



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

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL MODELO DE IMPLEMENTACIÓN DEL OEE (EFICIENCIA GLOBAL DE EQUIPOS) PARA LA MEJORA DE LA PRODUCTIVIDAD DE UNA CALDERA EN UN INGENIO AZUCARERO DE ESCUINTLA

Antulio Hildebrando Morales Díaz

Asesorado por el Ing. Pablo Fabián Escobar Grajeda

Guatemala, enero de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL MODELO DE IMPLEMENTACIÓN DEL OEE (EFICIENCIA GLOBAL DE EQUIPOS) PARA LA MEJORA DE LA PRODUCTIVIDAD DE UNA CALDERA EN UN INGENIO AZUCARERO DE ESCUINTLA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ANTULIO HILDEBRANDO MORALES DÍAZ
ASESORADO POR EL ING. PABLO FABIÁN ESCOBAR GRAJEDA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO INDUSTRIAL

GUATEMALA, ENERO DE 2017

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	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgén Adoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADORA	Inga. Paula Vanesa Ayerdi Bardales
EXAMINADOR	Ing. Pablo Fernando Hernández
EXAMINADORA	Inga. Norma Ileana Sarmiento Zeceña
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL MODELO DE IMPLEMENTACIÓN DEL OEE (EFICIENCIA GLOBAL DE EQUIPOS) PARA LA MEJORA DE LA PRODUCTIVIDAD DE UNA CALDERA EN UN INGENIO AZUCARERO DE ESCUINTLA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 18 de julio de 2016.



Antulio Hildebrando Morales Díaz



USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala



Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
 Teléfono 2418-9142 / 2418-8000 Ext. 86226

AGS-MGIPP-033-2015

Guatemala, 18 de julio de 2016.

Director
 Juan José Peralta Dardón
 Escuela de Ingeniería Industrial
 Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Antulio Hildebrando Morales Díaz** carné número **91-12501**, quien optó la modalidad del **“PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO”**. Previo a culminar sus estudios en la **Maestría de Gestión Industrial**.


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

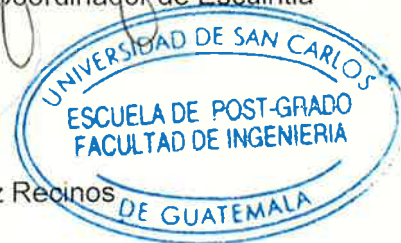
Sin otro particular, atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


 MSc. Ing. Pablo Fabián Escobar Grajeda
 Asesor (a)


 MSc. Ing. Juan José Peralta Dardón
 Coordinador de Escuintla


 MSc. Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
 Director
 Escuela de Estudios de Postgrado



Cc: archivo
 /la



REF.DIR.EMI.231.016

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 graduación en la modalidad Estudios de Postgrado titulado **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: MODELO DE IMPLEMENTACIÓN DEL OEE (EFICIENCIA GLOBAL DE EQUIPOS) PARA LA MEJORA DE LA PRODUCTIVIDAD DE UNA CALDERA DE UN INGENIO AZUCARERO DE ESCUINTLA**, presentado por el estudiante universitario **Antulio Hildebrando Morales Díaz**, aprueba el presente trabajo y solicita la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAR A TODOS”

Ing. José Francisco Gómez Rivera
DIRECTOR a.i.
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial



Guatemala, noviembre de 2016.

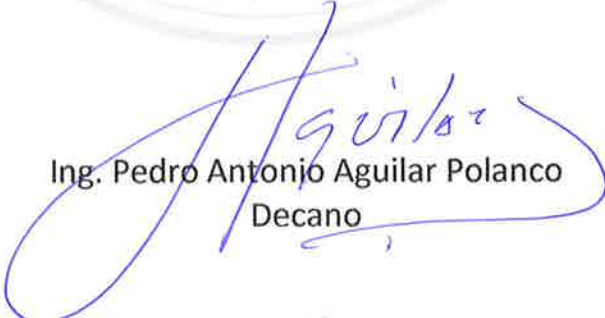
/mgp



DTG. 032.2017

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: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: MODELO DE IMPLEMENTACIÓN DEL OEE (EFICIENCIA GLOBAL DE EQUIPOS) PARA LA MEJORA DE LA PRODUCTIVIDAD DE UNA CALDERA EN UN INGENIO AZUCARERO DE ESCUINTLA**, presentado por el estudiante universitario: **Antulio Hildebrando Morales Díaz**, 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, enero de 2017

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Todo lo que soy y tengo es por la voluntad de mi padre espiritual.
Mis padres	Por el amor y principios recibidos e incondicional apoyo.
Mi esposa	Por tu amor, comprensión y paciencia.
Mis hijos	Por ser la mayor bendición de mi vida.
Mis hermanos	Abner y María con mucho cariño, esperando sea factor motivante para lograr sus sueños.
Mis tíos	Especialmente a Maco y Silvia por su cariño y apoyo.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad de la preparación académica
Ingenio Pantaleón	Por permitirme crecer como profesional.
Cohorte I de la maestría de gestión industrial Escuintla	Por su amistad y aporte a mi desarrollo

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
INTRODUCCIÓN.....	XIII
1. ANTECEDENTES	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
2.1. Descripción del problema	5
2.2. Delimitación	5
2.3. Formulación de preguntas	6
2.4. Viabilidad de la investigación.....	6
2.5. Consecuencias de la implementación de la investigación.....	7
3. JUSTIFICACIÓN	9
4. OBJETIVOS	13
4.1. Objetivo General.....	13
4.2. Objetivo Especificos	13
5. NECESIDADES PARA CUBRIR Y ESQUEMA DE RESOLUCIÓN	15
6. MARCO TEÓRICO.....	17
6.1. Industria del Azúcar	17
6.1.1. Generalidades.....	17

6.1.2.	Caña de azúcar	22
6.1.3.	Fabricación de azúcar	24
6.1.3.1.	Proceso de extracción de jugo.....	24
6.1.3.2.	Proceso de tratamiento de jugo	26
6.1.3.3.	Proceso de evaporación de Jugo.....	28
6.1.3.4.	Proceso de recuperación de azúcar.....	29
6.1.4.	Congeneración	30
6.1.4.1.	Proceso de producción de vapor	31
6.1.4.2.	El bagazo y su aprovechamiento	35
6.2.	Caldera	37
6.2.1.	Clasificación de caldera.....	37
6.2.2.	Componentes y equipo auxiliar de una caldera	40
6.2.3.	Eficiencia de la caldera.....	43
6.2.4.	Combustión	44
6.2.5.	Transferencia de calor	45
6.2.6.	Vapor de agua	46
6.3.	Productividad	47
6.3.1.	Factores de la productividad.....	48
6.3.2.	Medición de la productividad	49
6.3.2.1.	Indicadores de la productividad.....	50
6.3.3.	Mejora de la productividad.....	52
6.4.	Eficiencia global de equipos (OEE)	53
6.4.1.	Ventajas del OEE	53
6.4.2.	Clasificación del OEE	54
6.4.3.	Factores del cálculo del OEE	54
6.4.3.1.	Disponibilidad	54
6.4.3.2.	Eficiencia	55
6.4.3.3.	Calidad	55
6.4.4.	Cálculo del OEE de una caldera.....	55

7.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	57
8.	METODOLOGÍA	59
9.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	65
10.	CRONOGRAMAS	67
11.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	69
	BIBLIOGRAFÍA.....	71
	APÉNDICES.....	75

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Típico proceso de generación de energía de un ingenio	32
2.	Producción de vapor en un generador acuotubular	33
3.	Caldera de dos cuerpos cilíndricos tipo Springfield	39
4.	Caldera cleaver-brooks, de cuatro pasos, pirotubular	40

TABLAS

I.	Ingreso de divisas por exportación (miles de US\$).....	19
II.	Composición promedio del bagazo de caña.....	36
III.	Clasificación de empresas en función al OEE.....	54
IV.	Cuadro de variables e indicadores	62
V.	Presupuesto de gasto de elaboración del estudio	70

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

Símbolo	Significado
BTU	Unidad térmica británica
°Brix	Grados Brix (solidos disueltos en una solución)
C	Carbono
°C	Grados centígrados
CO	Monóxido de carbono
CO₂	Dióxido de carbono
ε	Eficiencia
°F	Grados fahrenheit
Ft	Pie
Gal	Galón
Gl/min	Galón por minuto (flujo)
h	Entalpía
H	Hidrogeno
HP	Caballo de potencia
Hr	Hora
HS	Superficie de calefacción
Kg	Kilogramo
KJ	Kilojoule
KW	Kilowatt
lb	Libra
O	Oxígeno
OEE	Eficiencia global de equipos
Plg	Pulgada
Psi	Libra/plg ²
Q	Calidad

TPM	Mantenimiento productivo total
σ	Desviación estándar
ρ	Densidad
π	Constante pi = 3.1416
\bar{X}	Media aritmética
%	Porcentaje

GLOSARIO

Alcalización	Etapa del proceso de purificación del jugo en la cual se introduce cal al jugo en forma de lechada de cal o sacarato de calcio.
Azúcar	Término para la sacarosa disacárida y productos de la industria azucarera, compuestos esencialmente por sacarosa.
Bagazo	Residuo de los frutos que se exprimen para sacarles el jugo.
Caldera	Aparato dotado de una fuente de calor donde se calienta o se hace hervir el agua para diferentes aplicaciones.
Calidad	Conjunto de todas las características de una entidad asociadas con la facultad de satisfacer las necesidades explícitas e implícitas.
Calor	La energía que fluye en virtud de una diferencia de temperaturas.
Cliente	Receptor de un producto proporcionado por el suministrador o proveedor.

Cogeneración	Procedimiento mediante el cual se obtiene energía eléctrica y energía térmica útil.
Combustible	Sustancia o materia que al combinarse con oxígeno es capaz de reaccionar (combustión) desprendiendo calor.
Combustión	Reacción química que se produce entre el oxígeno y un material oxidable, que va acompañada de desprendimiento de energía en forma de calor y habitualmente se manifiesta por incandescencia o llama.
Conformidad	Cumplimiento de requisitos específicos.
Energía	La capacidad para producir un efecto.
Eficacia	Mide el alcance de resultados.
Eficiencia	Mide la forma de uso de los recursos.
Especificación	Documento que establece los requisitos.
Extracción	Corresponde a la masa de azúcar en jugo diluido como porcentaje de la masa de azúcar en caña.
Fibra	Estructura fibrosa insoluble seca de la caña.

Imbibición	Proceso de añadir agua en la planta de extracción para aumentar la extracción.
Mantenimiento	Conservación de una cosa en buen estado o en situación determinada para evitar su degradación.
Presión	La fuerza por unidad de superficie ejercida por un medio sobre sus límites.
Proceso	Conjunto de actividades y recursos interrelacionados que transforman entradas en salidas.
Rendimiento	Utilidad sobre algo en relación a lo que se invierte.
Temperatura	Índice de energía interna relativa de la masa.
Vapor	Fase gaseosa que se transforma una sustancia, generalmente líquida, y que se produce en temperaturas próximas al punto de ebullición o licuefacción.

INTRODUCCIÓN

La industria azucarera es de vital importancia para la economía guatemalteca, los productos que comercializa son los siguientes: azúcar, mieles, alcohol y energía.

El trabajo de investigación consiste en la sistematización de control de variables que sirven para determinar un indicador de productividad, eficiencia global de equipos (OEE), para mejorar el rendimiento total de una caldera (generador de vapor) de un ingenio azucarero, por medio de la relación entre la disponibilidad del equipo, su rendimiento y calidad del producto que se obtiene.

El enfoque del trabajo de investigación es resolver el problema de la falta de control del rendimiento total de la caldera.

La importancia del trabajo de investigación se alinea a la estrategia de mejora continua de la organización, y con la implementación del mismo se espera contribuir con el alcance de objetivos de gestión de la empresa relacionados a efectividad, seguridad y salud ocupacional e impacto ambiental, lo que beneficia a los dueños e inversionistas del proyecto, colaboradores y sus familias, nuestro medio ambiente y en general a todos los stakeholders de la organización.

El diseño de investigación es no experimental, porque tiene enfoque mixto y el tipo de estudio es descriptivo y transversal; se pretende aportar a la industria azucarera la metodología que permita medir el rendimiento de operación de una caldera con el siguiente esquema:

- Determinar línea base con la información de diseño de la caldera.
- Registro del comportamiento de las variables de proceso involucradas en el estudio.
- Cálculo y análisis de resultados del indicador eficiencia global de equipos OEE.
- Analizar sus desviaciones y sus respectivas causas.
- Realizar la evaluación de propuestas viables para reducir o eliminar las desviaciones del OEE.

El ingenio azucarero donde se realizará la investigación, proporcionará el recurso físico, humano y la documentación necesaria para realizar el estudio.

El financiamiento de los gastos y costos en los que se incurra para realizar la investigación serán aportados por el investigador.

En el primer capítulo, se describe la industria del azúcar en Guatemala, da a conocer generalidades de la planta caña de azúcar y el proceso de fabricación del azúcar y derivados.

En el segundo capítulo, se describe una caldera, su operación y la importancia dentro de la industria del azúcar.

En el tercer capítulo, se conoce sobre productividad, los factores que la determinan, su medición e importancia en cualquier proceso que involucre entradas y salidas.

En el cuarto capítulo, se conoce el indicador OEE (eficiencia global de equipos), los factores que lo determinan, como se calculan los factores mencionados y el OEE de una caldera.

En el quinto capítulo, se desarrolla la investigación, bajo el esquema presentado anteriormente.

Y por último, la presentación y discusión de resultados obtenidos en el desarrollo de la investigación, sus conclusiones y recomendaciones pertinentes.

1. ANTECEDENTES

La productividad de la operación de una caldera relaciona factores importantes como el rendimiento y/o eficiencia de la caldera, la disponibilidad de la caldera y la calidad de producto que entrega, por lo anterior es que el indicador OEE es el indicado para medir el desempeño de una caldera.

El uso eficiente de los combustibles (sin importar la fuente) en los generadores de vapor se traduce en mayor margen de utilidad y oportunidades de negocio para la empresa.

“El rendimiento global de una caldera de vapor en condiciones de funcionamiento cualesquiera es la relación entre el calor transmitido y la energía suministrada en forma de combustible” concluye Severns W. H, Degler H. E. & Miles J. C. (1992, p. 144). Por lo tanto, en el presente trabajo de investigación se aplica como indicador de eficiencia, la producción relativa de la caldera, la razón vapor/bagazo (unidad de masa de vapor producida por unidad de masa de bagazo consumido).

El análisis de la eficiencia de la caldera en función a su producción relativa puede indicarnos áreas de oportunidad para reducir pérdidas, como lo indica Kohan (2000, p. 654) donde lista las principales causas que afectan la eficiencia de combustión, de tal forma que si existen desviaciones del OEE causado por ineficiencia en el uso del combustible se evaluarán las propuestas en función a lo mencionado.

En la metodología utilizada para realizar el estudio tratado en la tesis de Ingeniería Mecánica: “Análisis energético integral de ingenio Santa Teresa, S.A.” de Escamilla (2007) de la Universidad de San Carlos de Guatemala indica en su análisis de resultados que realizó la comparación entre el comportamiento de la caldera y los datos de diseño (línea base). En el mismo menciona características de entrada al sistema de producción de vapor (agua y bagazo) que deben ser considerados para un mejor enfoque del estudio.

En la tesis de la Escuela de Postgrado: “Gestión de los controles de productividad a través del análisis de la eficiencia de la línea de flexitubo de la empresa empaques globales, S. A.” de Gálvez (2007) de la Universidad de San Carlos de Guatemala destaca en el análisis e interpretación de los resultados que fue fundamental la medición del OEE para obtener información como diagnóstico, para conocer el estado actual de la operación del equipo. Sin embargo, menciona que se debe realizar el análisis posterior complementario que ayude a mejorar el indicador, por medio de la búsqueda de la causa o causas raíces que originan la reducción en el rendimiento para mejorar la productividad.

Todo sistema productivo tiene un cliente que espera que el producto cumpla con los requerimientos de calidad.

En el manual de calidad (Juran, 2001) indica que la calidad no es únicamente el cumplimiento de especificaciones del producto, sino el nivel de satisfacción del cliente. En el caso de una caldera se considera además del título del vapor, relacionado a la temperatura (se conoce como calidad de vapor), la presión y el flujo de vapor requerido, más la estabilidad de las variables mencionadas. En la implementación del OEE, la calidad debe considerar todos los factores que eleven la satisfacción del cliente.

En la entrevista (Xitamul, 2016), coordinador del proceso Producción de Vapor del ingenio Pantaleón, se define el factor disponibilidad de la caldera para el cálculo del OEE en función a la disposición de cada uno de los equipos que forman parte de la caldera y no como unidad en sí, partiendo de lo siguiente: la caldera puede estar en funcionamiento, pero si uno de sus componentes (ventilador, bomba de agua alimentación, etc.) no está disponible baja su capacidad. El criterio anterior será considerado para la presente investigación.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Falta de control del rendimiento total de la caldera, ya que no se cuenta con la métrica que relacione la disponibilidad de la caldera, respecto a su productividad y calidad de producto.

2.1. Descripción del problema

El ingenio Pantaleón forma parte de la industria azucarera guatemalteca, con una capacidad de molienda de 28000 toneladas de caña diaria.

El ingenio cuenta con dos líneas de molienda, su propia refinería de azúcar, planta termoeléctrica y destilería.

Los productos que se comercializan son: azúcar refino, azúcar blanco, azúcar moreno, azúcar crudo, miel final (melaza), alcohol neutro, alcohol carburante y energía eléctrica.

La falta de control del rendimiento total de la caldera tiene como consecuencia la baja gestión de la productividad, esto deriva en que falta claridad sobre la eficiencia de uso de los recursos y la satisfacción de los clientes con el cumplimiento de requerimientos del vapor acondicionado.

2.2. Delimitación

El trabajo de investigación se realizará en el proceso de producción de vapor en un ingenio azucarero.

El período de ejecución de la investigación será desde el mes de febrero a octubre de 2016.

2.3. Formulación de preguntas

Pregunta central

¿Cómo mejorar la productividad de una caldera en la industria azucarera utilizando el OEE (indicador de eficiencia global de equipos)?

Preguntas auxiliares

1. ¿Qué disponibilidad de información se tiene sobre la capacidad de diseño de la caldera?
2. ¿Cómo realizar la recolección de datos e información necesaria para la medición del OEE de la caldera?
3. ¿Qué herramienta utilizar para el cálculo del OEE de la caldera?
4. ¿Qué herramientas utilizar para el análisis de resultados del OEE, el comportamiento de las variables de proceso e indicadores de desempeño de la Caldera?
5. ¿Cómo evaluar la viabilidad de las propuestas para mejorar la productividad de la caldera?

2.4. Viabilidad de la investigación

El ingenio azucarero autoriza la ejecución del presente trabajo de investigación, proporcionando los recursos físicos y humanos, así como la documentación necesaria para realizar el estudio.

El financiamiento de los gastos y costos en los que se incurra para realizar la investigación serán aportados por el investigador.

2.5. Consecuencias de la implementación de la investigación

De no realizarse:

- Se continuará con el desconocimiento del rendimiento total de la caldera lo que no permite realizar la gestión necesaria para la mejora de la productividad de la misma.
- No habrá proceso de mejora continua, ya que las acciones que se tomen para mejorar no estarán sustentadas, por medio de un sistema que indique las desviaciones y sus causas.

De realizarse:

- Bajo la premisa que “lo que no se mide no se mejora”, implementar el OEE ayudara a dar visibilidad a las desviaciones respecto de una línea base de la operación de una caldera, a conocer las causas y por lo tanto, buscar la forma de eliminarlas, lo que se traduce en la mejora de la productividad de la caldera.
- La mejora de la productividad de la caldera contribuye de forma significativa en el alcance de los indicadores de gestión de la empresa.

3. JUSTIFICACIÓN

La línea de la investigación con la que se relaciona el presente estudio es la productividad, porque se busca mejorar la eficiencia, calidad del producto y disponibilidad de una caldera por medio de la implementación del indicador de desempeño OEE (Eficiencia Global de Equipos).

La principal necesidad a cubrir en el aspecto laboral con el estudio de investigación es la falta de control del rendimiento total de la caldera, ya que no se cuenta con la métrica que relacione la disponibilidad de la caldera respecto a su productividad y calidad de producto.

El trabajo de investigación es de suma importancia porque sirve para mejorar el rendimiento total de la operación de una caldera en un ingenio azucarero, esto considera la eficiencia de operación, la disponibilidad del equipo y la calidad del producto impactando de forma directa en la productividad del proceso de calderas y contribuyendo al alcance de resultados de la organización en las líneas de producción de azúcar, sus derivados y energía eléctrica.

La eficiencia de operación de la caldera se refiere al uso de los recursos, con énfasis en el combustible. En la industria azucarera la idea es optimizar el aprovechamiento de la energía contenida en el bagazo de caña para generar energía térmica a un costo menor.

La disponibilidad de la Caldera se debe maximizar, debido a que todos los equipos de la planta tienen implícita una inversión y un propósito de la misma. Por lo tanto, deben estar operando cuando se les requiere.

La calidad del producto de una caldera se refiere al cumplimiento con las especificaciones del vapor (flujo, presión y temperatura) acordadas con el cliente enmarcado por el diseño del equipo. Tiene relación directa con la satisfacción del cliente interno y externo (cumplimiento de contrato de venta de energía eléctrica).

La motivación del investigador para realizar el presente trabajo de investigación es el deseo de aportar a la industria azucarera una metodología que permita medir el rendimiento de operación de una caldera, determinar las desviaciones principales respecto de una línea base y generar propuestas viables para la mejora continua del proceso de producción de vapor.

Con la implementación del trabajo de investigación se espera beneficiar a los siguientes relacionados en el negocio, por las razones a continuación:

- Contribuye con el alcance de indicadores de gestión, lo que beneficia a los dueños e inversionistas del proyecto.
- El nivel de riesgo de accidentes disminuye, impactando directamente en el bienestar de los colaboradores y sus familias.
- La mejora en la operación de la caldera en términos de eficiencia facilita el cumplimiento de los indicadores de cuidado del medio ambiente, por lo tanto impacta de forma positiva con nuestro ecosistema.
- El control y mejora del OEE de la caldera impacta de forma positiva en la satisfacción de los clientes internos y externos al cumplir con las especificaciones del producto.
- Mejora la rentabilidad de la empresa por medio de la optimización en el uso de los recursos y disminución de pérdidas, lo que da mayor solidez y estabilidad a la corporación, a sus empleados y a las relaciones comerciales con proveedores.

El aprovechamiento de los recursos naturales para generar energía debe ser de forma sostenible, con esto se satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la satisfacción de las necesidades de generaciones futuras.

4. OBJETIVOS

4.1. General

- Diseñar un modelo de implementación del indicador OEE (eficiencia global de equipos) para mejorar la productividad de una caldera en un ingenio azucarero.

4.2. Específicos

- Definir la capacidad instalada de la caldera, de acuerdo a su diseño para contar con la línea base o referencia.
- Diseñar el sistema de captura de información de operación de la caldera, para el control de desempeño de la caldera.
- Calcular el indicador de eficiencia global de equipos OEE.
- Diseñar la metodología del análisis de resultados del OEE y causas de ineficiencias o incumplimientos de variables de proceso e indicadores de desempeño de la caldera.
- Evaluar propuestas para mejorar la productividad de una caldera en la industria azucarera.

5. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

La principal necesidad a cubrir en el aspecto laboral con el estudio de investigación es la falta de control del rendimiento total de la caldera, ya que no se cuenta con la métrica que relacione la disponibilidad de la caldera respecto a su productividad y calidad de producto.

A continuación se describe la forma o el esquema de solución del trabajo de investigación y consiste en lo siguiente:

- Determinar línea base o referencia con la información de diseño de la caldera y criterios de operación relacionados a la expectativa de resultados del proceso.
- Registro del comportamiento de las variables de proceso involucradas en el estudio por medio de un seguimiento en línea durante el periodo de zafra.
- Cálculo y análisis de resultados del indicador de la eficiencia global de equipos OEE.
- Analizar desviaciones en el comportamiento de los factores relacionados al cálculo del OEE y sus respectivas causas.
- Posteriormente realizar la evaluación de propuestas viables para reducir y/o eliminar las desviaciones del OEE.

El estudio de investigación pretende mejorar la productividad de operación de una caldera, por medio de la implementación del indicador OEE con el acompañamiento del análisis de las desviaciones del mismo y de donde se originan. La implementación del OEE en el proceso de producción de vapor requiere creatividad, criterio y flexibilidad para definir cada uno de los factores que intervienen en el cálculo del OEE.

El trabajo de investigación tiene validez técnica porque se busca mejorar la eficiencia, calidad del producto y disponibilidad de una caldera, por medio de la implementación del indicador de desempeño OEE (Eficiencia Global de Equipos).

6. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

6.1. Industria del azúcar

6.1.1. Introducción

Historia de la industria del azúcar de Guatemala:

En la obra *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala*, (CENGICAÑA, 2012, p. viii) indica que en 1536 se inicia el cultivo de la caña de azúcar en Guatemala y con ello se promueve la aparición de los primeros trapiches para extraer el azúcar presente en la caña para su consumo y comercialización.

En el artículo electrónico *nuestra historia* (ASAZGUA, 2012), marca que en 1587 prácticamente se inicia con la administración en la comercialización de azúcar, puesto que por el número de trapiches presentes en el valle de Guatemala, el ayuntamiento decide certificar al gremio como “hacedores de azúcar” y establecer el puesto de vendedor de trapiches, entidad que tendría a su cargo el control del precio del azúcar, requisitos del azúcar (tamaño del cristal) y establecimiento del valor de los jornales.

El concepto de la palabra ingenio aparece en el siglo XIX, comprendía toda el área donde se encontraban las instalaciones de la fábrica, servicios, maquinaria y de vivienda, además incluía a los esclavos y animales que se dedicaban a la fabricación de azúcar. Hoy en día esto se conceptualiza como finca y/o hacienda de un ingenio azucarero.

Ahora bien, en la actualidad el concepto de ingenio se refiere básicamente al complejo industrial que comprende desde la recepción de la caña, el proceso de fabricación de azúcar, derivados y energía, además de procesos administrativos y de apoyo situados en el mismo complejo.

En el transcurso del tiempo, del siglo XVIII hacia la actualidad, el sector productivo de azúcar ha evolucionado de fincas y trapiches de fabricación de azúcar hacia la industria del azúcar. El número de unidades productoras ha descendido considerablemente, anteriormente se podía encontrar más de una decena de trapiches en una misma población según el artículo electrónico nuestra historia (ASAZGUA, 2012) y sólo algunas han logrado trascender y continuar operando todavía en el siglo XXI.

El artículo electrónico nuestra historia (ASAZGUA, 2012) relata que para mediados del siglo XX la industria azucarera se concentraba geográficamente en el "cordón cañero" en los departamentos de Escuintla (80,12 %), Suchitepéquez (14 %), Retalhuleu (3,44 %) y Guatemala (2,44 %). De los 11 ingenios, que existían los de mayor capacidad de producción eran: Pantaleón, Concepción, El Baúl, El Salto y Palo Gordo; los más pequeños eran San Antonio Tzululá, Mirandilla, Santa Cecilia, Santa Teresa, Mauricio y San Diego.

En la actualidad, de los ingenios mencionados anteriormente ya no operan los ingenios El Baúl, El Salto, Mirandilla, Santa Cecilia, Mauricio y San Diego. Sin embargo operan grandes ingenios como: La Unión, Magdalena, Trinidad, Santa Ana y Madre Tierra que conforman hoy el importante grupo productor de ingenios azucareros de Guatemala.

Situación actual de la industria del azúcar de Guatemala

En el artículo electrónico de Economía (ASAZGUA, 2012) afirma que la agroindustria azucarera guatemalteca es el sector económico que más divisas genera en nuestro país, representa el 31 % del valor total de la exportación agrícola guatemalteca y 15,36 % de las exportaciones totales del país. Durante el año 2013, el azúcar y la melaza produjeron un ingreso de US\$978,1 millones.

Guatemala y su industria del azúcar ha tomado un lugar importante en el mercado mundial, es una industria competitiva y dinámica, de la mano con la tecnología, con el cumplimiento de requisitos legales y certificaciones que abren la puerta para comercializar en otros países.

Tabla I. **Ingreso de divisas por exportación (miles de US\$)**

Año	2009	2010	2011	2012	2013
Ingreso Total de Divisas por Exportación	4,795,305	5,490,744	6,578,115	6,561,021	6,456,476
Principales Productos	1,855,565	2,087,566	2,493,456	2,519,914	2,502,130
Azúcar y Melaza	492,987	763,831	702,901	843,717	978,125
Banano	494,291	351,565	384,297	469,910	593,051
Café	589,245	705,477	1,164,000	955,915	713,560
Cardamomo	300,212	307,500	296,340	250,372	217,394
Centroamérica	1,212,780	1,991,856	2,440,258	2,447,121	2,146,790
Otros Productos	1,726,960	1,411,321	1,644,400	1,593,986	1,807,555

Fuente: Economía ASAZGUA. www.azucar.com.gt/economia3.html. Consulta: 8 de marzo de 2016

“La agroindustria azucarera guatemalteca, que representa alrededor del 3 % del PIB nacional, genera 425000 empleos directos e indirectos, 32000 corresponden a cortadores de caña”, artículo electrónico de economía (ASAZGUA, 2012).

Cogeneración de Energía Eléctrica

El artículo electrónico de economía (ASAZGUA, 2012), nos menciona que también hay un rubro importante en la economía guatemalteca relacionada con la producción de energía eléctrica en la industria del azúcar, y se debe al aprovechamiento del bagazo para la cogeneración, que representa el 25,0 % de energía eléctrica en época de zafra dentro del Sistema Nacional Interconectado –SNI- que equivale a 408 MW de potencia instalada.

La cogeneración es un espacio del negocio que ha crecido en los últimos años y es de mucho interés para los ingenios por el bajo costo que representa el combustible en época de zafra, el bagazo de caña.

Alcohol

En el artículo electrónico de economía (ASAZGUA, 2012) indica que en los últimos años Guatemala ha invertido en la industria del alcohol producido tomando como materia prima la miel final (sub producto del proceso de fabricación de azúcar) por medio del proceso de destilación. Esto ha puesto a Guatemala en la posición 1 de la región centroamericana. El proceso de fabricación de alcohol no reduce, ni sacrifica la producción de azúcar, puesto que la materia prima es un subproducto.

“En la actualidad cinco empresas en donde participan algunos ingenios realizan este proceso, alcanzando una producción de 269 millones de litros al

año. Este producto es exportado a Europa y Estados Unidos”, artículo electrónico de economía (ASAZGUA, 2012).

Breve descripción del ingenio de fabricación de azúcar donde se realizará el estudio

Empresa agroindustrial dedicada a procesar la caña para producir azúcar, energía, mieles y energía eléctrica.

El ingenio cuenta con dos líneas de molienda, su propia refinería de azúcar, planta termoeléctrica y destilería.

Los productos que se comercializan son: azúcar refino, azúcar blanco, azúcar moreno, azúcar crudo, miel final (melaza), alcohol neutro, alcohol carburante y energía eléctrica.

El ingenio se encuentra catalogado como el más competitivo de Guatemala en función a los resultados de los indicadores de gestión de desempeño, los cuales sirven como parámetros de comparación entre los ingenios guatemaltecos.

El ingenio tiene una capacidad instalada de molienda de caña de 28000 ton/día, producción de azúcar de 2900 ton/día, producción de alcohol de 525 m³/día y venta de energía de 60 MWh.

Para ser competitivos a nivel mundial se han implantado sistemas de gestión relacionados a calidad, inocuidad, seguridad industrial y cuidado del medio ambiente.

6.1.2. Caña de azúcar

La caña de azúcar es una planta gigante que se cultiva en regiones tropicales y semitropicales, por lo que se le denomina también como cañas nobles o nativas.

(Rein, 2012) explica que es un híbrido complejo de varias especies, por la introducción de variedades nacidas de semillas, pero todas pertenecen a la familia *Saccharum Officinarum*.

“En la actualidad, la mayor parte de las autoridades reconocen cuatro especies adicionales: *S. barberi*, *S. sinense*, *S. spontaneum*, *S. robustum*.” (Spencer & Mead, 1967, p. 13).

En (Spencer & Mead, 1967) se menciona también que la apariencia de la caña, en color, diámetro, tamaño, etc. Responde a las condiciones climáticas, del suelo, métodos de cultivo y de la selección local.

El período de cosecha de la caña de azúcar se denomina zafra y normalmente se realiza en los meses donde no hay presencia de lluvia por conveniencia en la misma operación de cosecha, transporte y fabricación de azúcar.

El objetivo de procesar la caña de azúcar es maximizar la recuperación del azúcar contenido en la planta, por medio del proceso de fabricación de azúcar. El nombre científico del azúcar es sacarosa que se compone de los azúcares glucosa y fructuosa.

Ahora bien, en los últimos años es de mucho interés la presencia o la cantidad de fibra presente en la caña, ya que es sinónimo de producción de energía por el poder calorífico del bagazo.

Composición de la caña

Tallos limpios: Sección de la caña donde se encuentra contenida la mayor cantidad de azúcar. (Rein, 2012) indica que el contenido de fibra en caña (tallos limpios) es de 10 a 18 % base caña y el contenido de sacarosa es de 8 a 17 % base caña.

Fibra: La cantidad de fibra en la caña varía en función al diámetro, longitud y al número de nudos presentes en la caña. Si es más delgada y larga mayor será la proporción de corteza de la caña, por lo tanto más fibra. En los nudos se concentra la fibra, por lo tanto a mayor número de nudos más fibra.

Hojas y cogollos: La cantidad de hojas y cogollos presentes en la caña depende del método de cosecha y factores climáticos. La presencia de hojas y cogollos baja la pureza de la caña e incrementa la fibra y la ceniza.

No sacarosas en la caña: El mayor contenido de no sacarosas se refiere a los azúcares reductores glucosa y fructuosa, se originan de la descomposición de la sacarosa. También se incluye la presencia de cenizas (contenidas principalmente en hojas y cogollos), polisacáridos y ácidos orgánicos.

(Rein, 2012) define los componentes de la caña de la siguiente forma:

- Jugo: solución acuosa de azúcares, material orgánico e inorgánico.
- Fibra: todo el material insoluble presente en la caña como tierra, cogollo, hoja, material extraño, entre otros.

La proporción de presencia de los componentes presentes en la caña llegando a la fábrica depende de un gran número de factores, entre ellos principalmente la variedad de la caña, la madurez, factores climáticos, métodos de cultivo, métodos de cosecha, el tiempo entre cosecha y molienda, entre otros.

6.1.3. Fabricación de azúcar

6.1.3.1. Proceso de extracción de jugo

El proceso de extracción de jugo se compone de dos subprocesos:

Preparación de caña: (Rein, 2012) señala que el objetivo de este proceso es desfibrar la caña rompiendo o abriendo las células que contienen el jugo para facilitar la extracción del mismo.

Las actividades del proceso inician desde la recepción de la caña, el volteo de la caña a las mesas de caña, la limpieza de la caña que puede ser con agua o en seco, el transporte de la caña por medio de conductores hacia la operación de molienda, el picado de la caña y el atrapamiento de piezas metálicas, por medio de un imán para evitar que se dañen los equipos de molienda. El producto de este proceso es la caña preparada.

Factores importantes en la operación para lograr la buena preparación de caña son:

- Nivel de caña en los conductores
- El flujo continuo de caña
- La velocidad de los conductores de caña
- La velocidad de giro del equipo de picado
- El buen estado de las picadoras, desfibradoras, troceadoras, entre otros.

El indicador de eficacia de este proceso es el índice de preparación de caña por medio del método de grado de rompimiento de celdas, que indica porcentualmente la cantidad de celdas rotas sobre la totalidad de celdas posibles de romper.

La adecuada preparación de caña “permite una alimentación de caña más pareja, aumentan la capacidad del tándem y logran mayor efectividad del agua de maceración, y el resultado de esto es un aumento en la extracción de sacarosa” (Spencer & Mead, 1967, p. 55).

Molienda de caña: (Rein, 2012) indica que el objetivo de la molienda de caña es lograr extraer la mayor cantidad de azúcar presente en la caña.

La extracción de jugo se logra por medio de pasar la caña por varios molinos colocados en serie, a éste juego de molinos en esa disposición se le llama tándem de molinos. Los molinos se componen de pares de mazas que exprimen la caña, y en la secuencia de molinos se va cerrando el área de paso para incrementar la extracción.

Para el transporte de la caña de un molino a otro se utilizan conductores inclinados que se denominan intermedios.

Para mejorar la extracción de jugo se aplica jugo de menor pureza a la caña en los intermedios antes de la entrada de cada molino a partir del molino 2 hasta el penúltimo molino, de tal forma que el jugo producto del molino 4 se aplica antes de la entrada al molino 3 (así bajo ese orden en cada molino), a ésta operación se le llama maceración. En el último molino se aplica agua con temperatura entre 60 a 80 °C , a ésta operación se le llama imbibición.

El jugo extraído en el tandem se filtra y se elimina el bagacillo por medio de los coladores de jugo, éste bagacillo se retorna al proceso de molienda.

Factores importantes en la operación para lograr buena extracción de sacarosa son:

- Preparación de la caña

- Uniformidad del flujo de caña hacia el molino 1
- Nivel de shutes de molinos
- Presión hidráulica ejercida sobre las mazas de molinos
- Flotación de las mazas de molinos
- Porcentaje de agua imbibición base fibra de caña (teórico 220 %)
- Estado de las mazas y peines limpiadores en los molinos

Los productos del proceso de extracción de jugo son el jugo diluido que se transfiere al proceso de tratamiento de jugo y el bagazo que sirve de combustible en las calderas.

Los indicadores de eficacia del proceso de extracción de jugo son: % de extracción de jugo, pol de bagazo y humedad del bagazo.

Sobre la influencia de la estructura de la caña sobre la extracción de sacarosa (Spencer & Mead, 1967, p. 70) indica que “ el porcentaje de fibra tiene un efecto notable sobre la extracción; cuanto mayor sea la cantidad de fibra, menor será la extracción, con la misma eficiencia de molienda”.

6.1.3.2. Proceso de tratamiento de jugo

(Rein, 2012) indica que el objetivo del proceso de tratamiento de jugo es la eliminación de impurezas del jugo.

El proceso inicia con la recepción del jugo proveniente del tándem de molinos, que (Spencer & Mead, 1967) lo caracteriza como ácido, turbio y de color verde oscuro.

Luego se aplica al jugo la lechada de cal (alcalización) para neutralizar la acidez y generar el fosfato de calcio, con esto se logra la formación de flocs

necesario para la separación de impurezas en operación posterior (en el jugo también se aplica ácido fosfórico, si los fosfatos que trae la caña no cumplen el requisito).

En función a la calidad de azúcar en producción se debe aplicar ácido sulfuroso (sulfitación), para reducir el color y la turbiedad del jugo Rein, 2012.

El jugo se calienta para superar la temperatura de ebullición, nominalmente 220 °F, se transfiere a los clarificadores de jugo, pero previamente pasa por los tanques flash para eliminar el aire presente en el jugo y procurar entregar el jugo bajo un flujo lo más cercano a lo laminar a los clarificadores, en los cuales se lleva a cabo la sedimentación con la ayuda de aplicación de floculantes, el jugo resultante a la salida de los clarificadores se le llama jugo claro.

El depósito formado en la parte inferior de los clarificadores de jugo se le llama cachaza y se recircula hacia el proceso de filtración de cachaza para su agotamiento y recuperar el azúcar presente en la misma, acá se obtiene el jugo filtrado que se transfiere a la estación de alcalización.

El jugo claro se transfiere a los coladores de bagacillo y se almacena en el tanque de jugo claro en condiciones para iniciar el proceso de la evaporación.

Factores importantes en la operación para la clarificación del jugo son:

- pH del jugo sulfitado
- pH de jugo alcalizado
- temperatura del jugo alcalizado después del calentamiento
- adecuada operación de los tanques flash

Los indicadores de eficacia de la clarificación de jugo son la transmitancia y turbidez del jugo claro.

6.1.3.3. Proceso de evaporación del jugo

(Rein, 2012) señala que el proceso de evaporación busca evaporar el agua presente en el jugo claro para alcanzar de 65 a 68 ° Brix en la meladura producto.

“El jugo clarificado, que posee casi la misma composición que el jugo crudo extraído (con la excepción de las impurezas precipitadas que fueron extraídas por el tratamiento con cal) contiene aproximadamente 85 % de agua” (Spencer & Mead, 1967, p. 45). Por lo tanto, se esta definiendo que en la evaporación se debe incrementar el % de solidos disueltos en el jugo de 15 a 65 por medio de la evaporación del agua presente en el jugo.

“La configuración de la estación de la evaporación determina la cantidad de vapor que la fábrica requiere, y por lo tanto el arreglo de los evaporadores es de gran importancia” (Rein, 2012, p. 313).

De lo anterior, se deduce que el diseño del multiple efecto en la evaporación es de los más eficientes en el uso del vapor, puesto que el vapor generado por ebullicion en un efecto sirve para el calentamiento a ebullición en el efecto posterior.

De acuerdo con (Spencer & Mead, 1967), el incremento de concentración del jugo en la evaporación de múltiple efecto es por la ebullición que se logra en cada efecto, los cuales estan colocados en serie, por lo tanto la temperatura necesaria para lograr la ebullición del jugo presente en el efecto posterior es

menor por estar el cuerpo sometido a una presión menor, de hecho en los últimos efectos están al vacío.

Factor clave para el buen desempeño de la evaporación es la limpieza de los evaporadores, una vez la superficie de transferencia de calor está incrustada la capacidad disminuye drásticamente.

El producto del proceso de evaporación es la meladura evaporada y el indicador de eficacia del proceso es la concentración de la meladura o el porcentaje de sólidos presentes en la misma.

6.1.3.4. Proceso de recuperación de azúcar

El objetivo del proceso es la formación y recuperación de cristales de azúcar presentes en las mieles.

La cristalización se lleva a cabo en los tachos, equipos que elevan la concentración de la sacarosa por encima de aquella correspondiente a una solución saturada.

(Spencer & Mead, 1967) explica que el proceso consiste en concentrar la miel hasta quedar saturada de azúcar, para ello ya tiene que haber introducido semilla (magma, grano mejorado, etc.) para que sirvan de núcleo a los cristales de azúcar presentes en la miel, y a medida que se va concentrando por evaporación del agua se continúa alimentando de miel hasta conseguir las condiciones de grano o cristal deseadas. Para lograr las características del cristal deseadas existen diferentes métodos de operación, donde lo más común es escuchar que se realiza por fases, en donde cada una de ellas va contribuyendo a alcanzar el tamaño de cristal y condiciones de masa requerida.

La masa se almacena en recipientes donde todavía hay formación de cristales por enfriamiento, algunos diseños de cristalizadores tienen enfriamiento forzado por medio de sistemas de enfriamiento con agua.

El grano se encuentra presente en la masa, pero debe separarse la miel y esto se realiza por medio de la operación de centrifugado. El producto de la operación es el azúcar y miel por separado, listos para su disposición.

Si el azúcar es comercial se transporta hacia la secadora para eliminar humedad y luego hacia la estación de envasado, sino servirá de grano núcleo para la preparación de otra templa en el sistema de masas.

Si la miel es la del último agotamiento o miel final, entonces se clasifica como un sub producto para comercializar como materia prima a otros procesos (por ejemplo destilerías), sino servirá de miel proveedora de grano a desarrollar en una templa del sistema de masas.

6.1.4. Cogeneración

Actualmente los ingenios azucareros son autosuficientes desde la perspectiva de uso de la energía eléctrica, puesto que producen lo que consumen y un excedente se logra vender al sistema nacional de energía por medio de previa negociación en el periodo de zafra.

Ésta operación se lleva a cabo por medio de equipos de generación eléctrica constituidos por un generador y una turbina accionada por vapor de agua.

La turbina accionada por vapor de agua donde se convierte la energía térmica en energía mecánica cuenta con extracciones intermedias o bien con

salida de vapor residual llamado vapor de escape. La turbina le transmite el movimiento rotativo al generador para producir energía eléctrica.

El vapor de escape que entrega la turbina se utiliza en el proceso de fabricación de azúcar para transferir el calor del mismo hacia los materiales en proceso para evaporación de agua principalmente.

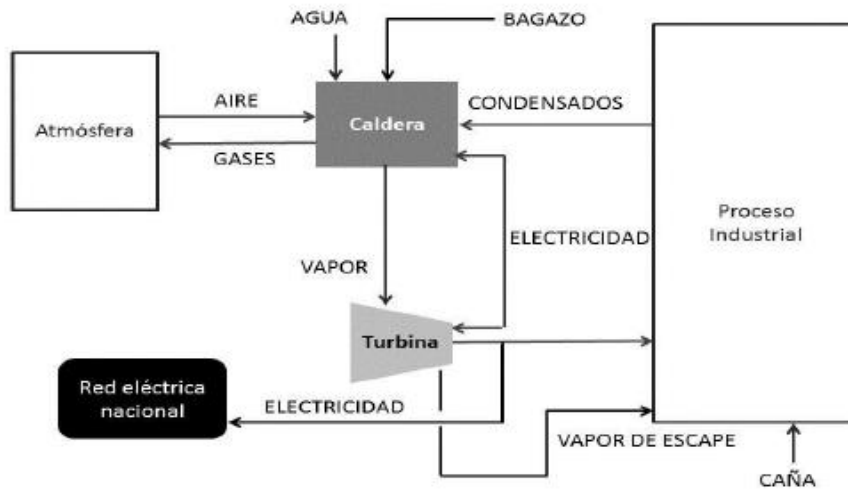
En conjunto, a la obtención de energía eléctrica y energía térmica útil de forma simultánea se le conoce como cogeneración.

En condiciones ideales de operación de suministro de vapor de admisión a la turbina, la carga del turbo generador de escape dependerá de la demanda de vapor del proceso de fabricación de azúcar. “Las presiones de generación y temperaturas del vapor se han incrementado para permitir cogenerar mas energía” (Rein, 2012, p. 709). El enunciado anterior es de acuerdo a que la eficiencia del proceso de generación de vapor y energía eléctrica es mas elevada cuando se alcanzan mayores presiones y temperaturas de trabajo.

6.1.4.1. Proceso de producción de vapor

Acertadamente Muñoz (2015) indica que en un ingenio azucarero el objetivo del proceso de producción de vapor es satisfacer la demanda de vapor del proceso de fabricación de azúcar, además se considera que debe cumplir con las características del vapor requeridas por el proceso de cogeneración y generación de energía eléctrica.

Figura 1. **Típico proceso de generación de energía en un ingenio**



Fuente: MUÑOZ, Mario. Guía para determinar y reducir pérdidas de energía en generadores de vapor. p. 3

El proceso de producción de vapor consiste en lo siguiente: se produce vapor de agua en calderas generalmente acuotubulares a presión entre 200 a 1000 psi, el combustible es el bagazo de la caña (subproducto del proceso de extracción de jugo) que es transportado por medio de conductores de duela o banda desde el último molino del tándem y es alimentado a las calderas a un ritmo determinado por la demanda de vapor de la fábrica, el excedente de bagazo se almacena o bien se invierte en generar energía eléctrica utilizando turbogeneradores de condensación.

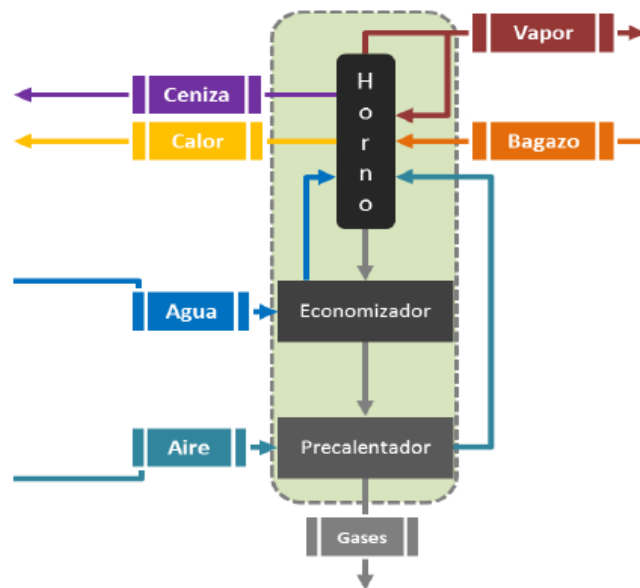
El agua de alimentación de la caldera proviene del proceso de fabricación de azúcar que se genera en el proceso de evaporación cuando la energía en forma de calor se transfiere del vapor de escape al material en proceso (jugo de caña), éste material sigue su curso con un incremento de concentración y el vapor que ha entregado su energía se condensa y se retorna a calderas, básicamente este procedimiento utiliza únicamente los condensados de los dos

primeros efectos de la evaporación porque el riesgo de contaminación con jugo de caña es menor.

El vapor generado por la caldera se transporta hacia las turbinas de los generadores por medio de tubería, donde se mide la temperatura y se acondiciona por medio de aplicación de agua de forma atomizada si es necesario, a ésta operación se le llama atemperación del vapor, teniendo como producto el vapor acondicionado.

Operación de la caldera.

Figura 2. **Producción de vapor en un generador acuotubular**



Fuente: MUÑOZ, Mario. Guía para determinar y reducir perdidas de energía en generadores de vapor. p. 7

Dentro de la caldera ocurre lo siguiente:

En el hogar de la caldera ocurre la combustión por la presencia de material combustible (bagazo) y oxígeno bajo condiciones de temperatura

requerida para la reacción. Se lleva control de presión y temperatura del hogar, además de busca una mezcla homogénea entre bagazo y oxígeno por medio de aplicación de aire sobre fuego, así como lograr que la combustión se lleve a cabo en suspensión. La transferencia de calor se da por radiación hacia los tubos del hogar y elementos del sobre calentador. Se hacen mediciones del gas de combustión que permiten conocer el balance entre combustible y oxígeno, y tener base para realizar modificaciones en las curvas de operación. La cantidad de aire suministrada por medio de los ventiladores forzados responde a la curva de operación de la caldera y el aire es calentado antes de llegar al hogar por eficiencia.

El gas de combustión generado en el hogar se desplaza por la ruta de diseño de la caldera debido al tiro inducido transfiriendo el calor a los tubos o bancos de convección, precalentador y economizador por medio de la convección. Se mide la temperatura del gas de combustión en diferentes puntos del recorrido desde el hogar hasta la chimenea para conocer la cantidad de calor entregado en puntos de interés. Cierta cantidad de ceniza e inquemados se van quedando en la ruta en secciones de la caldera llamado ceniceros y luego ser removidos por medio de corrientes de agua.

El gas de combustión antes de ser entregado a la atmósfera, se efectúa una limpieza procurando precipitar la mayor cantidad de partículas sólidas presentes y reducir la contaminación a valores aceptados por entidades del cuidado del medio ambiente.

El vapor generado por la ebullición del agua es saturado húmedo presente en el domo superior, luego se hace circular por el sobre calentador para incrementar su temperatura para llevarlo a vapor seco libre de humedad.

La reposición del agua en la caldera es inyectada por medio de bombas de agua alimentación y es en función a mantener un nivel de operación adecuado en el domo superior, la reposición de agua es continua y es calentada antes de ser inyectada al domo superior de la caldera.

La alimentación de bagazo a la caldera es por medio de alimentadores de bagazo capaces de variar su velocidad de rotación en función a la cantidad de bagazo necesaria para mantener satisfecha la demanda de vapor que se ejerce sobre la caldera.

6.1.4.2. El bagazo y su aprovechamiento como combustible

Muñoz (2015, p. 22) define que “el bagazo de caña es un subproducto proveniente del proceso de la molienda de la misma. Es un compuesto orgánico fibroso con alto contenido de agua y un considerable poder calorífico”.

Ademas (Spencer & Mead, 1967) señala que el bagazo se compone aproximadamente de 50 % fibra, y el restante 50 % de agua y solidos solubles y que las proporciones de estos componenetes son en función a la eficiencia de la molienda y variedad de la caña.

Actualmente se dispone del bagazo de caña como combustible de las calderas de un ingenio azucarero, con ello se asegura la generacion de energia eléctrica y térmica (cogeneración) a utilizar en los procesos de fabricación de azúcar.

En el balance relacionado a la producción y consumo de bagazo nos da un excedente del mismo, lo que se aprovecha para generar energía eléctrica

con turbos de condensación (independientes a la demanda de vapor del proceso azucarero), por lo tanto la carga de los turbos estará en función de la disponibilidad de bagazo.

Ademas, se almacena bagazo en forma de pacas comprimidas para las pruebas de vapor del siguiente período como preparativos para zafra inmediata y el arranque de la misma.

Datos técnicos relacionados al bagazo:

Poder calorífico del bagazo:	8200 – 8400 Btu/libra
Fibra seca base caña:	12 – 14 %
Peso medio del bagazo apilado:	12,5 libras/pie cúbico
Peso medio del bagazo suelto:	7,5 libras/pie cúbico

Tabla II. **Composición promedio del bagazo de caña**

FÍSICA		QUÍMICA	
Celulosa	25 - 40 %	Carbono	23 %
Hemicelulos	10 - 25 %	Hidrógeno	3 %
Lignina	15 - 30 %	Oxígeno	22 %
Pol	2,5 %	Cenizas	2 %
Agua	50 %	H ₂ O	50 %

Fuente: MUÑOZ, Mario. Guía para determinar y reducir perdidas de energía en generadores de vapor. p. 23

“La cantidad de vapor generada a partir de bagazo depende de la eficiencia de la caldera, de la presión a la cual se genere el vapor y del valor calorífico del bagazo (determinado por el contenido de humedad y ceniza” (Rein, 2012, p. 767).

En (Rein, 2012) y (Spencer & Mead, 1967) se mencionan que el valor del poder calorifico del bagazo de caña en todo el mundo es uniforme, no varía

demasiado; por lo que se puede deducir que no depende de las condiciones climáticas ni la variedad de caña, sino es una característica intrínseca del bagazo.

Muñoz (2015) menciona la humedad como desventaja del bagazo como biocombustible, y ciertamente lo es; pero desde la perspectiva que es un subproducto de el proceso de extracción de jugo, “que no tiene costo de compra”, para la industria azucarera es una ventaja del negocio poder utilizar como combustible lo que antes se desechaba. Esto no exime de buscar las alternativas en el proceso de extracción de jugo y producción de vapor para reducir la humedad y aprovechar mejor la energía contenida en el bagazo de caña.

6.2. Caldera

La caldera es un equipo diseñado para generar vapor de agua por medio del calentamiento de la misma hasta llegar al punto de ebullición dentro de un recipiente cerrado. Dicho calentamiento se da por la transferencia de calor desde un gas resultante de la combustión del bagazo (caso de ingenio azucarero) hacia el agua por medio de superficies de transferencia (normalmente paredes de tubos). El vapor generado responde a ciertas condiciones de presión y temperatura para lo cual la caldera fue diseñada por (Kohan, 2000).

6.2.1. Clasificación de calderas

Las calderas se clasifican en función a la posición relativa del gas de combustión y el agua, respecto de la posición de los tubos, respecto de la forma de los tubos y por la naturaleza de servicio que prestan.

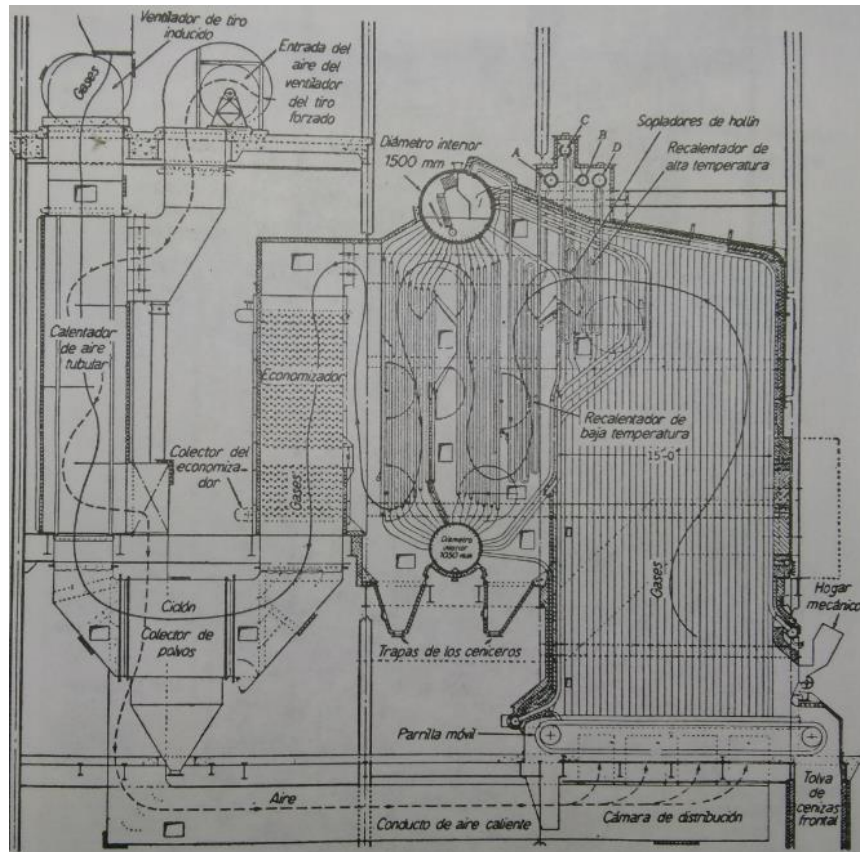
En esta ocasión se atenderá únicamente las de la posición relativa del gas de combustión y el agua que se clasifican en acuotubulares (tubos de agua) y pirotubulares (tubos de humo) como lo define (Severns, Degler, & Miles, 1992).

“Las calderas de tubos de humos generalmente son utilizadas para capacidades hasta 22000 kg por hora y presión de 21 kg/cm². Por encima de ésta capacidad y presión, se usan las calderas de tubos de agua” (Kohan, 2000, p.17).

Caldera acuotubular.

En la caldera acuotubular el agua a calentar y el vapor circulan internamente en los tubos que están expuestos a las llamas y el gas de combustión circula y tiene contacto por la parte externa de los tubos mencionados. Normalmente estas calderas son de mayor capacidad y las encontramos en procesos donde se requiere presiones, temperaturas, flujos de vapor elevados y alto rendimiento como por ejemplo en fábricas de procesos de alimentos donde el consumo de vapor es alto, generadores de energía eléctrica.

Figura 3. **Caldera de dos cuerpos cilíndricos, tipo Springfield**

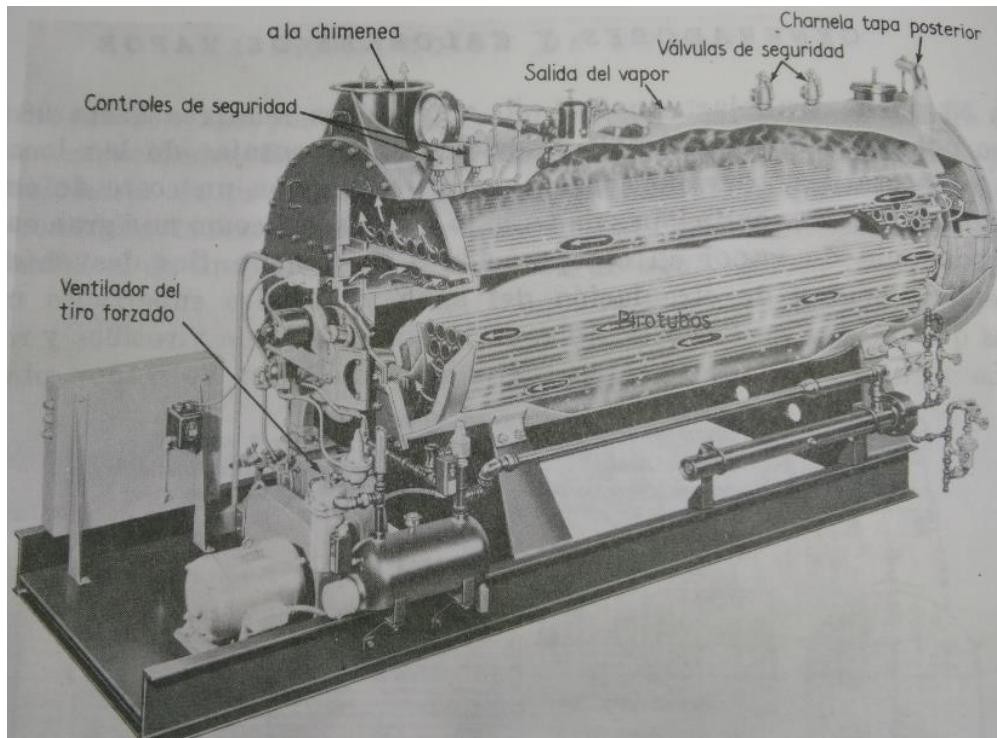


Fuente: SEVERNS, W.H.; DEGLER, H.E.; MILES, J.C. La producción de energía mediante el vapor de agua, el aire y los gases. p. 133

Caldera piro tubular.

En la caldera piro tubular el agua a calentar se encuentra en la parte externa de los tubos y el gas de combustión circula por la parte interna. Generalmente estas calderas son de baja presión de trabajo y se utilizan en procesos de calefacción o para generar energía eléctrica únicamente para consumo interno, donde no se someten a mayores esfuerzos los componentes de la caldera.

Figura 4. **Caldera Cleaver-Brooks, de cuatro pasos, pirotubular**



Fuente: SEVERNS, W.H.; DEGLER, H.E.; MILES, J.C. La producción de energía mediante el vapor de agua, el aire y los gases. p. 130

6.2.2. Componentes y equipos auxiliares de una caldera

Domo superior.

Cilindro colocado en posición horizontal presurizado internamente donde se produce la separación del vapor de agua, y también se inyecta el agua de alimentación de la caldera y los productos químicos para el tratamiento del agua. Internamente cuenta con un separador de agua que no permite que se transporte agua dentro del vapor generado y un tubo de distribución longitudinal

de los químicos. Externamente cuenta con accesorios a mencionar: nivel físico de la caldera, válvulas de purga continua que sirven para regular la conductividad eliminando sólidos en suspensión.

Domo inferior.

Cilindro colocado en posición horizontal en la parte inferior de la caldera, conectado al domo superior por medio de los tubos del banco de convección, entre ambos domos circula el agua durante el proceso de evaporación. En el domo superior están colocadas las válvulas de purga de fondo que sirven para eliminar todos los lodos formados por el tratamiento químico.

En el domo superior se encuentran colocadas las válvulas de seguridad que permiten liberar vapor para reducir la presión interna del domo cuando supera la presión de trabajo.

Hogar / Horno de la caldera.

Lugar de la caldera donde se lleva a cabo la reacción química de la combustión del combustible alimentado. Internamente tiene una parrilla donde se depositan las cenizas puede ser móvil o estacionaria, esta parrilla permite el paso del aire necesario para la combustión.

Pre calentador de aire.

Intercambiador de calor colocado internamente de la caldera que aprovecha el calor residual contenido en los gases de combustión, para elevar la temperatura del aire entrando a la caldera que suministra el oxígeno necesario para la combustión con el propósito de mejorar la eficiencia de combustión de la caldera.

Economizador.

Intercambiador de calor colocado internamente de la caldera que aprovecha el calor residual contenido en los gases de combustión , para elevar la temperatura del agua entrando a la caldera para llevarlo más cerca del punto de ebullición, esto contribuye a mejorar la producción de vapor de la caldera.

Ventilador de tiro forzado.

Ventilador que toma el aire del ambiente y lo inyecta a la caldera. Dependiendo de la cantidad de bagazo alimentado puede variar la velocidad angular o maniobrar un dámper que permite el paso de aire, en función a la curva de operación aire-combustible.

Ventilador over fire.

Ventilador que inyecta aire al hogar de la caldera (desde cierta altura respecto del nivel de parrilla) con la intención de lograr una mezcla más homogénea entre aire-combustible para mejorar la eficiencia de combustión.

Ventilador de tiro inducido.

Ventilador que induce cierta presión negativa en el hogar, con ello logra desplazar los gases de combustión por toda la ruta diseñada de desplazamiento del gas desde el hogar hasta la chimenea, entregando el calor en el banco de convección e intercambiadores de la caldera.

Equipos limpiadores del gas de combustión.

Sección de la caldera que separa las partículas sólidas presentes en los gases de combustión para evitar que salgan a la atmósfera por la chimenea generando contaminación al ambiente. Pueden ser separadores ciclónicos húmedos o separadores electrostáticos secos.

Bombas de agua alimentación.

Bombas centrifugas normalmente de multietapas que se encargan de inyectar el agua de alimentación de la caldera al domo superior. La condición de operación es que sean capaces de levantar mayor presión en el fluido que la presión interna del domo para ser capaces de inyectar el agua, por lo menos con un diferencial de 100 psi para garantizar la operación.

Sopladores de hollín.

Accesorio de la caldera que sirve para efectuar limpieza en la superficie exterior de los tubos de convección y sobrecalentador utilizando inyección de vapor direccionado con toberas el flujo del mismo para garantizar la limpieza.

6.2.3. Eficiencia de la caldera

En (Severns, Degler, & Miles, 1992) se indica que el rendimiento global de una caldera de vapor es la relación entre la energía entregada por la caldera en forma de vapor y la energía suministrada a la caldera en forma de combustible, es decir:

$$\mathcal{E} = m_s (h - h_f) / (m_f \times F)$$

\mathcal{E} : eficiencia o rendimiento global de la caldera

m_s : peso del vapor producido por la caldera en kg/hora

h : entalpia de 1 kg de vapor a la presión y temperatura observados en kcal/kg

h_f : entalpia de 1 kg de agua en condiciones de entrada a la caldera en kcal/kg

m_f : peso total de combustible quemado por hora en kg/hora

F : potencia calorífica superior del combustible quemado en kcal/kg

(Kohan, 2000) resume lo anterior como el cálculo de rendimiento o eficiencia por el método directo donde relaciona la energía saliente por unidad de energía entrante por cien.

También un indicador muy relacionado a la eficiencia calculada por el método descrito anteriormente es la relación entre flujo másico de vapor producido y flujo másico de bagazo de consumo en la caldera, a este indicador le llamamos producción relativa de la caldera.

El cálculo requiere tener la medición confiable del consumo de bagazo por unidad de tiempo y el vapor producido por hora de la caldera.

6.2.4. Combustión

Muñoz (2015) señala que la combustión es un proceso de oxidación en donde los elementos combustibles carbono, hidrógeno y azufre se combina con el oxígeno bajo condiciones de temperatura de ignición requerida, como también lo indica Kohan (2000).

“La combustión también se entiende como la energía química contenida en combustibles tales como carbón, petróleo, madera, bagazo, etc., en calor a través de un proceso de oxidación” (Muñoz, 2015, p. 11).

Según (Severns, Degler, & Miles, 1992) la combustión es completa cuando se quema por completo cada unidad de combustible presente en la mezcla oxígeno-combustible, el producto en el gas de combustión es el CO₂. Sino se cumple lo anterior es que la combustión es incompleta y se da esto por tres razones: a) Deficit de oxígeno en la mezcla con el combustible, b) mezcla no homogénea entre el combustible y el oxígeno, y c) baja temperatura en la

ignición, lo que no garantiza la continuidad de la combustión. En los tres casos, el producto que se genera en el gas de combustión es el CO.

Bajo los principios anteriores, la combustión eficiente dentro de la caldera consiste en proporcionar la cantidad de oxígeno necesario para garantizar que se quema todo el combustible, únicamente se debe tener cuidado de no excederse porque baja la eficiencia de la caldera porque calentamos una buena cantidad de nitrógeno presente en el aire que entra a la caldera (79 % en volumen) y no tiene ningún beneficio.

Luego se debe garantizar la mezcla homogénea entre oxígeno y combustible por medio de la adecuada operación de los ventiladores forzados y sobre fuegos y la buena distribución del aire dentro de la caldera, además de cuidar la calidad del combustible alimentado, principalmente la humedad. Además se debe evitar la entrada de aire al hogar fuera de control (aire frío).

6.2.5. Transferencia de calor en una caldera

La transferencia de calor en una caldera se presenta mediante los mecanismos de conducción, convección y radiación. A continuación se presenta el concepto de forma breve de estos mecanismos de transferencia de calor:

Transferencia de calor por conducción.

Se da por la diferencia de temperatura entre dos puntos, lo que promueve que exista flujo de calor del punto de mayor temperatura hacia el punto de menor temperatura según (Holman, 1998).

Transferencia de calor por convección.

Se relaciona con la transferencia de calor por conducción, pero considera una condición extra en el sistema y es la velocidad del fluido que gana calor (el punto de menor temperatura). Según (Holman, 1998) el gradiente de temperatura es proporcional a la rapidez con que el fluido de enfriamiento se lleva el calor.

Transferencia de calor por radiación.

(Kern, 1999) da énfasis a la diferencia y contraposición con los dos mecanismos anteriores de transferencia de calor, porque la transferencia de calor por radiación no necesita vehículo o medio de transporte de la energía en forma de calor sino que se efectúa en el vacío presente entre los dos puntos por donde fluye la energía.

En la caldera la transferencia de calor por conducción y convección se da utilizando la pared del tubo como vehículo para transferir la energía presente en el gas de combustión hacia que circula por fuera del tubo al agua que circula por dentro del tubo. La transferencia de calor por radiación se da por la exposición de los tubos a las llamas generadas por la combustión dentro del hogar de la caldera.

6.2.6. Vapor de agua

El vapor es un vehículo para transferir calor de forma muy eficiente y fácil de controlar. El nivel de energía transportada responde a la presión, temperatura y flujo del vapor.

(Severns, Degler & Miles, 1992) indica que cuando se transfiere calor al agua desde una fuente de energía su temperatura aumenta y varía su entalpía

y estado físico. El agua tiende a reducir su densidad y cambia de estado líquido a gaseoso.

Según el diagrama de Mollier para una presión absoluta dada corresponde una temperatura de ebullición del agua y se genera el vapor saturado que puede tener presencia de agua que no ha sido evaporada, por lo tanto, el vapor saturado puede ser húmedo o seco.

El vapor saturado seco o sobrecalentado se produce cuando se logra alcanzar temperaturas mayores en el vapor de agua que la temperatura de ebullición a una presión dada, según (Howell & Buckius, 1990) en su obra.

“En la producción de vapor de agua saturado la absorción de energía (calor) por cada kilogramo de agua tiene lugar en dos etapas: (1) adición de la entalpía del líquido, h_f , y (2) adición de la entalpía de vaporización, h_{fg} ” (Severns, Degler, & Miles, 1992, p.72).

En las dos etapas mencionadas por Severns, el calor necesario para llevar el agua de 0 °C a su punto de ebullición a una presión dada es el calor de líquido saturado y luego llevarlo a vapor bajo las mismas condiciones de presión y temperatura es el calor latente.

6.3. Productividad

Productividad es la relación razonable y eficaz entre entradas y salidas de un proceso, por lo tanto, “Productividad es el grado de rendimiento con que se emplean los recursos disponibles para alcanzar objetivos predeterminados” (García Criollo, 2005, p. 9).

Luego de analizar la definición anterior, es evidente que se relaciona la eficiencia y la eficacia cuando hace referencia al uso de recursos pero logrando los objetivos.

La eficacia de un proceso está ligada al alcance de resultados, incluyendo la calidad de los productos y/o servicios, por lo tanto, se puede decir que la productividad es la administración de los recursos de la empresa en busca de la calidad de sus productos.

En función de la definición de productividad se puede incrementar:

- Incrementando las salidas y constante las entradas
- Constante las salidas y reduciendo las entradas
- Variando salidas y entradas a diferente proporción incrementando la relación.

6.3.1. Factores de la productividad

La productividad la definen factores internos y externos como se muestra en (Business solutions consulting group, 2008), a continuación se listan algunos de ellos.

Factores internos: son aquellos que la empresa puede alterar en función a la mejora de la productividad: terrenos y edificios, materiales, energía, máquinas y equipo, recurso humano.

Factores externos: son aquellos que la empresa no tiene control sobre ellos: disponibilidad de materiales, mano de obra calificada, políticas estatales relativas a tributación y aranceles, infraestructura existente. La importancia del

conocimiento de los factores y su comportamiento es que la empresa puede reaccionar oportunamente para suavizar el impacto de las fluctuaciones de estos factores, además de maximizar el aprovechamiento de las condiciones favorables.

Los factores mencionados anteriormente pueden afectar la eficiencia como la eficacia, por lo tanto la productividad.

Un factor interno que no se menciona en los anteriores, son los métodos de trabajo, normalmente siempre tienen oportunidades de mejora, mejores formas de hacer las cosas que contribuya a incrementar la producción o bien a reducir costos.

Todo los factores que influyen en la productividad de una empresa están sujetos a ser modificados, es conveniente realizar diagnósticos del proceso por medio del análisis FODA que nos ayuden a dar visibilidad a la situación actual y realizar la toma de decisiones pertinente.

6.3.2. Medición de la productividad

La productividad está muy vinculada a la calidad del producto, el proceso y los insumos, por lo que García Criollo (2005, p. 10) indica que “la productividad no es una medida de la producción ni de la cantidad que se ha fabricado, sino de la eficiencia con que se han combinado y utilizado los recursos para lograr los resultados específicos deseables”. Lo que lleva a la siguiente relación para medir la productividad: $\text{resultados logrados} / \text{recursos empleados}$.

Ahora bien bajo otro punto de vista, la productividad se puede medir únicamente relacionando las unidades de producción (sin que necesariamente

se tome en cuenta la calidad) con los insumos necesarios para ese nivel de producción, por lo tanto ,la relación para medir la productividad queda: producción / insumos.

Es obvio que a la empresa le conviene que el resultado de las relaciones se maximice, y se obtiene incrementando el numerador o reduciendo el denominador.

6.3.2.1. Indicadores de la productividad

Los indicadores de productividad sirven para orientarnos sobre el desempeño de un proceso, nos dan una línea base y/o nos permiten conocer la situación actual. La única forma de incrementar la rentabilidad de una empresa o negocio es incrementando su productividad.

A continuación se dan a conocer algunos ejemplos de indicadores de productividad en diferentes procesos:

Producción

- Venta de energía = kwh vendidos / tonelada de caña. (kwh/TC)

La relación nos indica la cantidad de energía vendida utilizando como combustible el bagazo de la caña que molemos.

- Caña molida = Toneladas de caña / día

La relación nos indica la cantidad de caña que molemos por día.

- Rendimiento de la caña = kg de azúcar / tonelada de caña **(kg/TC)**

La relación nos indica la cantidad de azúcar que extraemos por tonelada de caña.

- Azúcar refino = Sacos de azúcar refino / hora

La relación nos indica la cantidad de azúcar conforme refino producida por hora.

Financiero

- Rotación de activos fijos = Ventas totales / Activo fijo

La relación nos indica la cantidad de unidades monetarias vendidas por cada unidad monetaria invertida en activos fijos (maquinaria, equipo industrial, inmuebles, etc.).

- Retorno sobre patrimonio = Utilidades / Patrimonio

La relación nos indica la rentabilidad de la empresa para generar utilidades con el uso de capital invertido en ella y el dinero que ha generado.

Salud ocupacional

- Reducción de condiciones inseguras = Condiciones inseguras eliminadas / Condiciones inseguras reportadas

La relación indica la efectividad con la que se reduce la posibilidad de ocurrencia de accidente por una condición insegura detectada.

Gestión ambiental

- Tasa de reciclaje = cantidad de residuos reciclados / cantidad de residuos totales

La relación indica la cantidad de residuos reciclados por unidad de residuo generado.

Logística

- Transporte de caña = toneladas de caña / unidad de transporte (ton/unidad)

La relación indica la cantidad de caña transportada por unidad de transporte.

Mantenimiento

- Eficiencia Global de Equipos = Disponibilidad x Eficiencia x Calidad

Éste indicador relaciona tres factores importantes de funcionamiento de un equipo y/o proceso, la disponibilidad (tiempos muertos), eficiencia (capacidad real) y calidad (producción de unidades defectuosas).

6.3.3. Mejora de la productividad

Mejorar la productividad es sinónimo de incrementar la rentabilidad, puesto que implica mejorar la relación entre producto conforme por unidad de insumo.

Para mejorar la productividad se debe incrementar producción y/o reducir costos de producción. Se mencionan los siguientes aspectos que pueden contribuir con ello:

- Evitando desperdicios
- Evitar el mal uso de materiales
- Reducción del tiempo de ocio
- Estudio de métodos para mejorar rendimiento del personal
- Reduciendo tiempos de paro
- Evitando el desgaste prematuro
- Uso de tecnología de mayor eficiencia en el proceso de operación y mantenimiento
- Uso de materiales de mayor rendimiento
- Aprovechar subproductos o desperdicios en el proceso
- Evitando rechazos y devoluciones en producto terminado
- Implementación de metodología LEAN, 5S's
- Metodología enfocada a seguridad industrial como por ejemplo la seguridad basada en comportamiento.
- Metodología de mejora continua de procesos
- Maximizar el uso de la capacidad instalada

6.4. Eficiencia global de equipos (OEE)

El OEE es un indicador de productividad de un proceso, operación, etc. muy completo por los factores que contiene para determinarlo. (OEE). Por sus siglas en inglés, Overall Equipment Efficiency, en español Eficiencia Global de Equipos.

El OEE es un indicador que ayuda a dar visibilidad a el mal uso del recurso, perdidas por producto defectuoso, baja disponibilidad del equipo por fallas, equipo sub utilizado, entre otros.

El OEE es un excelente indicador para evaluar los resultados cuando se aplica TPM (Mantenimiento Productivo Total) en una organización. (Sayer & Williams, 2007, p. 164) enuncian lo siguiente al respecto: “The aim of TPM is to maximize the Overall Equipment Efficiency (OEE) and minimize production losses due to equipment failure or malfunction. OEE is a performance metric tracked on the Balance Score Card, especially for manufacturing organizations”.

6.4.1. Ventajas del OEE

El OEE tiene las siguientes bondades:

- Muestra el grado de disponibilidad del equipo y/o proceso relacionado a la realización de ajustes, arreglos y fallas del mismo.
- Muestra el grado de eficiencia del equipo y/o proceso relacionado a paros menores, vacíos y sub utilización del equipo.
- Muestra el grado de calidad del producto resultado del equipo y/o proceso por operación de arranque, defectos y re trabajos.

Los puntos expuestos anteriormente nos ayudan a definir estrategias de mantenimiento, métodos de operación y ciclos de gestión de la calidad.

6.4.2. Clasificación del OEE

Los resultados del OEE son un factor de comparación entre las empresas *benchmarking* con similitudes en la naturaleza de sus procesos. Además posicionan a la organización en función al resultado del OEE de la siguiente forma:

Tabla III. **Clasificación de empresas en función al OEE**

OEE	Clasificación	Comentario
< 65 %	Inaceptable	Baja productividad y competitividad. Baja rentabilidad o pérdidas.
65 % < OEE < 75 %	Regular	Baja productividad y competitividad.
75 % < OEE < 85 %	Aceptable	Aceptable productividad y competitividad. En proceso de mejora.
85 % < OEE < 95 %	Bueno	Aceptable productividad y competitividad. Rentable.
> 95 %	Excelencia	Clase mundial. Alta rentabilidad.

Fuente: elaboración propia.

6.4.3. Factores de cálculo del OEE

El OEE es un indicador que mide todos los parámetros de pérdidas fundamentales en la producción: la disponibilidad, la eficiencia y la calidad.

6.4.3.1. Disponibilidad

Es la relación del tiempo que utilizamos el equipo por estar en condiciones de operación entre el tiempo posible de utilización. El tiempo posible de utilización debe dejar fuera de consideración los paros planificados (mantenimiento, tiempos de comida, horarios de trabajo, entre otros).

6.4.3.2. Eficiencia

Es la tasa de producción real entre la teórica. Todos los equipos tienen una capacidad de diseño según fabricante, este es el dato a considerarse en el cálculo como denominador de la relación.

6.4.3.3. La calidad

Es la relación entre producto conforme respecto de la totalidad de producto, o bien el tiempo del equipo produciendo en conformidad respecto del tiempo total de producción. Considerando como conformidad del producto lo que cumpla con los requisitos negociados con el cliente.

6.4.4. Cálculo del OEE de una caldera

Para el cálculo del OEE se consideraran algunas variantes dentro de cada uno de los factores componentes bajo el marco de referencia, sin pretender modificar o alterar el principio de éste indicador de productividad, sino más bien realizando una adaptación a la naturaleza del proceso. De tal forma que los factores se definen bajo los siguientes criterios:

Disponibilidad

Del tiempo total (24 horas), únicamente se descuenta paros programados y paros por condiciones externas. La disponibilidad puede ser parcial o total en el tiempo, considerando que la caldera puede estar funcionando con alguna restricción que no le permita utilizar toda su capacidad. De tal forma que si la caldera esta parada, pues se considera el tiempo de paro, ahora bien si la caldera opera con restricción, se calcula un factor extra relacionando la

producción real respecto de su capacidad total y luego se multiplica por el tiempo bajo esa condición.

Eficiencia

La eficiencia se determina en función a la producción relativa relacionando vapor producido por unidad de bagazo, y evaluando su comportamiento en el tiempo.

Calidad

La calidad se determinará en función al comportamiento de dos variables: presión y temperatura del vapor en el tiempo.

Relación entre el tiempo que las variables se mantengan en conformidad o dentro de especificación y el tiempo de operación.

7. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y

FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. INDUSTRIA DEL AZÚCAR
 - 1.1. Generalidades
 - 1.2. Caña de azúcar
 - 1.3. Fabricación de Azúcar
 - 1.4. Cogeneración

2. CALDERA
 - 2.1. Clasificación de calderas
 - 2.2. Componentes y equipos auxiliares de una caldera
 - 2.3. Eficiencia de la caldera
 - 2.4. Combustión
 - 2.5. Transferencia de calor
 - 2.6. Vapor de agua

3. PRODUCTIVIDAD
 - 3.1. Factores de la productividad

- 3.2. Medición de la Productividad
 - 3.2.1. Indicadores de la Productividad
- 3.3. Mejora de la Productividad

4. EFICIENCIA GLOBAL DE EQUIPOS (OEE)

- 4.1. Ventajas del OEE
- 4.2. Clasificación del OEE
- 4.3. Factores de cálculo del OEE
- 4.4. Cálculo del OEE de una caldera

5. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

6. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

ANEXOS

8. METODOLOGÍA

El alcance metodológico es descriptivo, porque se tiene disponible la caracterización del proceso de producción de vapor donde describe el alcance completo del mismo en el documento registrado en el sistema de gestión de la calidad “ficha de proceso” que nos permite evaluar y conocer el proceso de Producción de Vapor. Además se cuenta con información básica para el estudio sobre los eventos ocurridos a diario en la operación de la caldera en el reporte por turno que genera el supervisor de producción de vapor.

La implementación del OEE (eficiencia global de equipos) para mejorar la productividad de una Caldera inicia con la determinación de la línea base o datos de diseño de la Caldera, continúa el registro de datos o comportamiento de variables de operación, luego efectuar un análisis sobre las desviaciones de las variables respecto de la línea base y posteriormente evaluar propuestas para mejorar la productividad.

Desde la perspectiva del estudio de investigación, se aportará a la empresa propuestas razonables y viables para mejorar la productividad, fundamentadas en eliminar las causas raíces o principales que afectan la disponibilidad y rendimiento de la caldera, así como la calidad del vapor disminuyendo el valor del OEE.

El presente diseño de investigación es no experimental porque no se utilizará ensayos de laboratorio para determinar información a ser utilizada en el proyecto planteado y tampoco se manipulan variables en laboratorio.

Enfoque mixto por las siguientes razones:

Cuantitativo porque se utiliza la medición de variables para el control de proceso, la evaluación del comportamiento del proceso y sus desviaciones.

Cualitativo porque utiliza la revisión documental cuando se investiga antecedentes del problema y marco teórico relacionado.

El tipo de estudio es:

Descriptivo porque se cuenta con la información necesaria en la ficha de proceso, donde se describe su alcance, sirve para conocer y evaluar el mismo. Además se tiene también el reporte diario de los supervisores del proceso de Producción de Vapor donde nos detalla los eventos operativos diarios por turno.

Transversal porque el estudio de investigación está delimitado en tiempo, existe una fecha de inicio y fin del proyecto.

Variables involucradas en la investigación:

Variables independientes

Flujo de vapor: es la cantidad de vapor producida por la caldera, expresada en klb/hora.

Presión de vapor: es la fuerza ejercida por unidad de área del vapor producido por la caldera, expresada en psi (lb/plg²).

Temperatura de vapor: es la temperatura del vapor producido por la caldera, expresada en °F. La temperatura del vapor debe cumplir con la especificación del cliente por eficiencia del turbogenerador, para mantener la integridad del equipo.

Tiempo perdido: es la cantidad de tiempo que no está disponible la caldera parcial o totalmente. La disponibilidad se calcula en función a la capacidad de producción respecto de su producción nominal o de diseño.

Consumo de bagazo: es el consumo de combustible de la caldera necesario para cumplir con la demanda de vapor requerido por el sistema, expresado en klb/hora. Hoy el consumo de bagazo es calculado en función a la velocidad angular de los alimentadores de bagazo (variable) y el área de paso del bagazo en el alimentador hacia la caldera.

Variables dependientes

Disponibilidad de la caldera: indica con un valor porcentual el tiempo de disponibilidad parcial o total de la caldera en un día de operación en función a su capacidad nominal.

Eficiencia de la caldera: indica con un valor porcentual la razón de producción de vapor relativa real respecto de la producción de vapor relativa teórica. La producción relativa de vapor es la producción de vapor por unidad de consumo de bagazo.

Calidad del vapor: indica con un valor porcentual el cumplimiento de las variables presión y temperatura de vapor producido por la caldera respecto de los datos de diseño o nominales de la misma.

Tabla IV. Cuadro de variables e indicadores

	OBJETIVO	VARIABLE	INDICADOR	TIPO DE CONTROL	OBSERVACIÓN
General	Diseñar un modelo de implementación del indicador OEE (eficiencia global de equipos) para mejorar la productividad de una Caldera en un ingenio azucarero	Flujo de vapor Presión de vapor Temperatura de vapor Tiempo perdido de operación Consumo de bagazo	OEE Disponibilidad de la caldera Calidad del vapor Producción relativa de la caldera	Control en línea Registro de control	VARIABLES INDEPENDIENTES: Flujo de vapor, Presión de vapor, Temperatura de vapor, Tiempo perdido de operación, Consumo de bagazo VARIABLES DEPENDIENTES: Calidad de vapor, Disponibilidad, Rendimiento
	Definir la capacidad instalada de la Caldera de acuerdo a su diseño para contar con la línea base o referencia	Capacidad teórica de la Caldera: Flujo, presión y temperatura de vapor	Fiabilidad de los datos obtenidos		
Específicos	Diseñar el sistema de captura de información de operación de la Caldera para el control de desempeño de la Caldera		Fiabilidad de los datos obtenidos		
	Calcular el indicador de eficiencia global de equipos OEE		Reporte de resultados del OEE		
	Diseñar la metodología de análisis de resultados del OEE y causas de ineficiencias o incumplimientos de variables de proceso e indicadores de desempeño de la Caldera		Eficacia del análisis de resultados		
	Evaluar propuestas para mejorar la productividad de una Caldera en la industria azucarera		Informe de propuestas de mejora de la productividad		

Fuente: elaboración propia.

El proceso para cumplir con los objetivos del diseño de investigación debe llevarse a cabo de la siguiente forma:

Fase 1: responde a la revisión documental para realizar la investigación de antecedentes del problema y marco teórico relacionado al mismo.

Fase 2: se debe definir la capacidad instalada de la caldera de acuerdo a su diseño para contar con la línea base o referencia, esto de acuerdo a revisión y análisis de manuales de diseño, de operación y planos de la caldera y sus componentes.

Fase 3: se diseñara el sistema de captura de información de operación de la caldera para el control de desempeño de la Caldera. Las fuentes disponibles de información son el sistema de control de operación de la caldera y la bitácora diaria de supervisores y operadores de turno del proceso de producción de

vapor, luego se debe definir el responsable de la captura de información, también se definirá el responsable del manejo de la información, el diseño del registro a utilizar para el almacenamiento y difundirlo al personal involucrado.

Fase 4: se debe calcular el indicador de eficiencia global de equipos OEE de la caldera, para ello se tomara en consideración como marco de referencia el concepto de cálculo del indicador que relaciona tres factores: disponibilidad, rendimiento y calidad, el criterio del investigador y la opinión de técnicos expertos en operación de calderas.

Fase 5: se diseñara la metodología de análisis de resultados del OEE y causas de ineficiencias o incumplimientos de variables de proceso e indicadores de desempeño de la caldera. Inicialmente se realizará un análisis estadístico de las variables relacionadas a la investigación, posteriormente se utilizarán herramientas administrativas para llegar a las causas raíz de las desviaciones: Diagrama de Pareto, análisis de causa y efecto, árbol de problemas. Además para enriquecer las conclusiones del análisis, se efectuarán reuniones con el personal involucrado en la operación de calderas.

Fase 6: en función a las conclusiones derivadas del análisis se evaluará propuestas para mejorar la productividad de la caldera y su viabilidad.

Para la realización del estudio de investigación, se utilizará como unidad de análisis el universo de datos (población total) ya que en el sistema de control se miden las variables de proceso de la caldera en línea, lo que hace viable su captura y poder analizar con la totalidad de los mismos el comportamiento de las variables.

Para el registro y control de la variable que indica el tiempo perdido de operación de la caldera, se definirá el criterio de registro, el responsable, así como el diseño del formato de almacenamiento y la difusión a los involucrados. El dato de tiempo perdido debe ser registrado por evento que implique desviación sobre el factor de disponibilidad de la caldera.

9. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Se utilizará técnicas de la estadística descriptiva como:

La recolección de datos de las variables de operación de la caldera utilizando la información que se genera en el sistema de control operativo, utilizando para esto el registro indicado en sección de anexos, numeral 2.

La recolección de datos relacionados a la disponibilidad de la caldera utilizando la información de bitácoras de operación del supervisor y operador de turno, reporte de laboratorio y reporte del departamento de planeación y control.

Determinación de indicadores estadísticos para el análisis de la información como la media, mediana, desviación estándar, entre otros.

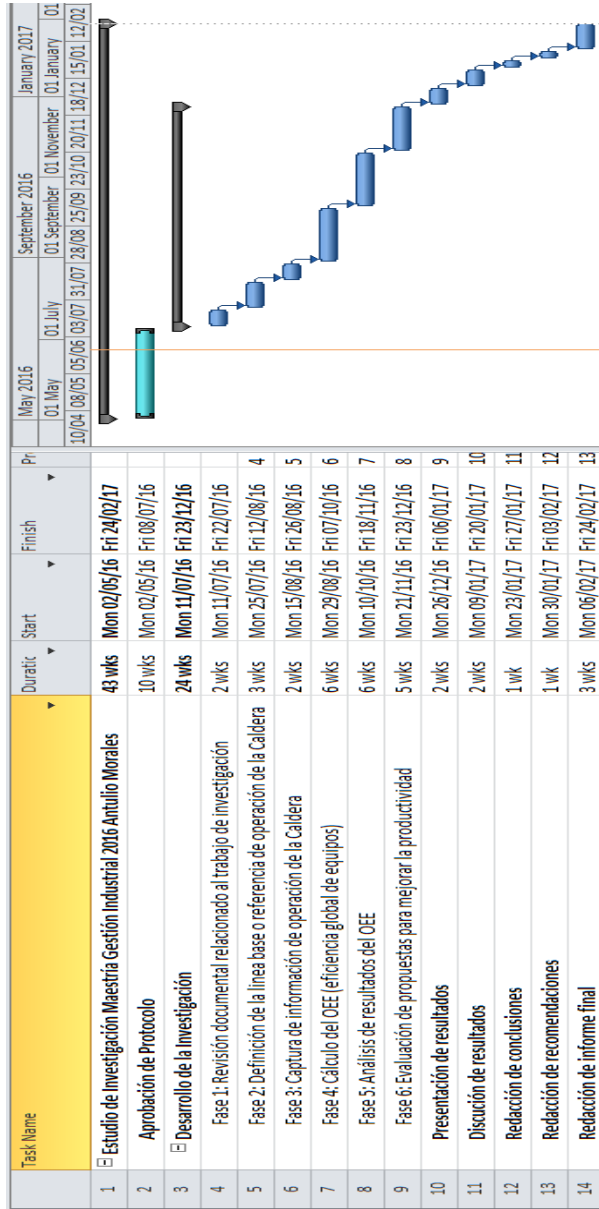
La representación gráfica del comportamiento de las variables, principalmente por medio de gráficos de control, con el propósito de caracterizar el comportamiento de las variables relacionadas con el cálculo del indicador OEE de la caldera.

Considerando que el alcance de la investigación es también explicativo, se dispondrá y transformará los datos a gráficos y diagramas que nos ayuden en el análisis para identificar causas de desviaciones respecto a los datos esperados del OEE, para ello, se utilizarán los diagramas de Pareto, árbol de problemas, Ishikawa. Ver anexos, numerales 3, 4 y 5.

Se considera la participación de operadores, supervisores, coordinador y jefe de proceso en la discusión de resultados con el propósito de validar la

información y que ayude a generar propuestas que agreguen valor a la gestión de la operación de la caldera.

10. CRONOGRAMA



Fuente: elaboración propia.

11. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El trabajo de investigación es factible porque se cuenta con los recursos necesarios para ejecutar cada una de las fases de la presente investigación y cumplir con los objetivos propuestos.

El ingenio azucarero autoriza la ejecución del presente trabajo de investigación, proporcionando los recursos:

Humanos: personal a disposición para realizar las tareas requeridas en la investigación.

Tecnológicos: Sistema de control y equipo de medición para la observación del comportamiento de variables, acceso a internet.

Información: acceso a la información requerida en la investigación con el compromiso de respetar los derechos de propiedad.

Equipo e infraestructura: La utilización de los equipos de informática y mobiliario dentro de la empresa, así como la infraestructura que permita la realización de la investigación.

El recurso financiero necesario para realizar la investigación será aportado por el investigador. Se presenta el siguiente presupuesto de gasto relacionado a la investigación:

Tabla V. **Presupuesto de gasto de elaboración del estudio**

id	Recurso	Descripción del gasto	Q	%
1	Intelectual	Tiempo propio de inversión	7,000.00	47%
2	Intelectual	Asesor de campo de trabajo de investigación	2,500.00	17%
3	Material	Papelería y útiles	2,000.00	13%
4	Transporte	Consumo de combustible y depreciación vehículo	1,400.00	9%
5	Alimentación	Alimentación	1,000.00	7%
6	Tecnologico	Internet	350.00	2%
7	Varios	Imprevistos (5%)	712.50	5%
			14,962.50	100%

Fuente: elaboración propia.

BIBLIOGRAFÍA

1. Asociación de Azucareros de Guatemala. ASAZGUA. Historia. Disponible en: <<http://www.azucar.com.gt/historia.html>>. Fecha de consulta 18 de marzo de 2016.
2. Asociación de Azucareros de Guatemala. ASAZGUA. Economía. Disponible en: <<http://www.azucar.com.gt/economia3.html>>. Fecha de consulta 18 de marzo de 2016.
3. BUSINESS SOLUTIONS CONSULTING GROUP. Productividad [en línea]. Argentina, 2007. Disponible en: <http://www.bscgla.com/04.%20Educacion/00010.%20Productividad/Productividad.pdf>
4. CENGICAÑA. El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala. Guatemala: Artemis Edinter, 2012. 512 p. ISBN 978-9929-40-469-4
5. GARCÍA CRIOLLO, Roberto. Estudio del trabajo. 2ª. ed. México: Mc Graw Hill, 2005. 458 p. ISBN 970-10-4657-9
6. HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto. Metodología de la investigación. 6ª. ed. México: Mc Graw Hill, 1997. 505 p. ISBN 968-422-931-3

7. HOLMAN, J. P. Transferencia de calor. 8ª. ed. España: Mc Graw Hill, 1998. 484 p. ISBN 007-844785-2
8. HOWELL, John y BUCKIUS, Richard. Principios de termodinámica para ingenieros. 1ª. ed. México: Mc Graw Hill, 1990. 713 p. ISBN 968-422-571-7
9. JURAN, Joseph y BLANTON, A. Manual de Calidad. 5ª. ed. España: Mc Graw-Hill, 2001. 48 capítulos. ISBN 84-481-3006-5
10. KERN, Donald. Procesos de transferencia de calor. 31ª. ed. México: Compañía editorial continental, S.A. de C.V., 1999. 980 p. ISBN 968-26-1040-0
11. KOHAN, Anthony. Manual de Calderas. 4ª. ed. España: Mc Graw-Hill, 2000. 733 p. ISBN 84-481-2800-1
12. FUNDACIÓN DE INVESTIGACIONES ECONOMICAS LATINOAMERICANAS. Productividad, competitividad, empresas. Los engranajes del crecimiento. 1ª. ed. Argentina: Talleres Gráficos Loigraf, 2002. 220 p. ISBN 987-9329-12-0
13. MUÑOZ, Mario. Guía para determinar y reducir perdidas de energía en generadores de vapor. Guatemala: Publicación de CENGICAÑA, 2015. 76 p.

14. PILOÑA ORTIZ, Gabriel. Métodos y técnicas de investigación documental y de campo. 10ª. ed. Guatemala: GP Editores, 2016. 337 p. ISBN 978-9929-8019-7-7
15. REIN, Peter. Ingeniería de la Caña de Azúcar. 1ª. ed. Berlin: Bartens, 2012. 880 p. ISBN 978-3-87040-142-9
16. SAYER, Natalie y WILLIAMS, Bruce. Lean For Dummies. 1ª. ed. Estados Unidos: Wiley Publishing, Inc., 2007. 362 p. ISBN 978-0-470-09931-5
17. SEVERNS, W. H.; DEGLER, H. E., Y MILES, J. C. La producción de energía mediante el vapor de agua, el aire y los gases. 5ª. ed. Barcelona: Reverté, S.A., 1992. 503 p. ISBN 84-291-4890-6
18. SHANK, John y GOVINDARAJAN, Vijay. Gerencia estratégica de costos. 1ª. ed. Bogotá, Colombia: Editorial Norma, S.A., 1995. 340 p. ISBN 958-04-2840-9
19. SPENCER, Guilford y MEAD, George. Manual del Azúcar de Caña. Barcelona: Montaner y Simón, S.A., 1967. ISBN 9788427402805
20. VARA HORNA, Arístides. Desde la idea hasta la sustentación: Siete pasos para una tesis exitosa [en línea]. 3ª. ed. Universidad de San Martín de Porres, Lima, 2012. 451 p. Disponible en: www.aristidesvara.net

APÉNDICES

Apéndice 1. Matriz de coherencia

MATRIZ DE COHERENCIA

DISÑO DE INVESTIGACIÓN: IMPLEMENTACION DEL OEE (EFICIENCIA GLOBAL DE EQUIPOS) PARA LA MEJORA DE LA PRODUCTIVIDAD DE UNA CALDERA EN UN INGENIO AZUCARERO DE ESCUINTLA

Falta de control del rendimiento total de la Caldera, ya que no se cuenta con la métrica que relacione la disponibilidad de la caldera respecto a su productividad y calidad de producto

PROBLEMA:

Formulación del Problema	Objetivos	Preguntas	Variables	Indicadores	Técnicas e instrumentos
Falta de control del rendimiento total de la Caldera, ya que no se cuenta con la métrica que relacione la disponibilidad de la Caldera respecto a su productividad y calidad de producto	Diseñar un modelo de implementación del indicador OEE (eficiencia global de equipos) para mejorar la productividad de una Caldera en un ingenio azucarero	PREGUNTA CENTRAL ¿Cómo mejorar la productividad de una Caldera en la industria azucarera utilizando el OEE (indicador de eficiencia global de equipos)?	Tiempo perdido de operación de la caldera Flujo de vapor Presión de vapor Temperatura de vapor Consumo de bagazo	OEE de la caldera Disponibilidad de la caldera Calidad del vapor Producción relativa de vapor	Eficiencia global de equipos OEE
	ESPECIFICOS Definir la capacidad instalada de la Caldera de acuerdo a su diseño para contar con la línea base o referencia	PREGUNTAS AUXILIARES ¿Qué disponibilidad de información se tiene sobre la capacidad de diseño de la Caldera?	Capacidad teórica de la Caldera: Flujo, presión y temperatura de vapor	Fiabilidad de los datos obtenidos	Revisión documental: Manual de diseño de la Caldera Manual de operación de la Caldera Planos de la Caldera
	Diseñar el sistema de captura de información de operación de la Caldera para el control de desempeño de la Caldera	¿Cómo realizar la recolección de datos e información necesaria para la medición del OEE de la Caldera?		Fiabilidad de los datos obtenidos	Registro de control de variables Registro de control de indicadores
	Calcular el indicador de eficiencia global de equipos OEE	¿Qué herramienta utilizar para el cálculo del OEE de la Caldera?		Reporte de resultados del OEE	Diseño de una hoja de cálculo del OEE Programa de cálculo del OEE
	Diseñar la metodología de análisis de resultados del OEE y causas de ineficiencias o incumplimientos de variables de proceso e indicadores de desempeño de la Caldera	¿Qué herramientas utilizar para el análisis de resultados del OEE, el comportamiento de las variables de proceso e indicadores de desempeño de la Caldera?		Eficacia del análisis de resultados	Análisis estadístico de resultados Diagrama de Pareto Análisis de causa y efecto Árbol de problemas Reuniones con personal del proceso de Producción de vapor
	Evaluar propuestas para mejorar la productividad de una Caldera en la industria azucarera	¿Cómo evaluar la viabilidad de las propuestas para mejorar la productividad de la Caldera?		Informe de propuestas de mejora de la productividad	Análisis de costo beneficio

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Recolección de datos

REPORTE DE VARIABLES FUERA DE ESPECIFICACION

Fecha:

Día de zafra:

HORA		FLUJO	tiempo	PRESION	tiempo	TEMPERATURA	tiempo	RAZON
De	A	klb/hora	min	psi	min	°F	min	
00:00	01:00							
01:00	02:00							
02:00	03:00							
03:00	04:00							
04:00	05:00							
05:00	06:00							
06:00	07:00							
07:00	08:00							
08:00	09:00							
09:00	10:00							
10:00	11:00							
11:00	12:00							
12:00	13:00							
13:00	14:00							
14:00	15:00							
15:00	16:00							
16:00	17:00							
17:00	18:00							
18:00	19:00							
19:00	20:00							
20:00	21:00							
21:00	22:00							
22:00	23:00							
23:00	00:00							

Nombre de operador de control _____

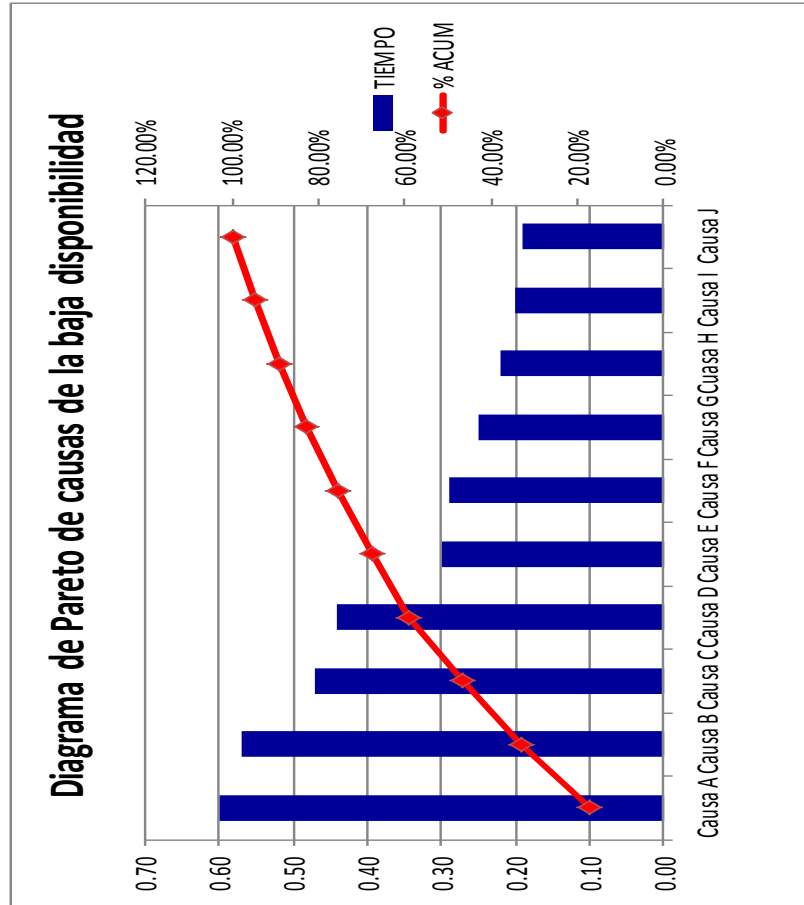
Nombre de supervisor _____

Firma _____

Firma _____

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Diagrama de Pareto

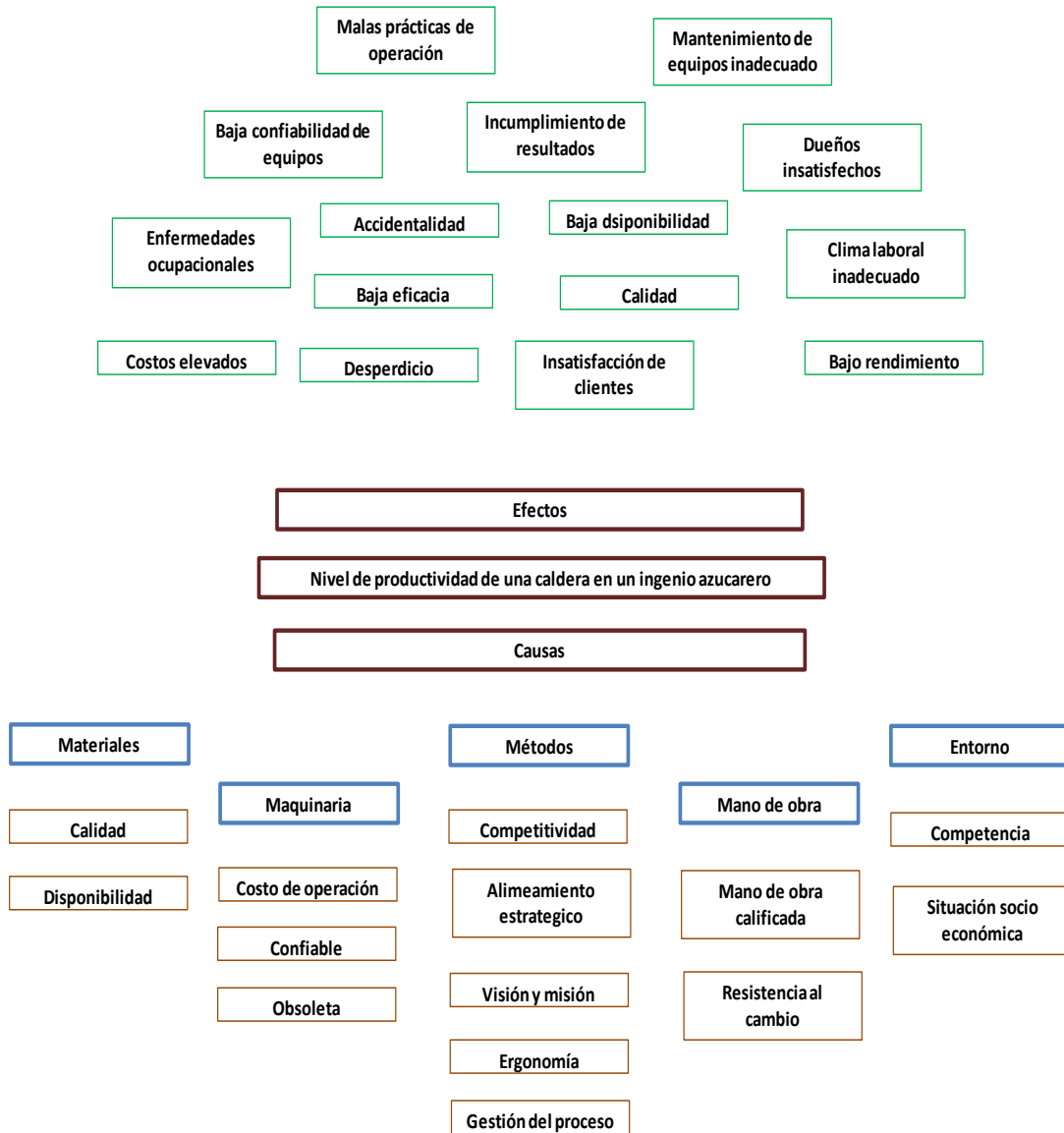


CAUSAS DE LA BAJA DISPONIBILIDAD	TIEMPO	% ACUM
Causa A	0.60	17.00%
Causa B	0.57	33.14%
Causa C	0.47	46.46%
Causa D	0.44	58.92%
Causa E	0.30	67.42%
Causa F	0.29	75.64%
Causa G	0.25	82.72%
Causa H	0.22	88.95%
Causa I	0.20	94.62%
Causa J	0.19	100.00%

3.53

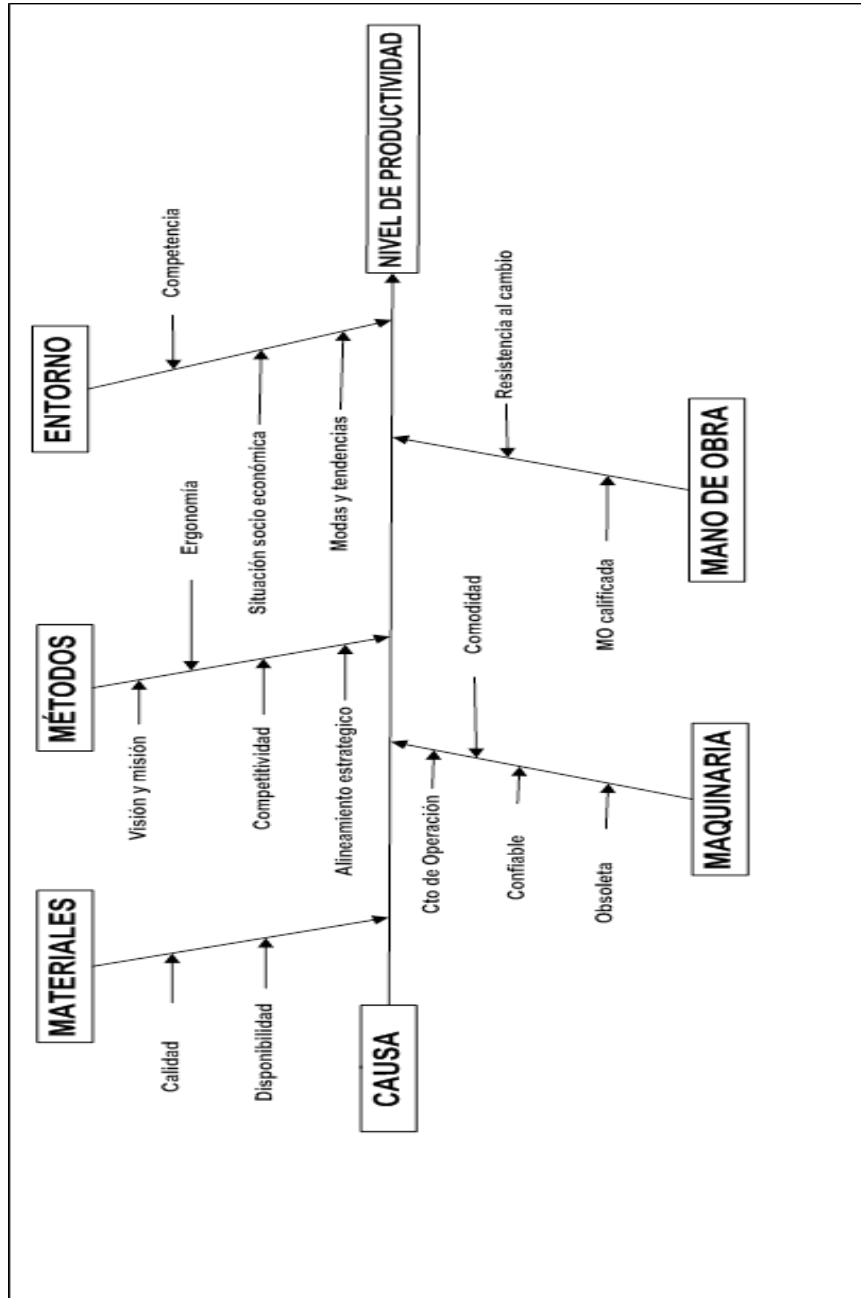
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

