



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

**EVALUACIÓN DE LA PAJA DE CAÑA DE AZÚCAR COMO COMPLEMENTO
BIOCOMBUSTIBLE AL BAGAZO DE CAÑA EN UN INGENIO AZUCARERO**

Elder Josué Fuentes Menchú

Asesorado por el Ing. Edwin Josué Ixpatá Reyes

Guatemala, noviembre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA PAJA DE CAÑA DE AZÚCAR COMO COMPLEMENTO
BIOCOMBUSTIBLE AL BAGAZO DE CAÑA EN UN INGENIO AZUCARERO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ELDER JOSUÉ FUENTES MENCHÚ

ASESORADO POR EL ING. EDWIN JOSUÉ IXPATÁ REYES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. José Francisco Gómez Rivera
EXAMINADORA	Inga. Sigrid Alitza Calderón de León
EXAMINADOR	Ing. Edwin Josué Ixpatá Reyes
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

EVALUACIÓN DE LA PAJA DE CAÑA DE AZÚCAR COMO COMPLEMENTO BIOCOMBUSTIBLE AL BAGAZO DE CAÑA EN UN INGENIO AZUCARERO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, con fecha 28 de enero del año 2015.



Elder Josué Fuentes Menchú

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE
GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

Guatemala, 24 julio de 2015.

Ingeniero
César Urquizú
Director de Escuela Mecánica Industrial
Facultad de Ingeniería
Presente.

Ingeniero Urquizú:

Por este medio informo que el tema del Trabajo de Graduación titulado, **“EVALUACIÓN DE LA PAJA DE CAÑA DE AZÚCAR COMO COMPLEMENTO BIOCOMBUSTIBLE AL BAGAZO DE CAÑA EN UN INGENIO AZUCARERO”**, presentado por el alumno Elder Josué Fuentes Menchú, quien se identifica con el carné No. 2011-14659, ha sido revisado y aprobado por el suscrito.

Por el motivo, doy mi visto bueno para que se continúe con los trámites respectivos.

Agradeciendo, sirva tomar nota de la presente, me suscribo de usted, deferentemente.


Edwin Josué Ixpatá Reyes
Ing. Mecánico Industrial
Colegiado No. 7128
Ing. Edwin Ixpatá Reyes
Mecánico Industrial
Colegiado 7128



Como Catedrático Revisor del Trabajo de Graduación titulado **EVALUACIÓN DE LA PAJA DE CAÑA DE AZÚCAR COMO COMPLEMENTO BIOCOMBUSTIBLE AL BAGAZO DE CAÑA EN UN INGENIO AZUCARERO**, presentado por el estudiante universitario **Elder Josué Fuentes Menchú**, apruebo el presente trabajo y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Inga. Milbian Kattina Mendoza Méndez
Catedrático Revisor de Trabajos de Graduación
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

KATTINA MENDOZA MÉNDEZ
INGENIERA INDUSTRIAL
Colegiado No. 7418

Guatemala, septiembre de 2015.

/mgp



REF.DIR.EMI.202.015

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el Visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística del trabajo de **EVALUACIÓN DE LA PAJA DE CAÑA DE AZÚCAR COMO COMPLEMENTO BIOCOMBUSTIBLE AL BAGAZO DE CAÑA EN UN INGENIO AZUCARERO**, presentado por el estudiante universitario **Elder Josué Fuentes Menchú**, aprueba el presente trabajo y solicita la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. César Ernesto Urquizú Rodas
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial



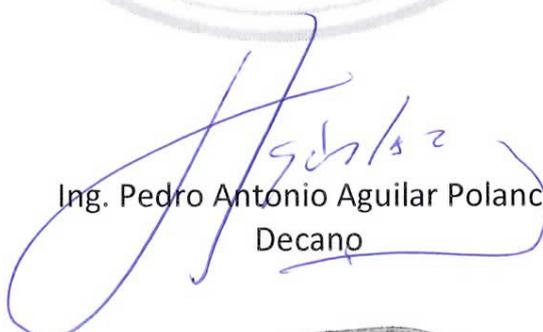
Guatemala, octubre de 2015.

/mgp



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 Industrial, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA PAJA DE CAÑA DE AZÚCAR COMO COMPLEMENTO BIOCOMBUSTIBLE AL BAGAZO DE CAÑA EN UN INGENIO AZUCARERO**, presentado por el estudiante universitario: **Elder Josué Fuentes Menchú**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, noviembre de 2015

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser el guía, camino, consuelo e incondicional apoyo durante toda mi vida y en esta etapa tan importante para alcanzar este sueño.
- Mis padres** Elder Hermelindo Fuentes y Lilian Lissette Menchú, por ser unos padres ejemplares, brindarme el don de la vida, su cariño, amor, consejo, comprensión y absoluto apoyo.
- Mi hermana** Adriana Ximena Fuentes, por ser una persona imprescindible en mi vida, su apoyo moral y cariño brindado a lo largo de estos años.
- Mis abuelos** Blanca Marroquín, Georgina García, Maximiliano Menchú y Rigoberto Fuentes (q. e. p. d.) por ser luz, guía y apoyo para seguir adelante.
- Mi familia** En general, por formar parte de este logro tan importante.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi querida alma máter y pieza clave en mi carrera.
Facultad de Ingeniería	Por ser una importante influencia en mi carrera y desarrollo como profesional.
Mis amigos	De la Universidad y en general. Por los buenos y gratos momentos que pasamos durante la carrera y por ser pieza clave en mi vida.
Mi asesor	Ing. Edwin Ixpatá, por sus consejos y apoyo para finalizar este trabajo tan importante.
Los profesionales	Ings. Carlos Ixcot, Kattina Mendoza, Ernesto Muñoz, Álex Suntecún, Lics. Susana Álvarez y Luis Valdés, por su apoyo en la realización de este trabajo de graduación.
Ingenio Azucarero	Por ser el establecimiento que me abrió sus puertas para la elaboración de esta investigación, a todos sus colaboradores que me brindaron su apoyo y compartieron sus conocimientos y experiencias.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
OBJETIVOS.....	XVII
Hipótesis.....	XVIII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Bagazo de caña.....	1
1.2. Composición del bagazo	2
1.2.1. Composición química	2
1.2.2. Composición media	2
1.3. Poder calorífico superior (PCS)	3
1.4. Poder calorífico inferior (PCI)	3
1.5. Bioetanol.....	4
1.5.1. Comparación energética de materias primas con producción de etanol	5
1.5.2. Producción de energía vs. producción de etanol a partir del bagazo de caña	7
1.6. Parámetros de producción de etanol y azúcar	9
2. PROCESO DE GENERACIÓN DE VAPOR.....	11
2.1. Recepción del bagazo	11
2.2. Distribución de bagazo a calderas.....	11

2.3.	Alimentadores de biomasa en calderas	12
2.3.1.	Alimentación por gravedad.....	12
2.3.2.	Alimentación por medio de alimentadores automáticos	12
2.4.	Combustión de biomasa.....	13
2.4.1.	Generación de vapor	16
2.4.1.1.	Calderas de dos domos.....	16
2.4.1.2.	Calderas de tres domos	17
2.4.2.	Producción de libras de vapor	18
2.5.	Distribución de vapor.....	20
2.5.1.	Distribución de vapor a molinos	20
2.5.2.	Distribución de vapor a patios	20
2.5.3.	Distribución de vapor a generadores.....	20
2.6.	Tratamiento de cenizas	21
3.	ANÁLISIS RELACIÓN BAGAZO VS. PAJA DE CAÑA	25
3.1.	Biocombustibles en ingenios.....	25
3.2.	Generalidades del bagazo	26
3.2.1.	Propiedades físicas del bagazo.....	27
3.2.2.	Propiedades químicas del bagazo	28
3.2.3.	Grado calorífico del bagazo.....	29
3.3.	Generalidades de la paja de caña.....	31
3.3.1.	Propiedades físicas de la paja de caña.....	34
3.3.2.	Propiedades químicas de la paja de caña.....	35
3.3.3.	Grado calorífico de la paja de caña	36
3.4.	Relación de aportación de vapor en combustión.....	38
3.5.	Mezcla de bagazo y paja de caña	41
3.5.1.	Cálculo de unidades de bagazo y paja de caña	41

3.5.2.	Relación de unidades de bagazo por unidades de paja de caña	43
3.6.	Resultados sobre análisis.....	43
4.	ANÁLISIS DEL CONTROL DEL RENDIMIENTO DE LAS CALDERAS	53
4.1.	Antecedentes en registros	53
4.1.1.	Análisis estadístico de control.....	57
4.2.	Rendimiento actual en área de calderas	64
4.3.	Eficiencia actual en calderas	66
4.3.1.	Eficiencia en calderas de baja presión	66
4.3.2.	Eficiencia en calderas de alta presión	68
4.4.	Análisis de niveles de presión	69
4.4.1.	Análisis estadístico de control.....	69
4.5.	Producción de libras de vapor	72
4.5.1.	Producción de libras de vapor en calderas de baja presión	72
4.5.2.	Producción de libras de vapor en calderas de alta presión	75
4.6.	Contaminación.....	77
4.6.1.	Factores de emisión	77
4.6.2.	Dispersión de contaminantes.....	79
4.6.3.	Hermeticidad del sistema.....	80
4.7.	Seguridad del personal.....	82
4.7.1.	Riesgos.....	82
4.7.2.	Equipo de protección	84
4.7.3.	Medidas de seguridad	88

5.	EFFECTOS DE LA PAJA DE CAÑA DE AZÚCAR EN LAS CALDERAS.....	91
5.1.	Utilización de biomasa en calderas.....	91
5.2.	Nivel de humedad de la paja de caña	92
5.3.	Elementos dentro de la paja de caña	93
5.3.1.	Elementos primarios.....	94
5.3.2.	Elementos secundarios	94
5.3.3.	Intermediarios.....	95
5.4.	Introducción de la caja de caña en calderas	95
5.5.	Efectos de la paja de caña en el equipo.....	98
5.5.1.	Incrustaciones en calderas.....	98
5.5.2.	Nivel de sacarosa.....	100
5.5.3.	Resistencia a la abrasión	101
5.6.	Mantenimiento.....	101
5.6.1.	Mantenimiento predictivo.....	102
5.6.2.	Mantenimiento preventivo	102
5.6.3.	Mantenimiento correctivo	103
6.	ANÁLISIS DE COSTOS.....	105
6.1.	Estudio de costos fijos.....	105
6.2.	Estudio de costos variables.....	106
6.3.	Estudio de costos de transporte	107
6.4.	Estudio de costos de almacenamiento.....	108
6.5.	Total de costos	108
	CONCLUSIONES.....	109
	RECOMENDACIONES.....	111
	BIBLIOGRAFÍA.....	113
	ANEXOS.....	115

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Estequiometría de la conversión de una tonelada de bagazo integral a etanol.....	8
2.	Representación gráfica de hogar tipo herradura	14
3.	Representación gráfica de hogar tipo <i>pinhole</i>	15
4.	Caldera de dos domos	17
5.	Caldera de tres domos	18
6.	Proceso de tratamiento de cenizas	22
7.	Proceso de filtrado de cenizas	23
8.	Plantilla de muestreo	54
9.	Cálculo de promedios de medias y rangos	55
10.	Fórmulas estadísticas para el cálculo de promedios de medias y rangos.....	55
11.	Tabla de factores para el cálculo de límites de control de gráficas para variables.....	56
12.	Ejemplo de gráfico de control de variables.....	57
13.	Gráfico de control de medias en niveles de presión en línea de 200 psi.....	60
14.	Gráfico de control de rangos en niveles de presión en línea de 200 psi.....	61
15.	Gráfico de control de medias en niveles de presión en línea de 500 psi.....	62
16.	Gráfico de control de rangos en niveles de presión en línea de 500 psi.....	63

17.	Gráfico de control de medias en producción de libras de vapor en línea de 200 psi.....	73
18.	Gráfico de control de rangos en producción de libras de vapor en línea de 200 psi.....	74
19.	Gráfico de control de medias producción de libras de vapor en línea de 500 psi	75
20.	Gráfico de control de rangos en producción de libras de vapor en línea de 500 psi.....	76
21.	Materiales aislantes utilizados en el área de calderas	81
22.	Botas industriales.....	85
23.	Mascarilla.....	86
24.	Tapones para oído.....	86
25.	Casco industrial	87
26.	Guantes de cuero	87
27.	Medidas de seguridad implementadas en el Ingenio según políticas de buenas prácticas de manufactura	89
28.	Vías de utilización de paja de caña de azúcar	97

TABLAS

I.	Comparación energética de las diferentes materias primas para la producción de etanol.....	6
II.	Relación de alimentación de conductores hacia calderas de baja y alta presión.....	13
III.	Producción de libras de vapor de las calderas en libras de vapor por hora.....	19
IV.	Composición y propiedades físicas del bagazo	28
V.	Composición química del bagazo	29

VI.	Grado calorífico y porcentaje de cenizas en muestra de bagazo, según MEM.....	30
VII.	Grado calorífico y porcentaje de cenizas en muestra de bagazo, según Ingenio Azucarero	31
VIII.	Pérdidas de recuperación de azúcar por residuos fibrosos en África del Sur.....	33
IX.	Pureza de las mieles finales.....	34
X.	Características de la paja de caña en relación al poder calorífico inferior (PCI).....	35
XI.	Composición química del bagazo.....	36
XII.	Grado calorífico y porcentaje de cenizas en muestra de paja de caña según MEM.....	37
XIII.	Grado calorífico y porcentaje de cenizas en muestra de paja de caña según Ingenio Azucarero.....	38
XIV.	Producción de libras de vapor de las calderas en operación durante molienda estándar, en libras de vapor por hora	39
XV.	Cálculo de grado calorífico de mezcla entre bagazo y paja de caña....	42
XVI.	Grado calorífico de mezcla entre muestra de paja de caña y bagazo según Ingenio Azucarero	44
XVII.	Cálculo de combustible efectivo y depreciación de agua a evaporar ...	46
XVIII.	Combustible efectivo de biomosas	47
XIX.	Cálculo de ahorro de combustible a partir del combustible efectivo de biomosas.....	48
XX.	Muestreo de niveles de presión en línea de 200 psi	58
XXI.	Muestreo de niveles de presión en línea de 500 psi	58
XXII.	Cálculo de límites de control de medias y rangos de niveles de presión en línea de 200 psi	59
XXIII.	Cálculo de límites de control de medias y rangos de niveles de presión en línea de 500 psi	59

XXIV.	Cálculo del rendimiento actual en área de calderas	65
XXV.	Cálculo de la eficiencia en calderas de baja presión	67
XXVI.	Cálculo de la eficiencia en calderas de alta presión	68
XXVII.	Muestreo de producción de libras de vapor en línea de 200 psi.....	70
XXVIII.	Muestreo de producción de libras de vapor en línea de 500 psi.....	70
XXIX.	Cálculo de límites de control de medias y rangos de producción de libras de vapor en línea de 200 psi	71
XXX.	Cálculo de límites de control de medias y rangos de producción de libras de vapor en línea de 500 psi	71
XXXI.	Porcentaje de humedad en muestra de paja de caña según MEM.....	92
XXXII.	Porcentaje de humedad en muestra de paja de caña según Ingenio Azucarero.....	93
XXXIII.	Porcentaje de humedad en muestra de paja de caña según MEM.....	98
XXXIV.	Análisis de niveles de pol y brix de caña y paja de caña.....	100
XXXV.	Costos fijos	105
XXXVI.	Costos variables	106
XXXVII.	Costos de transporte.....	107
XXXVIII.	Costo de almacenamiento	108
XXXIX.	Costos finales	108

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
C₂H₅OH	Alcohol etílico
SO₃	Anhídrido sulfúrico
cm	Centímetro
cm³	Centímetro cúbico
US \$	Dólar norteamericano
n_A	Fracción parcial de elemento "a"
n_B	Fracción parcial de elemento "b"
GJ	Gigajoule
H_a	Grado calorífico elemento "a"
H_b	Grado calorífico elemento "b"
g	Gramo
H	Hidrógeno
P₂O₅	Hipofosfato
hr	Hora
Kcal	Kilocaloría
Kcal/kg	Kilocaloría sobre kilogramo
kg	Kilogramo
kg/cm³	Kilogramo sobre centímetro cúbico
Kg/L	Kilogramo sobre litro
kJ	Kilojoule
kJ/Kg	Kilojoule sobre kilogramo
Klb d B.	Kilolibra de bagazo
Klb. d V.	Kilolibra de vapor

Klb. d V/ klb d B.	Kilolibra de vapor sobre kilolibra de bagazo
lb	Libra
lb V	Libra de vapor
psi	Libra fuerza sobre pulgada cuadrada
lb/hr	Libra sobre hora
L	Litro
MW	Megavatio
#	Numeral
Al₂O₂	Óxido de aluminio
CaO	Óxido de calcio
Fe₂O₃	Óxido de hierro (III)
MgO	Óxido de magnesio
K₂O	Óxido de potasio
SiO₂	Óxido de silicio
Na₂O	Óxido de sodio
%	Porcentaje
w	Porcentaje de humedad de bagazo
Plg	Pulgada
Q	Quetzal, moneda guatemalteca
>	Signo mayor que
ton	Tonelada corta
ton/día	Tonelada corta sobre día
ton/zafra	Tonelada corta sobre zafra
BTU	Unidad de energía
BTU/Lb	Unidad de energía sobre libra
ΔH_f	Valor calorífico de una mezcla
V.C.N	Valor calorífico neto

GLOSARIO

Aire extractor	Llamado también aire inducido, se encarga de extraer los gases de combustión de una caldera.
Aire secundario	Llamado también aire forzado, se encarga de mantener el bagazo dentro del horno con cierta soltura.
AMM	Administrador del Mercado Mayorista de Guatemala.
Bagazo	Residuo fibroso de la caña de azúcar después de haber extraído su jugo.
Biocombustible	Materia orgánica derivada de la biomasa utilizada en los procesos de combustión como fuente de energía.
Bioenergía	Energía obtenida a través de biocombustibles.
Brix	Porcentaje de sólidos contenidos en una solución de sacarosa.
Caldera	Elemento mecánico encargado de generar vapor.
Cenizas	Sedimentos producto de la combustión de bagazo en las calderas, denominados también impurezas.

Cepas	Elemento inferior de la caña constituida de terrones y raíces.
Chulquines	Nuevos brotes de caña.
Cogeneración	Proceso de obtención de energía eléctrica a partir de energía térmica (vapor).
Cogollo	Parte interior de la caña de azúcar con altos niveles de sacarosa.
Floculante	Polímero encargado de atrapar las partículas de cenizas y decantarlas al fondo de las celdas.
Humedad	Porcentaje contenido de agua en un elemento.
Imbibición	Proceso de aplicación de agua caliente en el bagazo proveniente del penúltimo molino de un tándem, con el objetivo de utilizar el jugo de extracción del último molino hacia el bagazo proveniente del molino anterior y este hacia el anterior.
LCI	Límite de control inferior.
LCIR	Límite de control inferior de rango.
LCIX	Límite de control inferior de media.
LCS	Límite de control superior.

LCSR	Límite de control inferior de rango.
LCSX	Límite de control inferior de media.
MEM	Ministerio de Energía y Minas de Guatemala.
Mesa a granel	Mesa de preparación de caña larga.
Mesa mecanizada	Mesa de preparación de caña mecanizada, cortada en trozos pequeños y uniformes.
Miel final	Miel obtenida luego de haber sido reutilizada por varias acciones en procesos de cristalización y centrifugación. También llamada meladura.
Molinos	Tándem conformado por cinco molinos, con el objetivo de extraer el jugo primario de la caña de azúcar y el jugo diluido del bagazo aplicando imbibición.
Paja de caña	Basura residual de la caña de azúcar después de prepararla, se compone principalmente de hojas, hojas secas, puntas, raíces, pedazos de tallo que se cortan de la caña en los campos o por medio de las mesas de preparación.
PC	Poder calorífico.
PCI	Poder calorífico inferior.

PCS	Poder calorífico superior.
<i>Pinhole</i>	Es un horno formado por tres tipos de ventiladores: inducido, forzado y <i>overfire</i> .
Pol	Contenido supuesto de sacarosa en jugo de extracción, en forma porcentual.
Presión	Magnitud física que representa la relación inversamente proporcional entre la fuerza y un área superficial.
Pureza	Razón porcentual entre sacarosa y brix.
<i>Scrubber</i>	Elemento colocado al final del ventilador inducido en el cual se lleva a cabo el lavado de gases de combustión.
Vapor	Estado gaseoso del agua que se puede presurizar, obtenido por ebullición del agua, utilizado para generación de energía.
Ventilador <i>overfire</i>	Llamado también sobre fuego, encargado de distribuir el bagazo dentro del interior de una caldera.
Zafra	Período de cosecha de la caña de azúcar, comprendiendo su recolección, procesamiento y entrega final de azúcar por parte de fábrica.

RESUMEN

El presente trabajo se realizó en el Departamento de Generación de Vapor de un ingenio azucarero, por motivos de seguridad, se reserva el uso del nombre de la empresa denominándola Ingenio Azucarero durante el desarrollo del trabajo.

Durante los últimos años, la industria azucarera ha tomado un enorme auge en el desarrollo de nuevas fuentes de combustible para sustentar la demanda de producción de azúcar y cogeneración de energía eléctrica, estas fuentes se han centrado en el empleo de biomásas, específicamente en el bagazo. El bagazo es una excelente alternativa para la reducción de costos en comparación al empleo de fuentes derivadas del petróleo, sin embargo, ante la misión de seguir buscando nuevas fuentes de combustión, se ha centrado la atención en utilizar los residuos agrícolas cañeros (RAC) o paja de caña de azúcar.

El presente trabajo aborda la evaluación del empleo de la paja de caña de azúcar como suplemento biocombustible al bagazo. Se realizó un análisis de relación de ambas biomásas, asimismo, un análisis de rendimiento del equipo previo a su introducción, un estudio de posibles efectos en el equipo de combustión y un análisis de costos.

OBJETIVOS

General

Evaluar la utilización de la paja de caña de azúcar como complemento biocombustible al bagazo en un ingenio azucarero.

Específicos

1. Identificar los principales procesos de generación de vapor en el área de calderas del ingenio.
2. Establecer una relación bagazo-paja de caña sobre su reacción comburente dentro de las calderas.
3. Determinar la injerencia de la paja de caña, cuando se quema dentro de las calderas, en el sistema de control de rendimiento de generación de vapor.
4. Determinar los efectos de la paja de caña en la estructura interna del equipo de combustión.
5. Evaluar los costos de la utilización de la paja de caña como complemento biocombustible del bagazo.

Hipótesis

La paja de caña contribuirá a la nivelación de producción de libras de vapor dentro del sistema de generación de vapor, al utilizarse como complemento biocombustible del bagazo de caña.

INTRODUCCIÓN

Las exigencias en la industria actualmente demandan una constante evaluación de los resultados en cuanto a efectividad, productividad y entendimiento de la producción, para optimizar los procesos que eleven los ingresos monetarios de la empresa y ayuden a reducir los costos de operación. Pero, sobretodo, es necesaria la investigación en la identificación de los puntos clave que merman la productividad de una empresa, en este caso, el bajo rendimiento producido por la falta de bagazo durante la zafra en el ingenio por estudiar.

Solucionar un problema no es una tarea sencilla y menos cuando se trata de gestionar una solución dentro de un área influyente de una planta de un ingenio azucarero. Tal es el caso del área de calderas, que está condicionada por los efectos que puedan ocurrir dentro del sistema de generación de vapor, el cual es el encargado de distribuir las libras de vapor necesarias para el funcionamiento de la planta. Al realizar un análisis y una investigación previa, se determinará la viabilidad del planteamiento de utilizar un complemento biocombustible a partir del uso de la paja de caña de azúcar junto con el bagazo de caña, lo que brindaría apoyo en la nivelación de la presión de vapor, la cual sufre un decremento cuando el bagazo es insuficiente en el Ingenio durante cierto período de la época de zafra.

Se evaluarán diversos factores, como las propiedades y los efectos de la paja de caña cuando se utilice como complemento biocombustible del bagazo, con el objetivo de determinar una solución hacia el período de bajo rendimiento del sistema de generación de vapor presentado en el área de Calderas del

Ingenio, así como, la evaluación de costos que se puedan presentar al utilizar el ya mencionado biocombustible.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Bagazo de caña

Es el residuo fibroso de la caña de azúcar después de haber extraído su jugo. Se obtiene al finalizar el proceso de trituración, después de moler la caña de azúcar por medio de molinos giratorios.

La industria azucarera ha recurrido, en los últimos años, al uso de bagazo como fuente primaria de combustible por su fácil obtención, capacidad de generación de potencia y economía que representa. Se utiliza como sustituto energético en las calderas por la aportación de energía en la generación de vapor durante el proceso en la fabricación de azúcar, aunque el aporte calorífico del bagazo (1 850 Kcal/kg) se considera bajo en comparación con los combustibles fósiles derivados del petróleo que comúnmente utilizan.

Asimismo, se emplea en procesos de generación eléctrica, la cual es aprovechada por toda la red de vapor del Ingenio Azucarero, debido a que los alimenta constantemente. El bagazo sobrante que se origina en la molienda puede utilizarse como materia prima en distintos ámbitos de producción.

1.2. Composición del bagazo

Los componentes del bagazo consisten en material fibroso extraído de la caña de azúcar, el tamaño varía entre 3 y 7 cm, con rango de densidad que oscila entre 120-160 kg/cm³. Está compuesto en su mayoría por biomasa y agua. Entre las características principales del bagazo destacan la composición química y la composición media, debido a que son partes fundamentales que la industria azucarera debe conocer para su utilización.

1.2.1. Composición química

Los elementos que integran la composición química del bagazo son:

- Carbono (23 %)
- Oxígeno (22 %)
- Hidrógeno (3 %)
- Cenizas (2 %)
- Agua (50 %)

1.2.2. Composición media

Dentro de la composición media del bagazo destacan los siguientes elementos:

- Humedad (50 %)
- Fibra (46 %)
- Brix (sólidos solubles 2 %)
- Impurezas minerales (2 %)

1.3. Poder calorífico superior (PCS)

Se le denomina al calor que se refleja por la combustión de bagazo a cierta temperatura de alta presión, cuando los elementos que la integran se reducen a las mismas condiciones, lo cual da como resultado el condensamiento del agua, cuanto más se condensa, se obtiene un incremento en el calor producido, haciendo que el PCS sea mayor. El valor de PCS se determinará en los laboratorios de las industrias mediante ensayos químicos con el uso de un instrumento, llamado bomba calorimétrica.

“Con apoyo del *Manual para ingenios azucareros* de Hugot, el PCS del bagazo seco (PCSS) varía muy poco para las diversas variedades de caña y propone un valor medio: $PCSS = 4\ 600$ (Kcal/kg).”¹

1.4. Poder calorífico inferior (PCI)

Es el calor que se refleja cuando el agua presente y el resultado del proceso de combustión permanecen en estado de vapor. En la actualidad, no existen rangos o medios para determinar el valor del PCI, por lo tanto, se calcula a partir del PCS. El *Manual para ingenieros* de Hugot, propone para el bagazo seco la siguiente expresión:

$$PCIS: PCS - 5\ 400H \text{ (Kcal/kg)}$$

H: porcentaje kilogramos de hidrógeno

Esta expresión corresponde a un valor aproximado de hidrógeno del 6,5 %, por lo que se obtiene lo siguiente:

¹ AGÜERO, C.; PISA, R.; AGÜERO, J.; TORRES B. *Poder calorífico del bagazo de caña de azúcar*. p. 2.

PCIS: 4 600 – 5 400(0,065) (Kcal/kg)

PCIS: 4 250 (Kcal/kg)

La producción de calor en un proceso, según la cantidad, permite diferenciar el poder calorífico superior (PCS) del poder calorífico inferior (PCI).

1.5. Bioetanol

El término bioetanol se refiere al alcohol etílico de fórmula C_2H_5OH , conocido también como etanol, metil carbinol, alcohol de caña, o de granos. Es un líquido incoloro, transparente, volátil, de olor etéreo, sabor picante, y miscible en agua y en diversos líquidos orgánicos. Se emplea en la industria destilado con diferentes grados de pureza, según su destino.

La producción de bioetanol es utilizada en diferentes tipos de comercios y mercados por diferentes vías tecnológicas, en las cuales destacan el empleo de materias primas dulces, fermentables; o mediante el uso de materias primas amiláceas, como el maíz, el trigo y la yuca, cuyo almidón es convertido en azúcares previo a la fermentación. Una tercera alternativa sería el empleo de la biomasa disponible en plantas como el bagazo y la paja de caña, mediante la hidrólisis de las cadenas celulósicas, produciendo una solución de azúcares fermentables. Esta alternativa representa un gran interés gracias a su bajo costo de empleo.

Existe una serie de aspectos referentes a la materia prima en la producción de etanol:

- Las materias primas apropiadas para la elaboración de etanol son aquellas que presenten características más eficientes.
- Se debe tomar en cuenta la rentabilidad del proceso.

- La materia prima representa, aproximadamente, entre 60 y 70 % del costo del bioetanol.
- La relación entre el calor producido como energía y su demanda es fundamental.²

1.5.1. Comparación energética de materias primas con producción de etanol

Al realizar una equiparación sobre las materias primas que producen etanol y resultan eficientes, se evidencia que son pocos los elementos biomásicos que aportan coeficiente elevado de energía. A continuación, se presenta una tabla en donde se evidencia una comparación del nivel energético que aportan ciertas materias primas y la reducción de gases de efecto invernadero (ver tabla 1).

² TORRES, F. y GARRIDO, N. *Bagazo de caña de azúcar: ¿energía o etanol carburante?*. <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar31/HTML/Articulo02N.htm>. Consulta: 8 de diciembre del 2014.

Tabla I. **Comparación energética de las diferentes materias primas para la producción de etanol**

Materia prima	Relación de energía	Emisiones evitadas
Caña	9,3	89%
Maíz	0,6 - 2,0	-30% a 38%
Trigo	0,97 - 1,11	19% a 47%
Remolacha	1,2 - 1,8	35% a 56%
Mandioca	1,6 - 1,7	63%
Residuos lignocelulósicos*	8,3 - 8,4	66% a 73%

Fuente: TORRES, Francisco; GARRIDO, Norge. *Bagazo de caña de azúcar: ¿energía o etanol carburante?* <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar31/HTML/Articulo02N.htm>.

Consulta: 8 de diciembre de 2014.

Según la tabla 1, los datos evidencian una alta viabilidad de producción de etanol a partir de la caña de azúcar, lo que constituye una alternativa favorable en la producción de etanol a partir del bagazo como fuente de bioenergía, por la elevada relación de energía y la capacidad de reducción de gases de efecto invernadero.

1.5.2. Producción de energía vs. producción de etanol a partir del bagazo de caña

Después de haber establecido la incidencia del bagazo como fuente de bioenergía, se debe realizar un análisis de comparación en la producción de etanol sobre otras materias biomásicas, como medios de generación de energía eléctrica.

En el *Manual para ingenios azucareros*, se toman los datos del poder calorífico inferior (PCI) del etanol puro por tablas con valor de 26 790 kJ/kg, (6 399 Kcal/kg) y se calcula el bagazo integral a 50 % de humedad³, de acuerdo con la expresión reportada por Hugot:

$$V.C.N. = 4\ 250 - 4\ 850 w = 4\ 250 - 4\ 850 (0,5) = 1\ 850\ \text{Kcal/kg}$$

Donde:

w: Porcentaje de humedad del bagazo.

Al convertir 186 litros de etanol (ver figura 1), el cual es producido por una tonelada de bagazo, se obtiene una producción de calor de:

$$(186\ \text{L} \times 0,79\ \text{kg/L}) * 6\ 399\ \text{Kcal/kg} = 940\ 269,06\ \text{Kcal.}$$

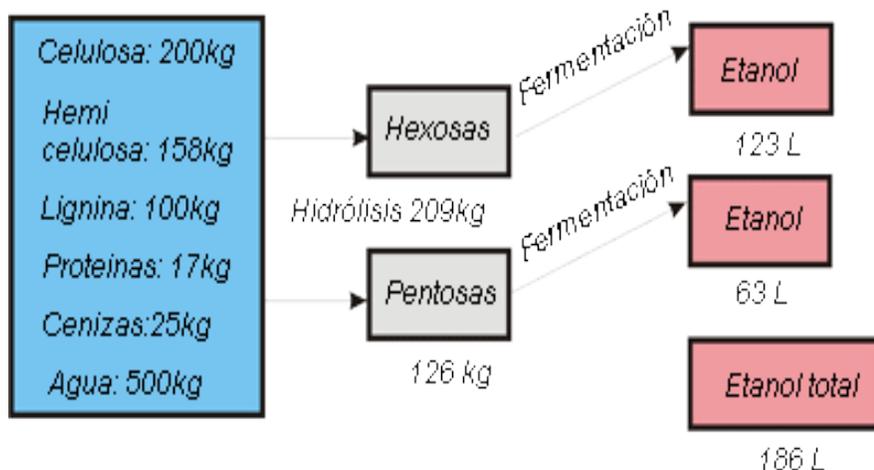
Por lo tanto, al comparar el calor producido por la combustión de una tonelada de bagazo integral a 50 % de humedad y el calor producido por los 186 litros de etanol, se obtiene una diferencia de calor elevado en favor del bagazo, el cual representa un valor aproximado del doble de la producción de calor del etanol:

³ HUGOT, E. *Manual para ingenios azucareros*. s.p.

$$1\ 850\ 000 - 940\ 269 = 909\ 731\ \text{Kcal.}$$

Con el análisis antes expuesto, se determina que se obtiene mayor cantidad de energía calorífica a partir de la combustión del bagazo que la obtenida por la combustión directa del etanol.

Figura 1. **Estequiometría de la conversión de una tonelada de bagazo integral a etanol**



Fuente: TORRES, Francisco; GARRIDO, Norge. *Bagazo de caña de azúcar: ¿energía o etanol carburante?* <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar31/HTML/Articulo02N.htm>

Consulta: 8 de diciembre de 2014.

La figura 1 muestra la estequiometría de conversión de una tonelada de bagazo en etanol, al desprender cada uno de sus componentes en hexosas y pentosas por medio de un proceso de hidrólisis que posteriormente se fermenta para la obtención del etanol.

1.6. Parámetros de producción de etanol y azúcar

En la producción de etanol y azúcar deben tomarse en cuenta distintos parámetros que pueden afectar su elaboración y mermar los niveles de calor producidos durante el proceso de combustión, entre los cuales se destacan:

- Eficiencia en calderas
- Eficiencia en turbogeneradores
- Consumo de vapor
- Índice de producción de vapor
- Índice de disponibilidad del bagazo
- Porcentaje de obtención de bagazo a partir de la caña de azúcar
- Poder calorífico superior (PCS)
- Poder calorífico inferior (PCI)
- Consumo de energía eléctrica
- Producción de energía eléctrica

Cada uno de estos factores debe ser revisado exhaustivamente por técnicos, operadores, y encargados del ingenio azucarero, para mantener niveles óptimos en estos índices, ya que una alteración en cualquiera de estos parámetros podría perjudicar de manera significativa en la producción calorífica durante la generación de energía eléctrica en la industria.

2. PROCESO DE GENERACIÓN DE VAPOR

2.1. Recepción del bagazo

El Departamento de Molinos en el Ingenio Azucarero es el ente encargado de extraer el jugo de caña de azúcar; durante este procedimiento se obtiene un residuo o excedente provocado por el proceso de trituración, denominado bagazo.

La recepción del bagazo se realiza en el Departamento de Molinos a través de una faja transportadora, la que se encarga de distribuir el biocombustible hacia el conductor principal de bagazo, el cual, a su vez, distribuye a las fajas transportadoras complementarias encargadas de proveer bagazo a las calderas.

El resultado puede provocar cierto excedente durante el proceso, el cual retorna nuevamente a las líneas conductoras de bagazo después de haber descargado en cada una de las calderas para mantener un nivel constante de alimentación.

2.2. Distribución de bagazo a calderas

Existen compuertas en todos los pisos de los alimentadores de las calderas, con el objetivo de que los operadores se encarguen de proveer el bagazo necesario, proveniente de las líneas conductoras de bagazo, para el proceso de combustión. El nivel del biocombustible dentro del horno de una caldera debe ser el óptimo para su posterior quema.

La distribución del bagazo se subdivide en dos grupos:

- Distribución de bagazo a calderas de baja presión
- Distribución de bagazo a calderas de alta presión

2.3. Alimentadores de biomasa en calderas

Existen dos tipos de alimentación en una caldera:

- Alimentación por gravedad
- Alimentación por medio de alimentadores automáticos

2.3.1. Alimentación por gravedad

Se define como la conducción de bagazo por medio de ductos directos al horno de una caldera, bajo el efecto que supone la gravedad sobre ellos.

2.3.2. Alimentación por medio de alimentadores automáticos

Se define como la conducción de bagazo por ductos sincronizados electrónicamente con el nivel de presión de la caldera; dependiendo de este factor, los ductos se activan electrónicamente, alimentándola según el nivel de bagazo que necesita.

El conductor de alimentación principal de bagazo alimenta a distintos conductores auxiliares. La tabla 2 presenta, a continuación, una muestra en la relación de alimentadores de bagazo, a las distintas calderas de baja y alta presión del Ingenio.

Tabla II. **Relación de alimentación de conductores hacia calderas de baja y alta presión**

Tipo de alimentador	Núm. de alimentador	Núm. de caldera	Tipo de caldera
Conductor auxiliar	1	1	Baja presión
Conductor auxiliar	2	1, 2	Baja presión
Conductor auxiliar	3	2, 3	Baja presión
Conductor auxiliar	4	3	Baja presión
Conductor auxiliar	5	5	Baja presión
Conductor auxiliar	6	5, 6	Baja presión
Conductor auxiliar	7	6	Baja presión
Conductor transversal	1	9	Baja presión
Conductor transversal	2	7, 8	Alta presión

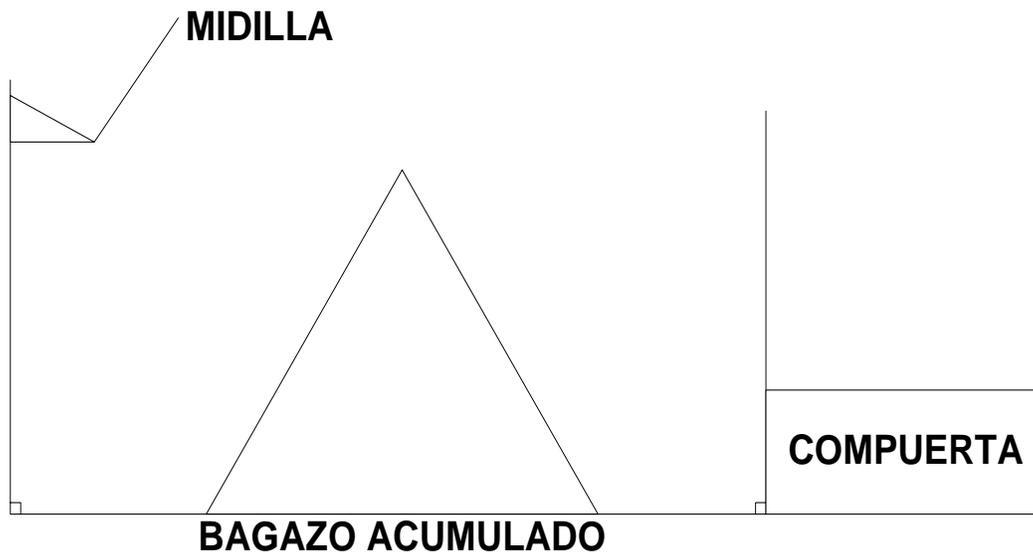
Fuente: elaboración propia.

2.4. **Combustión de biomasa**

El proceso de combustión de una caldera corresponde a la quema del bagazo por medio de una reacción química. Este proceso, se lleva a cabo en el hogar de la caldera. Existen dos tipos de hogares en las calderas dentro del ingenio: hogar tipo herradura y hogar tipo *pinhole*.

El hogar tipo herradura es un horno en el cual se procura elaborar, con ayuda del bagazo que cae desde los alimentadores, una montaña en forma de cono vista desde una perspectiva lateral para la generación de combustión, la cual se apoya por medio de toberas que se encargan de inyectar el aire secundario y el aire extractor provenientes de los ventiladores. La forma ideal en la que opera este tipo de horno es colocar una midilla de aproximadamente 1,80 m desde la base del horno, para contabilizar la altura óptima del bagazo que se desea quemar. Las calderas 1 y 6 del Ingenio poseen el hogar tipo herradura.

Figura 2. **Representación gráfica de hogar tipo herradura**

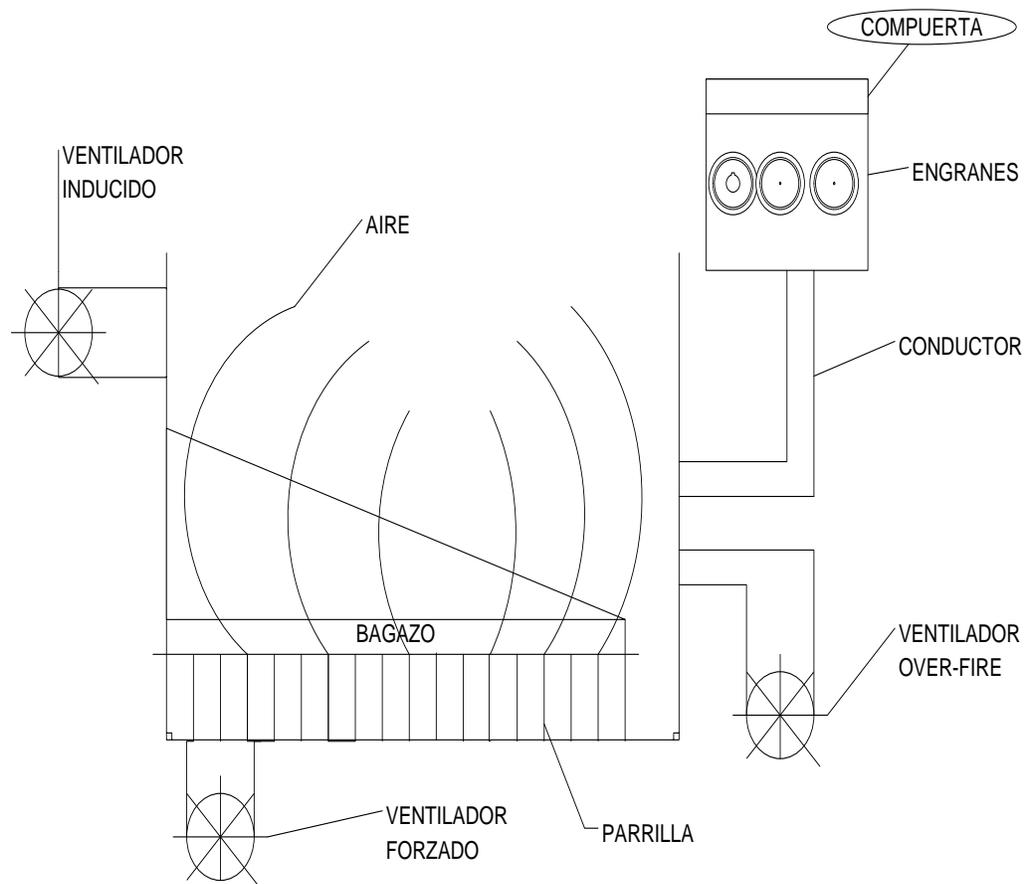


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

El hogar tipo *pinhole* es un horno formado por tres tipos de ventiladores: inducido, forzado y *overfire*. El ventilador Inducido se encarga de suministrar el aire extractor; el ventilador forzados se encarga de suministrar el aire secundario; mientras que el ventilador *overfire* se encarga de inyectar aire en la

parte frontal del horno para distribuir el bagazo dentro de toda la caldera. Las calderas 7, 8 y 9 del Ingenio poseen el hogar tipo *pinhole*.

Figura 3. **Representación gráfica de hogar tipo *pinhole***



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

Los ventiladores que inyectan los distintos tipos de aire dentro de los hornos forman una masa de aire que genera una especie de remolino, cuyo objetivo es el de conseguir que el proceso de combustión se realice de una forma más homogénea. Las cenizas que se forman como producto del proceso de combustión se acumulan al fondo del hogar de una caldera.

2.4.1. Generación de vapor

El proceso de generación de vapor ocurre en los domos de las calderas, el calor ocasionado por la combustión eleva la temperatura del agua y se convierte en vapor.

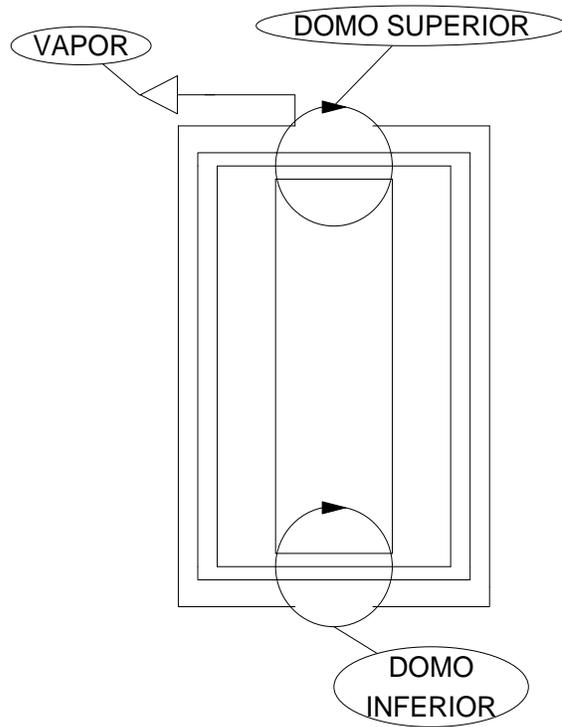
La generación de vapor dentro de las calderas del Ingenio se lleva a cabo en dos tipos de domos:

- Calderas de dos domos
- Calderas de tres domos

2.4.1.1. Calderas de dos domos

Las calderas formadas por dos domos se conectan entre ellas por medio de toberas que enlazan los domos en forma vertical, el vapor se extrae del domo superior. La figura 4, que se presenta a continuación, demuestra el funcionamiento de este tipo de domo.

Figura 4. **Caldera de dos domos**

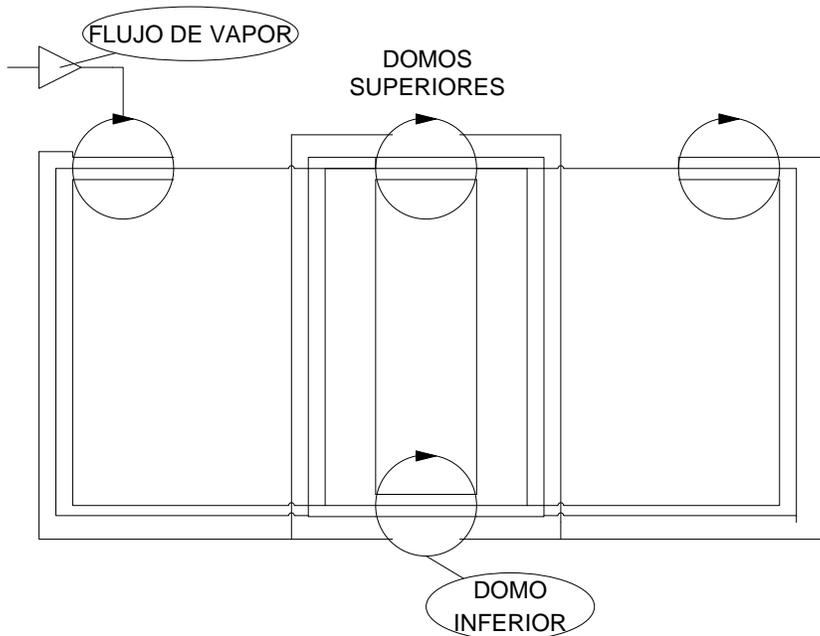


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

2.4.1.2. **Calderas de tres domos**

Las calderas formadas por tres domos se conectan entre ellas por medio de toberas que interceptan un grupo de domos en forma horizontal y un domo en la parte inferior del sistema. El vapor se extrae de la intersección de tuberías del grupo de domos en la parte superior del sistema. La figura 5 demuestra el funcionamiento de este tipo de domo.

Figura 5. **Caldera de tres domos**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

2.4.2. Producción de libras de vapor

Después de pasar por el proceso de generación de vapor, se obtiene la producción de libras de vapor que el ingenio necesita para consumir. El Ingenio Azucarero tiene estimada la utilización de 18 000 toneladas al día de caña, de las cuales se obtiene aproximadamente el 27,1 % de bagazo a partir de la caña.

En el Ingenio se manejan cantidades estándares de bagazo para alimentar las calderas, con el objetivo de no provocar una sobreproducción de libras de vapor; ya que esto repercutiría en la cantidad de bagazo por quemar y por la ineficiencia de las calderas, ocurriría algo similar al manejar una baja producción de libras de vapor.

Existen algunos factores que condicionan la producción de libras de vapor, de los cuales están:

- Cantidad de molida
- Condiciones de la caña de azúcar

La siguiente tabla muestra la producción de libras de vapor por cada una de las calderas del Ingenio, según datos promedios de operación normal durante carga alta (ver tabla 3).

Tabla III. **Producción de libras de vapor de las calderas, en libras de vapor por hora**

Núm. de caldera	Producción (Lb d V/hr)
1	65 000
2	25 000
3	25 000
5	50 000
6	100 000
7	120 000
8	215 000
9	300 000

Fuente: elaboración propia.

2.5. Distribución de vapor

Cuando se obtienen las libras de vapor necesarias, se distribuyen hacia tres áreas específicas, las cuales son:

- Distribución de vapor a molinos
- Distribución de vapor a patios
- Distribución de vapor a generadores

2.5.1. Distribución de vapor a molinos

El vapor es distribuido por un cabezal general que dirige el vapor hacia una salida en el área de molinos con una tubería de 20 plg de diámetro a una presión de 200 psi.

2.5.2. Distribución de vapor a patios

La distribución de vapor a patios se realiza por el cabezal general que dirige una presión de vapor de 200 psi, hacia el área de patios donde se encuentran ubicadas las picadoras, por medio de una tubería de 12 plg de diámetro.

2.5.3. Distribución de vapor a generadores

El vapor se distribuye hacia dos áreas: baja presión y alta presión. El área de baja presión de vapor se distribuye hacia los turbogeneradores 1 y 2; el cabezal del turbogenerador 1, lo transporta mediante una tubería de 10 plg y el cabezal del turbogenerador 2 transporta el vapor mediante una tubería de 8 plg. El área de alta presión distribuye el vapor hacia el turbogenerador 3 por medio

de una tubería de 10 plg y por medio de una tubería de 16 plg, se distribuye al turbogenerador 4. Para esta área se cuenta con un aproximado de 400 psi de presión, la cual abastece a estos turbogeneradores.

En el Ingenio, los turbogeneradores producen aproximadamente una cantidad considerable de megavatios. El turbogenerador 1 desarrolla aproximadamente 1 MW; el turbogenerador 2 genera cerca de 1,5 MW; el turbogenerador 3 6 MW y el turbogenerador 4 cerca de 21 MW aproximadamente.

2.6. Tratamiento de cenizas

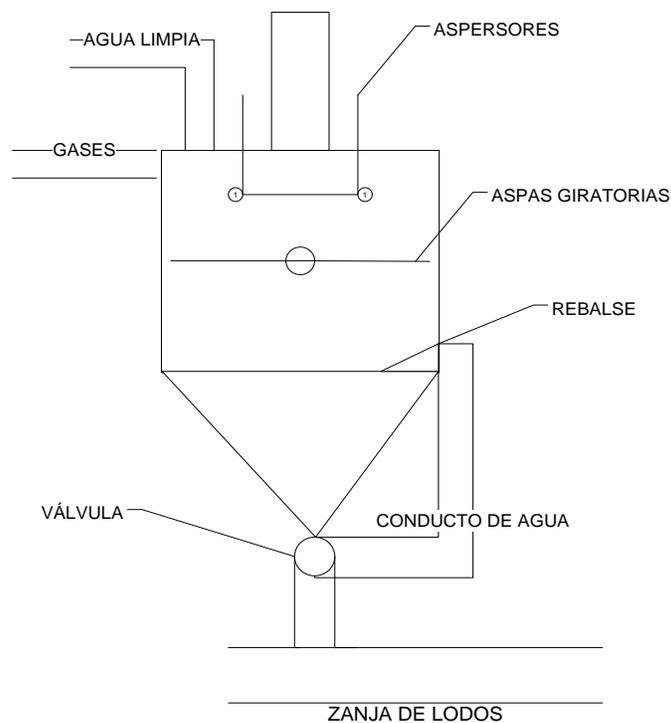
En el Ingenio, el tratamiento de cenizas se utiliza para el lavado de gases de combustión, en todas las calderas. Cuando se extraen los gases de combustión de las calderas por medio de los ventiladores inducidos, estos llegan a un proceso de lavado de gases en las calderas 1, 5, 6, 7, 8 y 9, respectivamente. Mientras que en las calderas 2 y 3, los gases se expulsan directamente al ambiente.

Cuando los gases de combustión pasan por el lavado, se activan dos líneas de aspersores de agua limpia que se encuentran en medio del tanque para lavarlos; al mismo tiempo, se activan aspas giratorias que los retienen cierto período. El residuo que se genera en el proceso de lavado de gases se almacena dentro del tanque, el cual, al mezclarse con agua limpia, evita la sedimentación.

Asimismo, posee un rebalse que indica el volumen almacenado que debe purgarse. Cuando el residuo alcanza el rebalse, este es purgado a través de una válvula que lo conduce hacia una zanja de lodos, para atravesar el proceso

de filtración. En la figura 6, que a continuación se presenta, se muestra el proceso de lavado de gases en el tanque.

Figura 6. **Proceso de tratamiento de cenizas**

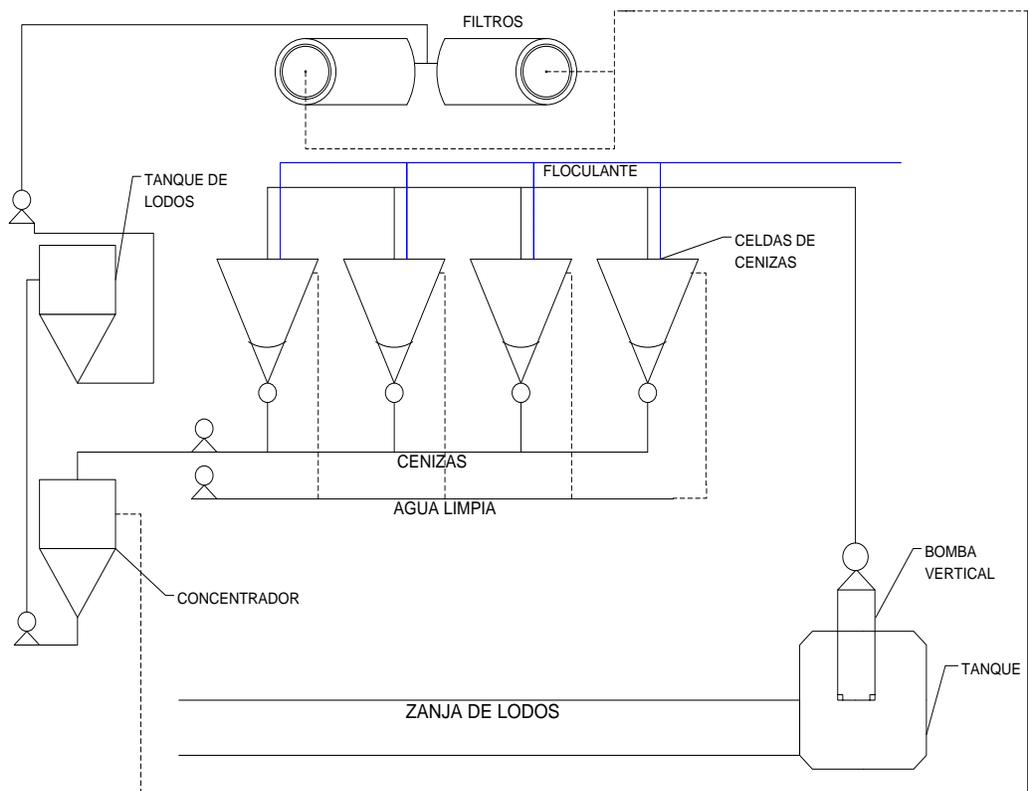


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

El procedimiento de filtración consiste en separar las cenizas y el agua limpia que se encuentran mezcladas en el residuo del proceso de lavado de gases. El residuo, que es transportado a través de la zanja de lodos, coincide con un tanque de almacenamiento, el cual, por medio de una bomba, es impulsado hacia las celdas de cenizas. A las celdas de cenizas se les agrega un floculante que se encarga de decantar el agua limpia por medio de una tubería, retornándola hacia el proceso de lavado de gases y las cenizas, hacia un proceso de filtración.

Las cenizas son enviadas a un concentrador para luego ser transportadas por medio de una bomba hacia un tanque de lodos, allí las cenizas se condensan previo a pasar al área de filtros rotativos, los cuales se encargan de discernir las cenizas de almacenamiento y expulsión, con las cenizas no condensadas que deben atravesar nuevamente el proceso de filtración. La figura 7 indica el proceso de filtración de cenizas llevado a cabo en los tanques de cenizas.

Figura 7. **Proceso de filtrado de cenizas**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

3. ANÁLISIS RELACIÓN BAGAZO VS. PAJA DE CAÑA

3.1. Biocombustibles en ingenios

En la actualidad, el empleo de biocombustibles como fuente de energía ha tenido un enorme auge en la industria azucarera como respuesta rentable y económica a la utilización de combustibles fósiles derivados del petróleo. El bagazo juega un papel importante dentro del crecimiento de los ingenios azucareros, debido a que cada vez más se emplea este biocombustible para la cogeneración de energía que se aprovecha para el sustento de las industrias y su posterior venta.

La disminución de inversiones en el sector eléctrico durante los últimos tiempos en la mayoría de países de Latinoamérica, escoltada por un asiduo incremento en el consumo de energía eléctrica, origina graves problemas en el abastecimiento de la demanda. Como consecuencia, se puede evidenciar el potencial creciente de las industrias azucareras con disponibilidad de cuantiosas cantidades de bagazo, aprovechándolo como una fuente de energía rentable. Según datos de Herrera, existen en el mundo alrededor de 70 países productores de caña de azúcar, con un área de siembra de aproximadamente 12,7 millones de hectáreas.⁴

⁴ CARRASCO CARPIO, R. *Criterios de evaluación termodinámica para sistemas de cogeneración en centrales azucareras.* http://www.sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/Publicaciones/hidraulica_mecanica/2001_n2/criterios. Consulta: 25 de febrero del 2015.

La caña de azúcar debe ser considerada como una fuente alimenticia, fuente de energía y otras variedades suplementarias. La comparación del costo de energía de otros tipos de biomasa, como el eucalipto, cuyo valor es de US \$ 2,2 por gigajoule con el costo del bagazo y el de la paja de caña, cuyos valores oscilan entre US \$ 0,281 por gigajoule y US \$ 0,95-2,21 por gigajoule respectivamente, según indica Carrasco Carpio⁵. Esto permite clasificar el bagazo como principal biomasa de bajo coste, seguido de la paja de caña y el eucalipto, lo que permite realizar, de forma rentable, la cogeneración de energía eléctrica por medio de métodos de baja eficiencia durante la época de zafra.

Actualmente, en la mayoría de países latinoamericanos se observa la predilección de estimular la cogeneración en las industrias azucareras. Se han reportado estudios y avances en este sentido en países como Cuba, México, Brasil, Costa Rica, Jamaica, Guatemala, El Salvador, Honduras, Colombia, entre otros.

3.2. Generalidades del bagazo

El bagazo es el excedente producido al final del proceso de molienda. Es un residuo leñoso aprovechado como biocombustible para la generación de vapor en la mayoría de industrias azucareras; su manejo puede constituir un problema en circunstancias de almacenamiento y aportación de energía. El bagazo suele almacenarse en lugares secos y poco húmedos, para perder cierto porcentaje de humedad con el transcurrir del tiempo y aumentar su valor calorífico. Sin embargo, teniendo presente el aspecto voluminoso como una de sus características principales, se torna muy difícil su almacenamiento si no se

⁵ CARRASCO CARPIO, R. *Criterios de evaluación termodinámica para sistemas de cogeneración en centrales azucareras*. http://www.sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/Publicaciones/hidraulica_mecanica/2001_n2/criterios. Consulta: 25 de febrero del 2015.

cuenta con un espacio lo suficientemente amplio para acopiarlo. Otro problema que puede presentar, es cuando el porcentaje de humedad excede los límites permitidos (>50 % promedio) por lo que su poder calorífico decrece, haciendo muy complicada su combustión en el interior de las calderas, por lo que es recomendable almacenarlo en espacios abiertos donde exista suficiente sol para degradar los niveles de humedad.

3.2.1. Propiedades físicas del bagazo

El bagazo de caña de azúcar consiste esencialmente en humedad, fibra y sólidos solubles. Los componentes principales del bagazo son celulosa, pentosana y lignina. Entre las características físicas del bagazo, se tienen dos partes fundamentales:

- Fibra: constitución de fibras largas, derivadas de la superficie y sus interiores.
- Meollo: este componente es derivado del parénquima, parte de la caña donde se almacena el jugo con sacarosa.

La tabla IV muestra las características y composición de la fibra del bagazo según datos recopilados por el *Manual del cultivador de hongos*, de Taurachand.

Tabla IV. **Composición y propiedades físicas del bagazo**

Propiedad	Composición (%)
Humedad	49
Fibra	48
Sólidos Solubles (azúcar)	2,3
Celulosa	48
Pentosana	28,7
Lignina	14,3

Fuente: TAURACHAND, Dewraj. *Manual del cultivador de hongos I. s.p.*

3.2.2. **Propiedades químicas del bagazo**

La composición química del bagazo se observa con base en el nivel de porcentaje presente en los elementos químicos como: aluminio, silicio, calcio, magnesio, sodio, oxígeno, entre otros. Según datos de Arias, expuestos por Carrasco Carpio, se poseen los siguientes elementos químicos están presentes en el bagazo:⁶

⁶ CARRASCO CARPIO, R. *Criterios de evaluación termodinámica para sistemas de cogeneración en centrales azucareras.* http://www.sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/Publicaciones/hidraulica_mecanica/2001_n2/criterios. Consulta: 25 de febrero del 2015.

Tabla V. **Composición química del bagazo**

Elemento	Composición (%)
SiO₂	67,52
Al₂O₂	3,50
CaO	7,60
MgO	3,50
Fe₂O₃	8,95
K₂O	3,75
Na₂O	2,17
P₂O₅	1,70
SO₃	0,03

Fuente: CARRASCO CARPIO, Ricardo. *Criterios de evaluación termodinámica para sistemas de cogeneración en centrales azucarera.*

http://www.sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/Publicaciones/hidraulica_mecanica/2001_n2/criterios.

Consulta: 25 de febrero de 2015.

3.2.3. **Grado calorífico del bagazo**

El grado calorífico del bagazo puede variar según el porcentaje de humedad, brix, composición y la región donde se ha extraído. Según información revelada por análisis efectuados en el Ministerio de Energía y Minas (MEM) y el Ingenio Azucarero ubicado en el departamento de Escuintla,

Guatemala; se han obtenido los siguientes datos derivados de muestras provenientes del Ingenio Azucarero evaluado:

Tabla VI. **Grado calorífico y porcentaje de cenizas en muestra de bagazo, según MEM**

Elemento	Grado Calorífico (BTU/Lb)	Cenizas (%)
Bagazo	7 465	2,24

Fuente: Ministerio de Energía y Minas.

El análisis efectuado en el Ministerio de Energía y Minas (MEM) sobre la muestra de bagazo, se realizó en una bomba calorimétrica a base seca por alto contenido de humedad, producto de un período de operación donde se aplicaron elevados contenidos de imbibición. A pesar de ello, se postula con un elevado grado calorífico (producto del tipo de análisis a base seca) y un porcentaje normal de impurezas.

Tabla VII. **Grado calorífico y porcentaje de cenizas en muestra de bagazo, según Ingenio Azucarero**

# Muestra	Grado Calorífico (BTU/Lb)	Cenizas (%)
Bagazo 1	3 760	2,12
Bagazo 2	3 817	1,66
Bagazo 3	4 127	1,86
Bagazo 4	1 900	1,92
Bagazo 5	2 955	1,70
Bagazo 6	3 478	1,98

Fuente: Laboratorio de Caña, Ingenio Azucarero ubicado en departamento de Escuintla, Guatemala.

El análisis realizado en el Laboratorio de Caña del Ingenio Azucarero sobre 6 muestras de bagazo, muestra valores semejantes entre sí, oscilando en valores estándares sobre grado calorífico en bagazo. Además, poseen niveles similares en los porcentajes de impurezas. El análisis se efectuó en un calorímetro, según la capacidad del instrumento: 1 g por muestra.

3.3. Generalidades de la paja de caña

La basura residual de la caña de azúcar después de prepararla, comúnmente llamada paja de caña, se compone principalmente de las hojas, puntas, raíces, pedazos de tallo que se cortan de la caña en los campos o en las mesas de preparación de esta planta. En la época de resurgimiento de las

industrias azucareras, la paja de caña se acumulaba en enormes cantidades para luego desecharla. Actualmente, algunos ingenios azucareros de la zona y de otros países productores de azúcar utilizan la paja de caña como abono fertilizante en los campos de cosecha debido a su riqueza en nutrientes para el suelo y como alimento para ganado porcino y bovino.

La paja de caña de azúcar puede constituir un problema por su manejo irresponsable. Este producto no debe almacenarse en espacios cerrados cerca de cables de alta tensión o elementos pirotécnicos que puedan originar su quema, ya que puede generar resultados destructivos por su facilidad de combustión, al igual que el bagazo. Otro de los problemas que puede presentar es su utilización dentro del proceso de molienda, debido a que no es posible retirar en un cien por ciento la basura dentro de las jaulas de caña, su injerencia en los molinos puede perjudicar su eficiencia de funcionamiento y reducir la capacidad de extracción de jugo.

Según el *Manual del azúcar de caña* de James Chen, la paja de caña o basura puede clasificarse como fibrosa y terrosa. La basura fibrosa consiste en puntas de caña, hojas y raíces. La basura terrosa constituye lodo y tierra. En África del Sur, se han determinado las siguientes cifras de basura fibrosa presentes en la molienda, en función de las pérdidas de recuperación de azúcar:

Tabla VIII. **Pérdidas de recuperación de azúcar por residuos fibrosos en África del Sur**

Residuo Fibroso (%)	Pérdidas de recuperación (% de azúcar de 96%)
3	1,8
5	3,1
7	4,5
9	6,0
11	7,7
13	9,1
15	11,5
17	13,6

Fuente: CHEN, James. *Manual del azúcar de caña*. s.p.

Además, se ha visto que el incremento de la paja de caña en el proceso de fabricación eleva los niveles de pureza en el contenido de las mieles finales. Chen expone una relación de aumento en el porcentaje de pureza en las mieles finales, ante la presencia de cierto porcentaje de residuo en la caña (ver tabla IX).

Tabla IX. **Pureza de las mieles finales**

Pureza de las mieles finales de caña limpia	Paja de caña (%)	Incremento de la pureza (% de basura)	Pureza de las mieles finales en presencia de paja de caña
31	3	2,3	33,2
31	5	3,8	34,8
31	7	5,3	36,3
31	9	6,8	37,8
31	11	8,3	39,3
31	13	9,8	40,3
31	15	11,3	42,3
31	17	12,8	43,8

Fuente: CHEN, James. *Manual del azúcar de caña*. s.p.

3.3.1. **Propiedades físicas de la paja de caña**

La constitución física de la paja de caña es similar a la de la propia planta de caña. Esto se debe a que la primera es resultado del residuo de la preparación de la segunda, por lo que, en cuestión de propiedades físicas, son muy similares; con la excepción del contenido de humedad y ceniza, productos que la paja de caña posee más en su composición.

La tabla X describe los contenidos de humedad y ceniza de la paja de caña en relación a su poder calorífico inferior (PCI).

Tabla X. **Características de la paja de caña en relación al poder calorífico inferior (PCI)**

PCI (Base seca)	Humedad (%)	Cenizas (%)	Referencia
15.62	7.8-30.38	9,4	Álvarez et al (1986)
12.48	25.3	7,0	Aguilar et al (1996)
15.88	-	7,20	Arias et al (1992)
15.86	-	13,20	Armas y Rubio (1990)
14.6	50	6,0	Magasliner (1996)

Fuente: CARRASCO CARPIO, Ricardo. *Criterios de evaluación termodinámica para sistemas de cogeneración en centrales azucareras.*

http://www.sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/Publicaciones/hidraulica_mecanica/2001_n2/criterios.

Consulta: 25 de febrero de 2015.

3.3.2. Propiedades químicas de la paja de caña

La composición química de la paja de caña se observa con base en el nivel de porcentaje presente de elementos químicos como aluminio, silicio, calcio, magnesio, sodio, oxígeno, entre otros. Según datos de Arias, expuestos por Carrasco Carpio, se poseen los siguientes elementos químicos están presentes (ver tabla XI) en la paja de caña:

Tabla XI. **Composición química del bagazo**

Elemento	Composición (%)
SiO₂	64,71
Al₂O₂	4,21
CaO	13,77
MgO	6,22
Fe₂O₃	1,37
K₂O	6,87
Na₂O	1,00
P₂O₅	0,27
SO₃	0,01

Fuente: CARRASCO CARPIO, Ricardo. *Criterios de evaluación termodinámica para sistemas de cogeneración en centrales azucareras.*

http://www.sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/Publicaciones/hidraulica_mecanica/2001_n2/criterios.

Consulta: 25 de febrero de 2015.

3.3.3. **Grado calorífico de la paja de caña**

El grado calorífico de la paja de caña, lo mismo que el bagazo, puede variar según el porcentaje de humedad, brix, composición y la región donde se ha extraído. Según datos obtenidos por análisis efectuados en el Ministerio de Energía y Minas (MEM) y en el Ingenio Azucarero ubicado en el departamento

de Escuintla, Guatemala, se han conseguido los siguientes valores derivados de muestras provenientes del Ingenio Azucarero evaluado:

Tabla XII. **Grado calorífico y porcentaje de cenizas en muestra de paja de caña según MEM**

Elemento	Grado Calorífico (BTU/Lb)	Cenizas (%)
Paja de Caña	4 443	41,67

Fuente: Ministerio de Energía y Minas.

El análisis elaborado por el Ministerio de Energía y Minas (MEM) sobre la muestra de paja de caña se realizó en una bomba calorimétrica con base húmeda, según Norma ASTM D-240 por bajo contenido de humedad, producto de un período de secado previo a la toma de muestra. Se ha adquirido un valor de poder calorífico excelso, derivado de las condiciones a las que fue sometido, además de presentar un porcentaje de impurezas elevado en comparación con el bagazo.

Tabla XIII. **Grado calorífico y porcentaje de cenizas en muestra de paja de caña según Ingenio Azucarero**

# Muestra	Grado Calorífico (BTU/Lb)	Cenizas (%)
Paja de Caña 1 (Mesa Granel)	2 952	1,92
Paja de Caña 2 (Mesa Mecanizado)	3 962	2,18

Fuente: Laboratorio de Caña, Ingenio Azucarero ubicado en departamento de Escuintla, Guatemala.

Se han analizado dos clases de paja de caña según procedencia de dos mesas de caña: mesa a granel y mesa mecanizada. El estudio establecido en el Laboratorio de Caña del Ingenio Azucarero, percibe alta variación entre los valores de poder calorífico de las dos mesas de caña. Este resultado se debe a que la mesa de caña a granel prepara caña larga con altos contenidos de tierra y niveles de humedad, mientras que la mesa de caña mecanizada presenta también altos contenidos de impureza, pero con elementos de caña de fácil combustión como hojas secas. El análisis se efectuó en un calorímetro, según capacidad del instrumento: 1 g por muestra.

3.4. Relación de aportación de vapor en combustión

El vapor originado durante el proceso de combustión proviene de dos líneas de presión de vapor conectadas con las calderas de alta y baja presión. El vapor generado por parte de las calderas de baja presión fluye bajo una presión de aproximadamente 205-230 psi, asimismo, el vapor generado por parte de las calderas de alta presión fluye bajo una presión de aproximadamente 530-560 psi.

En dado caso existiese una perturbación en el flujo de vapor de la línea de 205-230 psi, se activa una válvula que permite alimentar vapor de forma continua a la línea de baja presión por medio de la línea de alta, con el motivo de recuperar el nivel de presión en la línea de baja. El rango de flujo de vapor por parte de las dos líneas de presión se encuentra entre 300 000 y 400 000 lb de vapor por hora. En la siguiente tabla se detallará la estimación de flujo de vapor por parte de las calderas, utilizando únicamente bagazo durante una molienda estándar (ver tabla XIV).

Tabla XIV. **Producción de libras de vapor de las calderas en operación durante molienda estándar en libras de vapor por hora**

Núm. de caldera	Producción teórica estimada (Lb d V/hr)
1	90 000-100 000
2	40 000-60 000
3	40 000-60 000
5	40 000-60 000
6	80 000-100 000
7	90 000-120 000
8	200 000-250 000
9	330 000-370 000

Fuente: elaboración propia.

La producción teórica de vapor que se presenta en las calderas se calcula por el promedio de los rangos demostrados; por lo que se tiene una producción promedio de libras de vapor por hora de la siguiente forma:

- Caldera 1: 95 000 lb de vapor por hora
- Caldera 2: 50 000 lb de vapor por hora
- Caldera 3: 50 000 lb de vapor por hora
- Caldera 5: 50 000 lb de vapor por hora
- Caldera 6: 90 000 lb de vapor por hora
- Caldera 7: 105 000 lb de vapor por hora
- Caldera 8: 225 000 lb de vapor por hora
- Caldera 9: 350 000 lb de vapor por hora

Obteniendo estos datos, se calcula el promedio de generación de vapor teórico en las dos líneas de presión del Departamento de Calderas de la siguiente forma:

Línea de alta presión: caldera 7 + caldera 8

$$= 105\,000 \text{ lbs} \frac{\text{vapor}}{\text{hora}} + 225\,000 \text{ lbs} \frac{\text{vapor}}{\text{hora}} = \mathbf{330\,000 \text{ lbs} \frac{\text{vapor}}{\text{hora}}}$$

Línea de baja presión: caldera 1 + caldera 2 + caldera 3 + caldera 5 + caldera 6
+ caldera 9

$$= 95\,000 \text{ lbs} \frac{\text{vapor}}{\text{hora}} + 50\,000 \text{ lbs} \frac{\text{vapor}}{\text{hora}} + 50\,000 \text{ lbs} \frac{\text{vapor}}{\text{hora}} \\ + 50\,000 \text{ lbs} \frac{\text{vapor}}{\text{hora}} + 90\,000 \text{ lbs} \frac{\text{vapor}}{\text{hora}} + 350\,000 \text{ lbs} \frac{\text{vapor}}{\text{hora}} \\ = \mathbf{685\,000 \text{ lbs} \frac{\text{vapor}}{\text{hora}}}$$

3.5. Mezcla de bagazo y paja de caña

Se pretende obtener una mezcla de bagazo y paja de caña de azúcar con el apoyo de la ecuación de energías de Gibbs para fracciones molares parciales, con el objetivo de conseguir un valor similar de grado calorífico del bagazo que permita ahorrar biocombustible y sufragar su falta en el ciclo de caída de presión, además de mantener la producción necesaria de libras de vapor. La ecuación de energías de Gibbs para fracciones molares parciales se representa de la siguiente forma:

$$\Delta H_f = n_A(H_a) + n_B(H_b)$$

Donde:

ΔH_f = valor calorífico de mezcla

n_A = fracción parcial de elemento "a"

n_B = fracción parcial de elemento "b"

H_a = grado calorífico elemento "a"

H_b = grado calorífico elemento "b"

3.5.1. Cálculo de unidades de bagazo y paja de caña

Se realizaron los respectivos análisis sobre el cálculo de unidades de bagazo y paja de caña por medio de la ecuación de energías de Gibbs para fracciones molares parciales, tomando como referencia los valores adquiridos de grado calorífico del análisis efectuado, según las bases evaluadas (húmeda y seca respectivamente), por el Ministerio de Energía y Minas de Guatemala (MEM), sobre muestras de bagazo y paja de caña de azúcar. Se elaboraron supuestos teóricos sobre los resultados a obtener entre una serie de mezclas

de ambos componentes, asignándoles valores de fracciones parciales a cada uno de ellos. La tabla XV, expresa los resultados de los valores de grado calorífico entre de la serie de mezclas de bagazo y paja de caña.

Tabla XV. **Cálculo de grado calorífico de mezcla entre bagazo y paja de caña**

Relación	Na	PCS (Bagazo) "Ha" (Btu/lb)	Nb	PCS (Paja) "Hb" (Btu/lb)	"Hf" (Btu/lb)
A	0,7	7 465	0,3	4 443	6 558,4
B	0,75	7 465	0,25	4 443	6 709,5
C	0,8	7 465	0,2	4 443	6 860,6
D	0,85	7 465	0,15	4 443	7 011,7
E	0,9	7 465	0,1	4 443	7 162,8
F	0,95	7 465	0,05	4 443	7 313,9
G	1,0	7 465	0,0	4 443	7 465,0

Fuente: elaboración propia.

A través de los valores obtenidos de la tabla XV, se ha determinado que la relación "F" presenta el resultado más adecuado entre una mezcla de bagazo y paja de caña, debido a que se obtiene un valor análogo con el grado calorífico del bagazo para mantener la energía constante para producir las libras de vapor necesarias. Como resultado, se obtiene un valor teórico ideal de una mezcla conformada por un 95 % de bagazo y 5 % de paja de caña, según condiciones planteadas en la ecuación de energías de Gibbs para fracciones molares parciales.

3.5.2. Relación de unidades de bagazo por unidades de paja de caña

Luego de determinar el porcentaje de utilización de bagazo y paja de caña, se procede a calcular la relación de unidades de bagazo por unidad de paja de caña. Se poseen valores teóricos de una mezcla ideal de 95 % de bagazo y 5 % de paja de caña de azúcar, obteniendo una relación fraccional de $\frac{19}{20}$ partes de bagazo por $\frac{1}{20}$ partes de paja de caña.

Tomando el valor inicial de una molienda estándar en el Ingenio Azucarero de 4 878 toneladas de bagazo al día, se obtienen los siguientes valores:

$$4\,878 \frac{\text{ton}}{\text{día}} * 95 \% = 4\,634,1 \text{ ton de bagazo/día}$$

$$4\,878 \frac{\text{ton}}{\text{día}} * 5 \% = 243,9 \text{ ton de paja de caña/día}$$

La relación de utilización de ambos biocombustibles en una mezcla se reduce a la siguiente forma:

$$\frac{243,9 \text{ ton de paja de caña}}{4\,634,1 \text{ ton de bagazo}} = \frac{0,052631 \text{ ton de paja de caña}}{\text{ton de bagazo}}$$
$$= \frac{1 \text{ ton de paja de caña}}{19 \text{ ton de bagazo}}$$

3.6. Resultados sobre análisis

Posterior al análisis de relación de unidades de paja de caña y bagazo, se procede a llevar a cabo una comparación entre los resultados obtenidos por los análisis efectuados en el Laboratorio de Caña del Ingenio Azucarero sobre la

mezcla de ambos biocombustibles y el producto de la mezcla teórica, basados en el resultado de la relación entre ellos. Los resultados son los siguientes:

Tabla XVI. **Grado calorífico de mezcla entre muestra de paja de caña y bagazo según Ingenio Azucarero**

# Mezcla	Tipo	Grado Calorífico (BTU/Lb)
1	Bagazo 1/Paja de Caña (Mesa Granel)	2 997
2	Bagazo 2/Paja de Caña (Mesa Granel)	3 709
3	Bagazo 3/ Paja de Caña (Mesa Mecanizado)	3 831
4	Bagazo 4/Paja de Caña (Mesa Mecanizado)	3 025

Fuente: Laboratorio de Caña, Ingenio Azucarero ubicado en departamento de Escuintla, Guatemala.

La mezcla 1 muestra un grado calorífico menor a la muestra de bagazo 1, debido a que se permitió una mínima parte de cogollo en la muestra. La muestra 2 presenta un valor calorífico similar al ejemplar de bagazo 2, utilizando sobre todo hojas provenientes de la mesa de caña a granel en la muestra. La mezcla 3 tiene un valor calorífico menor a la del modelo de bagazo 3, aunque su diferencia es poco considerable; en esta mezcla se permitió una mínima parte de punta de caña. La mezcla 4 revela un grado calorífico mayor en comparación con el modelo de bagazo 4, esto se debe a que se utilizó, sobre todo, hoja seca proveniente de la mesa de caña mecanizado, elevando su poder calorífico y contrarrestando el mínimo valor calorífico presentado por el bagazo debido a su elevado contenido de humedad. Todas las mezclas se

llevaron a cabo en el Laboratorio de Caña del Ingenio Azucarero ubicado en la costa sur de Guatemala, utilizando un calorímetro como instrumento. Se llevó a cabo una mezcla de 80 % bagazo y 20 % de paja de caña en todas las muestras, debido a la capacidad del instrumento: 1 g por experimento, el cual únicamente permite 0,8 g de bagazo y 0,2 g de paja de caña, sujeto a las condiciones de las muestras.

Se ha determinado que la presencia de elementos como cogollos, puntas de caña e impurezas, merman el desempeño del valor calorífico entre la mezcla de ambos biocombustibles, como se puede observar considerablemente en la mezcla 1 y poco considerable en la mezcla 3. Sin embargo, si se emplean elementos como hojas secas y pedazos de tallos secos, estos contribuyen a la nivelación e incluso al alza del valor calorífico de las mezclas, como se puede visualizar en los resultados 2 y 4. Se concluye que el desempeño de la biomasa proveniente de la mesa de caña mecanizado es más efectivo que la mesa de caña a granel, por contener, en su mayoría, hojas secas y materiales de mayor facilidad de combustión. Cabe destacar que estos experimentos se realizaron con base en una combinación de 80 % bagazo y 20 % paja de caña, pudiendo presentar resultados mayoritariamente favorables si se hubiese producido una combinación de 95 % bagazo y 5 % de paja de caña.

Se demuestra que la utilización de la paja de caña (sobre todo de mecanizado), en relación con la aportación calorífica, es viable, por lo que supondría un efecto positivo en la implementación de este biocombustible como suplemento del bagazo para efectos de ahorro de combustible a mediano plazo. Es importante destacar que la utilización de paja de caña no supondría únicamente un ahorro mínimo de biocombustible en un período de zafra, sino, debido a sus características fisiológicas, podría permitir un ahorro superior de lo predispuesto, como lo demuestra el siguiente análisis.

Suponiendo una molienda estándar de 4 878 ton/día de bagazo con un porcentaje de humedad del 44,16 % y muestras de paja de caña a granel y mecanizada con porcentajes de humedad de 26,8 % y 34,0 % (ver tabla XXXII) respectivamente, se obtienen los siguientes resultados con relación a la utilización de combustible efectivo:

Tabla XVII. **Cálculo de combustible efectivo y depreciación de agua a evaporar**

Relación de bagazo	Combustible efectivo (ton)		Agua (ton)	
80 %	2 179,1		1 723,3	
85 %	2 315,29		1 831,01	
90 %	2 451,49		1 938,71	
95 %	2 587,68		2 046,42	
Relación de Paja	Granel (ton)	Mecanizado (ton)	Granel (26,8 %)	Mecanizado (34,0 %)
20 %	714,14	643,896	261,46	331,7
15 %	535,6	482,92	196,1	248,78
10 %	357,07	321,95	130,73	165,85
5 %	178,53	160,97	65,37	82,93

Fuente: elaboración propia.

Suponiendo una combustión ideal dentro del hogar de una caldera de ambas biomásas en diferentes posibilidades de relación de mezclas, se puede

despreciar el agua que se evapora y únicamente contar con el biocombustible efectivo para su utilización, como se demuestra a continuación:

Tabla XVIII. **Combustible efectivo de biomásas**

Relación de bagazo	Combustible efectivo (ton)	
80 %	2 179,1	
85 %	2 315,29	
90 %	2 451,49	
95 %	2 587,68	
Relación de paja	Granel (ton)	Mecanizado (ton)
20 %	714,14	643,896
15 %	535,6	482,92
10%	357,07	321,95
5%	178,53	160,97

Fuente: elaboración propia.

Partiendo de este análisis, se calcula el ahorro de combustible obtenido con la utilización de paja de caña en cada una de las posibles mezclas:

Tabla XIX. **Cálculo de ahorro de combustible a partir del combustible efectivo de biomásas**

Relación	Bagazo-paja a granel		Bagazo-paja mecanizada	
	Combustible efectivo (ton)	Ahorro	Combustible efectivo (ton)	Ahorro
80 %- 20 %	2 893,5	24,68 %	2 823	22,81 %
85 %- 15 %	2 850,89	18,79 %	2 798,21	17,26 %
90 %- 10 %	2 808,56	12,71 %	2 773,44	11,61 %
95 %- 5 %	2 766,21	6,45 %	2 748,65	5,86 %

Fuente: elaboración propia.

Luego de obtener los resultados teóricos de un ahorro de combustible relativamente mayor al predispuesto originalmente, basándose en el análisis anterior, donde la relación más adecuada de estos biocombustibles es de 19 partes de bagazo por 1 parte de paja de caña, para sostener los valores caloríficos promedios con el objetivo de mantener una óptima combustión; se obtiene el promedio de utilización por parte de ambas biomásas, el cual es de 6,16 % para una relación de 95 %-5 %.

Se ha demostrado que se pueden obtener diferentes beneficios a partir de la utilización de la paja de caña de azúcar, desde un ahorro del 5,0 % hasta el 6,16 % efectivo de bagazo, lo cual significaría ahorros monetarios para la industria, además del aprovechamiento energético que supondría la incursión de este elemento en un proyecto sostenible. Este beneficio económico se vería reflejado en el ahorro de bagazo a lo largo de un período de zafra estándar

(compuesto regularmente de 170 días) y su correlación con el valor monetario de una tonelada de bagazo, la eficiencia de una caldera y el precio de generación energética.

Esta relación se puede establecer con la eficiencia promedio de las calderas encargadas de cogenerar energía eléctrica (2,35 y 2,5 respectivamente, ver tabla XXVI), tonelaje ahorrado durante el período de zafra, la capacidad de generación de energía del Ingenio Azucarero (21 MW aproximadamente) y el precio *spot* sugerido por el Administrador de Mercado Mayorista de Guatemala (AMM), como se detalla a continuación.

Primero, se establece el tonelaje ahorrado durante un período de zafra estándar de 170 días, suponiendo un rendimiento efectivo de molienda del 80 %:

$$4\,878 \frac{\text{ton}}{\text{día}} * \frac{170 \text{ días}}{\text{zafra}} * \frac{80}{100} * 6,16 \% \text{ ahorro} = 40\,865,9328 \frac{\text{ton}}{\text{zafra}}$$

Segundo, se determina el promedio de la eficiencia de las calderas encargadas de producir vapor para cogeneración eléctrica:

$$\frac{2,35 \frac{\text{Klb de vapor}}{\text{Klb de bagazo}} + 2,5 \frac{\text{Klb de vapor}}{\text{Klb de bagazo}}}{2} = 2,425 \frac{\text{Klb de vapor}}{\text{Klb de bagazo}}$$

Por último, se establece el valor teórico monetario ahorrado, tomando como referencia el precio *spot* sugerido por el Administrador del Mercado Mayorista de Guatemala. Según la AMM, en el 2 014 se alcanzó un precio *spot* promedio durante todo el año de \$ 103,6/MW.

$$\frac{\$ 103,6}{MW} * \frac{1 MW}{14,5 Klb de vapor} * \frac{2,425 Klb de vapor}{1 Klb de bagazo} * \frac{1 Klb de bagazo}{1 000 lb de bagazo} * \frac{2,2 lb}{1 Kg} * \frac{907,18 Kg}{1 Ton métrica} * \frac{40 865,9328 Ton}{zafra} = \mathbf{1\ 413\ 126,564} \frac{\$}{Zafra}$$

Por otra parte, si se desea obtener el beneficio económico manteniendo un 5 % de ahorro de bagazo bajo las condiciones presentadas con anterioridad, se obtiene el siguiente resultado:

$$\frac{\$ 103,6}{MW} * \frac{1 MW}{14,5 Klb de vapor} * \frac{2,425 Klb de vapor}{1 Klb de bagazo} * \frac{1 Klb de bagazo}{1 000 lb de bagazo} * \frac{2,2 lb}{1 Kg} * \frac{907,18 Kg}{1 Ton métrica} * \frac{33\ 170,4 Ton}{zafra} \text{ ahorro del 5 \% durante zafra} = \mathbf{1\ 147\ 018,315} \frac{\$}{Zafra}$$

Conjeturando el valor promedio del precio de oportunidad de generación a lo largo del período de zafra, se pueden reflejar valores teóricos de beneficios económicos para la industria azucarera que podrían alcanzar desde \$ **1 147 018,315** hasta \$ **1 413 126,564**, al utilizar paja de caña de azúcar como suplemento biocombustible al bagazo para una relación de 95 %-5 % sin tomar en cuenta el beneficio económico por parte de la generación de energía al lograr conservar los niveles de presión, contando con el bagazo suficiente que supone esta acción.

Cabe destacar que podrían existir variaciones de tonelaje por parte de la paja de caña, debido a la necesidad de eliminación parcial o casi total de las impurezas que puedan mermar el desempeño calorífico de este biocombustible; además de las fluctuaciones que pueda presentar el Administrador de Mercado Mayorista de Guatemala con relación al precio *spot* de generación eléctrica.

Este análisis se ha basado bajo condiciones estándares presentadas por el Ingenio Azucarero evaluado, además de referencias por parte del Ministerio de Energía y Minas de Guatemala, el Administrador de Mercado Mayorista de Guatemala y estudios efectuados en un Ingenio Azucarero ubicado en la costa sur del departamento de Escuintla, Guatemala.

4. ANÁLISIS DEL CONTROL DEL RENDIMIENTO DE LAS CALDERAS

4.1. Antecedentes en registros

En el Departamento de Generación de Vapor del Ingenio Azucarero, se poseen distintos indicadores de producción de vapor y controles de medición, entre ellos, un sistema de control de niveles de presión que devela los valores de presión en las líneas de alta y baja presión durante cierto período. No obstante, no se posee el análisis de control estadístico para verificar si los niveles de presión se encuentran sobre rangos admisibles.

Se ha hecho un estudio por medio de una herramienta estadística llamada gráficos de control para variables. Este estudio se ha realizado con el objetivo de exponer el comportamiento de las líneas de presión e indicar si se encuentran dentro de los parámetros aceptables según los promedios de medias y rangos.

El método de gráficos de control para variables se calcula de la siguiente forma:

- Se realiza una plantilla de muestreo de ingreso de valores de las variables a analizar.

Figura 8. Plantilla de muestreo

Hoja de datos para gráficos de control de X y R								
Producto: _____			Depto: _____		Orden de trabajo: _____			
Característica: _____								
Unidad de medida: _____			Límites de especificación _____		Máx. _____			
					Mín. _____			
Muestra N°	Fecha de producción	medición 1	medición 2	medición 3	medición 4	\bar{X}	R	Observaciones
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
Totales								
Cálculos de límites								

Fuente: elaboración propia.

- Se determinan los promedios de las filas y columnas de los valores ingresados en la plantilla.

Figura 9. **Cálculo de promedios de medias y rangos**

Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Lectura 5	Lectura 6	Lectura 7	Lectura 8	Promedio Fila "X"	Rango "R"
1	X	x	X	X	X	x	X	X	X	xy
2	X	x	X	X	X	x	X	X	X	xy
3	X	x	X	X	X	x	X	X	X	xy
4	X	x	X	X	X	x	X	X	X	Xy
5	X	x	X	X	X	x	X	X	X	Xy
6	X	x	X	X	X	x	X	X	X	Xy
7	X	x	X	X	X	x	X	X	X	Xy
8	X	x	X	X	X	x	X	X	X	Xy
PROMEDIO (XX)									xyz	Xyz

Fuente: elaboración propia.

- Por medio de fórmulas estadísticas de medias y rangos, se determinan los límites de control superiores, inferiores y medias por medio de la tabla de factores para el cálculo de límites de control de gráficas para variables.

Figura 10. **Fórmulas estadísticas para el cálculo de promedios de medias y rangos**

$$\begin{array}{l}
 LCI_R = D_3 \bar{R} \quad LC = \bar{R} = \frac{\sum R_i}{k} \quad LCS_R = D_4 \bar{R} \\
 LCI_x = \bar{X} - A_3 \bar{S} \quad LCS_x = \bar{X} + A_3 \bar{S}
 \end{array}$$

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Tabla de factores para el cálculo de límites de control de gráficas para variables

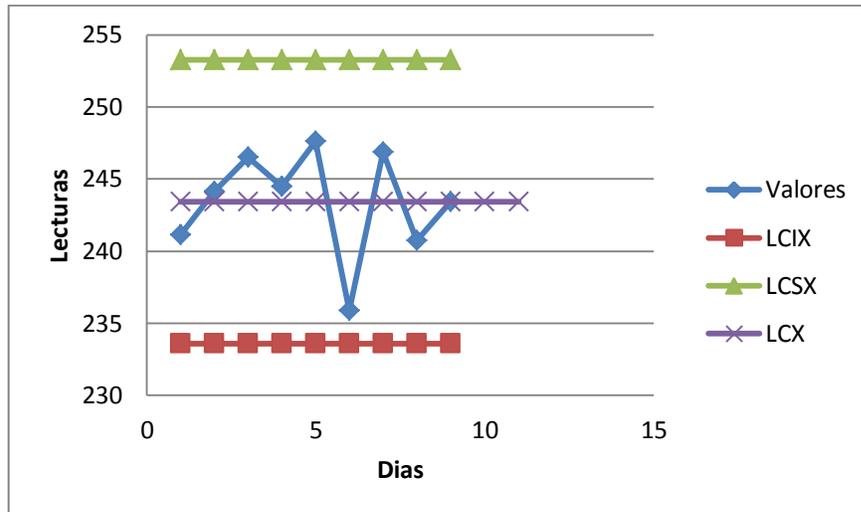
OBSERVACIONES EN LA MUESTRA, <i>n</i>	GRAFICA PARA PROMEDIOS			GRAFICA PARA LAS DESVIACIONES ESTANDAR				GRAFICA DE LOS RANGOS						
	FACTORES PARA LOS LIMITES DE CONTROL			FACTOR PARA LINEA CENTRAL	FACTORES PARA LIMITES DE CONTROL				FACTOR PARA LINEA CENTRAL	FACTORES PARA LOS LIMITES DE CONTROL				
	<i>A</i>	<i>A</i> ₂	<i>A</i> ₃	<i>c</i> ₄	<i>B</i> ₃	<i>B</i> ₄	<i>B</i> ₅	<i>B</i> ₆	<i>d</i> ₂	<i>d</i> ₁	<i>D</i> ₁	<i>D</i> ₂	<i>D</i> ₃	<i>D</i> ₄
2	2.121	1.880	2.659	0.7979	0	3.267	0	2.606	1.128	0.853	0	3.686	0	3.267
3	1.732	1.023	1.954	0.8862	0	2.568	0	2.276	1.693	0.888	0	4.358	0	2.574
4	1.500	0.729	1.628	0.9213	0	2.266	0	2.088	2.059	0.880	0	4.698	0	2.282
5	1.342	0.577	1.427	0.9400	0	2.089	0	1.964	2.326	0.864	0	4.918	0	2.114
6	1.225	0.483	1.287	0.9515	0.030	1.970	0.029	1.874	2.534	0.848	0	5.078	0	2.004
7	1.134	0.419	1.182	0.9594	0.118	1.882	0.113	1.806	2.704	0.833	0.204	5.204	0.076	1.924
8	1.061	0.373	1.099	0.9650	0.185	1.815	0.179	1.751	2.847	0.820	0.388	5.306	0.136	1.864
9	1.000	0.337	1.032	0.9693	0.239	1.761	0.232	1.707	2.970	0.808	0.547	5.393	0.184	1.816
10	0.949	0.308	0.975	0.9727	0.284	1.716	0.276	1.669	3.078	0.797	0.687	5.469	0.223	1.777
11	0.905	0.285	0.927	0.9754	0.321	1.679	0.313	1.637	3.173	0.787	0.811	5.535	0.256	1.744
12	0.866	0.266	0.886	0.9776	0.354	1.646	0.346	1.610	3.258	0.778	0.922	5.594	0.283	1.717
13	0.832	0.249	0.850	0.9794	0.382	1.618	0.374	1.585	3.336	0.770	1.025	5.647	0.307	1.693
14	0.802	0.235	0.817	0.9810	0.406	1.594	0.399	1.563	3.407	0.763	1.118	5.696	0.328	1.672
15	0.775	0.223	0.789	0.9823	0.428	1.572	0.421	1.544	3.472	0.756	1.203	5.741	0.347	1.653
16	0.750	0.212	0.763	0.9835	0.448	1.552	0.440	1.526	3.532	0.750	1.282	5.782	0.363	1.637
17	0.728	0.203	0.739	0.9845	0.466	1.534	0.458	1.511	3.588	0.744	1.356	5.820	0.378	1.622
18	0.707	0.194	0.718	0.9854	0.482	1.518	0.475	1.496	3.640	0.739	1.424	5.856	0.391	1.608
19	0.688	0.187	0.698	0.9862	0.497	1.503	0.490	1.483	3.689	0.734	1.487	5.891	0.403	1.597
20	0.671	0.180	0.680	0.9869	0.510	1.490	0.504	1.470	3.735	0.729	1.549	5.921	0.415	1.585

Derechos reservados de ASTM, 1916 Race Street, Filadelfia, PA, 19103. Se reproduce con autorización.

Fuente: BESTERFIELD, Dale. *Control de calidad*. p. 514.

- Por último, se grafican los resultados y se interpreta el comportamiento de la gráfica de control.

Figura 12. Ejemplo de gráfico de control de variables



Fuente: elaboración propia.

4.1.1. Análisis estadístico de control

Se han empleado las herramientas de gráficos de control para variables en los niveles de alta y baja presión, tomando muestreos de 8 lecturas en un período de 8 días. A continuación se presentan los muestreos tomados en las líneas de alta y baja presión.

Tabla XX. **Muestreo de niveles de presión en línea de 200 psi**

Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Lectura 5	Lectura 6	Lectura 7	Lectura 8	Promedio Fila "X"	Rango "R"
1	235	229	218	235	252	259	251	250	241,125	41
2	244	240	240	258	242	247	235	247	244,125	23
3	233	251	241	250	246	253	249	249	246,5	20
4	239	255	239	239	257	256	237	234	244,5	23
5	258	248	250	245	246	233	245	256	247,625	25
6	232	242	222	249	227	221	238	256	235,875	35
7	252	249	251	240	253	248	247	235	246,875	18
8	246	221	237	243	243	244	245	247	240,75	26
Promedio									243,422	26,375

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Muestreo de niveles de presión en línea de 500 psi**

Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Lectura 5	Lectura 6	Lectura 7	Lectura 8	Promedio Fila "X"	Rango "R"
1	529	526	527	529	546	519	538	540	531,75	27
2	541	538	529	518	532	541	505	533	529,625	36
3	542	549	560	543	562	562	566	559	555,375	24
4	526	521	551	533	529	540	560	525	535,625	39
5	551	544	569	559	574	538	547	558	555	36
6	585	548	553	524	542	539	527	525	542,875	61
7	524	535	500	541	528	526	541	575	533,75	75
8	534	531	536	539	539	545	539	558	540,125	27
Promedio									540,5156	40,625

Fuente: elaboración propia.

Luego de obtener los promedios de medias y rangos de los valores, se procedió a calcular los límites de medias y rangos por medio de la tabla de factores para el cálculo de límites de control de gráficas para variables.

Tabla XXII. **Cálculo de límites de control de medias y rangos de niveles de presión en línea de 200 psi**

LCIR (D3*R)	$0.136*26,375$		3,587
LCR			26,375
LCSR (D4*R)	$1.864*26,375$		49,163
LCIX (XX-A2*R)		$243,42-0,373*26,375$	233,58
LCX (XX)		243,42	243,42
LCSX (XX+A2*R)		$243,42+0,373*26,375$	253,26

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Cálculo de límites de control de medias y rangos de niveles de presión en línea de 500 psi**

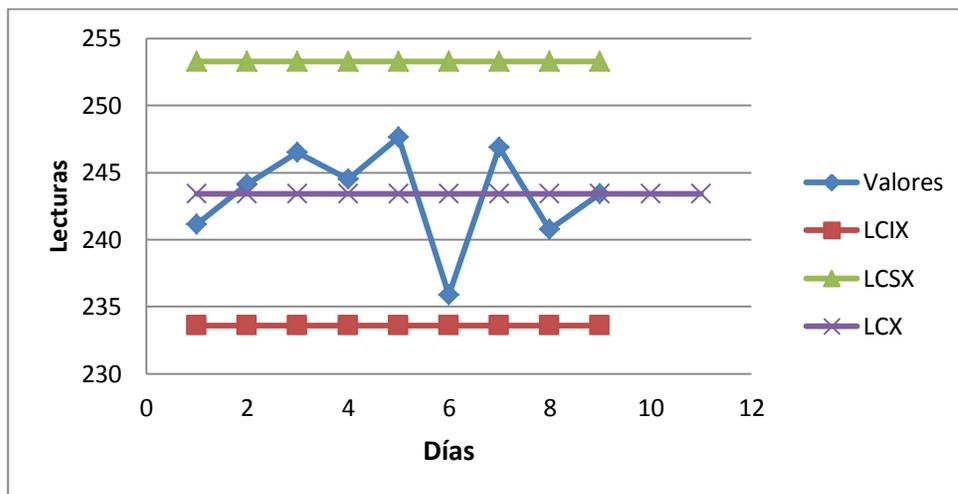
LCIR(D3*R)	$0,136*40,625$		5,525
LCR			40,625
LCSR(D4*R)	$1,864*40,625$		75,725
LCIX (XX-A2*R)		$540,52-0,373*40,625$	525,37
LCX (XX)		540,52	540,52
LCSX (XX+A2*R)		$540,52+0,373*40,625$	555,67

Fuente: elaboración propia.

Obtenidos los resultados de los límites de control en ambas líneas, se obtienen las gráficas de control para variables, graficando los promedios de las

filas y columnas de los muestreos, estableciendo los parámetros de los límites de control dentro de las gráficas correspondientes.

Figura 13. **Gráfico de control de medias en niveles de presión en línea de 200 psi**

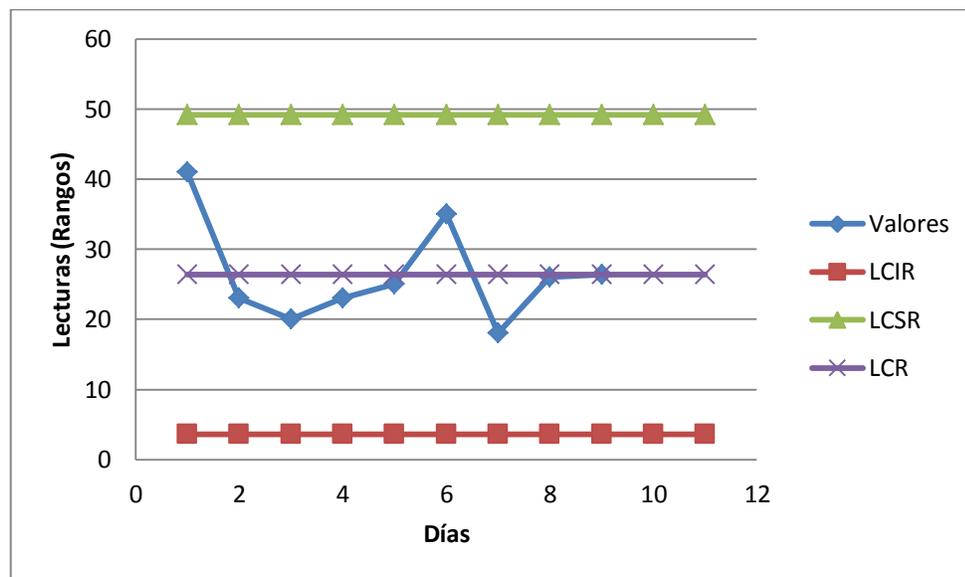


Fuente: elaboración propia.

Durante un proceso de operación estándar en el Departamento de Generación de Vapor, los valores promedios de presión en la línea de 200 psi se encuentran acoplados a la línea de tendencia central, por lo que se determina que la operación durante ese período se encuentra bajo control. Existe una abrupta variación dentro del comportamiento de la gráfica que indica que los niveles de presión durante ese día estuvieron muy por debajo de su rendimiento, pero ese comportamiento se presentó por causa de la falta de combustible a disposición, así como, niveles altos en la humedad de bagazo, disminuyendo los niveles de presión en la línea de 200 psi. Sin embargo, a pesar de esa variación, el proceso se conservó dentro de los parámetros admisibles, permitiendo un error de tipo II en presencia de una causa asignable.

Cabe destacar que durante el período de muestreo evaluado, se presentaron con anterioridad indicios de baja presión provocados por falta de combustible, por lo que durante toda esta etapa se utilizó una aplicación adicional de bagazo almacenado para mantener los niveles de presión, aunque el consumo ostentoso del bagazo provocó una disminución del combustible a disposición en el día expuesto por caída de presión.

Figura 14. **Gráfico de control de rangos en niveles de presión en línea de 200 psi**

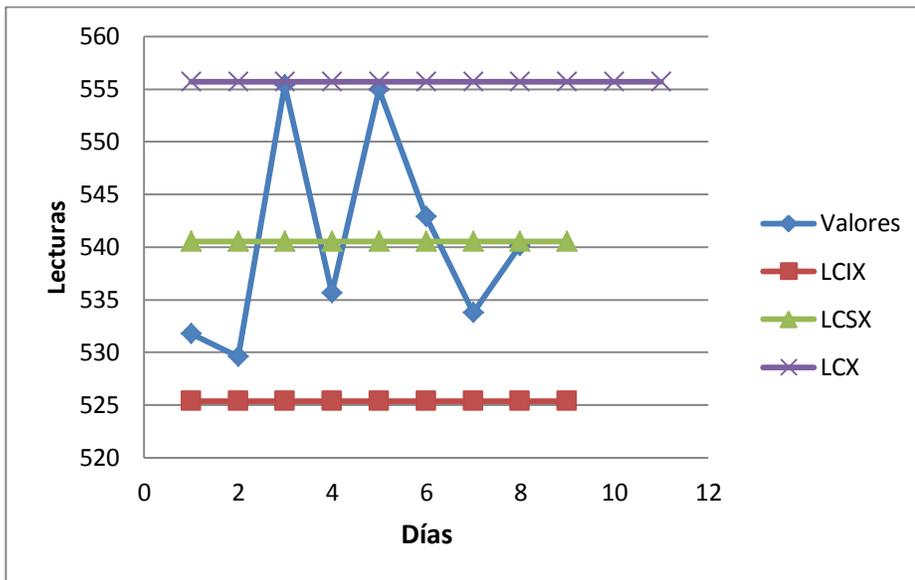


Fuente: elaboración propia.

Durante un proceso de operación estándar en el Departamento de Generación de Vapor, los valores de variación en rangos de presión en la línea de 200 psi se encuentran acoplados a la línea de tendencia central, por lo que se determina que la operación durante ese período, en efectos de variaciones considerables entre valores altos y mínimos, se encuentra bajo control. No se

encontraron disparidades dentro del comportamiento de los valores, incluso, tomando en cuenta las variables exteriorizadas en el análisis anterior.

Figura 15. **Gráfico de control de medias en niveles de presión en línea de 500 psi**

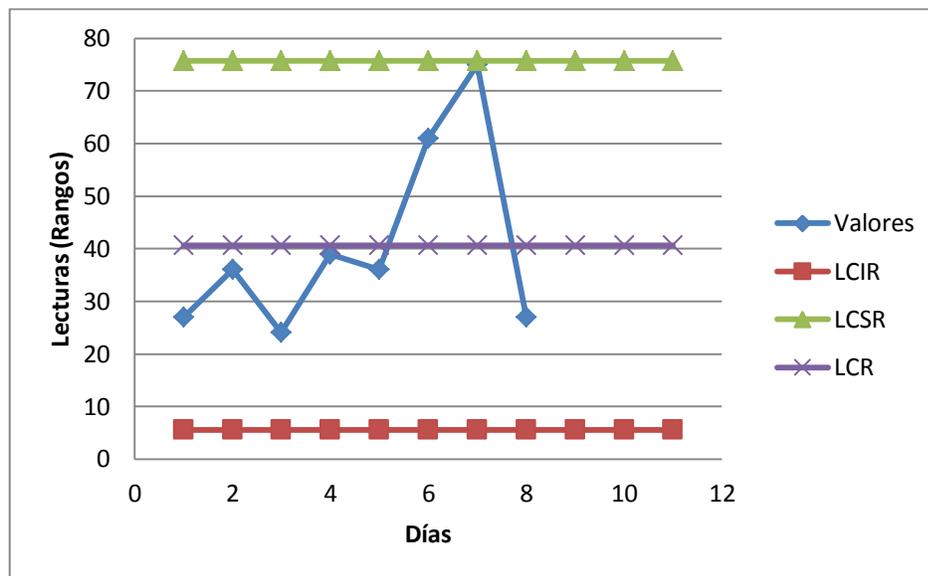


Fuente: elaboración propia.

Durante un proceso de operación estándar en el Departamento de Generación de Vapor, los valores promedio de presión en la línea de 500 psi presentaron variaciones excedidas durante el período evaluado, esto se produjo como consecuencia de las variaciones de presiones en las calderas 7 y 8. En el inicio del período, se observó una caída de presión considerable originada por causas desconocidas. Posteriormente, se produjo una elevación prolongada de presión provocada por un consumo de combustible excedente, manteniendo a su máxima capacidad el turbogenerador 4 y consecutivamente una disminución leve en la presión. El comportamiento de esta operación presenta errores de tipo II. Aún presentando este tipo de conducta, el proceso se conservó dentro

de los parámetros de control, exhibiendo indicios latentes de un proceso que podría salirse de control.

Figura 16. **Gráfico de control de rangos en niveles de presión en línea de 500 psi**



Fuente: elaboración propia.

Durante un proceso de operación estándar en el Departamento de Generación de Vapor, los valores de variación de rangos de presión en la línea de 500 psi, presentaron transiciones abruptas, esto se produjo como consecuencia de las causas establecidas en el análisis anterior de promedios en la línea de alta presión. El comportamiento de esta operación presenta errores de tipo II. El proceso se conservó dentro de los parámetros de control, asimismo, exhibió indicios latentes de un proceso que podría salirse de control.

4.2. Rendimiento actual en área de calderas

El rendimiento en una empresa es un indicador crítico que demuestra la situación presente y el rumbo al que podría orientarse una institución. Es de vital importancia mantener indicadores de rendimiento y eficiencia en toda área o departamento de cualquier índole, ya que esto permite tener un mejor control de los procesos que se gestionan en cada área, y en general, de toda la empresa.

El área de Calderas cuenta con un balance teórico y real de la producción de libras de vapor y el consumo de bagazo que esto supone. Cabe destacar que los términos rendimiento y eficiencia pueden tener diversas similitudes, pero no son parte del mismo concepto. El rendimiento es la relación que existe entre el valor real y teórico de una variable, mientras la eficiencia es la relación de producción en las salidas y las entradas de una variable. A continuación se detallan las ecuaciones para el cálculo de eficiencia y rendimiento correspondientes.

Ecuación de eficiencia

$$Eficiencia = \frac{Producción\ de\ salida}{Producción\ de\ entrada}$$

Ecuación de rendimiento

$$Rendimiento(\%) = \frac{Valor\ real}{Valor\ teórico}$$

El rendimiento actual del equipo en el área de Calderas se calcula con base en los valores reales indicados por los medidores de niveles de producción de vapor y los valores teóricos. En la tabla XXIV se detalla el

rendimiento del equipo en el departamento, basado en el cálculo de los valores reales y teóricos por parte de la ecuación de rendimiento.

Tabla XXIV. **Cálculo del rendimiento actual en área de Calderas**

Núm. de caldera	Producción teórica promedio (lb/hr)	Producción real promedio (lb/hr)	Rendimiento (%)
1	95 000	80 000	0,8421
2	50 000	42 000	0,84
3	50 000	41 000	0,82
5	50 000	42 000	0,84
6	90 000	80 000	0,8889
7	105 000	95 000	0,9048
8	225 000	220 000	0,9778
9	350 000	330 000	0,9429

Fuente: elaboración propia.

Los datos presentados en la tabla XXIV demuestran un rendimiento entre los límites óptimos sobre el flujo de vapor de las calderas. Las calderas pertenecientes a la línea de baja indican un rendimiento superior al 80 % en todos los equipos, con un rendimiento superior en la caldera número nueve, debido a que es de un modelo más reciente que las anteriores. Las calderas pertenecientes a la línea de alta presión indican un rendimiento superior, esto

es reflejo de la poca antigüedad del equipo y la aplicación de un mantenimiento especial.

4.3. Eficiencia actual en calderas

La eficiencia presente en el área de Calderas se detalla gracias a la relación de producción de libras de vapor sobre la utilización de kilolibras de bagazo. Este indicador permite obtener el valor de la producción de vapor sobre el empleo de biocombustible que se esté consumiendo. La ecuación de eficiencia se extiende de la siguiente forma:

$$Eficiencia = \frac{\text{Kilolibras de vapor producidas}}{\text{Kilolibras de bagazo}} = \frac{Klb.d.V.}{Klb.d.B.}$$

La eficiencia en el área se subdivide en dos áreas:

- Eficiencia en calderas de baja presión
- Eficiencia en calderas de alta presión

4.3.1. Eficiencia en calderas de baja presión

Las calderas de baja presión presentan un rendimiento aceptable dentro de los parámetros que necesita el Ingenio, a pesar de que son un modelo antiguo, conservan una utilidad muy provechosa que sostiene eficazmente a la línea de presión de 220 psi. La tabla XXV exhibe el cálculo de la eficiencia presente en las calderas de baja presión. Dentro de los resultados, se han tomado los valores de una molienda aproximada de 18 000 toneladas de caña en 24 horas, extrayendo un 27,1 % de bagazo, teniendo 4 878 toneladas cortas

de bagazo. Cada tonelada corta representa 907,18 kg y por cada 1 kg, se obtienen 2,2 lbs.

Tabla XXV. **Cálculo de la eficiencia en calderas de baja presión**

Núm. de caldera	Producción libras de vapor (KLb V/Hr)	Consumo de bagazo (%)	Consumo de bagazo (Klb B)	Eficiencia (KLb V/Klb B)
1	80	10,12	41,051	1,9488
2	42	5,06	20,526	2,04
3	41	5,06	20,526	2,00
5	42	7,59	30,788	1,3632
6	80	10,12	41,051	1,9488
9	330	30,36	123,154	2,6784

Fuente: elaboración propia.

Los valores de eficiencia en las calderas de baja presión se encuentran en un rango admisible sobre el nivel de generación de libras de vapor por kilolibra de bagazo consumido. Es importante tomar en cuenta que la eficiencia varía en torno a la capacidad de producción de cada una de las calderas.

4.3.2. Eficiencia en calderas de alta presión

Las calderas de alta presión significan un segmento decisivo dentro del Ingenio, ya que proporcionan el vapor utilizado por el turbogenerador que se encarga de proveer la energía eléctrica a la industria. Su rendimiento arroja valores superiores, en comparación con las calderas de baja presión, por su capacidad de generación y diseño. Este equipo sustenta la línea de presión de 550 psi. La tabla XXVI exhibe el cálculo de la eficiencia de las calderas de alta presión. Dentro de los resultados, se han tomado los valores de una molienda aproximada de 18 000 toneladas de caña en 24 horas, extrayendo un 27,1 % de bagazo, teniendo 4 878 toneladas cortas de bagazo. Cada tonelada corta representa 907,18 Kg y por cada 1 kg, se obtienen 2,2 lbs.

Tabla XXVI. **Cálculo de la eficiencia en calderas de alta presión**

Núm. de caldera	Producción libras de vapor (Klb V/Hr)	Consumo de bagazo (%)	Consumo de bagazo (Klb B)	Eficiencia (Klb V/Klb B)
7	95	9,98	40,483	2,35
8	220	21,69	87,985	2,5

Fuente: elaboración propia.

Los valores de eficiencia en las calderas de alta presión son resultados admisibles positivos. Esto es a consecuencia de que el equipo trabaja bajo condiciones ideales, se le ha brindado un mantenimiento adecuado y su capacidad de generación permite obtener un flujo de vapor sustentable hacia el turbogenerador.

4.4. Análisis de niveles de presión

Se ha determinado, dentro del análisis estadístico de control previo, el comportamiento de las líneas de presión de 200 psi y 500 psi; definiendo así los procesos que se encuentran bajo control en los niveles de presión y las diferentes variables que han originado cambios abruptos dentro de su conducta. Se ha definido que el origen principal de estos cambios se debe a la falta de combustible a disposición, permitiendo que se presente este tipo de situaciones.

Cabe destacar que la producción de libras de vapor posee una relación dependiente con los niveles de presión en ambas líneas, por lo que se procedió a realizar un análisis estadístico de control en la producción de libras de vapor, de igual forma que en los niveles de presión, con el objetivo de determinar el comportamiento gráfico de estas variables en relación al análisis anterior.

4.4.1. Análisis estadístico de control

Se ha empleado la herramienta de gráficos de control para variables en la producción de libras de vapor en las líneas de alta y baja presión, tomando muestreos de 8 lecturas en un período de 8 días. A continuación, se presentan los muestreos tomados en las líneas de alta y baja presión.

Tabla XXVII. **Muestreo de producción de libras de vapor en línea de 200 psi**

Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Lectura 5	Lectura 6	Lectura 7	Lectura 8	Promedio	Rango
1	581 945	606 666	593 621	616 374	562 693	611 132	601 513	597 642	596 448,25	53 681
2	567 067	520 350	603 666	577 073	569 696	592 790	574 005	601 332	575 747,38	83 316
3	585 002	542 393	526 075	577 073	567 006	563 803	583 691	569 529	564 321,5	58 927
4	575 810	559 858	568 347	582 588	602 873	589 869	394 322	545 174	552 355,13	208 551
5	564 993	564 039	530 470	533 582	559 982	519 692	540 613	568 173	547 69	48 481
6	548 108	491 526	535 444	524 006	520 150	538 271	563 258	523 156	530 489,88	71 732
7	526 115	479 157	499 983	512 369	394 290	449 299	437 498	532 561	478 91	138 271
8	500 659	495 920	528 184	499 650	478 195	503 622	350 649	511 726	483 575,63	177 535
Promedio									541 192,47	105 061,75

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Muestreo de producción de libras de vapor en línea de 500 psi**

Día	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Lectura 5	Lectura 6	Lectura 7	Lectura 8	Promedio	Rango
1	253 174	249 350	250 500	245 474	248 154	258 175	264 838	270 587	255 031,5	25 113
2	170 226	222 088	223 160	267 615	237 845	235 316	239 034	239 034	229 289,75	97 389
3	202 627	236 030	225 670	257 529	248 544	227 462	230 972	236 186	233 127,5	54 902
4	266 375	251 591	246 366	251 155	252 732	248 047	211 587	258 568	248 302,625	54 788
5	299 725	328 816	280 762	288 158	286 142	300 680	297 474	288 412	296 271,125	48 054
6	257 605	281 836	265 692	292 240	277 451	284 856	284 237	284 237	278 519,25	34 635
7	288 924	284 147	311 266	273 826	294 172	287 729	269 011	254 241	282 914,5	57 025
8	294 785	307 737	316 867	298 171	302 997	308 024	311 283	307 319	305 897,875	22 082
Promedio									266 169,27	49 248,5

Fuente: elaboración propia.

Luego de obtener los promedios de medias y rangos de los valores, se procedió a calcular los límites de medias y rangos por medio de la tabla de factores para el cálculo de límites de control de gráficas para variables.

Tabla XXIX. **Cálculo de límites de control de medias y rangos de producción de libras de vapor en línea de 200 psi**

LCIR(D3*R)	0,136*105 061,75	14 288,4	
LCR		105 061,75	
LCSR(D4*R)	1,864*105 061,75	195 835,1	
LCIX (XX-A2*R)		541 192,47-0,373*105 061,75	502 004,44
LCX (XX)		541 192,47	541 192,47
LCSX (XX+A2*R)		541 192,47+0,373*105 061,75	580 380,5

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Cálculo de límites de control de medias y rangos de producción de libras de vapor en línea de 500 psi**

LCIR(D3*R)	0,136*90 963,15	14 288,4	
LCR		90 963,15	
LCSR(D4*R)	1,864*90 963,15	169 555,31	
LCIX (XX-A2*R)		271 830,17-0,373*90 963,15	237 900,92
LCX (XX)		271 830,17	271 830,17
LCSX (XX+A2*R)		271 830,17+0,373*90 963,15	305 759,43

Fuente: elaboración propia.

Con los resultados de los límites de control en ambas líneas, se obtienen las gráficas de control para variables, detallando los promedios de las filas y

columnas de los muestreos, estableciendo los parámetros de los límites de control dentro de los esquemas correspondientes.

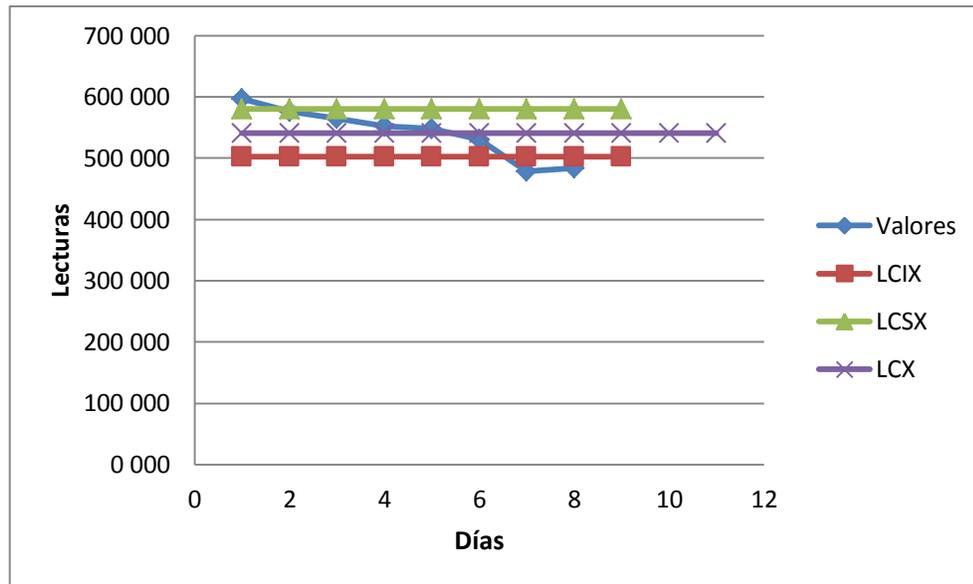
4.5. Producción de libras de vapor

A continuación se detallarán los análisis estadísticos correspondientes de los gráficos sobre la producción de libras de vapor en las líneas de presión de 200 psi y 500 psi.

4.5.1. Producción de libras de vapor en calderas de baja presión

En las figuras 17 y 18 se exponen los resultados obtenidos del estudio estadístico de control en la línea de baja presión.

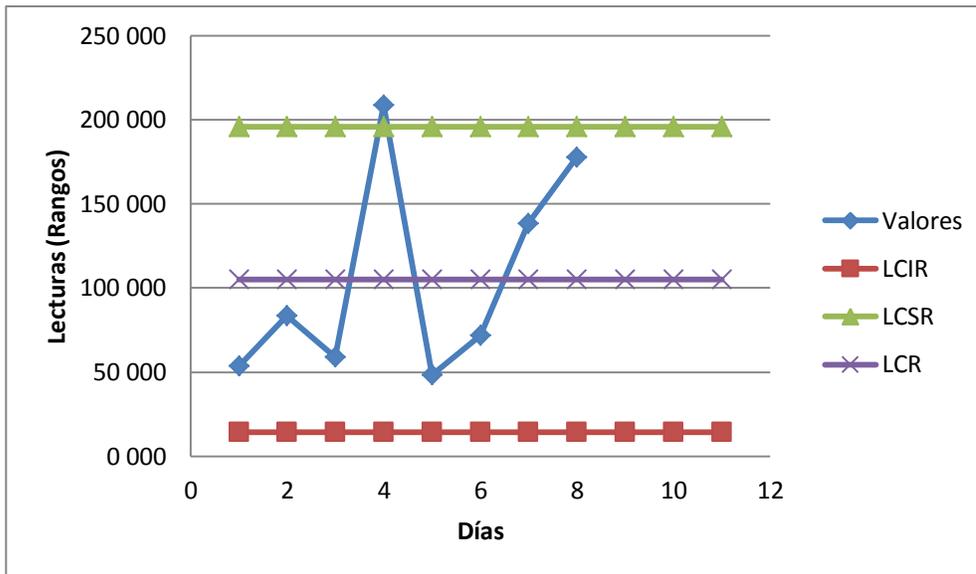
Figura 17. **Gráfico de control de medias en producción de libras de vapor en línea de 200 psi**



Fuente: elaboración propia.

Durante una gestión de operación estándar en el Departamento de Generación de Vapor, los valores promedios de producción de libras de vapor en la línea de 200 psi presentan un comportamiento en declive, mostrando algunos puntos fuera de los límites de control, por lo que se determina que la operación durante ese período no se encuentra bajo control. Esto se debe a la demanda irregular del combustible para suministro de las calderas; como anteriormente se expuso, se concibió un uso anómalo del bagazo, cediendo un comportamiento irregular en la curva de la gráfica, evidenciando así, la relación dependiente de la producción de vapor con los niveles de presión. Dentro de este comportamiento se detectan errores de tipo I y II.

Figura 18. **Gráfico de control de rangos en producción de libras de vapor en línea de 200 psi**



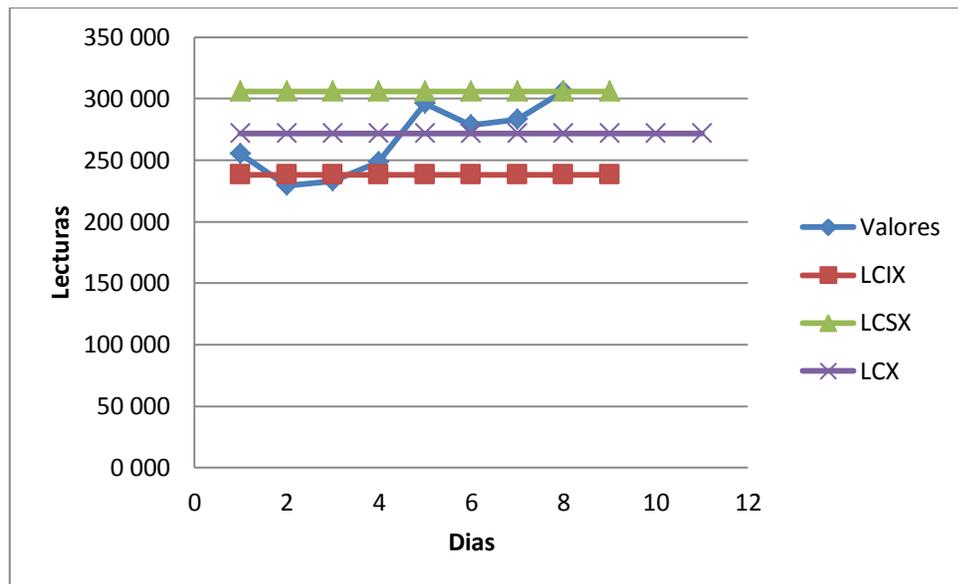
Fuente: elaboración propia.

Durante una gestión de operación estándar en el Departamento de Generación de Vapor, los valores de variación en rangos de la producción de vapor en la línea de 200 psi presentan cambios desiguales y discontinuos. Existe un punto fuera del rango permitido, por lo que se determina que la operación durante ese período, para efectos de variaciones considerables entre valores altos y mínimos, no se encuentra bajo control. Aunque puede existir cierta permisibilidad en el comportamiento, porque únicamente se presenta un punto fuera de los límites admisibles, esto se debe a las variables exteriorizadas en el análisis anterior.

4.5.2. Producción de libras de vapor en calderas de alta presión

En las figuras 19 y 20, se exponen los resultados obtenidos del estudio estadístico de control en la línea de alta presión.

Figura 19. Gráfico de control de medias producción de libras de vapor en línea de 500 psi

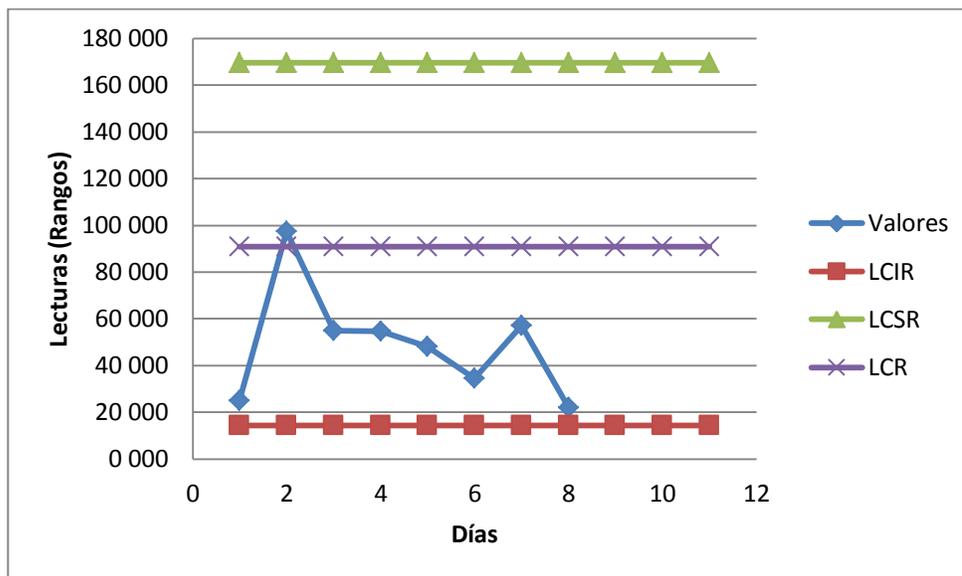


Fuente: elaboración propia.

Durante una gestión de operación estándar en el Departamento de Generación de Vapor, los valores promedios de producción de vapor en la línea de 500 psi, de igual forma que en la línea de 200 psi, se presentaron variaciones excedidas durante el período evaluado, dentro y fuera de los límites de control. Esto se produjo como consecuencia de las variaciones de presiones entre las calderas 7 y 8. El comportamiento de este gráfico revela errores de

tipo I y II, exhibiendo indicios claros de un proceso que no se encuentra bajo control.

Figura 20. **Gráfico de control de rangos en producción de libras de vapor en línea de 500 psi**



Fuente: elaboración propia.

Durante una gestión de operación estándar en el Departamento de Generación de Vapor, los valores de variación de rangos de la producción de vapor en la línea de 500 psi presentaron comportamientos desiguales, esto se produjo como consecuencia de las causas establecidas en el análisis anterior de promedios en la línea de alta presión. El comportamiento de esta operación revela errores de tipo II, aunque el proceso se conservó dentro de los parámetros de control, asimismo, exhibiendo indicios latentes de un proceso que podría salirse de control.

Cabe destacar que la gestión normal en el Departamento de Generación de Vapor presenta variaciones considerables de operación, por lo que se puede permitir cierto margen de error que pudiese ocurrir, si en dado caso se excediesen los parámetros de rangos admisibles. No obstante, si se desea mantener un proceso bajo control, permitiendo aumentar la eficiencia de los procesos, es necesario erradicar o disminuir las variables internas y externas que perjudiquen o impidan el desarrollo efectivo de la operación; como la disminución de combustible disponible y la regulación de niveles de humedad en ciertos períodos en el Ingenio Azucarero.

4.6. Contaminación

La presencia de factores contaminantes dentro de una industria es inevitable, sin embargo, con el pasar de los años, se han implementado nuevos sistemas de reducción de agentes contaminantes amigables con el medio ambiente y técnicas que disminuyen en niveles considerables la dispersión de cenizas y partículas. Dentro del Ingenio se encuentran tres aspectos importantes que deben evaluarse constantemente, con el fin de reducir los factores previamente mencionados, estos son:

- Factores de emisión
- Dispersión de contaminantes
- Hermeticidad del sistema

4.6.1. Factores de emisión

Entre los factores de emisión de contaminantes se encuentran los siguientes elementos:

- Gases de combustión (vapor de chimeneas)
- Cenizas
- Ruido
- Partículas de bagazo

Los gases de combustión emanados hacia el ambiente provienen de las calderas y los *scrubbers*, encargados de lavar los gases absorbidos del hogar de las calderas por medio del ventilador inducido. Los gases se aprisionan en una cámara que contiene aspersores que les disparan agua y todos los contaminantes quedan atrapados en las cenizas, mientras el vapor sale de las chimeneas. Los gases expulsados al ambiente por parte de las calderas son de baja incidencia, lo mismo los gases emanados por los *scrubbers*.

Dentro de las instalaciones se encuentra una planta de tratamiento de cenizas, encargada de filtrar las cenizas y separar el agua por medio de celdas. Las cenizas que se escapan de las celdas son aquellas que se encuentran adheridas al vapor del agua caliente que sale al ambiente de las celdas. Como en los gases de combustión, son mínimas las cenizas y partículas que se expulsan hacia el ambiente debido a la eficiencia del sistema.

Uno de los elementos más contaminantes dentro de las instalaciones es la propagación de ruido por la maquinaria. Se poseen dentro del área: nueve calderas, de las cuales solamente operan ocho; bombas y turbinas de agua; *scrubbers* conectados hacia las chimeneas; válvulas reductoras, de alivio y de suministro de vapor, entre otros, los cuales, en conjunto, generan un alto grado de decibeles que incomodan al personal. Sin embargo, la propagación de este elemento es inevitable debido a que se necesitaría una estructura y un sistema avanzado altamente costoso para evitar la emanación de ruido.

Otro de los elementos contaminantes que afectan al personal son las partículas de bagazo. Después de atravesar el proceso de molienda de caña, el bagazo es apilado a un costado de los alimentadores a la intemperie, por lo que es sencillo para las partículas dispersarse hacia toda el área de calderas y ocasionar dificultades de visión. Los alimentadores también forman parte de los causantes de la dispersión de partículas, ya que se encuentran en la parte superior del área y se movilizan por todo el espacio. Es importante remarcar que el personal cuenta con equipo de protección adecuado para cada uno de los factores manifestados anteriormente.

4.6.2. Dispersión de contaminantes

Existen diversos métodos de protección que impiden la dispersión de contaminantes, sin embargo, por efectos de imperfección; no todos los sistemas pueden retener las cenizas en un cien por ciento en las estructuras, pero sí en un nivel aceptable.

Dentro del ingenio se cuenta con una planta de tratamiento de cenizas (ver figura 7) que ayuda a separar las cenizas de los gases de combustión para su posterior tratamiento y evacuación hacia los campos como abono fertilizante. Dentro de este proceso, se encuentran pequeñas dispersiones de cenizas en la parte superior de las celdas, esto se debe a que en escasas ocasiones, el agua caliente provista en las celdas puede venir mezclada con ceniza y esta, con el vapor, se escapa hacia el ambiente.

En los *scrubbers*, hay una cámara donde actúan aspersores de agua con la función de lavar los gases de combustión, no obstante, se poseen compartimientos abiertos en los laterales para dejar emanar vapor hacia el ambiente, en este proceso pueden adherirse ciertas partículas de ceniza.

Asimismo, en las chimeneas, cuya función es liberar vapor en el entorno, puede darse el caso de que algunas partículas de ceniza consigan salir por medio del vapor.

4.6.3. Hermeticidad del sistema

Cuando se evalúa la hermeticidad de un proceso, donde es indispensable mantener bajo control ciertos elementos que requieren estar sellados y estampados, es necesario tener un apoyo con base en materiales que auxilien a estos elementos y les permitan tener un mejor desempeño. Las instalaciones cuentan con diversos materiales que se utilizan como apoyo para conservar la hermeticidad de las tuberías y maquinaria donde se pueden producir escapes de vapor, contaminantes, entre otros. A continuación se presenta un esquema en el cual se detallan los materiales utilizados en las diversas estructuras del área de calderas (ver figura 21).

Figura 21. **Materiales aislantes utilizados en el área de calderas**



Fuente: elaboración propia.

De la figura 21 se obtiene una lista de los materiales utilizados para evitar pérdidas y conservar la hermeticidad del sistema. Los aislantes de capa de fibra de vidrio y cerámico son utilizados en las tuberías de vapor para evitar fugas y mantener el nivel de presión que ejercen, debido a que si no se aplican estos elementos, los niveles de presión pueden disminuir por el contacto del ambiente. El cemento refractario en las paredes de las calderas posee una aplicación similar a los aislantes en las tuberías, pero, además, es utilizado también para evitar el choque de calor que existe cuando se encuentran en operación.

La utilización de acero inoxidable en las chimeneas, es debido a que el vapor expulsado se encuentra a una temperatura y presión muy elevadas, y este material es resistente a altas temperaturas y no se deforma fácilmente bajo las condiciones de operación. Por último, se emplea la técnica de soldadura utilizando electrodos para reparar o curar las tuberías dentro y fuera de las

calderas que soportan altas temperaturas y ciertas rupturas durante el proceso de combustión.

4.7. Seguridad del personal

La seguridad industrial es un tema crucial dentro de cualquier industria o institución, la seguridad del personal debe prevalecer en todo momento, asimismo, dentro de las instalaciones. Existen indicadores que destacan las virtudes y carencias en la infraestructura de ciertas áreas que ayudan a determinar los aspectos que se deben mejorar y algunos que se deberán reemplazar. Existen tres principios que se utilizan como medios de apoyo para comprobar la seguridad dentro de una empresa, los cuales son:

- Riesgos
- Equipo de protección
- Medidas de seguridad

4.7.1. Riesgos

Los riesgos son variables que en todo momento existirán sobre todo proceso, sin embargo, como cualquier variable, pueden ser manipuladas para lograr minimizarlas o disminuirlas considerablemente. Los riesgos dentro de un ingenio azucarero pueden presentarse de diversas formas, desde elementos secundarios que interfieren en el desempeño laboral, hasta emisiones de sustancias que necesita el empleo de un equipo de seguridad.

Entre los riesgos más influyentes dentro del Ingenio Azucarero, se pueden encontrar:

- Emisiones de humo
- Emisiones de vapor
- Dispersión de partículas de ceniza
- Elevada temperatura en ciertas áreas
- Ruido

Las emisiones de humo son los efectos más comunes en un ingenio, debido a que en la mayoría de procesos se requiere el consumo de combustibles para generar energía. Dentro de las instalaciones se cuenta con una planta de tratamiento de cenizas que ayuda drásticamente a la reducción de partículas de ceniza por medio de un proceso de lavado de gases. Pese a ello, durante la quema del bagazo en el horno de las calderas se emite cierta cantidad emisiones de humo que viaja de forma mínima hacia toda el área de Calderas.

Otro riesgo que se presenta, son las emisiones de vapor que expide la maquinaria. Esto es consecuencia de que no toda la maquinaria opera con energía eléctrica, sino con vapor, lo que conlleva a que hayan válvulas de seguridad a los costados para liberar la presión que es suministrada hacia las máquinas y se tenga cuantiosa precaución cuando son activadas.

La dispersión de cenizas es otro de los elementos presentes en el área de Calderas, cuando en cierto tiempo se debe proceder a la limpieza de las parrillas. La acumulación de bagazo en el hogar de las calderas y su posterior combustión origina la formación de cenizas que se quedan atrapadas en las parrillas de donde deben removerse después de cierto tiempo. Cuando se procede a esta acción, las cenizas se dispersan por todo el área, quedando impregnadas en las estructuras o esparcidas por todo el lugar.

Otro de los elementos que juega un papel importante en el desarrollo de las tareas efectuadas por el personal, son los niveles de temperatura. En el área de Calderas, durante la época de zafra, toda la maquinaria se encuentra en uso, originando una elevación de temperatura que afecta a los trabajadores, quienes deben tomar las medidas necesarias de protección para no sufrir algún accidente.

El último riesgo presentado es el ruido. El funcionamiento de la maquinaria ocasiona el factor más influyente en el área de Calderas, la operación en conjunto de las calderas, los ventiladores, las válvulas de escape de vapor, las celdas de ceniza, las chimeneas, entre otros, generan elevados niveles de ruido. El ruido es uno de los factores negativos que perjudican gradualmente el desarrollo de los operarios y que prevalecerán constantemente, por lo que deben tomarse en cuenta los métodos de seguridad necesarios para aislar o bloquear el ruido.

4.7.2. Equipo de protección

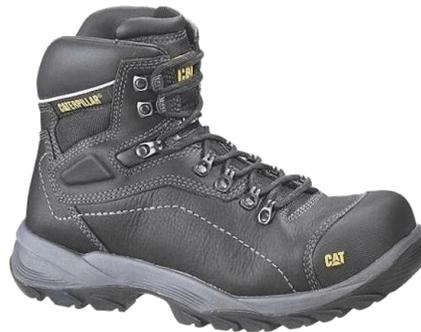
Ante la presencia de factores de riesgo, la industria debe hacerse cargo de suministrar el equipo adecuado al personal, siguiendo los estándares de seguridad más altos. En el interior del área de Calderas, se cuenta con el equipo de protección adecuado para las labores que desempeñan los colaboradores, los cuales son:

- Botas industriales
- Mascarillas
- Tapones de oído
- Casco industrial
- Guantes de cuero

- Lentes protectores

Las botas industriales son un calzado especial utilizado en las industrias donde se involucra maquinaria pesada. Este calzado posee una punta de acero para proteger los pies de los colaboradores en dado caso se derrumbara alguna pieza metálica o de gran peso sobre él.

Figura 22. **Botas industriales**



Fuente: *Tus botas Cat*. <http://www.blog.botascat.com/page/2/>. Consulta: 20 de mayo de 2015.

Las mascarillas se emplean para cubrir la boca y la nariz de la persona, por la propagación de partículas de bagazo y ceniza que existe en el ambiente y que se concentran en ciertas áreas. Las mascarillas ayudan a que el operario no inhale estas partículas y mantenga protegido su sistema respiratorio.

Figura 23. **Mascarilla**



Fuente: *Seguridad industrial*. <http://www.seguridadindustrialcr.com/14-equipos-desechables>.
Consulta: 20 de mayo de 2015.

Asimismo, se cuenta con tapones de oído que ayudan a amortizar la emisión de ruido en el área, esto como consecuencia de la operación de la maquinaria.

Figura 24. **Tapones para oído**



Fuente: *Equipo de protección personal*. <http://www.logisticacr.com/slidedeck/seguridad-ocupacional/attachment/audio-2-2>. Consulta: 20 de mayo de 2015.

Además, se cuenta con la equipación de cascos industriales para la protección de la cabeza de los colaboradores, esto con la misión de resguardar

cualquier accidente que se pueda producir en una parte alta del área y desplome algún elemento o escombros que pueda impactar en la parte baja.

Figura 25. **Casco industrial**



Fuente: 3M. <http://www.3mseguridadindustrial.cl/novedades/3m-presenta-su-nuevo-casco-de-seguridad/>. Consulta: 20 de mayo de 2015.

También, se poseen guantes de cuero que permiten manipular objetos a altas temperaturas y salvaguardar la seguridad del tacto de los operarios.

Figura 26. **Guantes de cuero**



Fuente: *Guantes de cuero*. <http://www. http://industriageo.com/Producto/151/Guantes-cuero-flor-medio-paseo>. Consulta: 20 de mayo de 2015.

4.7.3. Medidas de seguridad

Todas las medidas de seguridad dentro de las instalaciones del ingenio, se rigen bajo las políticas de las buenas prácticas de manufactura (BPM). Las buenas prácticas de manufactura abarcan una amplia gama de métodos de prevención y seguridad para el personal, asimismo, la implementación de productos farmacéuticos que aseguren el bienestar de los colaboradores en dado caso se presente una enfermedad.

En la figura 27 se detallan algunas políticas de BPM implementadas dentro de las instalaciones del Ingenio.

Figura 27. **Medidas de seguridad implementadas en el Ingenio según políticas de buenas prácticas de manufactura**



Fuente: elaboración propia.

5. EFECTOS DE LA PAJA DE CAÑA DE AZÚCAR EN LAS CALDERAS

5.1. Utilización de biomasa en calderas

Mejoras en calderas, mayor economía de combustible empleado en industrias azucareras, cogeneración de energía eléctrica, junto con una molienda cada vez más eficiente, son algunos de los argumentos que varias industrias destinadas a la fabricación de azúcar han presentado para utilizar biomasa como combustible. Combustibles biomásicos son acostumbrados a utilizarse en la mayoría de ingenios azucareros por su bajo precio y fácil obtención. Sin embargo, el empleo de biomasa en calderas incurre en variaciones de diseño en el equipo y observación de variables a tomar en cuenta dentro de su composición, previamente detalladas en capítulos anteriores.

En la actualidad, existen diversidades de calderas, desde calderas empleadoras de combustibles derivados del petróleo hasta calderas de biomasa. Este último tipo de calderas constituye el Departamento de Generación de Vapor del Ingenio Azucarero.

El empleo de bagazo en las calderas es la acción más utilizada por el Ingenio Azucarero, sin embargo, se ha comprobado que la mezcla de bagazo con paja de caña constituye una opción viable para mantener los niveles de presión y ahorro de combustible. Para introducir la paja de caña en las calderas, deben tomarse en cuenta diversos factores que se redactarán a continuación.

5.2. Nivel de humedad de la paja de caña

El nivel de humedad puede variar según las condiciones medioambientales presentes, así como el modo de empleo que se utilice para surtir la basura de caña en las diferentes mesas de preparación. Se han efectuado dos análisis distintos acerca del porcentaje de humedad contenido en el volumen de esta biomasa, para establecer un parámetro sobre esta propiedad. Estos análisis se han llevado a cabo en el Ministerio de Energía y Minas de Guatemala y en las instalaciones de un laboratorio de caña de un ingenio azucarero ubicado en el departamento de Escuintla. Los resultados son los siguientes:

Tabla XXXI. **Porcentaje de humedad en muestra de paja de caña según MEM**

Elemento	%Humedad
Paja de Caña	1,73

Fuente: Ministerio de Energía y Minas.

Este análisis fue realizado en una muestra de base húmeda según método de prueba gravimétrica; conformada por 0,5 lb de paja de caña a granel y 0,5 lb de paja de caña mecanizada con un tiempo de secado, expuesto directamente al sol, de aproximadamente 1 hora.

Tabla XXXII. **Porcentaje de humedad en muestra de paja de caña según Ingenio Azucarero**

# Muestra	% Humedad
Paja de Caña 1 (Mesa Granel)	26,80
Paja de Caña 2 (Mesa Mecanizado)	34,00

Fuente: Laboratorio de Caña, Ingenio Azucarero ubicado en departamento de Escuintla, Guatemala.

Este estudio fue realizado con base en muestras de ambas mesas de preparación de caña, en un instrumento denominado horno convencional. Las muestras fueron constituidas por 100 g sin experimentar ningún período de secado.

5.3. Elementos dentro de la paja de caña

La basura de caña o paja de caña puede variar según los elementos presentes en su composición. Se han definido tres tipos de elementos dentro de su contenido:

- Elementos primarios
- Elementos secundarios
- Elementos intermedios

5.3.1. Elementos primarios

Los elementos principales que constituyen la paja de caña son los siguientes:

- Hojas verdes
- Hojas secas
- Puntas de tallo
- Cogollos (pedazos de tallos limpios)

Dentro de los elementos primarios de la paja de caña, lo que se aprovecha para la combustión es cierta parte de hojas verdes, hojas secas y pedazos de tallo seco que pudiesen formarse durante cierto período; ya que al incluir pedazos de tallo enteros y cogollos, se reduciría el poder calorífico en la mezcla conjunta con el bagazo, debido a que en su estructura se encuentran elementos como la sacarosa, clorofila y tierra que perjudicarían el rendimiento energético de la composición.

5.3.2. Elementos secundarios

Los elementos secundarios presentes en la paja de caña son los siguientes:

- Cenizas
- Tierra
- Cepas

La tierra, las cenizas y las cepas (raíces con rastros de tierra) pueden llegar a significar un problema en la tubería de domo a domo de una caldera,

debido a la formación de incrustaciones que perjudicarían el equipo reduciendo su tiempo de vida.

5.3.3. Intermediarios

Los elementos intermedios dentro de la paja de caña son los siguientes:

- Brix (sólidos solubles)
- Pol (sacarosa contenida)
- Humedad

Elementos como el brix y la pol pueden provocar complicaciones en el proceso de combustión, debido a los sólidos solubles y sacarosa que estos poseen. Si bien es cierto, no se puede reducir completamente el porcentaje de estos elementos, ya sea en el bagazo o en la paja de caña, es necesario mantenerlos en un nivel mínimo despreciable. Asimismo, los niveles de humedad deben conservarse inferiores de un promedio de 50 %, con el objetivo de optimizar el proceso de combustión.

5.4. Introducción de la caja de caña en calderas

La paja de caña, como anteriormente se ha expresado, puede utilizarse en diferentes ámbitos para su aprovechamiento (ver figura 28), no obstante, su manejo se ha enfocado primordialmente en la quema en las calderas para obtener energía. Según la investigación *Paja de la caña de azúcar, sus usos en la actualidad*, efectuada en el Instituto Cubano de Investigaciones sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, revela lo siguiente:

Reflexionando sobre la situación energética mundial, el empleo de la paja de caña con fines energéticos es, en la actualidad, una necesidad indispensable. Sin embargo, su utilización no es sustentable ecológicamente, enfrenta problemáticas relacionadas con sus propias características (baja densidad, granulometría, etc.), además de los de recolección, manipulación y transporte.

De esta necesidad, y con el deseo de aprovechar al máximo el potencial energético de la caña, surgió la idea de utilizar los residuos agrícolas, renovables anualmente, como combustible en las calderas para la generación del vapor. Tales residuos están compuestos por las hojas verdes y secas, los cogollos, las basuras y la caña sin procesar.

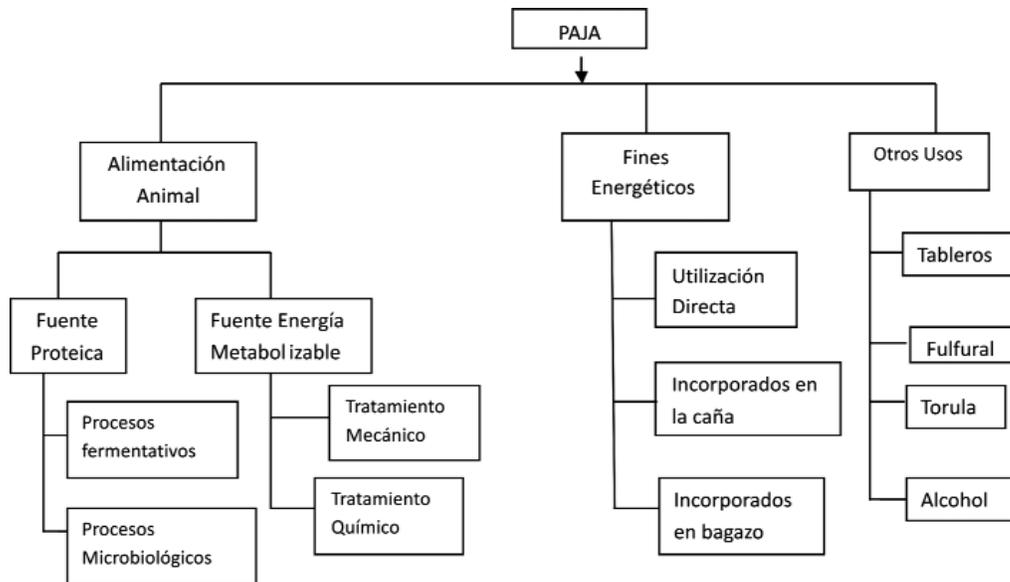
Las cantidades de residuos generados varían dependiendo de la variedad de caña, del rendimiento y la edad. La proporción de estos residuos oscila aproximadamente entre el 10 y el 60 % en Colombia y entre el 25 y 35 % en Sudáfrica. El poder calorífico de los residuos mostrados en la tabla XXXIII es equivalente a la del bagazo, que con un contenido de humedad del 30 % alcanza los 11 600 kJ/kg, al 1 % será de aproximadamente 15 800 kJ/kg. El contenido de humedad de los cogollos y basuras en la época de cosecha es de 50 %; si se dejan en el campo durante 2 o 3 días se reduce a 30 % y a 15 % después de dos semanas.

Cifras de Tailandia muestran que los residuos se pueden recoger, embalar y transportar a los ingenios a un costo de US \$ 1,87/GJ, mientras que el petróleo con un poder calorífico equivalente cuesta US \$ 2,91/GJ. En Islas Mauricio, se pueden producir a partir de los residuos, 4,2 MWh de electricidad por hectárea de caña. Los residuos poseen un contenido de cenizas más alto que el bagazo, por esta razón es recomendable quemarlos mezclados con bagazo.

Un estudio realizado por un profesor del Departamento de Ciencias Exactas de la Escuela Superior de Agricultura de la Universidad de Sao Paulo, demuestra que es posible mantener una hidroeléctrica, similar a la de Itaipú, funcionando solamente con la energía de la biomasa de la paja y del bagazo, durante el período mayo-octubre. Según este investigador, la paja, que actualmente es un problema ambiental por causa de la quema en el campo, tiene un excelente

potencial de energía eléctrica debido a su alto poder calorífico y excelente combustión compatible con calderas de biomasa.⁷

Figura 28. **Vías de utilización de paja de caña de azúcar**



Fuente: Instituto Cubano de Investigaciones sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. *Paja de la caña de azúcar, sus usos en la actualidad.* s.p.

⁷ Instituto Cubano de Investigaciones sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. *Paja de la caña de azúcar, sus usos en la actualidad.* s.p.

Tabla XXXIII. **Porcentaje de humedad en muestra de paja de caña, según MEM**

Combustible	Ceniza	PC (kcal/kg)
RAC	7,0	4,484
Bagazo	2,5	4,600
Madera	-	3.220
Turba	6,0	1,990
Lignito	7,2	3,940
Antracita	7,8	7,390

Fuente: Instituto Cubano de Investigaciones sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. *Paja de la caña de azúcar, sus usos en la actualidad.* s.p.

5.5. Efectos de la paja de caña en el equipo

La introducción de paja de caña podría provocar diversos efectos en el equipo de combustión. Tales efectos podrían ser de carácter beneficioso o perjudicial según el manejo que se lleve a cabo. La introducción de una cantidad adicional de cenizas, el incremento de residuos no deseados que disminuyan los períodos de limpieza, elementos con niveles de sacarosa elevadas, se erigen como las consecuencias más perjudiciales del empleo de los residuos cañeros en el equipo. Entre los factores más importantes para el manejo de la paja de caña se encuentran las incrustaciones en calderas y el nivel de sacarosa.

5.5.1. Incrustaciones en calderas

Las incrustaciones en equipos de combustión son depósitos o elementos sólidos que se adhieren a las superficies metálicas de una caldera. Estos

sedimentos pueden encontrarse en el interior o exterior de la tubería, adhiriéndose a las paredes, produciendo pérdidas de calor y ocasionando que se necesite mayor transmisión de energía para alcanzar el valor deseado de combustión.

Existen diferentes tipos de incrustaciones, entre los cuales se destacan: por dureza, formado por elementos de calcio y magnesio; por conductividad, formado por sólidos disueltos de mayor concentración; por turbidez, formado por sólidos suspendidos en el fluido; por compuestos de sílice, formado por elementos de silicato; entre otros. Este tipo de incrustaciones perjudican al equipo, reduciendo su tiempo de vida útil, además de elevar los costos de reparación y mantenimiento.

Se deben tomar medidas especiales para reducir el riesgo de incrustaciones en el equipo, debido a que la inclusión de paja de caña elevaría los niveles de cenizas e impurezas. Es imprescindible el empleo de un método que discrimine las impurezas y los elementos útiles de combustión de la paja de caña (hojas secas, trozos de caña secos, entre otros), para mantener el equilibrio de combustión y el ciclo de vida de la tubería.

En el Ingenio Azucarero se cuenta con una planta suavizadora de agua, en la cual se añaden químicos como sulfitos, hipoclorito de sodio, fosfatos, soda cáustica, entre otros; para el tratamiento de eliminación de compuestos que produzcan incrustaciones. Sin embargo, este tipo de tratamiento es efectivo en el interior de los domos de las calderas donde fluye el agua, por lo cual no tendría efecto alguno en el exterior de la tubería donde no existe formación de incrustaciones que reducirían el ciclo de vida de los conductos.

5.5.2. Nivel de sacarosa

El nivel de sacarosa presente en la paja de caña se refleja en la cantidad de brix y pol en las puntas y residuo de basura que contienen pedazos de cogollos y ciertos pedazos de tallos enteros. Según información provista por Chen, estudios realizados en África del Sur brindan los siguientes datos:

Tabla XXXIV. **Análisis de niveles de pol y brix de caña y paja de caña**

	Brix	Pol	Pureza Aparente	Fibra (%)	Humedad (%)	No Pol (%)
Caña	16,7	14,8	89	12,8	70,5	1,9
Puntas	6,7	1,4	21	16,6	77,7	5,3
Paja	7,8	1,5	19	58,6	33,6	6,3

Fuente: CHEN, James. *Manual del azúcar de caña*. s.p.

Los datos expresados en la tabla XXXIV, indican que la paja de caña contiene porcentajes considerables de brix (sólidos solubles) y bajos porcentajes de pol en su contenido. Esto demuestra que la mayor parte de estos elementos se encuentra contenida en las puntas y cogollos de la caña, por lo que pueden afectar la eficiencia del proceso de molienda, creación de incrustaciones en calderas que reducirían los períodos de limpieza, perturbación en la clarificación del jugo y combustión en calderas. Según Chen, una disminución del 1,0 % de basura de caña consentiría un aumento del 3,0 %

en el rendimiento total, pudiendo optimizar el proceso general de fabricación y reducir el tiempo estimado de molienda.⁸

5.5.3. Resistencia a la abrasión

Es una propiedad que poseen ciertos elementos, en este caso la tubería de las calderas, en contra del desgaste. Esta propiedad se demuestra con el roce de distintos elementos metálicos, que, dependiendo de su dureza, experimentarán un desgaste leve o significativo en su estructura. La inclusión de paja de caña dentro del equipo de combustión no experimentaría riesgos de desgaste por abrasión, ya que se trataría de elementos orgánicos.

5.6. Mantenimiento

En todo equipo, o mecanismo, se producen desgastes y deterioros ocasionados por el uso frecuente de los aparatos. Estos desgastes conllevan a realizar acciones de reparación en la maquinaria, principalmente en las áreas más afectadas, el mantenimiento se encarga principalmente de evitar y prevenir situaciones no deseadas.

Existen diversos tipos de mantenimiento, de los cuales se destacan tres:

- Mantenimiento predictivo
- Mantenimiento preventivo
- Mantenimiento correctivo

⁸ CHEN, James. *Manual del azúcar de caña*. s.p.

El mantenimiento que deberá efectuarse con el empleo de mezcla de paja de caña y bagazo en el equipo debe ser de carácter predictivo, preventivo y correctivo, si la situación así lo amerita.

5.6.1. Mantenimiento predictivo

Es aquel que se encarga de detectar fallos propensos a manifestarse mediante a una evaluación visual, se reducen costos de reparación y posibles paros de producción. Dentro de las acciones se encuentran:

- Separación de impurezas de biomasa.
- Separación de cogollos, cepas y chulquines de las hojas, hojas secas y pedazos de tallos secos en los campos de cosecha.

5.6.2. Mantenimiento preventivo

Es aquel que se encarga de realizar las acciones protectoras de los equipos, según ajustes aconsejados por el manual del fabricante o reparaciones curativas para prolongar la vida útil de la maquinaria y reducción de gastos. En las actividades a llevar a cabo, están:

- Períodos de limpieza cada 12 horas.
- Revisión de tubería en general durante paros programados, liquidación o fin de zafra.
- Revisión de indicadores de transmisión de energía y calor.
- Revestimiento por medio de polímeros para prolongamiento de ciclo de vida de la tubería.

5.6.3. Mantenimiento correctivo

Es aquel que se encarga de enmendar las fallas originadas por percances dentro del funcionamiento de las máquinas, por medio de acciones de reparación inmediatas, pudiendo ocasionar gastos elevados que se encuentren fuera de los rangos presupuestarios. Dentro de las actividades se detallan:

- Lavado de químicos, como fosfatos, coloides, sulfitos, entre otros; en tiempos programados para una caldera, si se observa una disminución de transmisión calórica en la tubería.
- Eliminación de costras por medio del uso de cepillos de alambre y ácidos de remoción cada paro programado, liquidación o fin de zafra.

6. ANÁLISIS DE COSTOS

Para la inclusión de la paja de caña como complemento biocombustible al bagazo, se debe tomar en cuenta una serie de costos en el proyecto. Los estudios respectivos se detallan a continuación. (Los costos se han tomado con base en valores reales aproximados).

6.1. Estudio de costos fijos

Entre los costos que se pueden considerar fijos dentro de la planificación, se encuentran los siguientes:

Tabla XXXV. **Costos fijos**

Descripción	Costo	Cantidad	Valor total
Mano de obra	\$ 353,00 x mes	6 operarios (3 jornadas diarias)	\$ 38 124,00
Máquina chipeadora (300 HP)	\$ 2 500 000,00	1	\$ 2 500 000,00
Filtro de impurezas (200 HP)	\$ 2 500 000,00	1	\$ 2 500 000,00
Consumo energía 300 HP	\$ 555,71 x día	180 días	\$ 80 022,24
Consumo energía 200 HP	\$ 370,47 x día	180 días	\$ 53 347,68
Mantenimiento maquinaria (5 %)	(10 %) x costo maquinaria	180 días	\$ 250 000,00
Total			\$ 5 396 077,92

Fuente: elaboración propia.

Entre los costos de mano de obra se incluyen dos operarios para la operación de *paylover* (para mezclar el bagazo y la paja de caña), dos operarios para la operación de la máquina chipeadora y dos operarios para la operación del filtro de impurezas en tres jornadas de 8 horas cada día, además de contar con el valor del salario de cada uno de ellos en dólares americanos por mes, contando con seis meses efectivos de zafra (180 días). También, se incluye el costo de consumo de energía (precio *spot* sugerido) de la maquinaria durante la época de zafra con una efectividad operacional del 80 %. Se incluye, además, el costo de mantenimiento de maquinaria correspondiente al 5 % del valor de las máquinas.

6.2. Estudio de costos variables

Entre los costos variables, se encuentran los siguientes:

Tabla XXXVI. **Costos variables**

Descripción	Costo
Retención ISR (15 %)	\$ 44 496,45
Retención IVA (12 %)	\$ 35 597,16
Total	\$ 80 093,61

Fuente: elaboración propia.

Las retenciones de los impuestos del IVA e ISR dependen del valor total facturado, incluyendo los costos por viaje y combustible. Los costos de

retenciones de IVA e ISR resultan ser del promedio total facturado durante el período de zafra para su posterior pago al fisco.

6.3. Estudio de costos de transporte

Dentro de los costos de transporte, en concepto de traslado del compost de paja de caña de las fincas seleccionadas hacia el Ingenio, se encuentran los siguientes:

Tabla XXXVII. **Costos de transporte**

Descripción	Costo aproximado	Cantidad promedio	Valor total
Descripción de viajes	\$ 15,69 x viaje	12 000,00 viajes x zafra	\$ 188 280,00
Combustible	\$ 3,30 x galón	21 400 galones x zafra	\$ 70 620,00
Total			\$ 258 900,00

Fuente: elaboración propia.

Se ha tomado como referencia en el transporte de paja de caña, el valor promedio de los viajes efectuados en las fincas seleccionadas durante la época de zafra, de las cuales se destacan: Finca W, Finca X, Finca Y y Finca Z, además de contar con el valor promedio del combustible durante el último período de zafra.

6.4. Estudio de costos de almacenamiento

El costo de almacenamiento se detalla cómo el 5 % del valor que representa la paja de caña dentro de las instalaciones del Ingenio. El valor se fija a partir del costo de los viajes realizados para traslado de los residuos.

Tabla XXXVIII. **Costo de almacenamiento**

Descripción	Costo aproximado	Valor total
5 % Almacenamiento	(5 %)x \$ 188 280,00	\$ 9 414,00

Fuente: elaboración propia.

6.5. Total de costos

El costo total de la introducción de paja de caña como complemento del bagazo se detalla de dos formas, el costo inicial durante el primer año (incluyendo la inversión inicial de las máquinas) y el costo durante los años posteriores (sin la inversión inicial de la maquinaria). Los costos de retención de IVA e ISR no se incluyen por pertenecer al grupo de pagos de tributo al fisco.

Tabla XXXIX. **Costos finales**

Descripción	Valor total
Costo inicial (1er año)	\$ 5 689 807,92
Costo posterior (anual)	\$ 689 807,92

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Se ha centralizado la investigación en el proceso de combustión llevado a cabo en el hogar de las calderas, erigido como el proceso más relevante de la operación, debido a que es allí donde se obtiene la energía necesaria para elevar la temperatura de los domos y, posteriormente, la evaporización del agua.
2. Se ha logrado establecer una relación bagazo-paja de caña, en función de la cantidad del empleo de biomasa y el poder calorífico de estos componentes, sobre una reacción comburente en el interior de las calderas.
3. Se ha determinado que la principal injerencia de la paja de caña de azúcar en el interior de las calderas es el resultado de la mezcla de esta junto con el bagazo, para mantener el rendimiento del poder calorífico necesario para la generación del libraje de vapor correspondiente.
4. Los posibles efectos de la paja de caña en la estructura interna del equipo de combustión pueden ser perjudiciales si los materiales residuales de caña no son tratados correctamente. Pueden originar incrustaciones, pérdidas de calor y disminución de la vida útil del equipo.
5. Se han evaluado los gastos de la utilización de la paja de caña en un estudio de costos, determinando una alta inversión durante el primer año de operación, financiable los años posteriores con los beneficios monetarios que incurre el ahorro de biocombustible expuesto por la

investigación planteada, sin tomar en cuenta el beneficio económico por parte de la generación de energía al lograr conservar los niveles de presión, contando con el bagazo suficiente que supone esta acción.

RECOMENDACIONES

1. Manipular adecuadamente la paja de caña, con el objetivo de no perjudicar su desempeño complementario con el bagazo, con el objetivo de mantener el poder calorífico óptimo durante el proceso de combustión.
2. No interferir el proceso de combustión en el momento que se adhieran los residuos para su mezcla, ya que podrían ocasionarse condiciones de baja presión.
3. Conservar las cantidades sugeridas de bagazo y de paja de caña, para evitar problemas de caída de presión por presencia mayoritaria de impurezas o de disminución de ahorro de biocombustible.
4. Mantener los niveles de bagazo y paja de caña en el interior de las calderas, con el objetivo de conservar el rendimiento de poder calorífico de la mezcla.
5. No elevar el contenido de residuos cañeros en el equipo, para evitar incrustaciones, pérdidas de calor y disminución de la vida útil del equipo.
6. Realizar un bosquejo de variaciones de costos de mantenimiento, ya que podrían presentarse diversas fluctuaciones de los gastos dependiendo del uso del equipo.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGÜERO, Armando; PISA, Jorge; AGÜERO, Carlos; TORRES, Adolfo. *Poder calorífico del bagazo de caña de azúcar*. Argentina: Universidad Nacional de Tucumán, Laboratorio del Departamento de Mecánica. 1-3 p.
2. *Bagazo de caña*. [en línea]. <http://www.ecured.cu/index.php/Bagazo_de_caña>. [Consulta: 25 de febrero de 2015].
3. CARRASCO CARPIO, Ricardo. *Criterios de evaluación termodinámica para sistemas de cogeneración en centrales azucareras*. [en línea]. <http://www.sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/Publicaciones/hidraulica_mecanica/2001_n2/criterios>. [Consulta: 5 de febrero de 2015].
4. CHEN, James. *Manual del azúcar de caña*. García, Carlos (trad.). Álvarez, Constantino (rev.). México: Limusa, 2 009. 1 179 p. ISBN 13: 978-968-18-3662-7.
5. GARCÉS PAZ, Rosa Virginia; MARTÍNEZ SILVA, Sandra Viviana. *Estudio del poder calorífico del bagazo de caña de azúcar en la industria azucarera de la zona Risaralda*. Colombia. Nota de aceptación de trabajo de graduación. s.p.

6. HUGOT, E. *Handbook of cane sugar engineering*. Jenkins, G.H. (trad.). Países Bajos: Elsevier Science Publishers, 1986. 1 146 p. ISBN 0-444-41897-0.
7. LEÓN, Tamara; DOPÍCO, Daisy; TRIANA, Omar; MEDINA, Marelys. *Paja de la caña de azúcar, sus usos en la actualidad*. [en línea]. <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223128548003>>. [Consulta: 15 de mayo de 2015].
8. TAURACHAND, Dewraj. *Manual del cultivador de hongos I*. Sustrato Capítulo 5: bagazo de caña de azúcar. 1-5 p.
9. TORRES, Francisco; GARRIDO, Norge. *Bagazo de caña de azúcar: ¿energía o etanol carburante?* [en línea]. <<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar31/HTML/Articulo02N.htm>>. [Consulta: 8 de diciembre de 2014].

ANEXOS

1. Factores para el cálculo de límites de control de gráficas para variables

OBSERVACIONES EN LA MUESTRA, n	GRAFICA PARA PROMEDIOS			GRAFICA PARA LAS DESVIACIONES ESTANDAR				GRAFICA DE LOS RANGOS						
	FACTORES PARA LOS LIMITES DE CONTROL			FACTOR PARA LINEA CENTRAL	FACTORES PARA LIMITES DE CONTROL				FACTOR PARA LINEA CENTRAL	FACTORES PARA LOS LIMITES DE CONTROL				
	A	A ₂	A ₃	c ₄	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	d ₂	d ₁	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
2	2.121	1.880	2.659	0.7979	0	3.267	0	2.606	1.128	0.853	0	3.686	0	3.267
3	1.732	1.023	1.954	0.8862	0	2.568	0	2.276	1.693	0.888	0	4.358	0	2.574
4	1.500	0.729	1.628	0.9213	0	2.266	0	2.088	2.059	0.880	0	4.698	0	2.282
5	1.342	0.577	1.427	0.9400	0	2.089	0	1.964	2.326	0.864	0	4.918	0	2.114
6	1.225	0.483	1.287	0.9515	0.030	1.970	0.029	1.874	2.534	0.848	0	5.078	0	2.004
7	1.134	0.419	1.182	0.9594	0.118	1.882	0.113	1.806	2.704	0.833	0.204	5.204	0.076	1.924
8	1.061	0.373	1.099	0.9650	0.185	1.815	0.179	1.751	2.847	0.820	0.388	5.306	0.136	1.864
9	1.000	0.337	1.032	0.9693	0.239	1.761	0.232	1.707	2.970	0.808	0.547	5.393	0.184	1.816
10	0.949	0.308	0.975	0.9727	0.284	1.716	0.276	1.669	3.078	0.797	0.687	5.469	0.223	1.777
11	0.905	0.285	0.927	0.9754	0.321	1.679	0.313	1.637	3.173	0.787	0.811	5.535	0.256	1.744
12	0.866	0.266	0.886	0.9776	0.354	1.646	0.346	1.610	3.258	0.778	0.922	5.594	0.283	1.717
13	0.832	0.249	0.850	0.9794	0.382	1.618	0.374	1.585	3.336	0.770	1.025	5.647	0.307	1.693
14	0.802	0.235	0.817	0.9810	0.406	1.594	0.399	1.563	3.407	0.763	1.118	5.696	0.328	1.672
15	0.775	0.223	0.789	0.9823	0.428	1.572	0.421	1.544	3.472	0.756	1.203	5.741	0.347	1.653
16	0.750	0.212	0.763	0.9835	0.448	1.552	0.440	1.526	3.532	0.750	1.282	5.782	0.363	1.637
17	0.728	0.203	0.739	0.9845	0.466	1.534	0.458	1.511	3.588	0.744	1.356	5.820	0.378	1.622
18	0.707	0.194	0.718	0.9854	0.482	1.518	0.475	1.496	3.640	0.739	1.424	5.856	0.391	1.608
19	0.688	0.187	0.698	0.9862	0.497	1.503	0.490	1.483	3.689	0.734	1.487	5.891	0.403	1.597
20	0.671	0.180	0.680	0.9869	0.510	1.490	0.504	1.470	3.735	0.729	1.549	5.921	0.415	1.585

Derechos reservados de ASTM, 1916 Race Street, Filadelfia, PA, 19103. Se reproduce con autorización.

Fuente: BESTERFIELD, Dale. *Control de calidad*. p. 514.

2. Resultados del análisis del ministerio de energía y minas (MEM) sobre muestra de bagazo

LABORATORIOS TECNICOS	 Gobierno de Guatemala Ministerio de Energía y Minas	PAGINA 1 DE (1) LAB-RÉP-0316-15 ORDEN No. L-147-15 GUATEMALA, 27-02-15	
RESULTADOS DE ANALISIS			
MUESTRA: Bagazo de Caña PRESENTADA POR: Elder Fuentes RESPONSABLE DEL MUESTREO: Elder Fuentes PROCEDENCIA: Elder Fuentes LOCALIZACION: Guatemala, Guatemala FECHA DE MUESTREO: Desconocida FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 20-02-15 FECHA DE ANALISIS: del 23 al 26-02-15 PRECIO DE ANALISIS: ANALISTA: Max Pérez			
DESCRIPCION	METODO DE ANALISIS	ESPECIFICACION (a)	RESULTADOS (b)
PODER CALORIFICO SUPERIOR, MJ/Kg	ASTM D-240	-----	(c) 17.36
CENIZA, % masa	ASTM D-482	-----	2.24
HUMEDAD, % volumen	Gravimétrico	-----	75.61
OBSERVACIONES: <p>a) En el Acuerdo Ministerial No. 399-2012 no existen especificaciones para este producto. b) Los resultados son válidos solo para la cantidad de muestra presentada en este laboratorio. c) El valor de 17.36 MJ/Kg es equivalente a 4147 Kcal/Kg y a 7465 Btu/Lb. Debido al alto contenido de agua, 75.61 % volumen, la prueba se realizó en base seca.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  Ing. Julio Villacinda AREA DE HIDROCARBUROS </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;">  Vo. Bo. Inga Mayra Villatoro COORDINADORA LABORATORIOS TECNICOS </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div>			
<small>El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico</small>			

Ministerio de Energía y Minas
 Diagonal 17, 29-78 zona 11 Las Charcas. Guatemala, Centroamérica.
 Teléfonos: (502) 2419-6464 - www.mem.gob.gt

Fuente: Ministerio de Energía y Minas.

3. Resultados del análisis del ministerio de energía y minas (MEM) sobre muestra de bagazo

<p>LABORATORIOS TECNICOS</p>	 <p>Gobierno de Guatemala Ministerio de Energía y Minas</p>	<p>PAGINA 1 DE (1) LAB-REP-0356-15 ORDEN No. L-160-15 GUATEMALA, 03-03-15</p>																
<p>RESULTADOS DE ANALISIS</p>																		
<p>MUESTRA: Paja de Caña PRESENTADA POR: Elder Fuentes RESPONSABLE DEL MUESTREO: Elder Fuentes PROCEDENCIA: Elder Fuentes LOCALIZACION: Guatemala, Guatemala FECHA DE MUESTREO: Desconocida FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 23-02-15 FECHA DE ANALISIS: del 03 al 05-02-15 PRECIO DE ANALISIS: ANALISTA: Roderico Zapata</p>																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>DESCRIPCION</th> <th>METODO DE ANALISIS</th> <th>ESPECIFICACION (a)</th> <th>RESULTADOS (b)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PODER CALORIFICO SUPERIOR, MJKg</td> <td>ASTM D-248</td> <td>-----</td> <td>(c) 10.33</td> </tr> <tr> <td>CENIZA, % masa</td> <td>ASTM D-482</td> <td>-----</td> <td>41.87</td> </tr> <tr> <td>HUMEDAD, % volumen</td> <td>Gravimetrico</td> <td>-----</td> <td>1.73</td> </tr> </tbody> </table>			DESCRIPCION	METODO DE ANALISIS	ESPECIFICACION (a)	RESULTADOS (b)	PODER CALORIFICO SUPERIOR, MJKg	ASTM D-248	-----	(c) 10.33	CENIZA, % masa	ASTM D-482	-----	41.87	HUMEDAD, % volumen	Gravimetrico	-----	1.73
DESCRIPCION	METODO DE ANALISIS	ESPECIFICACION (a)	RESULTADOS (b)															
PODER CALORIFICO SUPERIOR, MJKg	ASTM D-248	-----	(c) 10.33															
CENIZA, % masa	ASTM D-482	-----	41.87															
HUMEDAD, % volumen	Gravimetrico	-----	1.73															
<p>OBSERVACIONES:</p> <p>a) En el Acuerdo Ministerial No. 369-2012 no existen especificaciones para este producto. b) Los resultados son válidos solo para la cantidad de muestra presentada en este laboratorio. c) El valor de 10.33 MJKg es equivalente a 2466 Kcal/Kg y a 4443 Btu/Lb. La prueba se realizó en base húmeda.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div data-bbox="537 1003 722 1157">  </div> <div data-bbox="771 1039 971 1129"> <p><i>[Signature]</i> Ing. Roderico Zapata ÁREA DE HIDROCARBUROS</p> </div> <div data-bbox="1015 1094 1203 1247">  </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center; margin-top: 20px;"> <div data-bbox="771 1165 1096 1333"> <p><i>[Signature]</i> Vc. Bc. Inga Mayra Vilatoro COORDINADORA LABORATORIOS TECNICOS</p> </div> </div>																		

El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico

Ministerio de Energía y Minas
Diagonal 17, 29-78 zona 11 Las Charcas. Guatemala, Centroamérica.
Teléfonos: (502) 2419-6464 - www.mem.gob.gt

Fuente: Ministerio de Energía y Minas.

4. Resultados de los análisis efectuados en el laboratorio de caña en un ingenio azucarero ubicado en el departamento de Escuintla, Guatemala. Muestras de bagazo, paja de caña y mezcla

	Informe Análisis de Biomasa	Código: _____
Gestión de la Calidad		Versión: 1
		Página: 1 de 1

Informe de Análisis No. 2014-2015 Fecha de emisión: 25 de Marzo del 2015
 Sección de laboratorio: Caña
 Empresa: Ingenio
 Orden de trabajo: _____
 Fecha de recepción: 24/03/2015
 Presentación: Bolsa plástica
 Cantidad recibida: 08 muestras
 Fecha de análisis: 24/03/2015

Análisis Solicitado: % HUMEDAD, CENIZAS Y PODER CALORIFICO

Resultados:

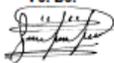
No.	FINCA O PROCEDENCIA	TIPO MUESTRA	TURNO	% DE HUMEDAD	% CENIZAS	PODER CALORIFICO (BTU/lb)	OBSERVACIONES
1	Ingenio El Pilar	BAGAZO 1	1	41.40	2.12	3,760	
2	Ingenio El Pilar	BAGAZO 2	1	44.40	1.86	3,817	
3	Ingenio El Pilar	BAGAZO 3	1	41.20	1.86	4,127	
4	Ingenio El Pilar	BAGAZO 4	1	48.80	1.92	1,900	
5	Ingenio El Pilar	BAGAZO 5	1	45.80	1.70	2,955	
6	Ingenio El Pilar	BAGAZO 6	1	48.00	1.98	3,478	
7	Mesa Granel	RASTROJO	1	26.80	1.92	2,952	
8	Mesa Mecanizado	RASTROJO	1	34.00	2.18	3,962	
9	Ingenio El Pilar	BAGAZO/RASTROJO	1	—	—	2,997	BAGAZO MUESTRA 1/RASTROJO GRANEL
10	Ingenio El Pilar	BAGAZO/RASTROJO	1	—	—	3,709	BAGAZO MUESTRA 2/RASTROJO GRANEL
11	Ingenio El Pilar	BAGAZO/RASTROJO	1	—	—	3,831	BAGAZO MUESTRA 3/RASTROJO MECANIZADO
12	Ingenio El Pilar	BAGAZO/RASTROJO	1	—	—	3,025	BAGAZO MUESTRA 4/RASTROJO MECANIZADO

Realizó:



Analista de Campo I

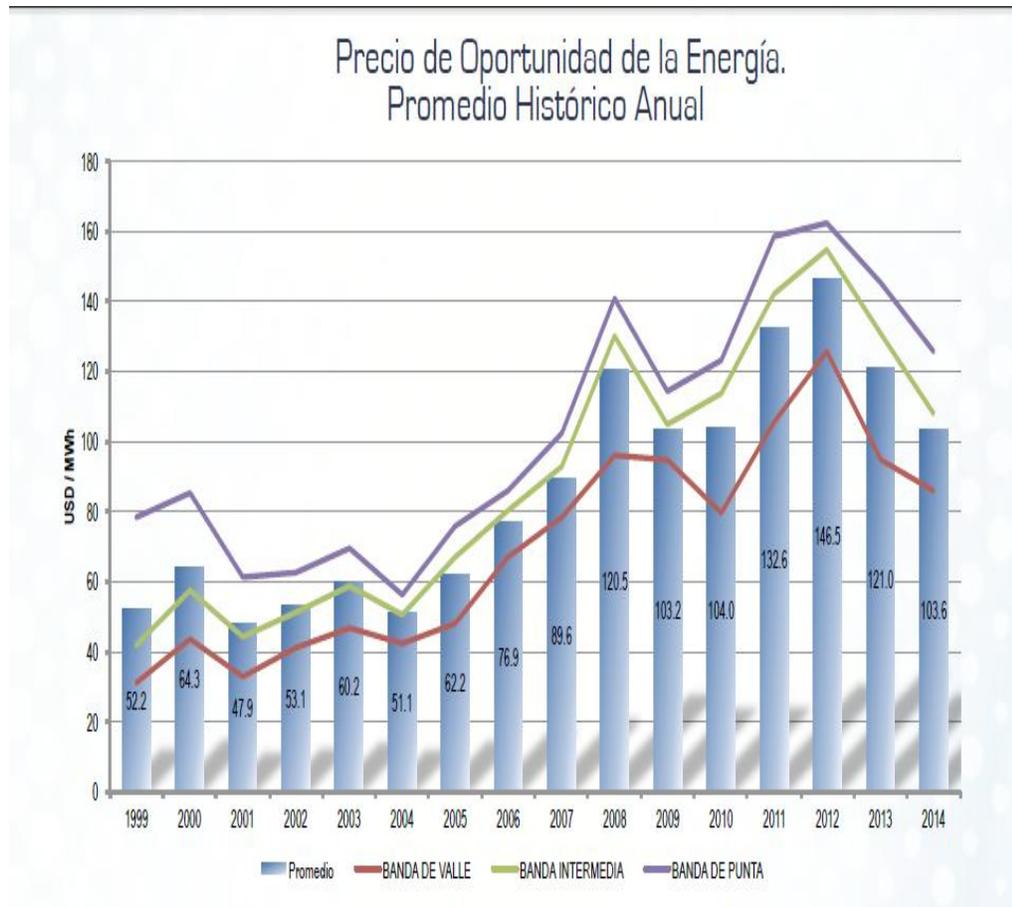
Vo. Bo.



Supervisor Laboratorio de Caña.

Fuente: Laboratorio de caña, Ingenio Azucarero ubicado en el departamento de Escuintla, Guatemala.

5. Curva anual del precio de oportunidad de energía (precio *spot*), presentada por el Administrador de Mercado Mayorista de Guatemala durante el ciclo 2014



Fuente: Administrador de Mercado Mayorista de Guatemala.