. de longitud. Aparece en las hojas adultas alimentándose de ellas y formando surcos en el limbo. Tras esta fase, se entierra en el suelo y se transforma en adulto. En este estadio su aspecto es el de un pequeño escarabajo adherido a los bordes de las hojas. Mientras las come va recorriendo su perímetro dándole así un aspecto de festoneadura.

Debido a su aparición los daños aún no se han podido estimar. La forma en la que se está actuando es mediante la denominada lucha biológica. En 1926 fue descubierto un insecto parásito de los huevos del goníptero que permitía el control de la plaga. Este insecto, la avispa *Anaphes nitens*, destruye las larvas del goníptero al alimentarse de ellas durante su desarrollo. La solución es crear un animal que las extermine el cual es la avispa *Anaphes* para el control de gonípteros, siendo utilizada en las zonas dañadas mostrando una alta efectividad.

La mayoría de los hongos que viven sobre las plantas no provocan graves daños. Entre los hongos que afectan al *E. globulus*, *Botrytis cinerea* es el más conocido. La enfermedad que provoca el mal azul se caracteriza por la

aparición de una mancha verde-azulada en el tallo frecuentemente acompañada por hojas secas en zonas próximas. Ataca a plantas jóvenes que aún no han cambiado la hoja juvenil y a rebrotes. Tras la aparición de los daños la planta muere desde la zona de infección hasta el ápice perdiéndose así ese crecimiento o medría. En ocasiones la planta responde aislando al hongo con tejido muerto, formando una cicatriz, y pudiendo rebrotar por debajo de la zona afectada. En general, en las enfermedades causadas por hongos es especialmente importante mantener a la planta bien aireada eliminando helecho y maleza que lo dificulte. En caso de aparecer la botritis, se recomienda cortar por la parte inferior al daño. Si estuviese muy afectada es mejor arrancar la planta y sustituirla por otra nueva teniendo especial cuidado de no tocar otra planta después que podría ser infectada. Existen tratamientos fungicidas que pueden ser aplicados si la enfermedad está localizada en pequeños rodales.

## 2. PODER CALORÍFICO

### 2.1 Calor de combustión y ahorro de energía

Los fenómenos térmicos son aquellos que están relacionados con la emisión y la absorción del calor. Una característica general de los fenómenos térmicos es que existen cuerpos que ceden energía en forma de calor, y otros que son capaces de absorber dicha energía. Con el objetivo de caracterizar cuantitativamente la emisión o la absorción del calor, se ha establecido el concepto cantidad de calor.

La cantidad de calor (Q) se define como la energía cedida o absorbida por un cuerpo de masa (m) cuando su temperatura varía en un número determinado de grados. La cantidad de calor (Q) está relacionada directamente con la naturaleza de la sustancia que se caracteriza por una magnitud denominada calor específico de la sustancia.

El calor específico de la sustancia se representa con la letra C y se define como la cantidad de calor requerida por la unidad de masa de una sustancia para variar su temperatura en 1 grado centígrado. El calor específico (C) se expresa en unidades de energía [joule (J)], por unidades de masa [Kilogramo (Kg)], y temperatura [grado centígrado (°C)].

La fórmula que permite determinar la cantidad de calor (Q) cedida o absorbida por un cuerpo de masa (m y calor específico(C), cuando su temperatura inicial ( $t_i$ ), varía hasta la temperatura final ( $t_f$ ), se puede calcular mediante la fórmula.

$$Q = C_m (t_f - t_i)$$

En esta fórmula el resultado numérico de la cantidad de calor (Q) se expresa en unidades de energía: J, Kcal. A partir de esta fórmula es posible apreciar que la cantidad de calor (Q) es directamente proporcional a la masa

(m) del cuerpo, su calor específico (C) y a la diferencia de temperaturas  $(t_f - t_i)$ .

Un cuerpo de masa (m) puede variar su temperatura inicial mediante un fenómeno térmico si absorbe o cede cierta cantidad de calor (Q). Al considerar que la energía no puede ser creada ni destruida de acuerdo con la ley de la conservación de la energía, entonces la energía absorbida (o cedida) por un cuerpo debe, en principio, ser cedida (o absorbida) por otro cuerpo. En estos procesos de emisión y absorción de energía desempeña un papel muy importante el proceso de combustión, ya que en un número considerable de fenómenos térmicos se logra el desprendimiento de energía de los cuerpos, mediante su combustión.

Durante la combustión de los cuerpos, el rendimiento de calor se realiza de forma diferente de acuerdo con las características físicas y químicas del cuerpo en cuestión. Una magnitud que permite caracterizar cuantitativamente el desprendimiento de calor de los cuerpos durante la combustión, es el denominado calor específico de combustión, que se representa con la letra I.

Podemos definir el calor de combustión como la cantidad de calor que cede la unidad de masa del cuerpo al quemarse totalmente. El calor específico de combustión se expresa en unidades de energía (joule) por unidades de masa (kilogramo) y depende del tipo de combustible. Iguales masas de combustibles diferentes, desprenden diferentes cantidades de calor al quemarse totalmente. Por lo que masas diferentes del mismo combustible desprenden, también, diferentes cantidades de calor. La cantidad de calor desprendida por cierta masa de combustible, al quemarse totalmente, puede ser calculada mediante la fórmula:

$$Q = Im$$

El calor específico de combustión generalmente se relaciona con los materiales considerados como combustibles tradicionales (petróleo, carbón,

alcohol, leña, etc.) pero también puede ser asociado con los combustibles alternativos, por lo que es importante conocer las potencialidades combustibles de diferentes materiales que no se emplean con frecuencia en la combustión.

Para poder apreciar con mas claridad las potencialidades combustibles de los materiales que se emplean en la combustión para lograr el desprendimiento de energía térmica, resulta posible iniciar el análisis del los calores específicos de combustión. Ver tabla III.

**Tabla III. Calor específico en materiales combustibles**

<b>Material combustible</b>	<b>Calor específico de combustión (BTU/LB)</b>
Hidrógeno	61049
Gas metano	23645.7
Carbón	15477.2
Alcohol etílico	12897.7
Carbón vegetal	12897.7
Alcohol metílico	9458.3
Cascarón de coco	8598.45
Leña seca	7738.61
Turba húmeda	6878.76
Aserrín seco	6448.84
Cáscara de arroz	6448.84
Lignito	5888.99
Bagazo	3869.2
Leña verde	3869.2
Planta de maíz seca	3869.2
Aserrín humero	3439.38

Fuente: Secado de grano en altas temperaturas, [www.fao.org](http://www.fao.org)

Cuando se estudia los valores relativos a los calores específicos de combustión de los combustibles se pueden extraer conclusiones como el calor de combustión de la leña seca es el doble de correspondiente a la leña verde. Esto nos conduce que si cierta masa de leña húmeda desprende una cantidad de calor al quemarse totalmente, entonces, cuando quemamos una masa



(m/2) de leña seca podemos obtener la misma cantidad de calor. O sea al utilizar la leña seca se ahorra la mitad de la madera que se quema. Esto nos indica que durante la utilización de la madera como combustible siempre será más conveniente emplear leña seca, en consideración a su calor de combustión. En los fogones que emplean leña se puede incrementar la eficiencia de estos, mediante la sustitución del empleo de la leña verde por la leña seca.

## **2.2 Comparación de valor calorífico del bunker (*fuel oil*) y chip de madera**

La característica más importante de cualquier combustible es su poder calorífico. Este se refiere a la cantidad de calor generado en la combustión completa de una unidad dada de combustible. Para una sustancia de composición invariable, este será un valor constante entre una muestra y otra. O sea es la cantidad de energía que un gramo de materia puede desprender mediante una reacción química, en general el poder calorífico describe la energía liberada en una reacción química entre un combustible y el aire u oxígeno puro.

### **2.2.1 Bunker (*fuel oil*)**

Es un combustible líquido y se obtiene mediante la destilación del petróleo. Presenta ciertas ventajas sobre los otros combustibles sólidos porque tiene mayor limpieza en combustión y fácil manejo y el almacenamiento. El bunker contiene mezclas complejas de componentes con un peso molecular relativamente elevado. Contiene hidrocarburos aromáticos poli cíclicos (fenantrenos, benzopirenos, antracenos) y en pequeña proporción hidrocarburos aromáticos menos pesados (tolueno, etilbenceno, xileno, etc.)

Además el fuel residual tiene un alto contenido en metales pesados. Según los aceites combustibles estos son los más utilizados, designados por los grados ASTM.

- Grado No. 1: es un aceite destilado empleado para la evaporación en quemadores de tipo domestico.
- Grado No. 2: es un aceite destilado para usarse en calentamiento doméstico.
- Grado No. 4: este requiere de precalentamiento para quemarse.
- Grado No. 5 requiere de precalentamiento según el clima.
- Grado No. 6 se necesita precalentamiento para manejarlo o quemarse.

De los anteriores mencionados, el aceite que se utiliza en la Industria azucarera es el de grado No. 6, por tener mejor poder calorífico respecto a los anteriores grados de aceites combustibles.

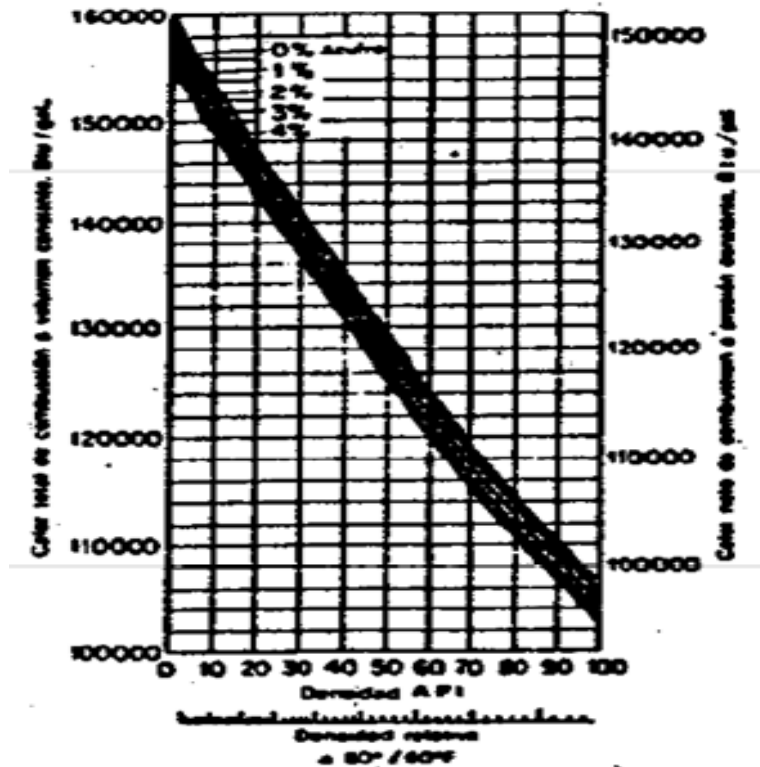
#### **Características de los aceites combustibles:**

- **Densidad:** se determina por la temperatura ambiente con hidrómetros especiales, corregidos a 60° F y se expresa en grados API. Es una escala que relaciona en proporción inversa el peso específico (s) a 60°/60° F, como sigue

$$\text{GradosAPI} = (141.5 / s) - 131.5$$

El calor de combustión se correlaciona también con la gravedad del combustible y se puede estimar hasta dentro de 1% como se muestra en la figura 4.

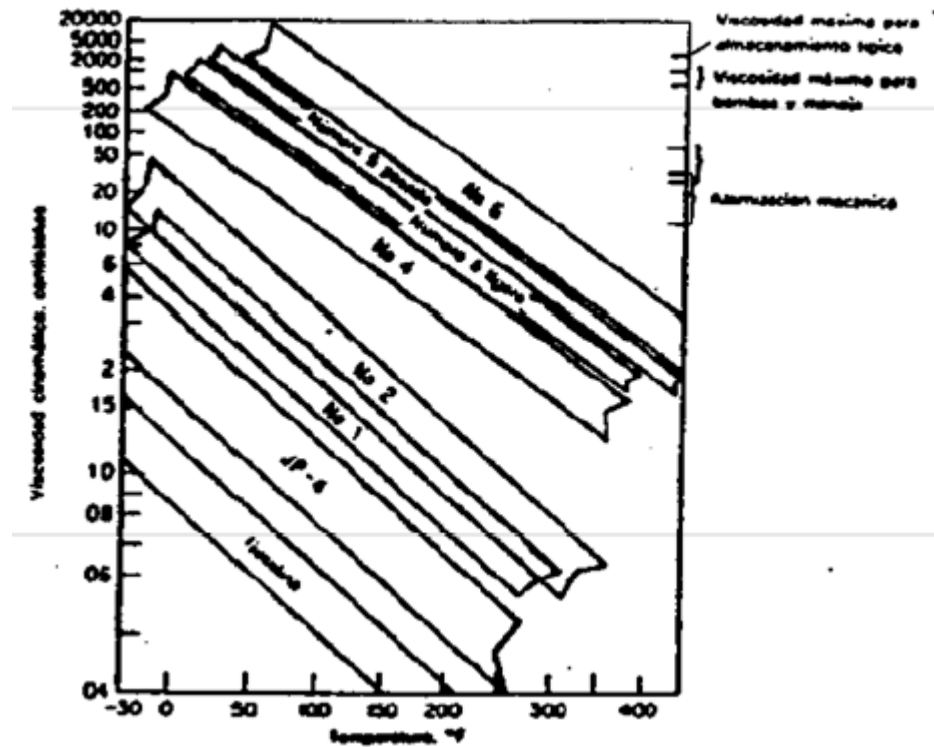
Figura 4. Calor total de combustión versus densidad



Fuente: Mejoramiento de la eficiencia de operación en calderas de Vapor

- **Punto de fluidez o congelación:** es cuando la temperatura a la cual su superficie que rodea un termómetro ya no es un fluido. Las gamas del punto de fluidez es de  $\leq 60^{\circ}\text{F}$ , para algunos combustibles hasta  $115^{\circ}\text{f}$  para los combustibles cerosos del No.6 y las relaciones de viscosidad y temperatura (figura 5) no son cercanas al punto de fluidez.
- **Viscosidad:** Es la medida de fluidez de un líquido, en la figura 5. se muestran relaciones de viscosidad y temperatura para combustibles de petróleo típico.

Figura 5. Relación de viscosidad y temperatura para combustibles de petróleo típico



Fuente: Mejoramiento de la eficiencia de operación en calderas de vapor

- **Punto de inflamación:** El punto de inflamación de un aceite es una medida de que tan volátil, si alcanza el punto de inflamación cuando se produce una tenue llama azulada sobre la superficie total pero este se extingue por si sola al retirar la llama de prueba.
- **Punto de combustión:** Es la temperatura de los vapores desprendidos del aceite que continúan ardiendo con llama permanente después de retirar la llama de prueba. Se considera que el bunker C es el denominado combustible No. 6. Originalmente, el bunker C y B eran combustibles de gamas superiores e inferiores de viscosidad,

respectivamente de la clasificación de los combustibles No.6 y el bunker A era un combustible del No.5. En los sistemas de combustión para aceites combustibles No.6 diseñaron por lo común para precalentar el combustible desde 90° a 120° F, con el fin de reducir la viscosidad para facilitar el manejo y calentamiento del combustible desde 165° a 200° F para reducir todavía más la viscosidad, con el fin de lograr una atomización adecuada. Para lograr el fin, se recurre al calentamiento de las líneas por medio de vapor o electricidad, según lo requieran las condiciones climáticas, la longitud de las tuberías y la frecuencia de la utilización. Los combustibles de grado No.2 o más ligero no se suelen precalentar, una excepción es la de turbinas industriales de gas que requieren con frecuencia un precalentamiento de los aceites combustibles No.2 hasta lograr una viscosidad de 12 centistokes o menos para los arranques en frío, durante el invierno. A continuación en la tabla IV, los requisitos detallados de la ASTM para aceites combustibles.

**Tabla IV. Requisitos de ASTM**

Grado de aceite combustible	Descripción y requisitos para el uso	Punto de inflamación, °F (°C)	Punto de fluidez de congelación, °F (°C)	Agua y sedimentos, % en volumen	Residuo de carbono en flocos de 10%, %	Cenizas, % en peso	Temperatura de destilación, °F (°C)				Viscosidad Saybolt, s				Viscosidad cinemática, centistokes				Densidad - A.P.I.	Corrosión de tira de cobre
							Punto de 40%		Punto de 60%		Universal a 100°F (38°C)		Faro a 122°F (50°C)		A 100°F (38°C)		A 122°F (50°C)			
							Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo		
No. 1	Un aceite destilado destinado a quemadores del tipo de olla para vaporizar y otros quemadores que requieren este grado de combustible	100 o legal (38)	0	Rastros	0.15	...	420 (215)	...	550 (268)	...	...	...	...	1.4	2.2	...	...	35	No. 3	
No. 2	Un aceite destilado para fines generales de calefacción doméstica, para uso en quemadores que no requieren combustible No. 1	100 o legal (38)	20 (-7)	0.10	0.35	...	...	540 (282)	640 (338)	(32.0)	(37.8)	...	...	2.0	3.6	...	...	30		
No. 4	Por lo común no se necesita precalentamiento para el manejo o la combustión	130 o legal (55)	20 (-7)	0.50	...	0.10	...	...	...	45	125	...	...	(5.8)	(20.4)	...	...			
No. 5 (ligero)	Se puede necesitar precalentamiento, dependiendo del clima y los equipos	130 o legal (55)	...	1.00	...	0.10	...	...	...	150	300	...	...	(32)	(65)	...	...			
No. 5 (pesado)	Se puede necesitar precalentamiento para la combustión y, en climas fríos, también para el manejo	130 o legal (55)	...	1.00	...	0.10	...	...	...	350	750	(27)	(40)	(75)	(162)	(42)	(81)			
No. 6	Se requiere precalentamiento para el manejo y la combustión	150 (65)	...	2.00	...	...	...	...	...	(900)	(9000)	45	300	...	...	(92)	(633)			

\*A.S.T.M. Burner Fuel Specification D 396.

Fuente: Mejoramiento de la eficiencia de operación en calderas de vapor

### 2.2.2 Chip de madera

Entre los principales combustibles sólidos se cuentan la leña, esta presenta una gran diversidad de características fisicoquímicas, según la aplicación que se desee darle. El contenido de humedad, la composición química y el poder calorífico de la leña son aspectos que hay que conocer para la construcción y el funcionamiento en las calderas. El contenido de humedad

de la leña recién cortada varía entre el 40 y el 50%; luego de estar expuesta a la intemperie, en época no lluviosa, la humedad promedio de la leña baja aproximadamente al 25%.

La composición química porcentual de la leña aparece en el Tabla V., se observa que el contenido de azufre de la leña es insignificante, lo que disminuye el riesgo de contaminación con este combustible.

El poder calorífico de la leña varía en función de la clase de leña utilizada (Tabla VI.) y del contenido de humedad de la leña (Tabla VII.).

**Tabla V. Composición química porcentual de la leña en función del contenido de humedad, en porcentaje, en peso.**

Compuesto Químico	Contenido de humedad (% b.h.)		
	0	20	40
Carbono	50,30	40,24	30,18
Hidrógeno	6,20	4,96	3,72
Oxígeno	43,08	34,46	25,85
Nitrógeno	0,04	0,03	0,02
Azufre	0,00	0,00	0,00
Cenizas	0,37	0,31	0,23
Total	100,00	100,00	100,00

Fuente: Secado de grano en altas temperaturas, [www.fao.org](http://www.fao.org)

**Tabla VI. Poder calorífico inferior de la leña seca**

<b>Especie</b>	<b>(BTU/LB)</b>
<b>Eucalipto</b>	<b>8254.5</b>
<b>Pino</b>	<b>8770.4</b>
<b>Cedro</b>	<b>7738.6</b>
<b>Ciprés</b>	<b>9200.3</b>
<b>Encino</b>	<b>8383.4</b>
<b>Media</b>	<b>8469.4</b>

Fuente: Secado de grano en altas temperaturas, [www.fao.org](http://www.fao.org)

**Tabla VII. Poder calorífico inferior de la leña en función del contenido de humedad**

<b>Contenido de humedad</b>	<b>Hi (KJ/Kg)</b>
0	19880
10	17644
20	15412
30	13180
40	10947
50	8715
60	6483

Fuente: Secado de grano en altas temperaturas, [www.fao.org](http://www.fao.org)

Una de las preocupaciones de los consumidores de leña es el abastecimiento seguro. El uso exclusivo de leña procedente de las reservas naturales, sin tomar medidas para su racionalización, podrá provocar la escasez del producto. La alternativa es la reforestación de bosques energéticos de manera auto sostenida,



## 2.3 Combustión en calderas

Las calderas de vapor son instalaciones industriales que, aplicando el calor de un combustible sólido, líquido o gaseoso, vaporizan el agua para aplicaciones en la industria.

El vapor o el agua caliente se producen mediante la transferencia de calor del proceso de combustión que ocurre en el interior de la caldera, elevando, de esta manera, su presión y su temperatura. Debido a estas altas presiones y temperaturas se desprende el recipiente contenedor o recipiente de presión debe diseñarse de forma tal que se logren los límites de diseño deseado, con un factor de seguridad razonable.

En el caso del agua caliente, esta es igual a 232°C (450°F).

Las calderas grandes se diseñan para diferentes presiones y temperaturas, con base en la aplicación dentro del ciclo del calor para la cual se diseña la unidad.

Los combustibles están caracterizados por un poder calorífico, un grado de humedad y unos porcentajes de materias volátiles y de cenizas.

El análisis químico es quien permite distinguir los diferentes elementos (puros) que constituyen el combustible. Estos elementos se pueden clasificar en dos grandes categorías:

- Elementos activos, es decir: combinables químicamente con el aire u oxígeno puro, cediendo calor. Son el carbono, hidrógeno, azufre, etcétera.
- Elementos inertes, que no se combinan con el comburente y que pasarán como tales a los residuos de la combustión. Son el agua, nitrógeno, cenizas, etc.

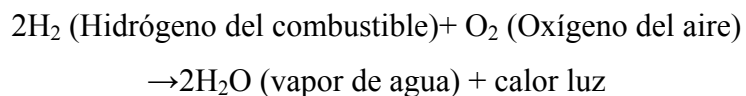
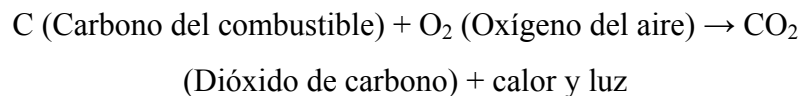
El objeto de la combustión, refiriéndonos a los hogares, es el de proporcionar una producción de calor uniforme y regulada para ser transmitida a un medio que la absorba. Una de las cuestiones más importantes es la de

suministrar una cantidad exacta de oxígeno por unidad de peso del combustible para que se realice la combustión completa.

Además de la exactitud correcta de la mezcla aire-combustible, se debe dar el tiempo necesario para que la mezcla sea íntima para que el combustible arda completamente; la temperatura del hogar debe ser tal que mantenga la combustión. La mejor manera de estudiar la combustión en un hogar consiste en relacionarla directamente con el análisis del combustible usado, para el cálculo de la cantidad necesaria de aire y de los productos gaseosos formados.

La combustión o quemado de los combustibles más comunes, o sea aquellos que consistan principalmente en carbono e hidrógeno (tales como el aceite combustible o la madera) implica la reacción del carbono y el hidrógeno con el oxígeno para producir dióxido de carbono y vapor de agua y la consecuente liberación de la energía química de enlace en forma de luz y calor.

Las reacciones químicas que tienen lugar son:



La combustión del carbono y el hidrógeno, solamente con oxígeno produce teóricamente un gas de escape que consiste únicamente en dióxido de carbono y vapor de agua, los cuales son productos inocuos de la combustión. Desafortunadamente, para sistemas de combustión reales, la composición compleja de los combustibles alimentados, más las características no ideales

del proceso de combustión en si pueden dar por resultado otros productos sólidos y gaseosos. Algunos de estos productos son el resultado de una combustión incompleta y son importantes desde el punto de vista de la eficiencia, ya que representan una pérdida de calor disponible que se escapa por la chimenea de la caldera. Una cierta cantidad de estos productos han sido identificados como severos contaminantes del ambiente.

El aire se utiliza como una fuente conveniente y constante de oxígeno para casi todos los procesos industriales de combustión. Los principales componentes del aire son el oxígeno y el nitrógeno en una proporción volumétrica de aproximadamente 21% de oxígeno, 78% de nitrógeno y 1% en otros gases como el dióxido de carbono. Si la combustión se efectúa idealmente bajo condiciones perfectas, existe la llamada cantidad teoría de aire que quemara completamente una cantidad dada de combustible sin quedar un exceso de oxígeno. Esta se conoce como combustión estequiométrica y se ilustra:

*Combustible + cantidad Teoría de Aire = Combustión Estequiométrica = Dióxido de Carbono + vapor de agua + Nitrógeno y otros gases (Excluyendo el oxígeno)*

Como las condiciones de combustión nunca son ideales, debe suministrarse a un quemador más de la cantidad teórica del aire para quemar completamente toda la materia combustible. La cantidad real de aire de combustión que se requiere para una caldera determinada depende de muchos factores tales como la clase y la composición del combustible, el diseño del horno, el régimen de alimentación, el diseño y ajuste de los quemadores. El suministro adicional del aire de combustión en relación a lo requerido teóricamente se denomina exceso de aire. Cuando no se provee una cantidad suficiente de aire, resultan despedidos por la chimenea de la caldera combustible no quemado, humo y otros productos de la combustión incompleta,

tales como monóxido de carbono y hollín (principalmente carbono), los cuales producen contaminación, desperdicio de energía del combustible y material potencialmente explosivo.

En el caso de calderas de bagazo, aumentara la cantidad de combustible no quemado en el residuo (ceniza). Si se suministra demasiado exceso de aire al quemador, la eficiencia de la caldera disminuiría debido a que parte del combustible se utilizara solamente para calentar el aire innecesario que se escapa por la chimenea. La cantidad de aire en exceso puede también influir en la formación y emisión de óxido de nitrógeno. La concentración de oxígeno en los gases de chimenea es una indicación directa de la cantidad de exceso del aire. La concentración porcentual de oxígeno en los gases de chimenea se denomina normalmente como exceso de oxígeno, exceso de  $O_2$  o sencillamente  $O_2$  de chimenea. Debe tenerse cuidado de no confundir los términos Exceso de aire y Exceso de oxígeno, ya que tienen significados diferentes, sin embargo, el exceso de oxígeno y exceso de aire son sinónimos como indicadores de la cantidad de aire de combustión que se suministra en la caldera.

### **2.3.1 Combustión con aire**

La mayoría de veces los procesos de combustión se llevan a efecto de aire y no con oxígeno puro. Este aire esta formado de varios elementos, en particular oxígeno, nitrógeno y argón, así como por algunos otros vapores y gases inertes, su composición volumétrica es de 21% de oxígeno, 78% de nitrógeno, y 1% de argón, sin embargo, se considera que el aire solo contiene nitrógeno puro y es esta formado únicamente por oxígeno y nitrógeno, cuya consideración es enmendada tomado como 28.16 como masa (peso) molecular en vez de 28.016.

### **2.3.2 Aire teórico**

La cantidad mínima necesaria de aire para oxidar los reactivos se llama aire teórico y es cuando la combustión se lleva a cabo con el aire teórico que ocurre íntegramente. Esto resulta imposible, se necesita más oxígeno del teóricamente necesario para logra combustión u oxidación total del combustible, es decir, exceso de aire, para cada porción de combustible. Un ejemplo es una gota, debe hallarse estrictamente rodeada por un numero de moléculas de oxígeno mayor que el necesario para asegurar la oxidación de todas las moléculas del hidrocarburo. Este exceso de aire generalmente se expresa como porcentaje de aire teórico. Si el exceso de aire es insuficiente para permitir una combustión completa, entonces, no todo el carbono se oxidara a la forma de dióxido de carbono, sino que una parte resultara como monóxido de carbono. Cuando haya una cantidad considerablemente menor, el aire teórico aparecerá en el hidrocarburo no quemado en los productos. Esto produce el hollín o humo negro en ocasiones arrojan en las chimeneas. Esto implica que no se cumple una combustión completa:

- 1.- El oxígeno debe encontrarse en contacto íntimo con el combustible
- 2.- Tiene que haber oxígeno suficiente para asegurar una oxidación completa
3. La mezcla de combustible y aire debe hallarse a la temperatura de ignición.

### **2.3.3 Relación entre el aire y combustible**

Es muy importante para el proceso de combustión indicar la proporción entre el aire y el combustible que interviene, se trata de las llamadas relaciones aire-combustible,  $R_{a/f}$ , y su recíproco, la relación combustible-aire,  $R_{f/a}$ . Ambas puede expresarse en términos de la masa del combustible y del aire presente

## **2.4 Combustión en calderas de bagazo**

Se denomina así a las calderas que exclusivamente utilizan el bagazo de caña de azúcar como combustible. El bagazo es la materia sólida, fibrosa, que sale de la abertura trasera del último de los molinos después de la extracción del jugo de caña. El bagazo en general es suficiente para que sea como combustible en las calderas y produzca todo el vapor necesario para darle movimiento a los generadores. Entre las propiedades más importantes, desde el punto de vista para la producción de vapor son:

- Humedad, es la cantidad de agua contenida en el bagazo al salir del último molino y se expresa en % de volumen. Los valores más frecuentes oscilan entre 48 a 51 %.
- Material insoluble, constituido principalmente por la celulosa y que constituye la fibra del bagazo. Cuyo % en volumen oscila alrededor del 50%.
- Sustancias en solución en el agua, consiste en azúcar e impurezas. Estas sustancias en solución se presenta en cantidades que van del 2 al 5%.

En este proyecto se hizo una breve referencia al análisis respecto a la combustión de bagazo, de algunos aspectos que serán de utilidad para más adelante. El bagazo seco tiene un poder calorífico de 8400 BTU/Lb.

En el balance térmico de la caldera el calor se distribuye así:

- Calor absorbido por la caldera
- Calor perdido por los humos.
- Evaporación de la humedad formada al quemar el hidrógeno.
- Evaporación de la humedad superficial del combustible
- Pérdidas por combustión incompleta.
- Pérdidas por carbón sin quemar en las cenizas
- Pérdidas por calentamiento de la humedad del aire
- Pérdidas por radiación y otras.

En la tabla VIII. se presentan ejemplos con el cálculo de combustión de calderas que queman bagazo, bajo condiciones distintas de porcentaje de exceso de aire y temperatura de chimenea.

**Tabla VIII. Eficiencia total de calderas bajo condiciones de operación**

<b>Condiciones de operación</b>	<b>No.1</b>	<b>No.2</b>	<b>No.3</b>	<b>No.4</b>
Porcentaje de exceso de aire	40%	40%	40%	40%
Temperatura de gases en chimenea	380 °F	450 °F	450 °F	550 °F
CO <sub>2</sub> en los gases de combustión	13.77%	13.77%	11.47%	10.79%
Volumen de gases $P^3$ /Min./Lb. Vap-Hr.	0.6832	0.7648	0.9078	1.1586
Volumen de aire $P^3$ /Min./Lb.Vap-Hr. (Aire a 90 F.)	0.3887	0.4016	0.4864	0.5629
<b>Descripción de las pérdidas</b>				
Gases en el combustible	8.00%	9.80%	11.50%	15.75%
Humedad en el combustible	14.75%	14.80%	14.80%	15.30%
Hidrógeno en el combustible	7.70%	7.95%	7.95%	8.25%
Radiación en la caldera(Estimado)	1.50%	1.50%	1.50%	1.50%
Carbón no quemado(Estimado)	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%
Humedad de aire	0.20%	0.20%	0.20%	0.30%
Indeterminados	1.50%	1.50%	1.50%	1.50%
<b>Pérdida total</b>	<b>34.65%</b>	<b>36.75%</b>	<b>38.45%</b>	<b>43.60%</b>
<b>Eficiencia(Calor absorbido)</b>	<b>65.35%</b>	<b>63.25%</b>	<b>61.55%</b>	<b>56.40%</b>
<b>Producción: Lbs. vapor por Lb. de bagazo</b>	<b>2.47</b>	<b>2.39</b>	<b>2.32</b>	<b>2.13</b>

Fuente: Registros de caldera No.6

## 2.5 Combustión en calderas de bunker

En la caldera que utiliza bunker para la generación de vapor al Generador, la combustión del bunker será una reacción química en la que el bunker se combina con el oxígeno desprendiendo calor y produciendo oxígeno, la combustión de bunker será una reacción exotérmica que produce calor al quemar y luz al arder.

La fórmula de Dulong es una ecuación en la cual se obtiene la potencia calorífica del combustible basado en proporciones de peso, del carbono total, hidrógeno útil y azufre, se expresa por:

$$Q = 145.55 * C + 620 * (H - O/8) + 41 * S (Btu / Lb)$$

Donde, C, H, O y S son respectivamente los porcentajes de carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre. En la tabla IX, se muestra los análisis finales típicos de combustibles de petróleo

**Tabla IX. Análisis finales típicos de combustibles de petróleo**

<b>Composición</b>	<b>Bunker numero 1 (41.5° A.P.I.)</b>	<b>Bunker numero 2 (33° A.P.I.)</b>	<b>Bunker numero 4 (23.3° A.P.I.)</b>	<b>No. 6 FO. de bajo contenido de azufre 1 (12.6° A.P.I.)</b>	<b>No. 6 FO. de alto contenido de azufre 1 (15.5° A.P.I.)</b>
<b>Carbono</b>	86.4	87.3	86.47	87.26	84.67
<b>Hidrógeno</b>	13.6	12.6	11.65	10.49	11.02
<b>Oxígeno</b>	0.01	0.04	0.27	0.64	0.38
<b>Nitrógeno</b>	0.003	0.006	0.24	0.28	0.18
<b>Azufre</b>	0.09	0.22	1.35	0.84	3.97
<b>Ceniza</b>	<0.01	<0.01	0.02	0.04	0.02
<b>Razon C/H</b>	6.35	6.93	7.42	8.31	7.62

Fuente: [www.paguito.com/portal/hemeroteca/tipos-de-petroleo.html](http://www.paguito.com/portal/hemeroteca/tipos-de-petroleo.html)



En la tabla X. se muestran las escorias típicas de calderas alimentadas por combustible del No.6

**Tabla X. Escorias en calderas alimentadas por bunker**

	<b>Cenizas de aceite %</b>	<b>Depósito en el supercalentador, %</b>
<b>SiO2</b>	1.70%	7.00%
<b>Al2O3</b>	0.30%	4.10%
<b>Fe2O3</b>	3.80%	5.80%
<b>CaO</b>	1.70%	4.50%
<b>MgO</b>	1.10%	2.50%
<b>NiO</b>	1.90%	1.10%
<b>V2O3</b>	7.90%	9.00%
<b>Na2O</b>	31.80%	23.70%
<b>SO3</b>	42.30%	46.40%

Fuente: [www.paguito.com/portal/hemeroteca/tipos-de-petroleo.html](http://www.paguito.com/portal/hemeroteca/tipos-de-petroleo.html)

En la tabla a continuación se permite apreciar de manera directa los diferentes valores de poder calorífico de los combustibles (tabla XI)

**Tabla XI. Valores caloríficas del bunker**

<b>Fuel-Oil No.1</b>	<b>Designación</b>	<b>API</b>	<b>Btu/Gal</b>
1	Doméstico liviano	38-40	136000
2	Doméstico mediano	34-36	138500
3	Doméstico pesado	28-32	141000
4	Industrial liviano	24-26	145000
5	S.industrial mediano	18-22	146500
6	S.industrial pesado	14-16	148000

Fuente: [www.power.com.mx/gt\\_combustibles.htm](http://www.power.com.mx/gt_combustibles.htm)

La tabla XII se muestra el volumen de aire requerido, la tabla XIII se muestra el porcentaje de oxígeno en los gases de combustión en relación al porcentaje de aire en exceso.

La figura 6 se muestra el porcentaje de O<sub>2</sub> y Co versus aire en exceso, la figura 7 se muestra el calor de combustión versus la gravedad API.

**Tabla XII. Volumen de aire requerido**

<b>Bunker (Densidad en g./m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen de aire requerido/Volumen de gas</b>	
	<b>m<sup>3</sup> aire/ m<sup>3</sup> combustible</b>	<b>Pie<sup>3</sup> aire/ galones combustible</b>
1 (805.1)	9176	1296
2 (848.2)	9576	1353
4 (900.9)	10054	1420
5 (932.0)	10301	1455
6 (962.0)	10563	1492

Fuente: Mejoramiento de la eficiencia de operación en calderas de vapor

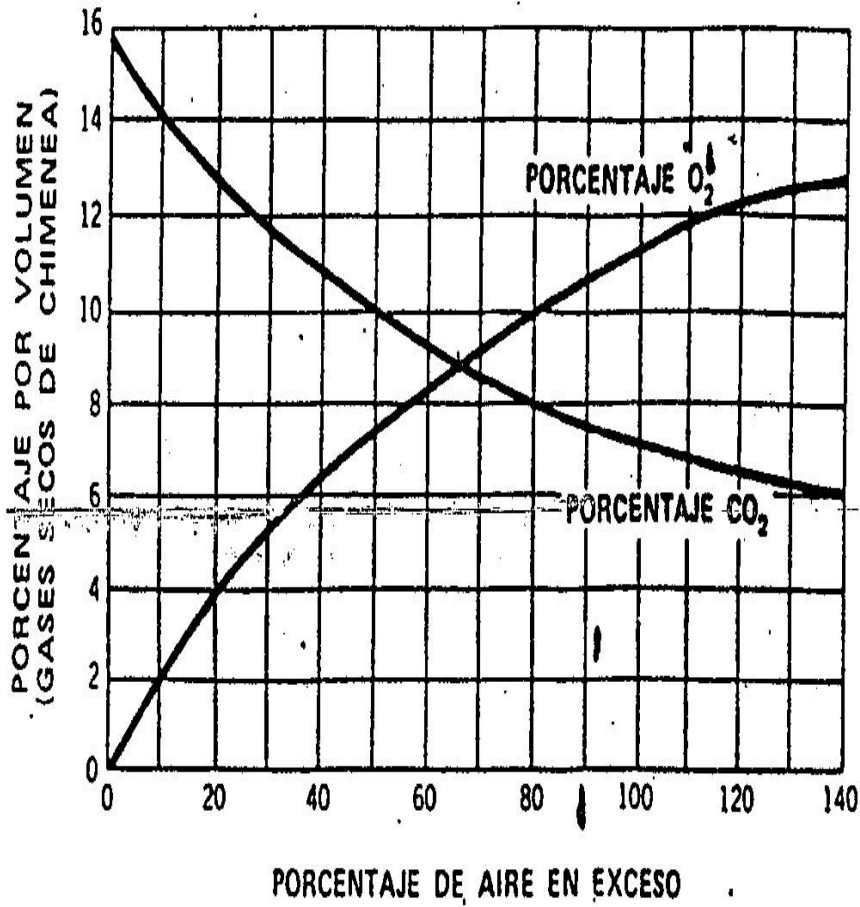
**Tabla XIII. Relación de 1% aire en exceso**

<b>Combustible</b>	<b>Porcentaje de aire</b>							
	0	1	5	10	20	50	100	200
<b>Gas natural</b>	0	0.25	1.18	2.23	4.04	7.83	11.4	14.7
<b>Propano</b>	0	0.23	1.08	2.06	3.75	7.38	10.9	14.3
<b>petróleo No.2</b>	0	0.22	1.06	2.02	3.69	7.29	10.8	14.2
<b>Petróleo No.6</b>	0	0.22	1.06	2.01	3.67	7.26	10.8	14.2

Fuente: Mejoramiento de la eficiencia de operación en calderas de vapor

**Figura 6. Porcentaje de aire en exceso vrs porcentaje por volumen**

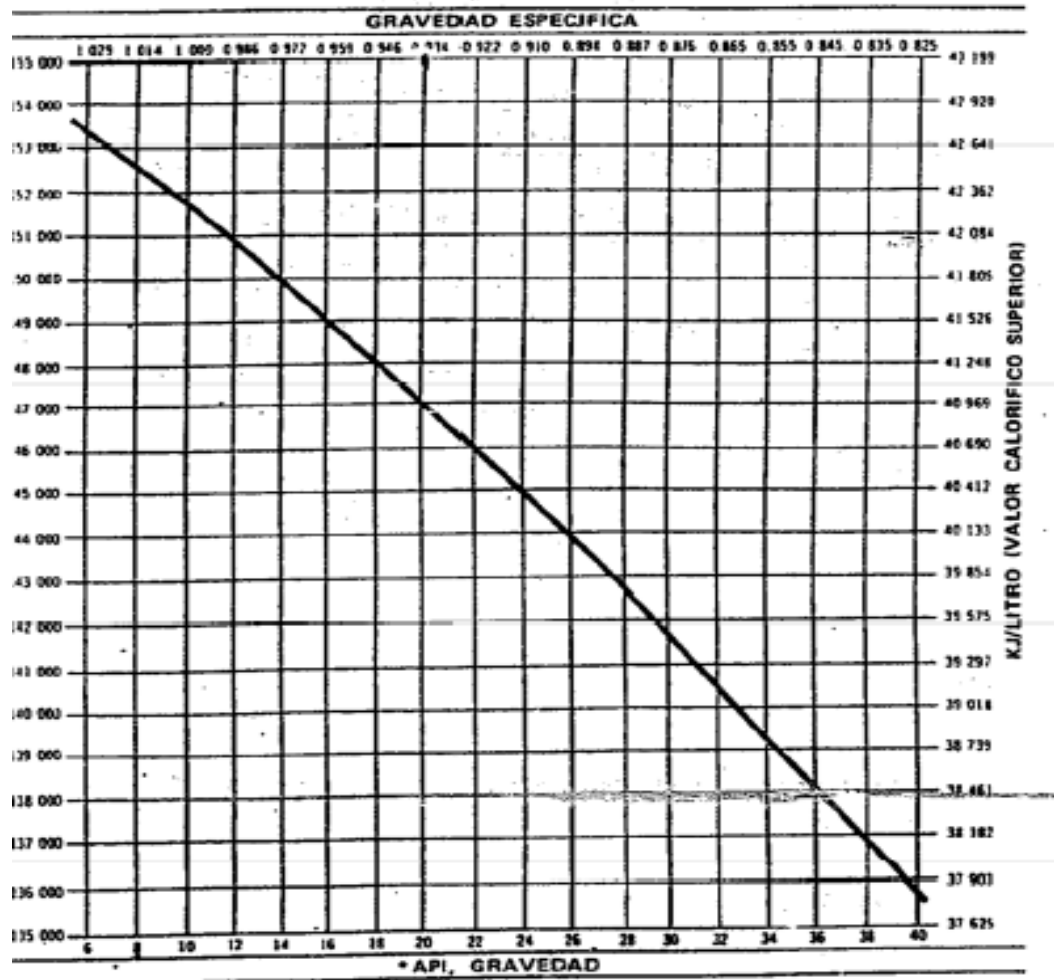
O<sub>2</sub> Y CO<sub>2</sub> vs. AIRE EN EXCESO



Fuente: Mejoramiento de la eficiencia de operación en calderas de vapor

Figura 7. Calor de combustión vs la gravedad

**CALOR DE COMBUSTION DE COMBUSTIBLES  
RELACION APROXIMADO\* DE BTU/GRAVEDAD**



\* Valores derivados de esta gráfica no necesariamente estarán de acuerdo con valores de calentamiento mostrados para combustibles específicos en la Tabla 1 de valores típicos para petróleos (Fuel Oils). Esto es porque la gráfica no permite variaciones por el contenido de azufre.

Fuente: Mejoramiento de la eficiencia de operación en calderas de vapor



### **3. ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO**

#### **3.1 Programa de producción de biomasa**

Se definió un horizonte de planificación y evaluación de 5 años. Se partió con una siembra de 100 hectáreas anuales, y se tomo en cuenta la producción de 20 toneladas hora, esta capacidad de producción corresponde a la alimentación de la caldera No. 6 por hora, trabajando 6 meses en el tiempo de no zafra. Como en la practica el aprovechamiento de la capacidad instalada se incrementa paulatinamente en la medida que el personal adquiere la destreza indispensable para la producción de 22 MW para el cumplimiento diario en la programación del Mercado Mayorista y este es el conjunto de actividades de generación, transporte, distribución y comercialización de energía eléctrica dentro del sector eléctrico del país.

#### **3.2 Inversión fija**

Comprende la adquisición de activos fijos tales como los terrenos donde se sembrará eucalipto, la maquinaria que se está utilizando en la producción chip de madera. En la tabla XIV se detallan los costos de los activos fijos

**Tabla XIV. Presupuesto de inversión fija**

No.	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio unitario (\$/unidad)	Subtotal Costo(\$)
1	Arrendamiento del terreno	1000	Hectáreas	400	400,000.00
2	Cuidados culturales	1000	Hectáreas	77.65	77,650.00
3	Silvicultura	1000	Hectáreas	56	56,000.00
4	Protección forestal	1000	Hectáreas	50	50,000.00
5	Otros(área agrícola)	1000	Hectáreas	258.7	258,700.00
6	Obra civil(infraestructura	400	Metros cuadrados	25	10,000.00
7	Obra civil (complementaria)	60	Metros cuadrados	30	1,800.00
8	Maquinaria	1	Unidad	100,000	100,000.00
9	Herramientas para mantenimiento	3	Unidad	1200	3,600.00
10	Equipo de transporte	5	Unidad	30,000	150,000.00
11	Instalación Eléctrica	1	Unidad	10,000	10,000.00
12	Instalación fajas	1	Unidad	8,000	8,000.00
13	Mobiliario	1	Unidad	2,000	2,000.00
	<b>Total de Inversión</b>				<b>1,127,750.00</b>

Fuente: Industria azucarera

Para instalar la máquina desfibadora se utilizó un espacio de 400 metros cuadrados con su respectiva faja, y se hizo una instalación eléctrica nueva con su respectivo arrancador.

### **3.3 Capital de trabajo**

El capital de trabajo para el proyecto de producción de energía eléctrica por medio de biomasa chip de madera fue absorbida por la Industria azucarera

por tener liquidez y poder aportar en el proyecto sin requerimiento de ningún préstamo.

### 3.4 Costos de generación de bunker y chip de madera

Los costos de producción se estimaron a partir de las necesidades técnicas de los insumos y de sus respectivos precios. Los datos de base fueron obtenidos de la investigación a campo, se determina en la tabla XV detalladamente.

**Tabla XV. Costos de generación con bunker**

Cambio de moneda:	<b>7.65</b>	\$
Contrato de venta de energía no zafra	22000	kW
Consumos internos(Ingenio)	800	kW
<b>PRODUCCIÓN TURBO 6 PARA COMPLETAR: (22 MW + 800kW)</b>		
Nivel de producción	24,478.83	kW
% auxiliares	7.1%	
EFF(lb/gl)	102.77	lb/gl
EEF(lb/kW.)	9.44	lb/Kw.
EFF(kW./gl) bruta	10.89	kW/gl
Consumo de auxiliares	1,678.83	kW
disponibilidad de venta	22,000.00	kW
Consumo de bunker	53964.42	gl/día
libras de vapor consumidas	231,080.15	lb/hr
Costo de bunker en ingenio (incluye transporte e IVA)	0.75035	\$/gl
Pesaje y control	0.00125	\$/gl
<b>Costo bunker</b>	<b>40,559.71</b>	<b>\$/día</b>

Fuente: Industria azucarera

A continuación se presenta la tabla XVI, los costos de producción con madera.



**Tabla XVI. Costos de generación con chip de madera**

Porcentaje de producción entre bunker y chip	100%	
MW DEJADOS DE PRODUCIR CON BUNKER	24478.83	kW
Nivel de producción	0	kW
Consumos internos	800	kW
consumo de auxiliares	0	kW
Disponibilidad de venta	-800	kW
Consumo de bunker	0	gl/día
Lbs. de vapor consumidas	0	lb/hr
Bunker dejado de consumir	53964.42	gl/día
Lbs de vapor dejadas de consumir	231080.1	lb/hr
Costo de bunker en ingenio (incluye transporte e IVA)	0.639708	\$/gl
Pesaje y control de bunker	0.00125	\$/gl
Costo bunker	0	\$/día
<b>MW PRODUCIDOS EN TURBO 6 CON BIOMASA DE MADERA</b>		
Disponibilidad de producción	24539.88	kW
Consumo de auxiliares	1739.877	kW
Disponibilidad de venta	22800	kW
EEF(lb/Kw.)	9.44	lb/ kW
Lbs. de vapor consumidas	231656.4	lb/hr
EEF(lb_vapor/lb_biomasa)	4.052363	lb/lb
Cenizas	1	%
Poder calorífico de la biomasa seca	9071.367	BTU/lb
Calor necesario	10621.97	MBTU/día
Compra de biomasa con humedad % 20.00	731.8334	ton/día
Árboles/hectárea	950	arb/ha
Biomasa/hectárea	105	ton/ha
Hectáreas necesarias	6.969842	ha/día
Densidad del biomasa (camión)	35	lb /pie^3
Capacidad de transporte, plataforma 2 X 40	65.15309	ton/viaje
costo de equipo de transporte, plataformas de 40 pies	9.50	Q./Km.
Cantidad de viajes	11.23252	Viaje
Distancia al campo	10	Km.
costo total de transporte (incluye IVA)	312.455	\$/día
precio del biomasa	21	\$/ton
Pesaje y control	0.04	\$/ton
Manejo y carga de camiones	0.80	\$/ton
Manejo y descarga de camiones (patio)	0.70	\$/ton
Chipiado de madera en ingenio	0.20	\$/ton
Bunker dejado de consumir	54099	gl/día

Ahorro de bunker	34675.19	\$/día
Costo total de la biomasa	16954.35	\$/día
<b>AHORRO</b>	<b>23605.36</b>	<b>\$/día</b>

Fuente: Industria azucarera

Haciendo el comparativo entre costo y beneficio de los dos tipos de combustibles se hace notar que producir energía eléctrica con chip de madera tendríamos un ahorro significativo de 23605.36 dólares diarios. Esto quiere decir que se producirá energía más barato con el mismo índice de eficiencia en la red de energía.

En la tabla XVII, se resume los requerimientos y costos de mano de obra directa, se supone una disminución del 10% en las horas hombre de trabajo (por faltas, permisos, incapacidades, etc.) y se incluye un adicional de 36 % por cargas sociales

**Tabla XVII. Requerimientos y costos de la mano de obra directa**

<b>Años</b>	<b>Requerimientos (No. operarios)</b>	<b>Costo anual</b>
1	18	Q 7,560,000.00
2	20	Q 9,072,000.00
3 a 5	22	Q 10,080,000.00

Fuente: Industria azucarera

Para la mano de obra indirecta se estimó una necesidad de 10 operadores por año (ayudantes) para cubrir las necesidades como limpieza del área y ayudar la operación del chip de madera, que representa un costo de Q. 36,600 por año.

### 3.5 Resultados del análisis económico

En la tabla XVIII muestra los ingresos esperados por el proyecto año tras año, según el programa de producción. Bajo el supuesto de que se este con el 100% de disponibilidad en la producción de energía durante 5 años

**Tabla XVIII. Ingresos de facturación industria azucarera**

Venta de Energía Eléctrica				Cargo variable	Precio	Total
Contador PQ-0508A017-03				0.09935		
Período:	01-Apr-06 00:00	al	2/5/2007 0:00			
Energía (kwh)					11,767,664.48	
Precio (\$./kwh) potencia garantizada zafra 2007					0.034	
Tasa promedio ponderado del día de toma de lecturas					7.65	
Precio promedio del barril en \$. según aparece en Platt's					47.39738	
Precio base del barril de combustible en \$.					16.22	
Total a cobrar por energía						1,169,156.59
IVA ( 12 % )						140,298.79
Total						1,309,455.38
Período:	01-Apr-06 00:00	al	2/5/2007 0:00			
Potencia (kw) es la potencia firme contratada multiplicada por una fracción cuyo numerador es la suma de los productos de las potencias registradas por debajo del 85% multiplicadas por las horas durante las cuales ocurrió la restricción más el producto de la potencia firme contratada multiplicado por las horas del mes en que no hubo restricción; y cuyo denominador es el producto de las horas del mes de facturación multiplicada por la potencia firme del período					3,267.97	
Precio (\$./kw) potencia garantizada zafra 2007, sobre:				25,000	19.41	
Tasa promedio ponderado del día de toma de lecturas					7.65	
Días de operación en el período de potencia garantizada					29	
Días de mes de facturación					30	
Total a cobrar por potencia						469,075.00
IVA ( 12 % )						56,289.00
Total						525,364.00
Total a cobrar						1,834,819.38

El monto total a cobrar es de \$1,834,819.38, con una disponibilidad del 100%, tendríamos que anualmente se estaría percibiendo

<b>Años</b>	<b>Producción</b>	<b>Ingreso (\$)</b>
1 a 5	25 Mw	22,017,832.50

Fuente: Industria azucarera

Los costos de producción que genera el proyecto donde esta relacionando el costo variable y el total de costo fijo, se resume en la tabla XIX.

**Tabla XIX. Costos de proyecto (U\$)**

<b>Concepto/ años</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3 al 5</b>
Volumen de producción (MW)	25	25	25
Materia prima	3,679,200.00	3,679,200.00	3,679,200.00
Otros insumos	17,520.00	17,520.00	17,520.00
Mano de obra directa	7,560,000.00	9,072,000.00	10,080,000.00
Total costo variable	3,729,661.18	3,740,641.57	3,751,621.96
Mantenimiento	2,500,000.00	2,500,000.00	2,500,000.00
Mano de obra indirecta	36,600.00	36,600.00	36,600.00
Costo de administración	2,175,000.00	2,175,000.00	2,175,000.00
Depreciación	240,000.00	240,000.00	240,000.00
Cargos por servicio de agua	250,000.00	250,000.00	250,000.00
Cargos por servicio de luz	325,000.00	325,000.00	325,000.00

Total costo fijo	2,990,000.00	2,990,000.00	2,990,000.00
Costo total de producción	3,936,121.18	3,947,101.57	3,958,081.96

Fuente: Industria azucarera

El costo total de producción es de \$ 3,936,121.18 en el primer año de funcionamiento, este monto se incrementa un 0.02 % en el segundo año y un 0.05 % en tercer año. Si bien se reconoce la alta incidencia de los costos fijos en el costo total para el primer año. Los costos variables aumentan a un ritmo anual de 0.029 % y el tercer al quinto año 0.058 %, acorde con la producción que hay en el ingenio. De los componentes del costo variable, el costo de la materia prima es el que representa el mayor peso el 98 % el cual es razonable, el costo de la mano de obra es del 1 % del total de los costos variables. Entre los componentes del costo fijo, la depreciación de los activos representa un 20% del valor real. Los gastos de administración ocupa el primer lugar de la participación con 70% de los costos fijos. La información que se obtuvo en el análisis económico sirvió de base para efectuar la evaluación económica. Las técnicas de rentabilidad descansan bajo el supuesto de que se esta en condiciones de certidumbre y de inflación cero. En la tabla XX se presenta el flujo de caja del proyecto y los valores obtenidos para el VAN, TIR.

**Tabla XX. Flujo de caja (Q)**

No.	Concepto/ años	0	1	2	3 al 5
1	Ingreso de venta		22,017,832.50	22,017,832.50	22,017,832.50
2	Costos variables		3,729,661.18	3,740,641.57	3,751,621.96
3	Contribución marginal (1-2)		18,288,171.32	18,277,190.93	18,266,210.54

4	Costos fijos sin depreciación		2,750,000.00	2,750,000.00	2,750,000.00
5	Depreciación		240,000.00	240,000.00	240,000.00
6	Utilidades antes de impuestos (3-4-5)		15,298,171.32	15,287,190.93	15,276,210.54
7	Impuesto a las ganancias		2,322,043.86	2,320,377.19	2,318,710.53
8	Utilidades después de impuesto (6-7)		12,976,127.46	12,966,813.74	12,957,500.01
9	Depreciación		240,000.00	240,000.00	240,000.00
10	Inversión del terreno	-400,000.00			
11	Otras inversiones en capital fijo	-727,750.00			
12	Inversión en capital de trabajo	0			
13	Recuperación inversión en terreno				400,000.00
14	Recuperación capital de trabajo				
15	Flujo de caja	1,127,750.00	13,216,127.46	13,206,813.74	13,597,500.01

VAN= 31,439,992.25 TIR 11.71%

Fuente: Industria azucarera

Las técnicas de evaluación VAN, TIR, proporcionan en este caso un resultado idéntico es decir el mismo criterio de selección del proyecto. A la tasa de rendimiento que se tomó es del 11%, los valores obtenidos con los dos

indicadores conducen a la aceptación del proyecto. Para el Valor actual neto se utilizo

$$VAN = -I + \sum_{n=1}^n \frac{Q_n}{(1+r)^n}$$

Donde

$Q_n$  representa el flujo de caja.

$I$  es el valor del desembolso inicial de la inversión.

$N$  es el número de períodos considerado.

La ecuación que se utilizo para la Tasa Interés de retorno es:

$$VAN = -I + \sum_{n=1}^n \frac{Q_i}{(1+TIR)^i} = 0$$

Cuando el VAN es positivo se manifiesta que el proyecto esta en condiciones de devolver el capital invertido a pagar a un 11% de interés y de generar excedentes por un monto de 31,439, 992.25 en los cinco años. Dicho en otros términos, el VAN positivo significa que el retorno esperado de la inversión es mayor que el 11% anual. Efectivamente, ese retorno de 11.71% anual, si se exigiesen retornos del capital superiores al 11.71 /% el proyecto no sería recomendable.

### **3.6 Costos actuales de producción de energía en Guatemala**

Haciendo los cálculos de los costos variables de generadoras que utilizan bunker y diesel en Guatemala utilizando las siguientes fórmulas:

$$CVG = CC + CVO \& M + CAP$$

$$CC = (HR/(fchr * 1000)) * PC * (1 + FPC)$$

$$CAP = FAYP * (HR/(fchr * 1000)) * (VI + T \& S + CP) * (1 + FPC) + CVO \& M$$

$$CVG = ((HR/(fchr * 1000)) * (VI + T \& S + CP) * (1 + FPC) + CVO \& M + (FAYP * ((HR/(fchr * 1000)) * (VI + T \& S + CP) * (1 + FPC) + CVO \& M)))$$

Al realizar y el cálculo podemos determinar el costo en US\$/MWH asumiendo la siguiente tabla

**Tabla XXI: Costo variable en generación de bunker y diesel**

Abreviatura	Nombre	Bunker	Diesel
Fchr (MMBTU/BBL)	Fac. Conv. BTU/KWH a BBL/MWH	6.3436	5.736
HR (BTU/KWH)	Rendimiento especifico	9702.458	13665.4
CVO&M (\$/MWH)	Operación y mantenimiento	12.51	8.954
FPC	Factor de pérdidas de combustible	1.56%	0.50%
FAYP	Fac. de ajuste por regimen de despacho en arranque y parada	0.90%	3.43%
VI (\$/BBL) Variable	Valor de combustible en inventario al dia de la declaración	79	126.276
T&S (\$/BBL)	Transporte y seguro	2.224	2.224
CP (\$/BBL)	Cargos Portuarios	6.52	6.52

Fuente: Generadora combustión interna



Al tener todos los valores podemos utilizar las ecuaciones para sacar nuestro costo de energía dando como resultado el costo variable en la generadora.

**Tabla XXII: Costo variable en generadora de bunker y diesel**

<b>Cálculo para bunker</b>		<b>Cálculo para diesel</b>	
<b>FAYP</b>	0.90%	<b>FAYP</b>	3.43%
<b>HR</b>	9,702.46	<b>HR</b>	13,665.40
<b>Fchr</b>	6.34	<b>fchr</b>	5.74
<b>VI</b>	79.00	<b>VI</b>	126.28
<b>T&amp;S</b>	2.22	<b>T&amp;S</b>	2.22
<b>CP</b>	6.52	<b>CP</b>	6.52
<b>FPC</b>	1.56%	<b>FPC</b>	0.50%
<b>CVO&amp;M</b>	12.51	<b>CVO&amp;M</b>	8.95
<b>CVG</b>	<b>150.149 US\$/MWH</b>	<b>CVG</b>	<b>343.642 US\$/MWH</b>

Fuente: Generadora combustión interna

Al realizar el cálculo aproximadamente de la generadora por medio de bunker y diesel y comparar los costos son más altos que la producción de energía con la generadora que utiliza madera. La AMM manda cada día los precios en las cuales las generadoras les sale el costo de energía viendo la siguiente tabla

**Tabla XXIII: Precios US\$/MWH en generadoras de Guatemala**

<b>P L A N T A</b>	<b>Potencia disponible MW</b>	<b>Costo en US\$/MWH mínima</b>	<b>Costo en US\$/MWH media</b>	<b>Costo en US\$/MWH máxima</b>
HIDROELÉCTRICA	0.000	0	0	0
GEOTERMICAS	21.899	1	1	1
HIDROELÉCTRICA	10.377	1	1	1
GEOTERMICAS	15.318	1	1	1
HIDROELÉCTRICA	4.300	2.68	2.68	2.68
HIDROELÉCTRICA	16.225	3.15	3.15	3.15
HIDROELÉCTRICA	2.209	4.07	4.07	4.07
HIDROELÉCTRICA	46.798	4.97	4.97	4.97
HIDROELÉCTRICA	13.426	6.14	6.14	6.14
HIDROELÉCTRICA	10.000	7	7	7
PLANTAS TÉRMICAS	4.535	8	8	8
HIDROELÉCTRICA	37.258	8	8	8
HIDROELÉCTRICA	11.599	8.9	8.9	8.9
HIDROELÉCTRICA	3.440	8.9	8.9	8.9
HIDROELÉCTRICA	79.425	9.07	9.07	9.07
HIDROELÉCTRICA	9.682	9.9	9.9	9.9
HIDROELÉCTRICA	25.507	9.91	9.91	9.91
HIDROELÉCTRICA	5.031	11.36	11.36	11.36
HIDROELÉCTRICA	2.100	11.37	11.37	11.37
HIDROELÉCTRICA	0.000	11.6	11.6	11.6
HIDROELÉCTRICA	66.344	12.4	12.4	12.4
HIDROELÉCTRICA	13.614	14.08	14.08	14.08
PLANTAS TÉRMICAS	1.100	22.25	22.25	22.25
PLANTAS TÉRMICAS	10.000	22.25	22.25	22.25
PLANTAS TÉRMICAS	23.000	22.51	22.51	22.51
PLANTAS TÉRMICAS	45.000	24.69	24.69	24.69
PLANTAS TÉRMICAS	17.400	25	25	25
PLANTAS TÉRMICAS	0.000	30.6	30.6	30.6
PLANTAS TÉRMICAS	9.724	35	35	35
PLANTAS TÉRMICAS	0.000	75	75	75
MOTORES RECIPROCANTES	131.128	87.67	87.67	87.67
MOTORES RECIPROCANTES	156.779	118.3	118.3	118.3
MOTORES RECIPROCANTES	14.979	121.7	121.7	121.7
MOTORES RECIPROCANTES	14.938	121.7	121.7	121.7

MOTORES RECÍPROCANTES	15.090	121.7	121.7	121.7
MOTORES RECÍPROCANTES	14.951	121.7	121.7	121.7
MOTORES RECÍPROCANTES	5.151	121.7	121.7	121.7
MOTORES RECÍPROCANTES	10.338	122.02	122.02	122.02
MOTORES RECÍPROCANTES	10.338	122.02	122.02	122.02
MOTORES RECÍPROCANTES	10.338	122.02	122.02	122.02
MOTORES RECÍPROCANTES	10.338	122.02	122.02	122.02
MOTORES RECÍPROCANTES	31.554	123.95	123.95	123.95
MOTORES RECÍPROCANTES	125.402	124.76	124.76	124.76
HIDROELÉCTRICAS	271.799	126.07	126.07	126.07
HIDROELÉCTRICAS	60.853	127.2	127.2	127.2
MOTORES RECÍPROCANTES	4.944	128.66	128.66	128.66
MOTORES RECÍPROCANTES	37.249	130.3	130.3	130.3
MOTORES RECÍPROCANTES	7.639	130.46	130.46	130.46
MOTORES RECÍPROCANTES	13.814	133.09	133.09	133.09
MOTORES RECÍPROCANTES	15.906	133.29	133.29	133.29
MOTORES RECÍPROCANTES	114.729	136.95	136.95	136.95
PLANTAS TÉRMICAS	26.723	147.28	147.28	147.28
PLANTAS TÉRMICAS	30.000	147.28	147.28	147.28
PLANTAS TÉRMICAS	16.000	147.28	147.28	147.28
PLANTAS TÉRMICAS	20.000	147.28	147.28	147.28
PLANTAS TÉRMICAS	38.100	147.28	147.28	147.28
PLANTAS TÉRMICAS	35.430	147.28	147.28	147.28
PLANTAS TÉRMICAS	37.647	160.43	160.43	160.43
PLANTAS TÉRMICAS	5.823	208.33	208.33	208.33
MOTORES RECÍPROCANTES	12.850	216.29	216.29	216.29
MOTORES RECÍPROCANTES	5.048	227.94	227.94	227.94
TURBINAS DE GAS	22.829	230.27	230.27	230.27
MOTORES RECÍPROCANTES	0.000	241.49	241.49	241.49
MOTORES RECÍPROCANTES	33.402	246.63	246.63	246.63
MOTORES RECÍPROCANTES	3.200	257.54	257.54	257.54
TURBINA DE GAS	0.500	276.37	276.37	276.37
MOTORES RECÍPROCANTES	0.000	313.95	313.95	313.95
MOTORES RECÍPROCANTES	0.000	337.9	337.9	337.9

Fuente: AMM

## **4. GENERADORES DE VAPOR ACUOTUBULARES DE BIOMASA DE EUCALIPTO**

### **4.1 Alimentación biomasa de eucalipto**

La alimentación de biomasa de eucalipto se realiza en el horno distribuidor o de alimentación por aspersión, por ser el más moderno y cuyo uso se ha difundido considerablemente en la Industria azucarera.

La alimentación de biomasa de eucalipto se da a través de una tolva y un alimentador compuesto por un motor eléctrico de 7 HP. Figura 8.

**Figura 8. Alimentadores biomasa de eucalipto**



Fuente: Industria azucarera

En la automatización, esta alimentación se registra a través de un porcentaje de alimentación, que da solamente una idea superficial y abstracta de la cantidad de bagazo que esta entrando a la caldera. Este % de alimentación esta gobernado por el valor de control de la presión.

Lo que se persigue que el alimentador rotativo es que, a medida que se aumenten las revoluciones por minuto de este, entra más cantidad de eucalipto, por el volumen libre que hay en el alimentador y que es ocupado por la biomasa, si aumentan la señal de presión hacia el motor y esto se manifiesta en el monitor de la computadora por un aumento en el porcentaje de alimentación.

A través de las observaciones se ha logrado apreciar que las señales de presión regularmente usadas son de 4.5 a 9 psi y cuyos % de alimentación correspondientes son de 12.5 % como mínimo y 50% como máximo.

#### **4.2 Equipo de combustión**

Para que se queme el chip de madera de eucalipto se utiliza un alimentador que esta compuesto por.

- Alimentador rotativo
- Conducto o canal cerrado (Chifle)
- Parrilla

Además de esto se necesita del equipo auxiliar como los ceniceros y lo que se refiere al sistema de aire (*Over-fire*)

#### **4.3 Tipos de horno**

Existen 4 tipos principales de hornos,

- El horno de Cook u horno de herradura
- El horno ward
- El horno de gradilla
- El horno distribuidor

Los primeros tres no se utilizan, ya que no son muy útiles en la actualidad, por lo que se utiliza más en los ingenios es el horno distribuidor de alimentación por aspersión.

#### **4.3.1 Horno distribuidor o alimentación por aspersión**

Este modelo más utilizado, consta de un espacio situado entre los tubos de la caldera y una parrilla especial plana o levemente inclinada (Pin- Hole).

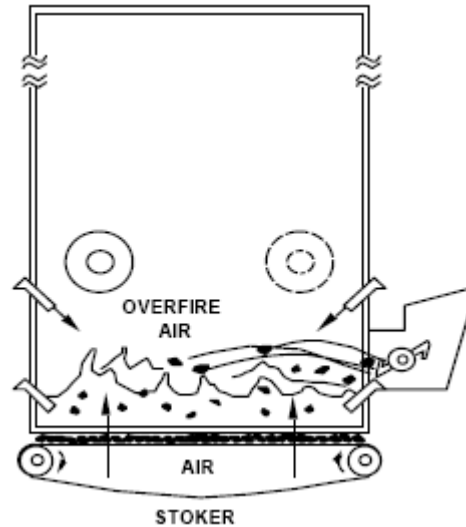
La parrilla puede ser:

- Fija
- Basculante, para remover las cenizas con la mano
- Mecánica, con descarga continua de cenizas, es recomendada para capacidades de 70,000 Lbs/Hr. o mayores.

La parte original del horno distribuidor se efectúa por medio de una caída, a través de un chifle, pero, en el momento en que se descarga en el horno se sopla aire a presión por medio de un tubo perforado localizado justamente debajo de esta caída, la cual corre longitudinalmente a lo largo del fondo de la misma. A esto se le llama Over Fire, el cual empuja al chip de eucalipto violentamente al horno. A medida que cae al horno, en esta forma el chip de eucalipto se evapora el agua o se seca y esto completa su combustión en la parrilla.

La mayor parte entra por abajo a través de los agujeros de la parrilla y también ayuda a la combustión en suspensión. Se considera que este tipo de horno permite reducir el exceso normal de aire al 30% (en lugar del 40 al 50%) y consecuentemente mejora la eficiencia. (Ver figura 9.)

**Figura 9. Spreader stoker**



Fuente: [www.coen.com/i\\_html/pdf/fordmotor.pdf](http://www.coen.com/i_html/pdf/fordmotor.pdf)

#### **4.4 Cámara de combustión**

##### **4.4.1 Volumen de la cámara de combustión**

El volumen de la cámara de combustión debe ser proporcional al volumen de los gases necesarios para la combustión. Este generalmente está relacionado con la cantidad de calorías que libera por hora el combustible empleado.

Existe una cierta relación entre la superficie de calentamiento de la caldera y la cantidad de vapor que puede producir el volumen de la cámara de combustión puede también relacionarse con la superficie de calentamiento de la caldera.

Para hornos distribuidores del tipo Riley, Millar da un máximo de 400,000 Kcal/H/m<sup>2</sup>, pero, recomienda mantenerse alrededor de las 250,000, valor óptimo necesario para mejorar la eficiencia y disminuir la formación de cenizas.

El volumen (V) de la cámara de combustión esta dado por la siguiente fórmula

$$V = \frac{(B * N_i)}{250000}$$

Donde

V= volumen de la cámara de combustión, en metros cúbicos.

B= Peso del eucalipto quemado, en kg/H

Ni= Valor calorífico neto del eucalipto, en Kcal.

#### **4.5 Dimensiones del hogar**

Las dimensiones se debe considerar lo siguiente

- a) Longitud de la llama: el recorrido de los gases en combustión entre la parrilla y los tubos de la caldera debe ser por lo menos de 5 metros y de preferencia entre 7 y 8 metros. Nunca debe de exceder de 10 metros.
- b) Volumen de la cámara de combustión: el volumen del hogar viene dado por la fórmula por la ecuación anterior.
- c) Ancho de la caldera generalmente, viene dado por la superficie de calefacción que se proporciona por metro de ancho.

#### **4.6 Área de parrilla**

El área de parrilla es plana e igual al área de la sección transversal del hogar, dejando un espacio aproximado de 1 metro entre esta y la pared frontal del horno para la caída de las cenizas al cenicero. La parrilla es ligeramente inclinada y limpiada con sopladores de vapor (toberas) su área es relativamente mayor al área de la sección transversal del hogar.



#### **4.7 Peso de chip de eucalipto quemado por unidad el área de la parrilla por hora**

El trabajo de la parrilla de un horno se expresa por la cantidad de chip de madera quemado en esta parrilla por metro cuadrado de superficie de la misma. Este trabajo puede designarse por:

$$B = (\text{peso del bagazo quemado/ hora en la parrilla}) / \text{área de la parrilla}$$

Para obtener una combustión suficiente, es necesario relacionar la superficie de la parrilla a la cantidad de bagazo que se quema por hora.

#### **4.8 Superficie de calentamiento**

Las superficies de calefacción en una caldera acuotubular, esta dato por

- a) superficie de conveccion
- b) superficie de economizador
- c) sobrecalentador
- d) Precalentador de aire
- e) Superficie de la pared de agua

#### **4.9 Tiros**

Los principales tiros forzados en las calderas acuotubulares son: El tiro forzado y el tiro inducido.

Para regular la cantidad de aire que se necesita suministrar por el ventilador (tiro forzado) se abren o se cierran los deflectores del ventilador, suministrando la menor cantidad de aire cuando estos están cerrados y la mayor cantidad cuando están abiertos.

El tiro forzado es controlado por el valor de control de la presión y a su vez, regula la cantidad que entra a la caldera. Los gases a evacuar por el ventilador de Tiro Inducido regularmente, es controlado por los dampers, que no son más que una especie de paletas con un eje al centro que les permite abrir y cerrar, estando estas ubicadas antes del ventilador; la abertura o cierre de los

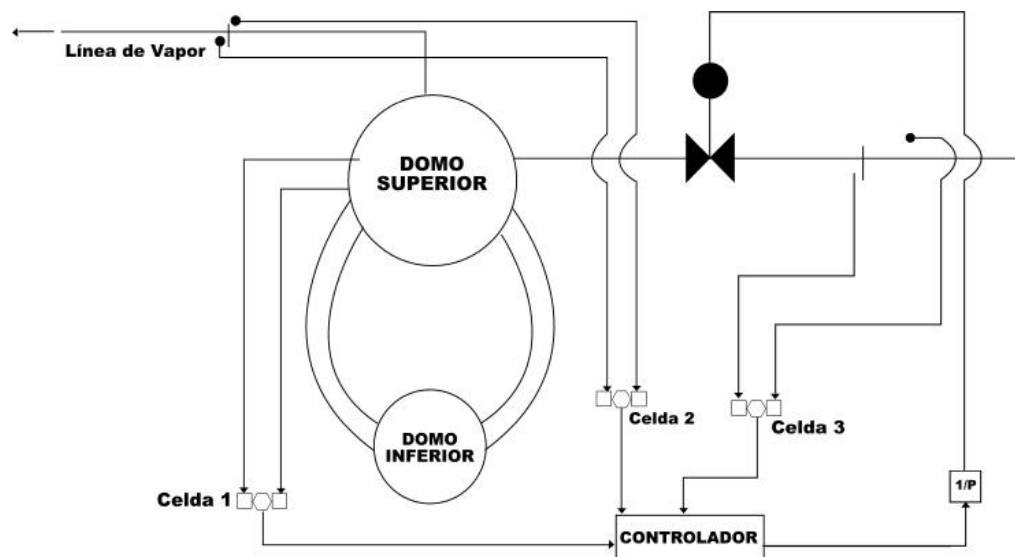
dampers es controlado por el valor de control de la presión de hogar, es decir, por el ajuste de presión de hogar.

#### 4.10 Principales controles automáticos en una caldera de vapor acuatubular de biomasa de eucalipto

##### 4.10.1 Control del agua en alimentación

En la figura 10, se muestra el diagrama del sistema de control de agua de alimentación de la caldera. En las celdas convertidoras de presión diferencial reciben señales del nivel del domo en la (celda 1) de la línea de vapor (celda 2) y de la línea de alimentación de agua (celda 3); estas con vierten las señales de presión en señales electrónicas y las envía al controlador que las procesa de acuerdo con el programa y las envía una señal electrónica a un convertidor de señales (I/P) que la convierte en una señal de presión abre o cierra la válvula neumática, que depende de las necesidades de agua en las calderas.

Figura 10. Diagrama del sistema del control del agua de alimentación



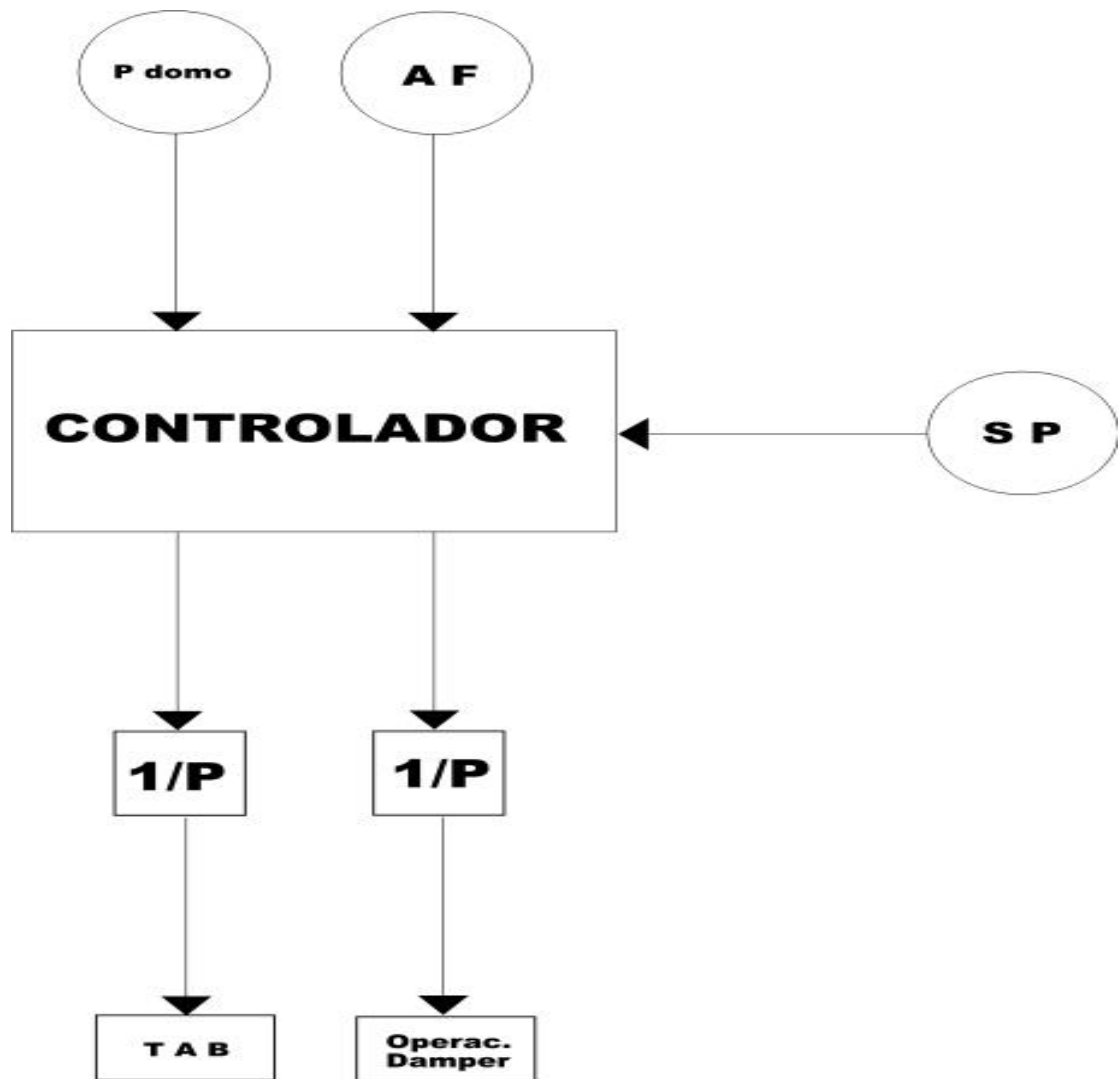
Fuente: [www.ucursos.cl/ingenieria/2008/1/EL42D/1/material\\_docente/objeto](http://www.ucursos.cl/ingenieria/2008/1/EL42D/1/material_docente/objeto)

#### **4.10.2 Control de la presión**

En la figura 11 se muestra el diagrama que representa el sistema de control de presión de la caldera por medio de un control del aire de combustión (tiro forzado) y del sistema de alimentación de bagazo. Este controlador recibe señales electrónicas de la presión del domo (P domo) de la presión del aire forzado (AF) y, además, un valor de referencia (SP) que es el valor de la presión que se desea mantener en la caldera.

Cuando el controlador recibe estas dos señales, las opera y realiza dos funciones: La primera es enviar una señal electrónica a convertidores (I/P) que la convierte en una señal de presión para accionar los tambores alimentadores de chip de madera que alimentan a la caldera. La segunda es enviar otra señal electrónica a un convertidor de señales (I/P), para que también la convierta en una señal de presión que accione los deflectores del ventilador del tiro forzado las cuales controlan el flujo de aire hacia el hogar.

Figura 11. Diagrama del sistema de control de la presión

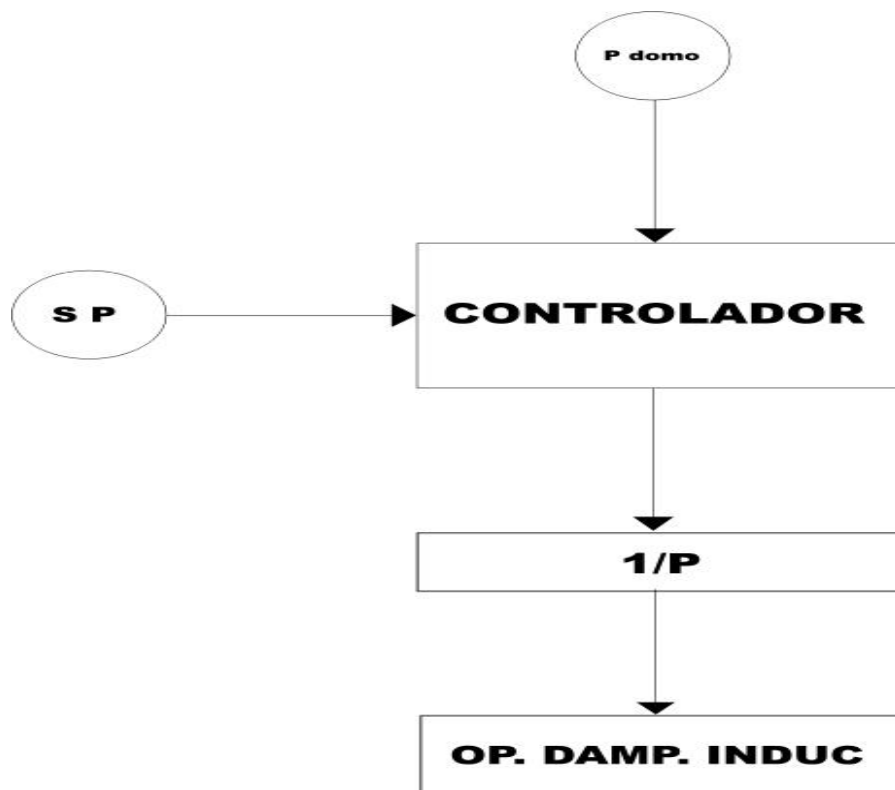


Fuente: Pantallas operativas en calderas

#### 4.10.3 Control del tiro en el hogar

En la figura 12 el controlador recibe una señal electrónica (TI) de la presión real que existe en el hogar y un valor  $s_p$ , introducido, exteriormente al controlador, el cual representa la presión que se desea mantener para que los gases sean evacuados, eficientemente. Cuando estos dos datos son operados por el controlador, este envía una señal electrónica a un convertidor de señales (I/P) que la convierte en una señal presión, que acciona el damper del ventilador de tiro inducido el cual abre o cierra el flujo de los gases expulsados de la caldera por la chimenea.

Figura 12. Diagrama del sistema de control del tiro en el hogar



Fuente: Pantallas operativas en calderas

#### 4.11 Eficiencia de un generador de vapor acuotubular de chip de eucalipto

En la tabla XXIV los datos registrados de la eficiencia y otros términos de importancia en un ensayo de análisis de la combustión de la caldera de la Industria azucarera. Datos recabados antes y después del precalentador de aire.

**Tabla XXIV. Eficiencia en caldera No.6 operando con chip de madera**

<b>OPERADOR:</b>	<b>16:30</b>	<b>21:30</b>	<b>02:30</b>	<b>07:30</b>	<b>12:30</b>	<b>05:30</b>	<b>10:30</b>
Temperatura. del hogar F	1326	1303	1300.8	1298	1323	1324.9	1227.7
Temperatura agua antes de economizador F	128	128	128.2	128.2	128.1	128.1	127.7
Temperatura gases antes del economizador F	590	586	589.6	593.2	590	590	572.7
Temperatura gases después de economizador	273	273	277	277.7	272.2	274.8	270
Presión de vapor salida de caldera psi	440	434.8	438.5	441.5	436.8	435.8	420
Flujo de vapor klb/h	117	115.9	116.6	117.4	116.7	116.6	96.3
Totalizador de vapor	152737	152746	152765	152778	152792	152803	152819
Temperatura de vapor sobrecalentado F	722	718.8	711.3	724.7	725.8	718.5	716.1
% Nivel de agua en el domo	17	16.6	16.4	16.5	17.1	16.6	17.2
Flujo de agua inyección gpm	244	236	240.07	255.5	233.8	245.6	194
% Dámper de tiro forzado	97	100	96	95.7	99.3	100	100
% salida alimentadores de bagazo	23.5	26	20.1	20.4	24.8	26	26
% Dámper de tiro inducido	100	100	100	100	100	100	100
% velocidad tiro inducido	43	43.5	42.5	43.1	43.5	43.9	42.7
% Oxígeno en gases	1	1.2	1.1	1.5	1.8	2	3.2
% Demanda del Máster	99.2	100	94.1	94.2	94.8	99.9	100
Ratio caldera	100	100	100	100	100	100	100
% velocidad bomba p. químico	88.3	87.9	89.1	89.3	90	88.7	62.5
psi salida de bomba de inyección	586	587.7	586.9	586	587.6	585.9	594.8

% nivel tk elevado	59	60.1	59.6	59.2	59.3	60	60
Apariencia de gases de chimenea	Blanco	Blanco	Normal	Normal	Normal	Normal	Blanco

Fuente: Industria azucarera

## **5. GENERADORES DE VAPOR ACUOTUBULAR DE BUNKER**

### **5.1 Alimentación de bunker**

Generalmente, el bunker es bombeado del tanque de almacenamiento diario, el cual sirve como depósito para alimentar a la caldera. Este tanque de día, para el caso de bunker, requiere de un calentamiento ( $60^{\circ}\text{C}$ ).

En el tanque de almacenamiento como el de día, debe de estar protegido contra pérdidas de calor, igual que las tuberías. Las bombas empleadas para el manejo de los combustibles líquidos son de desplazamiento positivo, recomendados para el diseño de tuberías las siguientes velocidades.

- a) succión de 0.1 a 0.2 m/s.
- b) descarga de 0.4 a 0.6 m/s.

### **5.2 Equipo de combustión**

Consiste un conjunto de monoblocks, dispuestos entre el depósito de almacenamiento y los quemadores, que incluyen todos los elementos necesarios para acondicionar el bunker de forma que adquiera las características que precisa para una buena pulverización. En ellos se verifican las operaciones del filtrado previo, bombeo, calentamiento y filtrado final. El bunker es importante que llegue a los quemadores con la viscosidad y temperatura adecuada para una buena combustión, por eso es que se instalan viscosímetros para regular el calentamiento. Un grupo de preparación para el bunker consta de:

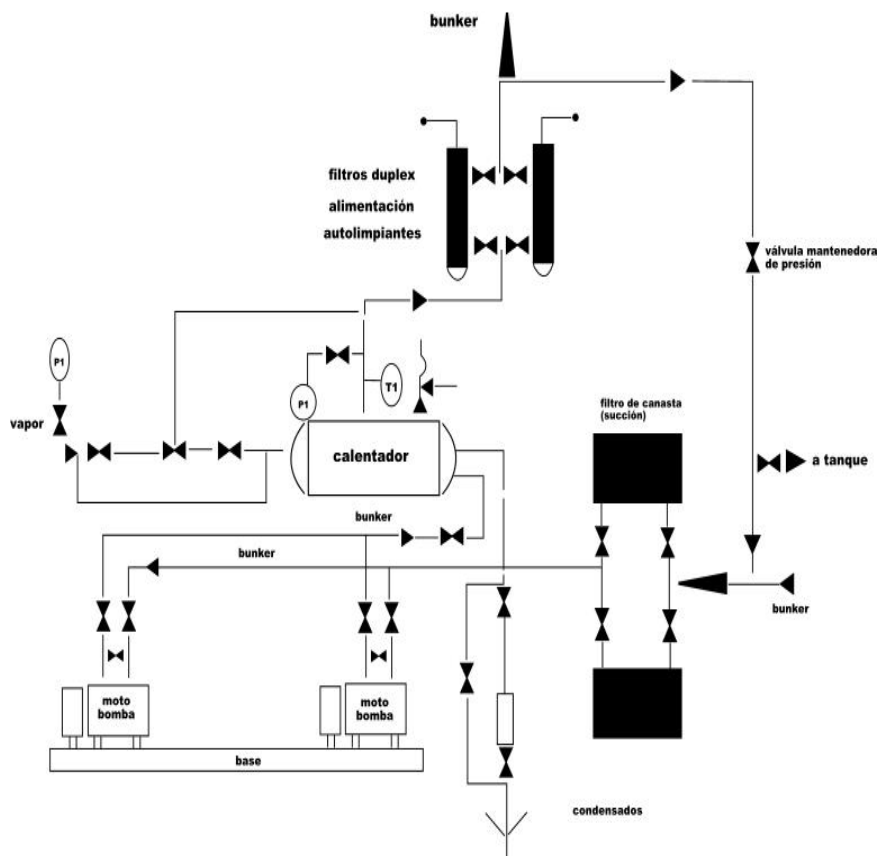
- a) Filtro de succión
- b) Bombas
- c) Calentadores (eléctrico o de vapor)
- d) Filtros de alimentación



- e) Regulaciones de presión y temperatura
- f) Tuberías
- g) Válvulas manuales
- h) Equipos de medición (manómetros, termómetros, viscosímetros, etc.)
- i) Base de quemadores

En la figura 13 se indican los accesorios precisos para la manipulación del bunker.

**Figura 13. Accesorios necesarios para el bombeo de bunker**



Fuente: Dibujo unifilar, Industria azucarera

### **5.2.1 Pre calentamiento de bunker**

En los sistemas de combustión para bunker por lo común es precalentar el combustible desde 90 a 120 °F, con el fin de reducir la viscosidad para facilitar el manejo y calentamiento del combustible desde 165 a 200 ° F, para reducir todavía la viscosidad, con el fin de tener una buena atomización adecuada. Se ha podido apreciar que la atomización correcta del bunker es cuando este llega al quemador con una temperatura que oscila entre 200 a 230°F.

### **5.2.2 Hogar**

La proporción de calor liberado y la temperatura sostenida del hogar, afectaran los materiales de las paredes del mismo y con tal motivo rigen su construcción. Si la temperatura o la erosión provocan la destrucción prematura de las paredes refractarias, lo indicado es colocar paredes enfriadas por agua. La cámara de combustión debe tener el espacio suficiente para contener la flama.

### **5.2.3 Quemador**

Los quemadores de bunker atomizan el combustible y lo mezclan íntimamente con el aire suministrado para la combustión, hace con aire ya precalentado. Cuando se cumplen estas dos condiciones se consigue obtener una combustión completa con un exceso de aire mínimo.

La atomización puede llevarse a cabo con aire, gas o vapor de agua, a presiones relativamente desde 24.84 a 99.35 Psig o por medios mecánicos. Algunas veces se utilizan como agentes atomizadores el gas natural y los gases sub-productos a presiones de 49.68 psig o más de mantener la ignición al quemar combustibles especiales.

El vapor de agua es un agente atomizador eficaz, pero, antieconómico. En condiciones muy favorables el consumo de vapor es de 0.1 a 0.2 Lb/Lb de fue quemado. El vapor da por el quemador puede tomar directamente de la caldera calentada por el quemador, pero, no se dispone de vapor para la puesta en marcha si es trata de una caldera sola y hay que recurrir a otros procedimientos para atomizar hasta que la caldera desarrolla presión. Otras desventajas del vapor de agua en la atomización son: perdidas de agua de la caldera, funcionamiento ruidoso, limpieza frecuente de los quemadores, perdidas caloríficas extras y aumento de la humedad de los gases de la chimenea, que hace bajar la temperatura del punto de rocío de los gases. Los atomizadores a base de vapor de agua no se suelen construir para más de 17 GPM de fuel.

### **5.3 Tipos de quemadores**

Existe una clasificación general de los quemadores de bunker, entre estos tenemos:

- a) Quemadores de vaporización
- b) Quemadores atomizadores de aceite

#### **5.3.1 Quemadores de vaporización**

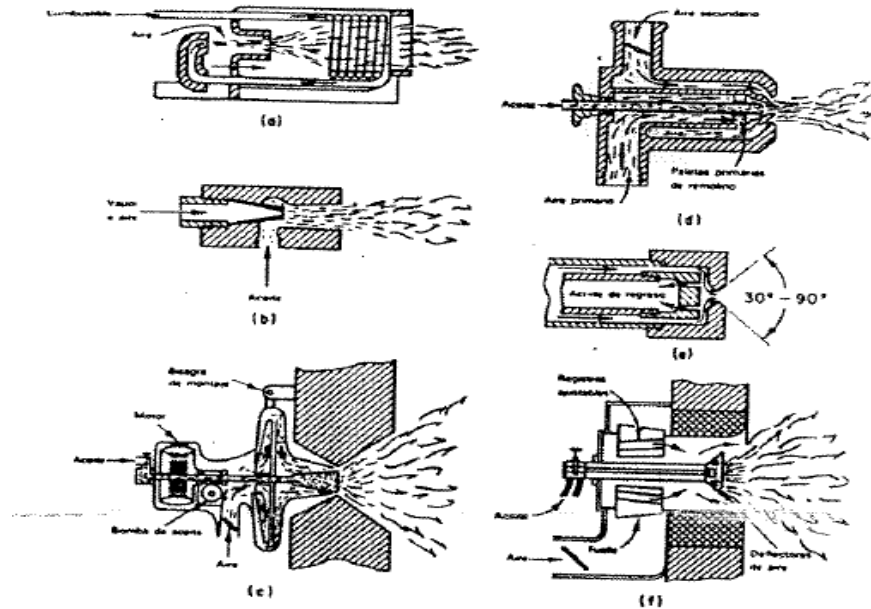
El calor de la flama convierte continuamente el combustible líquido en vapor en el aire de combustión, de modo que sostiene la flama.

#### **5.3.2 Quemadores atomizadores de aceite**

Rocían combustible desde una tobera, presiones de 100 a 300 Lb/plg<sup>2</sup>. o lo atomizan en aire o vapor a presiones de 0.5 a 200 Lb/plg<sup>2</sup>.

Se muestran los diferentes tipos de quemadores,

**Figura 14. Tipos de quemadores**



Fuente: [www.energia.inf.cu/iee-mep/SyT/CDG/Taller1BURE](http://www.energia.inf.cu/iee-mep/SyT/CDG/Taller1BURE)

### 5.3.3 Quemador de vaporización del tipo a presión

El petróleo pasa por la tubería del serpentín. Se utilizan queroseno o gasolina, de 0.1 a 8 Gal/H de 5 a 50 Lb/ Plg<sup>2</sup> de presión de combustible, con un índice de disminución de 3 a 1. Para sopletes, lámparas y equipos de quemador, portátiles, del tipo de sopletes. Inciso (a) de la figura 14.

### 5.3.4 Quemador de atomización de aire o de vapor de alta presión, tipo inyector o venturí

Utiliza petróleo de todos los grados, con los aceites pesados calentados para facilitar su circulación. Presión baja del petróleo, presión del vapor de 40 a 175 lb/plg<sup>2</sup>. Usa de 5 a 10% de aire o de 2 a 4 libras de vapor para la atomización. En las calderas, el 2% del vapor de salida se usa para la

atomización. El vapor contribuye a calentar el aceite y ayuda a reducir el hollín en la combustión. Inciso (b) de la figura 14.

### **5.3.5 Quemador de petróleo atomizador horizontal, de traza giratoria**

Usa combustibles de todos los grados, el aceite pesado se tiene que calentar de 150 a 300 S.S.U. La presión del aceite es baja y la del aire va de 0.25 a 3 Lb/ Plg<sup>2</sup>. Razón de disminución de 5 a 1. Capacidades: de 1 a 250 Gal/H. Para utilización de calderas de encendido automático. Inciso (c) de la fig. 14.

### **5.3.6 Quemador atomizador de aire a baja presión. Tipo de presión variable**

Usa aceite de todos los grados, cuando alimentan a viscosidad de 80 a 90 S.S.U. Presión del aceite de 20 Lb/plg<sup>2</sup>, presión de aire de 0.5 a 5 lb/ Plg<sup>2</sup>. Presión constante del aire primario, la del aire secundario varía. Razón de disminución de 4 a 1. Capacidad de 1 a 200 Gal/H. Inciso (d) de figura 14.

### **5.3.7 Quemador mecánico o atomizador a presión de aceite, del tipo de flujo de regreso**

El diseño típico y el principio general de funcionamiento. Utiliza bunker de todos los grados y el aceite pesado se calienta hasta 150 S.S.U. La presión del aceite es de 300 Lb/ Plg<sup>2</sup> y la del aire se baja de tiro natural. La razón de disminución es de 10 a 1. Capacidad de 10 a 1000 Gal/H. En inciso (e) figura 14.

### **5.3.8 Unidad quemadora completa mecánica o de atomización de aceite a presión**

Se proporciona aire por tiro natural o con un soplador de baja presión. Se usa en calderas y hornos giratorios. Los quemadores caseros de este tipo utilizan aceite a una presión de 100 Lb/ Plg<sup>2</sup>. Inciso (f) en la figura 14.

### **5.4 Ubicación de los quemadores**

Los quemadores para combustibles fluidos (incluyendo el carbón pulverizado) pueden ser colocados y acondicionados para:

- Combustión horizontal
- Combustión vertical
- Fuego opuesto
- Fuego tangencial
- Fuego ciclónico

El propósito de las diferentes formas de colocación es la obtención de una mezcla íntima del combustible (carbón, aceite o gas) con el aire para la combustión. Con el fuego tangencial o con el fuego opuesto, las flamas de dos o más quemadores están dirigidas al mismo punto, creando una turbulencia muy intensa (formación de remolinos o rotación) condiciones durante las cuales se mezclan perfectamente el aire y el combustible. Para el caso que ocupa esta tesis y que es el método utilizado en la caldera se refiere al método de fuego opuesto o turbo combustión.

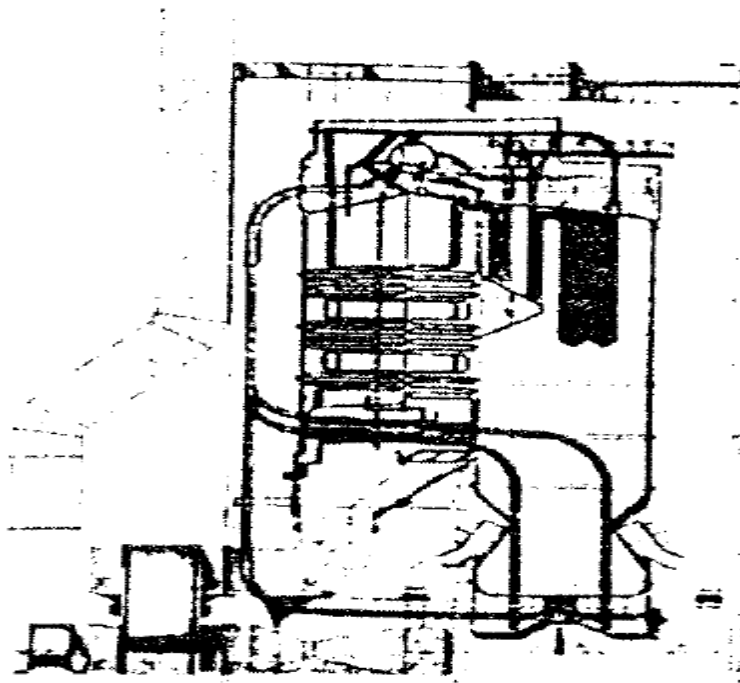
#### **5.4.1 Fuego opuesto**

El turbo fogón tiene las aberturas de los quemadores en Angulo respecto a la línea vertical, por ejemplo apuntados hacia el piso de escorias fluidas (figura 15). Los quemadores se colocan en paredes opuestas, para aventar el fuego uno contra otro. Aquí no se ha hecho ningún intento para obtener la

mezcla previa o el remolino del combustible y el aire; en realidad se dedica bastante esfuerzo en el diseño para reducir la turbulencia y lograr un flujo lineal. Para controlar el choque de las corrientes y la temperatura del fondo del hogar (escorias fundidas) se utilizan compuertas graduables en los conductos de aire.

La interferencia y la entremezcla de las dos corrientes opuestas de combustible y aire, producen condiciones de extrema turbulencia debajo de la garganta del hogar; la combustión es completa casi en su totalidad en esta zona. La tendencia al choque de las flamas es muy reducida, debido a la rotación lineal de la turbulencia.

**Figura 15. Quemador de gas de flama direccional. Fuego opuesto.**



Fuente: Mejoramiento de la eficiencia de operación de calderas de vapor

## **5.5 Características de la flama**

La flama es un fenómeno de la reacción química de un gas que ha sido calentado hasta su punto de ignición en presencia de otro gas, usualmente el oxígeno de la atmósfera. Las flamas que contienen partículas finas de carbón incandescente u otro tipo de residuos de carbón, son lo que forma el cuerpo opaco de efectividad radiante. Las flamas no luminosas como las de la combustión del gas del combustible obtienen su efectividad radiante. Las flamas no luminosas como las de la combustión del gas del combustible obtienen su efectividad radiante del dióxido de carbono y del vapor de agua, que tienen un valor bajo de radiación de, aproximadamente, el 10% de la que se obtiene del cuerpo opaco. La flama no luminosa es más caliente que la luminosa porque transforma en calor una cantidad mayor de energía. Hay una notoria diferencia entre las flamas de los diversos combustibles. La luminosidad de la flama del aceite-combustible es alta, lo que da por resultado una transmisión alta de calor radiante de la llama al material refractario y a las paredes enfriadas por agua. En los combustibles gaseosos, la mayor parte de la transmisión de calor es por convección, una vez que los gases abandonan el hogar propiamente dicho. Como aquí la radiación es mínima, no se requieren paredes enfriadas por agua en el hogar.

## **5.6 Superficies de calentamiento**

Las superficies de calefacción en un Generador de vapor acuatubular que quema aceite-combustible son, básicamente, iguales decir.

- Superficies de convección
- Superficie del economizador
- Del Sobrecalentador
- Del Precalentador de aire
- Superficie de la pared de agua.



## 5.7 Tiro

Los diferentes sistemas de tiro en un Generador de vapor acuotubular que quema aceite-combustible, hacen la misma función que en cualquier otro generador de vapor acuotubular, aunque en su operación queda limitada a las condiciones bajo las cuales trabaja el generador, en este caso el exceso de aire es menor y, por lo tanto, se necesita de un tiro forzado menor.

## 5.8 Eficiencia de un generador de vapor acuotubular de aceite combustible

Para describir la eficiencia de un generador de vapor acuotubular de aceite-combustible, se presenta a continuación la tabla XXV que muestra, aparte de la eficiencia misma del Generador de vapor acuotubular No. 6, quemado bunker. Cabe mencionar que estos datos fueron obtenidos a través de un analizador de combustión aplicado antes y después del precalentador de aire, cuando la caldera estaba a su máxima capacidad.

**Tabla XXV. Eficiencia en caldera No.6 operando con bunker**

<b>Operador:</b>	<b>16:30</b>	<b>21:30</b>	<b>02:30</b>	<b>07:30</b>	<b>12:30</b>	<b>05:30</b>	<b>10:30</b>
Temperatura. del hogar F	972	960	962	938	961	962	1183
Temperatura agua antes de economizador F	282	284	281	281.5	282	281.1	297.5
Temperatura gases antes del economizador F	690	690	699	695	691	694	690
Temperatura gases después de economizador	475	476	476	477	474	478	474
Presión de vapor salida de caldera psi	858	858	856	855	858	856	857
Flujo de vapor klb/h	137.6	133.4	135.7	138.2	134.2	132.8	133.8
Totalizador de vapor	152104	152104	152104	152104	152104	152104	152104
Temperatura de vapor sobrecalentado F	892.8	886.1	877	883.4	879.1	885.2	888
% Nivel de agua en el domo	38	37.8	38.3	37.6	38.4	37.2	37.5
Flujo de agua inyección gpm	287	270.8	277.5	284.1	278.3	282.4	280.4
% Dámper de tiro forzado	100	100	100	100	100	100	100

% salida alimentadores de bagazo	0	0	0	0	0	0	0
% Dámper de tiro forzado	100	100	100	100	100	100	100
% velocidad tiro inducido	40	38	36	36	37	38	39
% Oxígeno en gases	20	20	20	20	20	20	20
% Demanda del master	49.6	51.3	58.6	61.8	48.7	54.4	52.8
Ratio caldera	100	100	100	100	100	100	100
% velocidad bomba p. químico	87	87.9	88.7	84.5	86.3	84.2	91
psi salida de bomba de inyección	1006	1005	1006	1006	1008	1008	1007
% nivel tk elevado	55	46	67	64	65	65	70
Apariencia de gases de chimenea	Blanco	Blanco	Normal	Normal	Normal	Normal	Blanco

Fuente: Industria azucarera



## **6. CARACTERÍSTICAS COMUNES Y DIFERENCIAS ENTRE GENERADORES DE VAPOR ACUOTUBULAR DE BIOMASA DE EUCALIPTO Y DE ACEITE COMBUSTIBLE**

### **6.1 Características comunes**

#### **6.1.1 Componentes del generador de vapor acuotubular**

De los componentes básicos del generador de vapor acuotubular son comunes a ambos generadores de vapor acuotubular de biomasa de eucalipto y de aceite-combustible la sección del hogar, el sobrecalentador, el economizador, el precalentador de aire, los tiros y el sistema limpiador de hollín. Es decir que se pueden utilizar indistintamente, en ambos generadores de vapor.

#### **6.1.2 Refractario y/o aislamiento**

Otra de las características comunes a los generadores de vapor acuotubulares, independientemente al combustible que queme, es el material refractario y/o aislamiento, pues este es igualmente necesario, ya sea que el generador de vapor queme eucalipto o aceite-combustible y el tipo o clase de dicho material a utilizar esta en función a la temperatura a la que se ve sometido.

#### **6.1.3 Sistema de alimentación y circulación de agua hacia y en la caldera**

Otra de las características comunes e independientes al tipo de combustible que utiliza la caldera es la alimentación de agua hacia esta y el diseño de su circulación dentro de la misma. Cuando se habla de la alimentación de agua a la caldera se refiere, por ejemplo a. si esta trabajando

en circulación cerrado con un turbina con condensador, en el cual, entonces, el vapor producido por la caldera es utilizado para servicio de la fabrica por lo cual, parte de ese vapor es perdido en el proceso y se necesita inyectar agua de condensación, agua desmineralizada o, inclusive, en un momento dado hasta podría inyectársele agua cruda, pues, es imperativo que la caldera mantenga agua.

Al referirse a la circulación de agua en la caldera se habla del flujo de agua, vapor o una mezcla de ambos a través de los circuitos internos de la caldera, los cuales dependen más del diseño mismo de la caldera, que de la clase de combustible que consuma.

#### **6.1.4 Dispositivos de seguridad de las calderas**

Los dispositivos de seguridad o de protección de las calderas son igualmente comunes, tanto a calderas que queman bagazo o aceite-combustible y entre los cuales se cuentan: las válvulas de seguridad, requeridas para evitar el valor excesivo de la presión de vapor y las alarmas de bajo y alto nivel de agua, los cuales son dañinos a las calderas, el primero porque constituye un peligro de calentamiento excesivo de los tubos al quedarse sin agua y el segundo porque evita una circulación adecuada dentro de la caldera y provoca arrastres hacia la línea de vapor.

### **6.2 Diferencias**

#### **6.2.1 Alimentación de combustible**

El sistema de alimentación de combustible, depende del tipo de este, por lo tanto y como se describe en los capítulos 4 y 5 ambos sistemas en los generadores de vapor acuotubulares que queman eucalipto y aceite combustible son diferentes.

### **6.2.2 Suministro y distribución de aire para la combustión**

El suministro y distribución de aire para la adecuada combustión del eucalipto y del aceite combustible se realiza de diferente manera, como a continuación se describe.

Cuando el generador de vapor acuotubular esta quemando eucalipto, el aire necesario para la combustión es suministrado por el ventilador de tiro forzado. Parte de este aire es conducido al horno y para a través de la parrilla, ora parte es conducido por el over-fire que empuja al eucalipto hacia el horno y lo seca, simultáneamente, mientras se quema a medida que va cayendo, la cantidad de aire mencionada constituye el aire primario y, por ultimo, el resto del aire es inyectado por medio de unas toberas en la parte frontal y trasera del horno, suministrando con esto el aire en exceso necesario para la combustión y es lo que forma el aire secundario. Ahora, cuando se esta quemando aceite combustible al igual que cuando se quema eucalipto el aire se suministra por medio del ventilador de tiro forzado, pero, la distribución de aire es diferente, ay que parte de este aire es conducido a la parrilla (en mínima parte) con la única finalidad de proporcionar un medio de enfriamiento a la parrilla y evitar así que esta se detecte por la acción del calor, ahora, como ese aire no se pierde sino se conduce a lo largo del hogar se puede considerar como parte del aire secundario. El resto del flujo de aire suministrado por el ventilador se conduce por conductos diferentes a los quemadores dividiéndose ente mismo en aire secundario para completar la combustión y aire primario para atomizar el bunker.

### **6.2.3 Dimensiones del hogar**

Las dimensiones del hogar para una caldera acuotubular que quema eucalipto son determinadas considerando los siguientes factores:

- a) Longitud de flama de 5 a 10 m.

b) Superficie de calefacción por metro de ancho

c) Régimen calorífico de 400,000 Kcal/H/m<sup>2</sup>

Ahora para calderas acuotubulares que quema bunker, las dimensiones del hogar se determinan considerando lo siguiente.

a) Longitud de flama (que es relativamente corta)

b) Intensidad calorífica de 400,500 Kcal/H/m<sup>3</sup>, debiéndose mantener este valor debajo de 267,000 Kcal/H/m<sup>3</sup> para lograr una vida útil larga y un bajo costo de mantenimiento.

Por lo consiguiente, la mayor diferencia radica en la longitud de la flama y el régimen calorífico puede llegar a considerarse, en un momento dado, una característica común. Levando esto a que el hogar en las calderas que solo queman bunker sea mucho más compacto.

#### **6.2.4 Horno**

La diferencia más notable y es a la sección de parrillas. Simplemente para el retiro de cenizas en los combustibles sólidos cuando se utiliza un alimentador.

En una caldera acuotubular que queme aceite combustible no es necesario la parrilla, pues, la combustión del bunker es mucho más limpia que la de eucalipto (combustible residual) y la formación de cenizas es mínima.

#### **6.2.5 Superficie calórica**

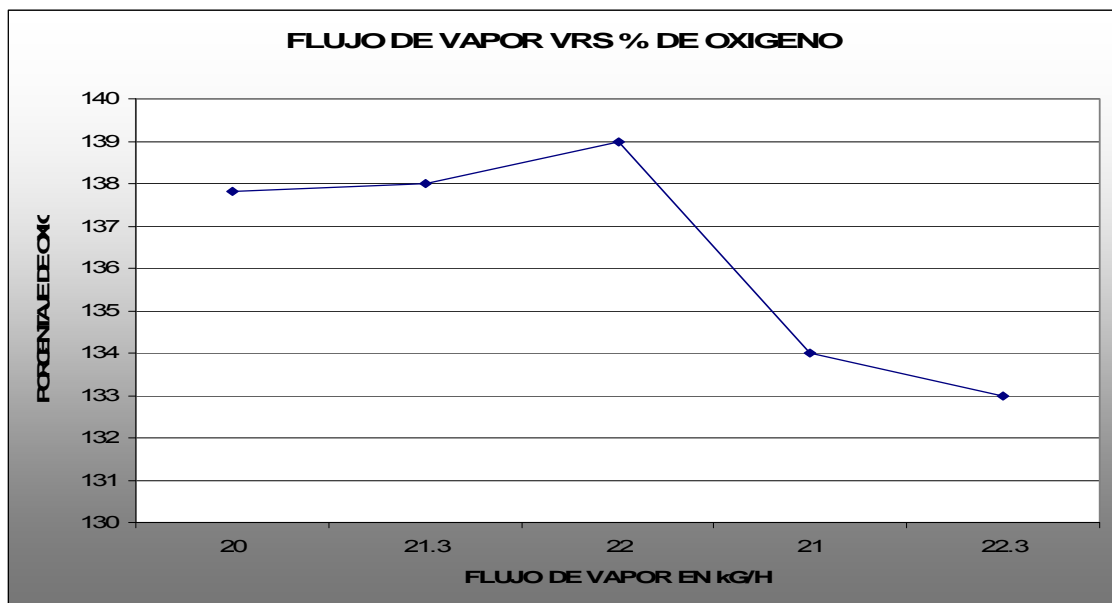
Se enfocara esta sección a la superficie calórica debido a la pared de agua. En lo que se refiere a la pared de agua esta se hace más indispensable en un generador de vapor acuotubular que quema bunker, ya que por el tipo de flama producida por este, la trasmisión de calor se lleva a cabo en mayor grado por radiación requiriéndose así, pues, paredes enfriadas por agua, por otro lado, el choque directo de las flamas y las consecuente erosión que ocasiona

en los materiales refractarios se evita utilizando paredes enfriadas por agua. Las calderas acuotubulares de vapor con alimentación por aspersion son calderas con paredes de agua adaptables para otros combustibles como carbón pulverizado, bunker y gas.

### 6.2.6 Producción de gases

El % de oxígeno producido y la cantidad de monóxido de carbón generado es diferente en la combustión, tanto del eucalipto como del bunker y para ilustrar esto, se presentas las siguientes graficas: % de oxígeno vrs flujo de vapor (figura 16), Co (PPM) vrs flujo de vapor (figura 17) estas dos graficas se obtuvieron quemando eucalipto.

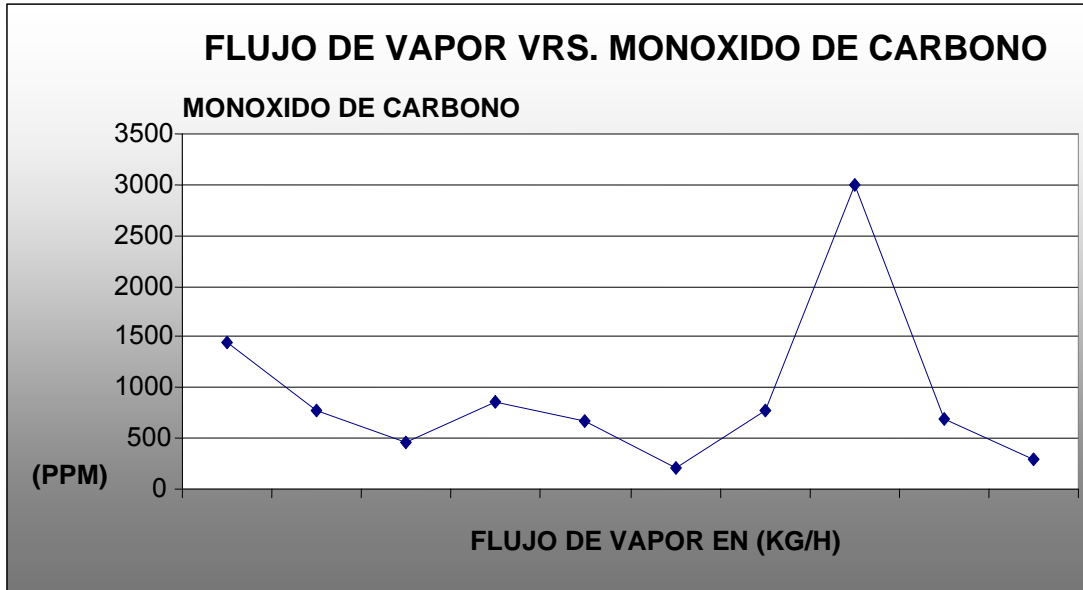
**Figura 16. Flujo de vapor vrs % de oxígeno en chip de madera**



Fuente: Industria azucarera



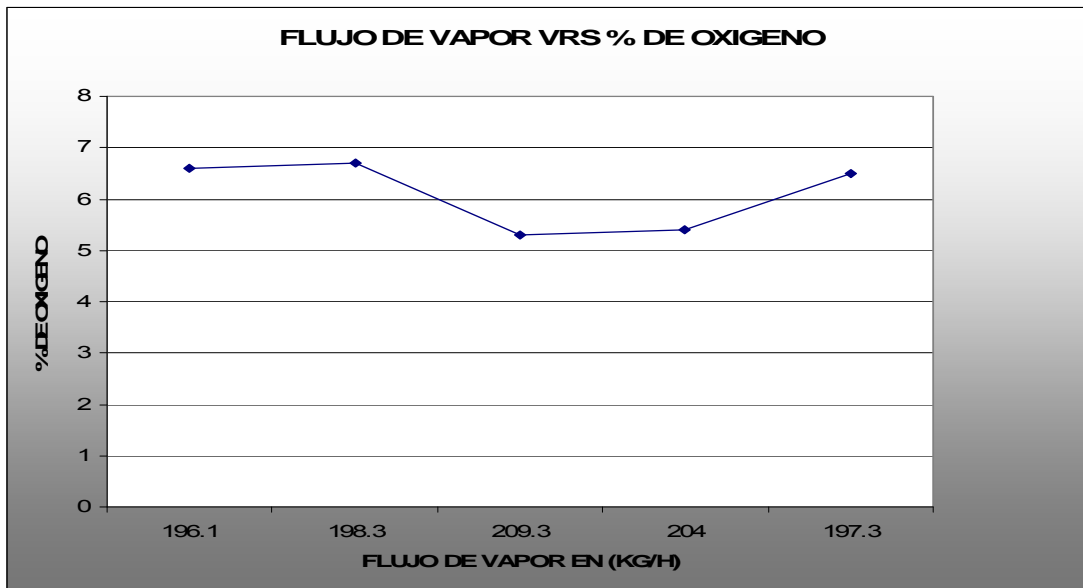
**Figura 17. Flujo de vapor vrs monóxido de carbono en chip de madera**



Fuente: Industria azucarera

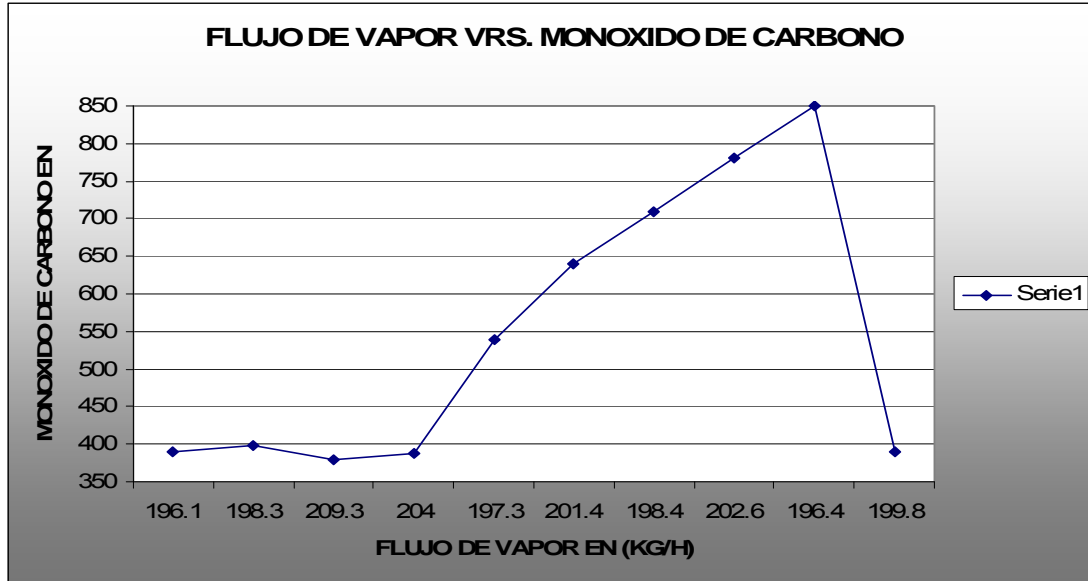
En la figuras 18 y figura 19 se muestran las mismas variables, respectivamente, solo que quemando bunker.

**Figura 18. Flujo de vapor vrs de oxígeno en bunker**



Fuente: Industria azucarera

Figura 19. Flujo de vapor vrs. monóxido de carbono en bunker



Fuente: Industria azucarera



## CONCLUSIONES

1. Al realizar la prueba con biomasa de madera, la caldera se mantuvo estable en la producción de vapor, manteniendo una presión y temperatura adecuada dentro del hogar, haciendo que el turbo generador estuviera en óptimas condiciones de operación, produciendo energía eléctrica, con estas pruebas se ha demostrado que la biomasa de madera sea la principal fuente de alimentación en época de no zafra, manteniendo una combustión estable y continua en la caldera.
2. La industria azucarera es el pionero de producir energía eléctrica en Guatemala, por medio de madera desfibrada de eucalipto, proponiendo alternativas para la producir energía a bajo costo sustituyendo a otros combustibles con altos precios en el mercado.
3. Los cultivos de eucalipto se crearon bosques energéticos, con el fin de suministrar madera a la industria azucarera para la producción de energía constante y ser un pulmón de oxígeno para Guatemala.
4. Este proyecto mantendrá un porcentaje de puestos operativos en época de no zafra, manteniendo la mano de obra calificada y favoreciendo a la industria azucarera en invertir menos en capacitación para el aprendizaje de operación de las máquinas.
5. El valor esperado del valor presente neto del proyecto en período de 5 años y la tasa de retorno requerida indica que el resultado del

análisis económico que el proyecto es rentable para la industria azucarera.

6. El área de energía conjuntamente con el área de campo mantienen una logística para mantener operando la caldera, demostrando que el proyecto abarca una buena comunicación entre el área de campo y la fabrica cumpliendo con todas las metas propuestas para mantener una operación eficaz y continua de energía eléctrica.
7. Se realizo una comparación entre generadoras y se visualiza que el costo con bunker es mayor que el costo con chip de madera, el cual es una alternativa para reducir costos y tener mayores ganancias.

## RECOMENDACIONES

1. En los primeros días de operación con eucalipto se encontraron problemas de diseño, se tienen que realizar modificaciones en los equipos para que la operación sea mayor y estable.
2. En tiempo de zafra se contratan plazas temporales para realizar diferentes funciones en la industria azucarera. El proyecto de producción de energía por medio de madera desfibrada, requiere de personal para el período de no zafra, sugiero que se contrate el personal con plazas temporales por la experiencia a adquirido en zafras pasadas.
3. La madera de eucalipto se comprobó que mantiene estable la operación en la caldera, por lo que da una mayor eficiencia y logra mantener una disponibilidad de potencia, recomendaría que se probaran otros tipos de maderas como las de pino que tiene crecimiento rápido y un buen poder calorífico
4. Por la ubicación que se encuentra actualmente la máquina desfibadora, es necesario construir patios para depositar madera ya desfibrada y colocar fajas que alimenten directamente la caldera para bajar costos en maquinaria pesada por los movimientos que realizan en la fábrica.
5. Aumentar la siembra de bosques energéticos donde no se puede sembrar caña de azúcar y café.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Casanueva, Alejandro. (entrevista). 19 de junio del 2006.
2. Ing. Luis Verdugo Becerra. Análisis de Transmisión de Calor y Diseño de Calderas. Curso de capacitación azucarera . Septiembre 2001.
3. Keneth Wark. Termodinamica, México, Mcgraw-Hill, 5ta ed. México. 1998.
4. Meade, George P. 1967. *Manual del Azúcar de caña*. 9ª edición. España. 940 págs.
5. Mejoramiento de la eficiencia de operación de calderas de vapor. Versión al español por el Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial. ICAITI. Atlanta, Georgia. 1981.
6. [www.ingeniosanantonio.com/chipeadora](http://www.ingeniosanantonio.com/chipeadora). Marzo 2005.
7. [www.fao.org/docrep/x2351s/x2351s02.htm](http://www.fao.org/docrep/x2351s/x2351s02.htm). Septiembre 2005.
8. [www.oni.escuelas.edu.ar/olimpi98/energia-Vs-Ambiente/biomasa.htm](http://www.oni.escuelas.edu.ar/olimpi98/energia-Vs-Ambiente/biomasa.htm). Noviembre 2005.