



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL AUMENTO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE
UNA CALDERA A TRAVÉS DEL EMPLEO DE ENERGÍA SOLAR COMO PARTE DEL
PRECALENTAMIENTO DE AGUA EN UNA INDUSTRIA JABONERA**

Jaime Danilo Dardón Contreras

Asesorado por el Msc. Ing. Cesar Oswaldo García Monterroso

Guatemala, noviembre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL AUMENTO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE
UNA CALDERA A TRAVÉS DEL EMPLEO DE ENERGÍA SOLAR COMO PARTE DEL
PRECALENTAMIENTO DE AGUA EN UNA INDUSTRIA JABONERA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JAIME DANILO DARDÓN CONTRERAS

ASESORADO POR EL MSC. ING. CESAR OSWALDO GARCÍA
MONTERROSO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

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 PARA EL AUMENTO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE
UNA CALDERA A TRAVÉS DEL EMPLEO DE ENERGÍA SOLAR COMO PARTE DEL
PRECALENTAMIENTO DE AGUA EN UNA INDUSTRIA JABONERA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 20 de octubre de 2020.

Jaime Danilo Dardón Contreras

Ref. EEPFI-1191-2021

Guatemala, 24 de agosto de 2021

Director
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Escuela de Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ing. Álvarez:

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL AUMENTO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA CALDERA A TRAVÉS DEL EMPLEO DE ENERGÍA SOLAR COMO PARTE DEL PRECALENTAMIENTO DE AGUA EN UNA INDUSTRIA JABONERA**, presentado por el estudiante **Jaime Danilo Dardón Contreras** carné número **200511958**, quien optó por 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 en Artes en Energía y Ambiente.

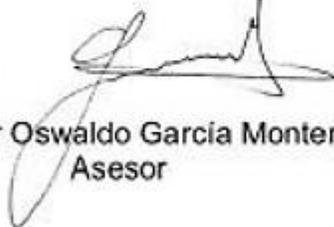
Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para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

Atentamente,

César Oswaldo García Monterroso
M.Sc. M.A. Ingeniero Químico
Colegiado No. 1563

Mtro. Cesar Oswaldo García Monterroso
Asesor

"Id y Enseñad a Todos"



Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Área
Desarrollo Socio-Ambiental y Energético



Mtro. Edgar Darío Alvar
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





Ref.EEP.EIQ. 013.2021

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL AUMENTO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA CALDERA A TRAVÉS DEL EMPLEO DE ENERGÍA SOLAR COMO PARTE DEL PRECALENTAMIENTO DE AGUA EN UNA INDUSTRIA JABONERA**, presentado por el estudiante universitaria Jaime Danilo Dardón Contreras, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. William G. Alvarez Mejia, M.I.Q., M.U.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, agosto de 2021



DTG.698.2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL AUMENTO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA CALDERA A TRAVÉS DEL EMPLEO DE ENERGÍA SOLAR COMO PARTE DEL PRECALENTAMIENTO DE AGUA EN UNA INDUSTRIA JABONERA**, presentado por el estudiante universitario: **Jaime Danilo Dardón Contreras**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, noviembre de 2021

ACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por guiarme en cada momento de mi vida.
Mis padres	Danilo Dardón y Rossana Contreras. Su ejemplo amor y dedicación son los pilares de mi vida.
Mi esposa	Jeimy Sabrina Barrios Pérez. Por ser mi apoyo y compañera de vida.
Mis hijos	Paula y Juan Dardón. Por ser la inspiración para mejorar cada día.
Mi hermana	Zoila Dardón. Por cuidarme en todo momento.
Mis familiares y amigos	Por ser parte de la alegría de mi vida.
Mis difuntos	Por haberme dado el privilegio de su amor.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por haberme dado la oportunidad de estudiar a nivel profesional.

Facultad de Ingeniería

Por ser mi casa de estudios y de experiencias de vida.

**Escuela de Postgrado
de Ingeniería**

Por haberme permitido crecer mi nivel académico.

Mi asesor

Maestro Cesar García por su apoyo, orientación y amistad.

Mi amigo y mentor

Antonio Argueta por su conocimiento y amistad compartido durante estos años.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
4. JUSTIFICACIÓN	9
5. OBJETIVOS	11
5.1. General.....	11
5.2. Específicos	11
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	13
7. MARCO TEÓRICO.....	15
7.1. Industria jabonera.....	15
7.1.1. Historia	15
7.2. Definición de jabón	15
7.2.1. Saponificación	16
7.3. Materias primas	16

7.3.1.	Álcali.....	17
7.3.2.	Glicerina	17
7.3.3.	Grasas y aceites.....	18
7.3.3.1.	Sebo.....	18
7.3.3.2.	Grasa vegetal	18
7.3.3.3.	Aceites.....	19
7.4.	Proceso de fabricación del jabón	19
7.4.1.	Mezcla de grasas	19
7.4.2.	Saponificación	20
7.4.3.	Mezclado con aditivos	21
7.4.4.	Secado	22
7.4.5.	Refinado	23
7.5.	Calderas de vapor	24
7.5.1.	Tipos de calderas de vapor	24
7.5.1.1.	Calderas pirotubulares	24
7.5.1.1.1.	División.....	25
7.5.1.1.2.	Partes.....	26
7.5.1.2.	Calderas acuatubulares.....	27
7.5.1.2.1.	Parámetros de funcionamiento y características	28
7.5.1.2.2.	Partes.....	29
7.5.2.	División de calderas por su tecnología	32
7.5.3.	Aspectos de diseño, selección de potencia.....	32
7.6.	Combustión	33
7.6.1.	Fases de la combustión	34
7.6.2.	Parámetros de temperatura en combustibles.....	34
7.6.3.	Tipos de combustión	35
7.6.4.	Analizadores de gases de la combustión	36

	7.6.4.1.	Medición del CO ₂ , O ₂ y opacidad	37
	7.6.4.2.	Medición del CO	37
	7.6.5.	Parámetros de combustión	38
	7.6.6.	Pérdidas de calor en la combustión.....	39
7.7.		Límites de inflamabilidad	39
7.8.		Tiro natural y tiro forzado.....	40
7.9.		Quemadores.....	41
7.10.		Rendimiento de la combustión	42
	7.10.1.	Pérdidas	42
7.11.		Combustibles.....	43
	7.11.1.	División de los combustibles.....	44
	7.11.2.	Propiedades de los combustibles	44
7.12.		Agua de alimentación de calderas.....	45
	7.12.1.	Ciclo de agua de calderas	45
	7.12.2.	Principales impurezas contenidas en el agua.....	46
7.13.		Tratamientos fisicoquímicos del agua	47
7.14.		Eficiencia energética en calderas	48
	7.14.1.	Balance de masa	48
	7.14.2.	Balance de energía.....	49
7.15.		Medidas de ahorro y eficiencia energética	50
	7.15.1.	Control de la combustión	50
	7.15.2.	Minimización de purgas	50
	7.15.3.	Recuperación del calor residual de gases	51
	7.15.4.	Minimizar pérdidas por paredes.....	51
7.16.		Energías renovables no convencionales	52
	7.16.1.	Energía térmica solar.....	52
		7.16.1.1. Tecnología solar activa de baja temperatura	53
		7.16.1.2. Colectores de baja temperatura.....	54

	7.16.1.3. Energía Solar activa media y alta temperatura	56
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	57
9.	METODOLOGÍA	63
9.1.	Tipo de estudio.....	63
9.2.	Fases del estudio	63
9.2.1.	Fase 1: exploración bibliográfica	65
9.2.2.	Fase 2: recolección de datos operacionales	65
9.2.3.	Fase 3: determinación de la eficiencia actual de la caldera.....	66
9.2.4.	Fase 4: determinación del potencial energético de la zona.....	66
9.2.5.	Fase 5: definición del diseño y ubicación del sistema	69
9.2.6.	Fase 6: determinación de la eficiencia energética al utilizar energía térmica solar.....	70
9.2.7.	Fase 7: estimar los costos de instalación y beneficios económicos	71
9.2.8.	Fase 8: viabilidad económica	72
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS.....	75
11.	CRONOGRAMA	77
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	79
13.	REFERENCIAS	81

14.	APÉNDICES.....	85
15.	ANEXO.....	87

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Reacción de saponificación.....	16
2.	Reacción para obtención de glicerina a partir de grasa o aceites	17
3.	Tanque estándar para mezcla de grasas	20
4.	Tanque de saponificación de grasa.....	21
5.	Crutcher	21
6.	Torre de secado	22
7.	Compresoras.....	23
8.	Diagrama del proceso de producción de jabón	23
9.	Sección de una caldera pirotubular	25
10.	Partes de la caldera pirotubular	27
11.	Esquema del funcionamiento de una caldera acuotubular	28
12.	Esquema de una caldera acuotubular.....	30
13.	Esquema de un colector.....	31
14.	Esquema de un economizador y calentador	31
15.	Reacción de combustión	33
16.	Reacción de general de combustión	34
17.	Diagrama de tiro natural.....	40
18.	Diagrama de tiro forzado.....	41
19.	Pérdidas (n) en una caldera	43
20.	Balance de masa de una combustión incompleta con exceso de aire	49
21.	Esquema de balance de energía	49
22.	Esquema de un sistema economizador	51

23.	Aplicación de energía solar en viviendas	53
24.	Aplicación de tecnología solar activa de baja temperatura	54
25.	Partes de un colector térmico	55
26.	Colectores cilíndricos parabólicos.....	56
27.	Potencial energético de la zona de estudio	67

TABLAS

I.	Porcentaje de exceso de aire por tipo de combustible.....	36
II.	Características de la combustión	37
III.	Poder calorífico de combustibles comunes.....	45
IV.	Variables de la fase de estudio	63
V.	Variables operacionales para recolectarse	66
VI.	Irradiación solar promedio mensual en la zona	68
VII.	Irradiación solar promedio mensual por hora.....	69
VIII.	Porcentaje de eficiencia energética de la caldera.....	71
IX.	Costos de instalación.....	72
X.	Beneficios económicos teóricos.....	72
XI.	Cronograma de actividades	77
XII.	Recursos necesarios para la investigación	79

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Cp_{cascabillo}	Capacidad calorífica del cascabillo
Kw/Kg	Entalpía
°C	Grados Celsius
hr	Hora
Kg	Kilogramos
Kg/hr	Kilogramos por hora
KJ	Kilojulios
Kw	Kilowatts
Lb	Libras
Lb vapor	Libras de vapor
m	Metros
KJ/Kg	Poder calorífico
%Eficiencia	Porcentaje de eficiencia de la caldera

GLOSARIO

Cascabillo de café	Capa que cubre el grano de café y es un subproducto de su cosecha, es utilizado como combustible orgánico.
Energía solar	Es la energía producida por la luz del sol.
Energía térmica solar	Energía térmica producida por el sol.
Inclinación solar	Ángulo formado con el horizonte en el que se encuentra el sol a distintas horas del día.
Medidor de flujo másico	Equipo de medición utilizado para determinar la cantidad de masa que fluye en un tiempo determinado.
Retorno de la inversión	Tiempo en el cual los beneficios económicos obtenidos por una inversión son iguales a esta.
Termo copla	Sensor de temperatura utilizado para determinar la temperatura.

RESUMEN

La investigación realizada tuvo por objetivo evaluar teóricamente los beneficios que se obtienen al utilizar un sistema de precalentamiento de agua a partir de calentadores solares para alimentar el agua de una caldera.

El estudio se llevó a cabo en una industria jabonera en el departamento de Escuintla, en una caldera acuatubular que utiliza biomasa como combustible para la generación de vapor. El principio en el que se basa el estudio es en disminuir el gradiente de temperatura que existe actualmente entre el agua de pozo a temperatura ambiente y la temperatura de evaporación del agua.

Al disminuir el gradiente de temperatura del agua se espera tener un ahorro de consumo energético, disminuyendo el consumo de cascabillo de café, lo que originará beneficios económicos.

Para realizar este estudio se partió de una recolección de datos sobre las condiciones de operación de la caldera, y con estos datos estimar su eficiencia actual. También se realizó una consulta del potencial energético de la zona a través del sitio web goblasolaratlas.com, el cual comparte información real sobre las condiciones solares en el mundo. A partir de una visita al sitio de interés se determinó el área de instalación de los calentadores solares, sabiendo las características técnicas de los calentadores solares fue posible determinar la temperatura que tendría el agua al someterla al proceso de precalentamiento por energía solar, con la nueva temperatura fue posible determinar una nueva eficiencia a la que podría trabajar la caldera, y los beneficios económicos que se tendrían por la instalación del sistema.

1. INTRODUCCIÓN

Para un proceso de generación de vapor tener una baja eficiencia energética es un problema serio que impacta de forma negativa en la economía de la empresa y en el medio ambiente de las comunidades cercanas. La falta de estudios para determinar la eficiencia energética real de los equipos impide tener un punto de partida, que incentive a la búsqueda de nuevas fuentes de energía renovable y que a partir de ellas se logre la mejora energética y por consecuencia la mejora medioambiental. Esta falta de estudios genera poca confianza en los inversionistas que prefieren alejarse de este tipo de proyectos.

Realizar un estudio que determine la mejora en la eficiencia energética que se tendría en una caldera de la industria jabonera, al utilizar un sistema economizador basado en el aprovechamiento de energía térmica solar para precalentar el agua de proceso, permitiría a los inversionistas tener un panorama de los beneficios económicos que tendrían al emprender en este tipo de proyectos.

En el presente estudio se determinará la eficiencia actual de la caldera, el potencial de energía térmica de la zona, el diseño y ubicación para el sistema economizador, los costos de inversión, la eficiencia de la caldera al utilizar el sistema economizador, los beneficios teóricos económicos que se obtendrían, y a partir de un análisis financiero del tiempo de retorno de la inversión se determinará la viabilidad del proyecto.

Para la realización del estudio se partirá de una fase de recolección de las condiciones de operación de la caldera, las cuales serán necesarias para

determinar la eficiencia actual de la caldera y la demanda de vapor a suministrar. El potencial de energía térmico de la zona se determinará consultando datos reales y con esto los horarios de operación y meses con mejores o peores condiciones para el sistema. Con las condiciones de operación y el potencial térmico solar de la zona será posible determinar la cantidad de colectores solares, el diseño general del sistema y la ubicación de este. Al contar con el diseño se podrán determinar los costos de instalación, la eficiencia teórica de la caldera al utilizar el sistema economizador, y los beneficios económicos que se obtendrían.

En el capítulo 1, se presentarán los más importantes antecedentes necesarios para esta investigación. En el capítulo 2, se realizará una revisión bibliográfica de los fundamentos teóricos relacionados con el tema de estudio, tales como generalidades del jabón sus materias primas y proceso en general, principios generales de las calderas, división de calderas, parámetros críticos de operación, partes y aspectos de diseño, generalidades de la combustión, tipos de combustión, mediciones y tipos de combustibles, eficiencia energética en calderas, energías renovables, y tecnología térmica solar. En el capítulo 3, se presentarán los datos operacionales de la caldera. En el capítulo 4, se determinará la eficiencia energética de la caldera. En el capítulo 5, se presentará el diseño del sistema. En el capítulo 6 se determinará la eficiencia energética de la caldera al utilizar energía térmica solar. En el capítulo 7 se realizará el análisis de viabilidad económica. En el capítulo 8 se discutirán los resultados. Finalmente se darán las conclusiones de la investigación y las recomendaciones para la instalación del sistema.

2. ANTECEDENTES

Se encontraron estudios publicados sobre la utilización de energía solar para precalentar el agua de calderas, los estudios publicados abarcan distintas situaciones en las que se utiliza este tipo de sistemas economizadores. A continuación, se presentan un caso nacional:

En la tesis titulada *Propuesta para el empleo de energía solar como parte del precalentamiento de agua en las calderas del Hospital General San Juan De Dios* (Quezada, 2015), hace una propuesta para utilizar energía solar para precalentar el agua de calderas del Hospital, realizó una investigación de las características de la caldera, el tamaño del sistema de captación solar y cuantificó el costo del sistema, obteniendo como resultado que al utilizar energía solar se pueden precalentar el agua de caldera en un rango de 55-65° C logrando temperaturas de hasta 75 °C al utilizar una resistencia eléctrica en el tanque colector de agua, también determino que para precalentar el agua de una caldera con capacidad de 1,125 galones se necesitan como mínimo 14 colectores solares.

A continuación, se presentan los casos extranjeros:

En la tesis titulada *Influencia del precalentamiento del agua de alimentación mediante energía solar en la eficiencia de una caldera piro tubular* (Vega, 2017), hace un estudio preliminar para la implementación de un sistema térmico solar en el pre calentamiento del agua de alimentación de una caldera piro tubular a través de programas simuladores buscó analizar el efecto que esto tiene sobre la caldera, obteniendo como resultado aumentar de 1.66 % a 3 % la eficiencia

energética de la caldera, también logró determinar que se tendría un retorno de la inversión en 4 años.

En la tesis titulada *Precaentamiento solar de aire de ingreso a calderas industriales y su evaluación técnica - económica* (Rivera, 2016), estudia la implementación de un sistema de calentamiento solar basado en colectores solares de aire en el Hospital Carlos Van Buren de Valparaíso, y su objetivo principal fue la reducción en el consumo de combustible, obteniendo reducción en el uso de combustible entre 0.6 - 3.4 %, pero el proyecto resulta ser económicamente no viable porque el tiempo de retorno de la inversión es de 10 años.

En la publicación titulada *Ahorro de energía primaria mediante precalentamiento del aire y agua en una unidad de generación de vapor* (Chucuya, 2017), realiza un diseño no experimental en el cual propone ahorro de energía primaria a través de economizadores; evalúa y cuantifica la influencia del precalentamiento en el aire de combustión y el agua de alimentación en el consumo de combustible; logró precalentar el aire de alimentación de 20° a 54.22° logrando un ahorro de 2.5 % en el consumo de combustible, al precalentar el agua se aumentó la temperatura de 65° a 95° obteniendo un ahorro de combustible de 5 %, y al combinar ambas técnicas logró ahorros de 7.4 % de combustible.

En la publicación titulada *Un diseño alternativo para el precalentamiento de aire de una caldera bagacera, caso caldera 6 de ingenio la Unión* (Muñoz y Vega, 2015), se proponen un rediseño de la Caldera 6 del ingenio La Unión con el cual pretenden utilizar los gases de combustión para precalentar el aire de alimentación primario y con esto tener una caldera más eficiente al acelerar la reacción de combustión. Esto se realizó separando los flujos de aire primario y

secundario y utilizar la salida del aire secundario para precalentar el aire primario logrando aumentar en 16 °C la temperatura de ingreso de aire primario, sin embargo, en el presente trabajo no se realiza un análisis económico con el cual se pueda determinar si la inversión para modificar la infraestructura es económicamente viable al compararlos con los ahorros generados por el sistema.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Tener baja eficiencia energética en una caldera es un problema para cualquier tipo de industria, especialmente en la industria jabonera donde el vapor se utiliza para el proceso de secado del jabón.

La falta de estudios técnicos que determinen la eficiencia energética de la caldera impide visualizar el problema dificultando el desarrollo de acciones que lo solventen, una de estas acciones puede ser la utilización de sistemas economizadores de combustible.

El principio de los sistemas economizadores de combustible es utilizar fuentes de energía alternativas como por ejemplo la energía térmica solar para disminuir el consumo de combustibles convencionales, pero en el caso de estudio no se utilizan este tipo de sistemas.

Tener una baja eficiencia de la caldera magnifica el peligro de incumplimiento de la demanda de vapor, demanda que cada vez es mayor debido a incrementos en el programa de producción.

Elevar el consumo del recurso energético disponible aumenta los costos de generación de vapor y contribuye al calentamiento global, ambos aspectos son negativos para los costos de operación y el compromiso ecológico de la empresa.

Esto lleva a plantear la pregunta principal de este estudio: ¿Es factible aumentar la eficiencia energética de una caldera a través del empleo de energía solar como parte del precalentamiento de agua en una industria jabonera?

Para responder esta interrogante se deberán responder las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuál es la eficiencia energética de la caldera sin utilizar sistemas economizadores?
- ¿Cuál es la eficiencia energética de la caldera sin utilizar sistemas economizadores?
- ¿Cuál es la eficiencia energética de la caldera al utilizar precalentamiento de agua por energía solar?
- ¿Cuál es el potencial de energía térmica solar en la zona?
- ¿Cómo debe ser el diseño del sistema precalentador de agua?
- ¿Cuáles son los costos de instalación del sistema de precalentamiento por energía solar y los beneficios económicos de su implementación?

4. JUSTIFICACIÓN

La realización de la presente investigación se justifica en la línea de investigación de Energías renovables para Gestión Energética de la Maestría en Energía y Ambiente.

La utilización de energía térmica solar en la industria jabonera provee un recurso energético sin costo, y libre de gases de efecto invernadero.

En el presente trabajo se expone aumentar la eficiencia energética de una caldera al utilizar energía solar como fuente de precalentamiento de agua. Esto disminuirá el consumo de combustibles convencionales, abaratará los costos de generación de vapor, y reducirá los gases contaminantes que son producto de la reacción de combustión.

En la investigación se define el diseño del sistema precalentador necesario para suministrar la cantidad de agua consumida por la caldera, se determina la viabilidad del proyecto tomando en cuenta el potencial de energía térmica solar en la zona, y se evalúan los beneficios económicos al compararlos con los costos de implementación del sistema.

Realizar este estudio brinda una herramienta técnica para que los ingenieros de la industria jabonera puedan justificar inversiones relacionadas con energías renovables que con el paso del tiempo generen un ahorro económico atractivo, y que a la vez disminuya el impacto ambiental provocado por la industria.

Los datos aportados incentivan emprendimientos relacionados con el uso de energías renovables en las grandes industrias guatemaltecas, que hasta el momento han sido levemente explotadas.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Estimar el aumento de la eficiencia energética de una caldera al emplear energía solar como parte del precalentamiento de agua en una industria jabonera.

5.2. Específicos

- Calcular la eficiencia energética de la caldera sin utilizar sistemas economizadores.
- Determinar el potencial de energía térmica solar en la zona.
- Definir el diseño y ubicación del sistema precalentador de agua.
- Estimar los costos de instalación del sistema de precalentamiento por energía solar y los beneficios económicos de su implementación.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Disminuir el consumo del recurso energético es de vital importancia para cualquier industria que busque ser competitiva, ya que al lograrlo se disminuyen de forma directa costos de producción y se aporta a la disminución de gases de efecto invernadero.

Realizar un estudio técnico que involucre inversiones y beneficios económicos sobre la utilización de sistemas ahorradores de combustible a través de energías renovables, puede incentivar emprendimientos para este tipo de tecnologías, que a su vez generarían beneficios económicos y medio ambientales.

De acuerdo con la problemática planteada para aumentar la eficiencia energética en una caldera en la industria jabonera, se presenta un estudio técnico que permite evaluar el impacto teórico en la eficiencia de la caldera al utilizar un sistema economizador de combustible que aproveche la energía térmica solar para el precalentamiento del agua de alimentación.

Contrarrestar el riesgo de incumplimiento al programa de producción por falta de suministro de vapor es vital en la industria jabonera, y esto es posible al tener un sistema de generación de vapor con mayor eficiencia, que optimice el uso de combustibles convencionales y que a la vez aproveche energía renovable gratuita.

Con la presente investigación se determinará el diseño del sistema de captación de energía solar y el tanque de almacenamiento de agua precalentada

correlacionando la cantidad de paneles solares en función de la demanda de agua de una caldera de 600hp, se evaluará la factibilidad del proyecto comparando el ahorro de combustible contra los costos de inversión en función de la capacidad de irradiación térmica solar de la zona, con estos resultados será beneficiada la industria general que utilice vapor como parte de su proceso y que se encuentre en una región con elevada exposición solar. Al reducir la dependencia de combustibles convencionales por energía térmica solar se aporta de forma positiva al área financiera disminuyendo costos de producción al utilizar una forma de energía gratuita y renovable.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Industria jabonera

La industria jabonera a través de los años ha evolucionado buscando una tecnificación de sus distintos procesos, a continuación, se detallan los aspectos más relevantes.

7.1.1. Historia

El uso del jabón fue inicialmente introducido a Roma desde Alemania, y fue descubierto por los galos que lo obtuvieron a partir de mezcla de grasas de cabras, luego la manufactura de jabón floreció en el siglo VIII en Italia y España, y fue introducida a Francia alrededor de quinientos años después, instalando las primeras fábricas de jabón en Marsella produciendo jabón a partir de aceite de oliva. En Inglaterra se fundó la primera fábrica de jabón en 1524, a partir de esa fecha hasta el siglo 19 la industria del jabón se desarrolló muy lentamente. Fue hasta el descubrimiento de la soda caustica a partir de la sal común (Appleton, H. & Simmons, W., 2016).

7.2. Definición de jabón

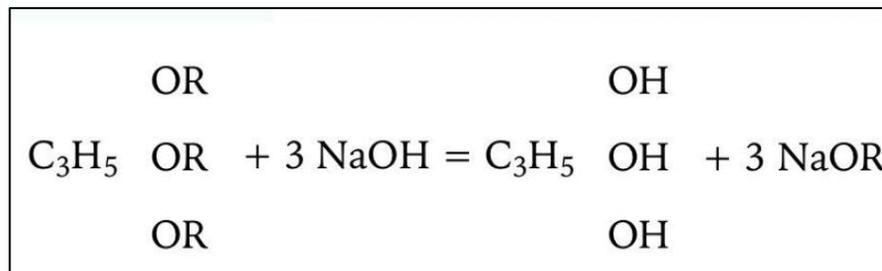
La palabra jabón es aplicada originalmente a productos obtenidos de la reacción de sebo con cenizas, en sentido químico el jabón es definido como la combinación de ácidos grasos con bases básicas, también se le define como la combinación de ácidos grasos y materias alcalinas.

También es definida por sus propiedades como una sustancia alcalina o neutra que es utilizada para lavar y limpiar (Appleton, H. & Simmons, W., 2016).

7.2.1. Saponificación

Se da cuando un aceite entra en combinación química con un hidróxido caustico (álcali), y los nuevos compuestos formados son jabón y glicerina.

Figura 1. **Reacción de saponificación**



Fuente: Thomssen (2016). *Soap-Making Manual: A practical handbook on the control in the modern soap.*

7.3. Materias primas

El jabón es el agente de limpieza más común conocido por el hombre, es muy importante conocer las distintas materias primas que pueden ser utilizadas para su fabricación para entender las distintas propiedades y características que pueden obtenerse (Thomssen, 2016).

7.3.1. Álcali

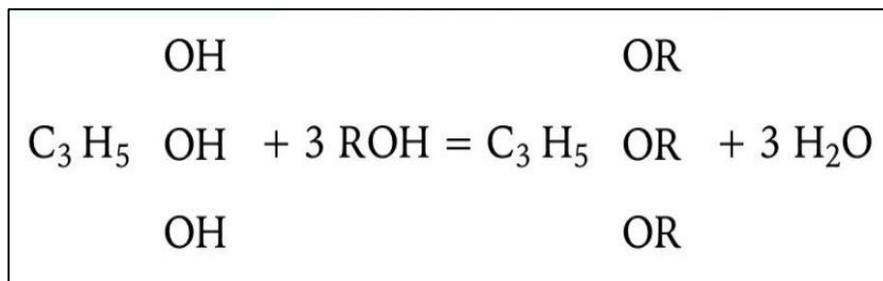
La producción de álcali fue una con la producción de jabón desde el principio, pero con el paso de los años la industria jabonera compra su álcali de un productor de este material. El álcali más comúnmente utilizado para la producción de jabón es el hidróxido de potasio, una solución del álcali y agua es añadida a las grasas para formar jabón.

Los álcalis más utilizados son: Soda caustica, hidróxido de potasio, carbonato de sodio, carbonato de potasio (Appleton y Simmons, 2016).

7.3.2. Glicerina

Esta proviene del glicerol, en el cual los tres átomos de hidrógeno son reemplazados por un radical univalente del más alto miembro de la cadena de ácidos grasos.

Figura 2. **Reacción para obtención de glicerina a partir de grasa o aceites**



Fuente: Thomssen (2016). *Soap-Making Manual: A practical handbook on the control in the modern soap.*

7.3.3. Grasas y aceites

Para iniciar se debe definir la diferencia entre aceite y sebo, el aceite da la impresión de ser un líquido, a temperatura ambiente es un fluido viscoso, por el contrario, el sebo o grasa, es un sólido a temperatura ambiente (Thomssen, 2016).

7.3.3.1. Sebo

Este nombre lo reciben los extractos de grasas solidas provenientes del ganado, caballos o cabras. Su calidad es muy variable dependiendo de la temporada del año, la alimentación y edad del animal. Es encontrado en el mercado como aceite comestible e incomedible. La mejor calidad de sebos es aquellos con elevada blancura tras ser expuestos a la luz, pero usualmente tiene un color amarillo, el sebo es por mucho la grasa más utilizada para la fabricación de jabón (Thomssen, 2016).

El sebo se utiliza en la fabricación de jabones, proviene mayormente de América, Australia y Nueva Zelanda. Posee un color amarillo fuerte y un fuerte olor peculiar, aporta un buen cuerpo y dureza al jabón, esta dureza depende del grado de Titer de la grasa (Appleton y Simmons, 2016).

7.3.3.2. Grasa vegetal

Este tipo de grasas son las segundas en orden de importancia de las materias primas utilizadas para producir jabón, en algunas ocasiones son utilizadas de forma individual, pero normalmente son utilizadas en combinación con el sebo. Normalmente los jabones obtenidos de estas grasas con ligeramente más blandos que los fabricados con sebo, y no tienen olor (Thomssen, 2016).

7.3.3.3. Aceites

Los distintos tipos de aceite que se comercializan en el mundo del jabón son: aceite de coco, de almendra, de palma, se utilizan combinados con las grasas ordinarias utilizadas en la fabricación de jabón. Los aceites producen jabones con propiedades físicas especiales (Appleton y Simmons, 2016).

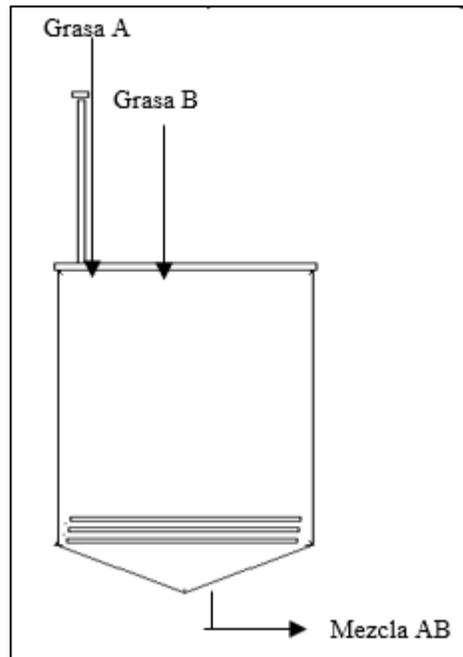
7.4. Proceso de fabricación del jabón

Este proceso de fabricación ha cambiado logrando una tecnificación importante en los últimos años, consta de distintas fases importantes las cuales se detallan a continuación.

7.4.1. Mezcla de grasas

Es utilizado para mejorar las cualidades de limpieza del jabón, esto depende de la longitud de la cadena de las grasas utilizadas, este proceso consiste en mezclar en estado líquido las distintas grasas que se utilizaran para producir el jabón (Appleton y Simmons, 2016).

Figura 3. **Tanque estándar para mezcla de grasas**

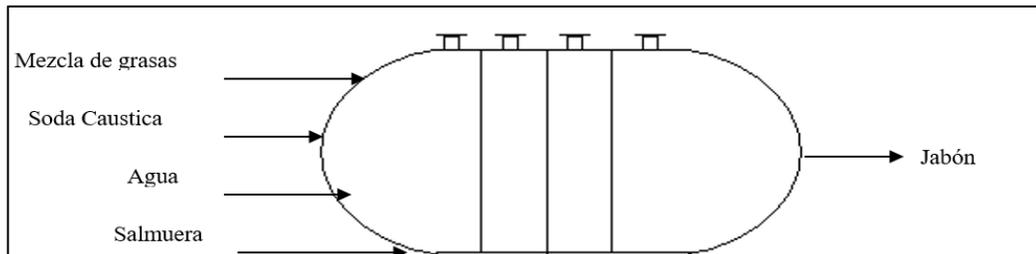


Fuente: elaboración propia.

7.4.2. **Saponificación**

Es la reacción en la que se obtiene una sal de los ácidos grasos. De dicha reacción se obtiene glicerina, agua y jabón. Esta reacción puede ser llevada a cabo de forma continua a través de un reactor presurizado en el cual se mezclan con un flujo continuo los distintos materiales, o por lotes el cual consiste en mezclar las distintas materias primas en un reactor abierto, el proceso debe terminar antes de iniciar un nuevo lote (Thomssen, 2016).

Figura 4. **Tanque de saponificación de grasa**

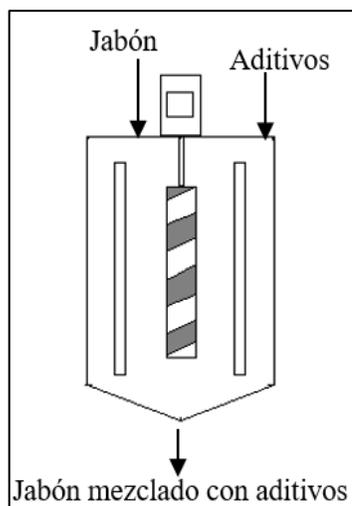


Fuente: elaboración propia.

7.4.3. **Mezclado con aditivos**

Consiste en agregar y mezclar de forma uniforme distintos ingredientes como potenciadores de lavado, agentes endurecedores, colorantes, abrillantadores ópticos, y materiales de relleno (Appleton y Simmons, 2016).

Figura 5. **Crutcher**

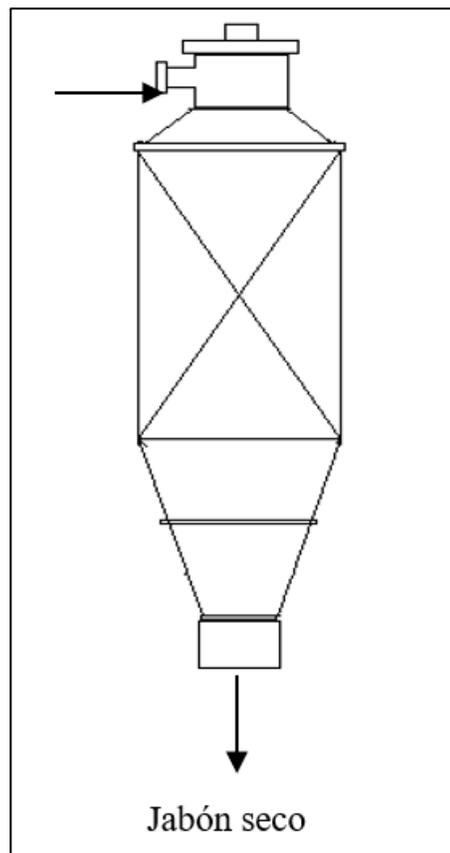


Fuente: elaboración propia.

7.4.4. Secado

Consiste en retirar el exceso de humedad a través de aplicar calor a través de intercambiadores de calor y luego atomizar el jabón en una cámara con presión negativa. Producto de esto se obtiene jabón sólido con una humedad alrededor de 15 - 21 %.

Figura 6. Torre de secado

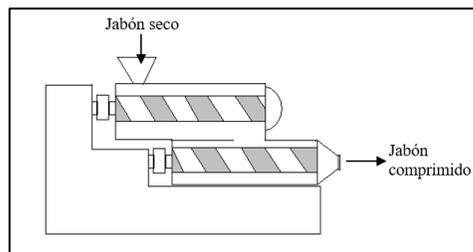


Fuente: elaboración propia.

7.4.5. Refinado

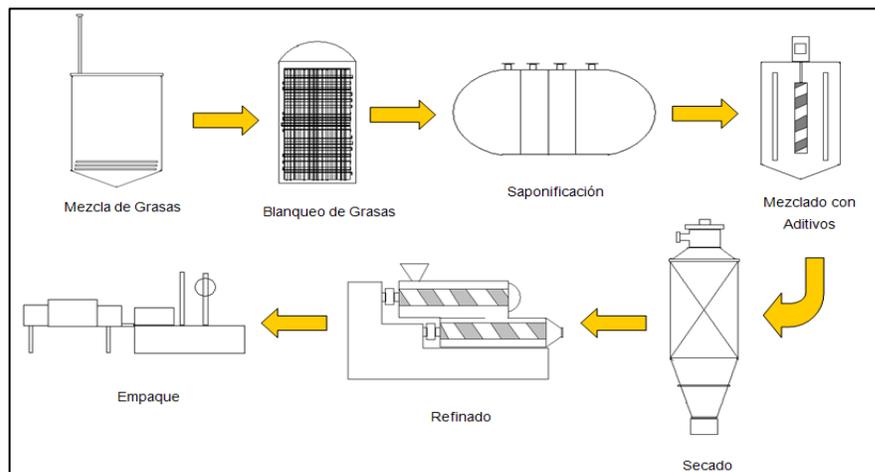
Compacta, mezcla y mejora las características del jabón a través de trabajo mecánico, exponiendo el jabón sólido a elevadas temperaturas y presiones. En esta etapa se pueden mezclar fragancias, rellenos y materiales para mejora de lavado.

Figura 7. Compresoras



Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Diagrama del proceso de producción de jabón



Fuente: elaboración propia.

7.5. Calderas de vapor

Son definidas como un aparato a presión que utiliza el calor que procede de alguna fuente de calor y lo transforma en vapor de agua útil (Santiago, 2014).

7.5.1. Tipos de calderas de vapor

Las calderas pueden dividirse por la disposición de sus fluidos que suelen dividirse en dos grandes grupos: Calderas de tubos de humo también llamadas pirotubulares y calderas de tubos de agua también llamadas acuotubulares (Santiago, 2014). Y también se pueden dividir por su tecnología:

7.5.1.1. Calderas pirotubulares

Son un cilindro de agua que es atravesado en su longitud por un haz de tubos, a través de los cuales circulan los humos, y ellos están rodeados por agua (Santiago, 2014).

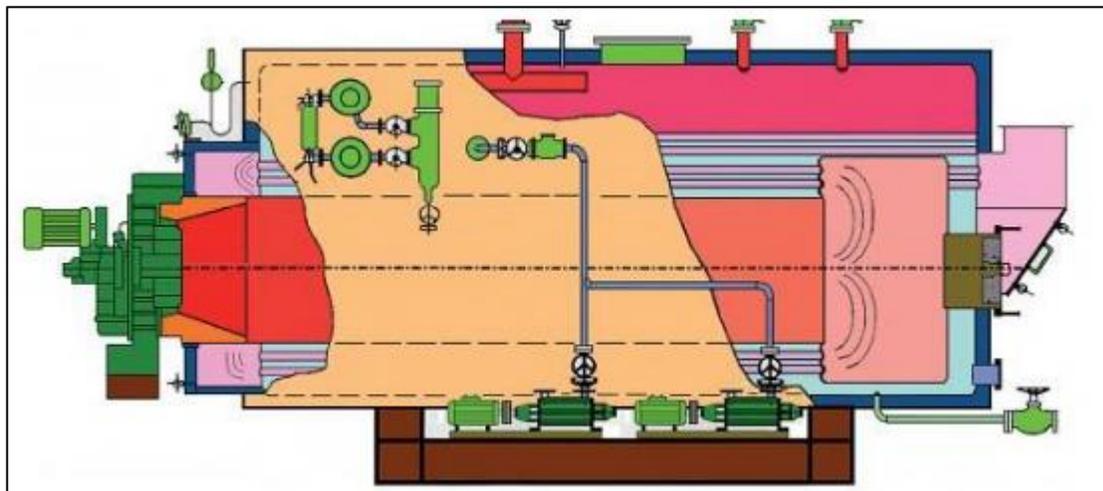
Su presión de operación es principalmente debajo de los 22 bares. Sus gases de combustión son transportados por el interior de los tubos, y el agua está en el recipiente atravesado por los tubos (Uceda, 2014).

El volumen de agua en este tipo de equipos actúa como un almacén de energía que puede abastecer las demandas de vapor (Santiago, 2014).

Tienen un elevado volumen de agua, y ese elevado volumen les permite una mejor adaptación a las variaciones de instalación que otro tipo de calderas. El vapor que producen tiene un título cercano a 1, y el contenido de agua por

unidad de masa es de 3 %, un valor bajo. La calidad del agua de alimentación no es tan exigente como las de otros tipos de calderas (Uceda, 2014).

Figura 9. **Sección de una caldera pirotubular**



Fuente: Sanz (2018). *Manual práctico del operador de calderas industriales*.

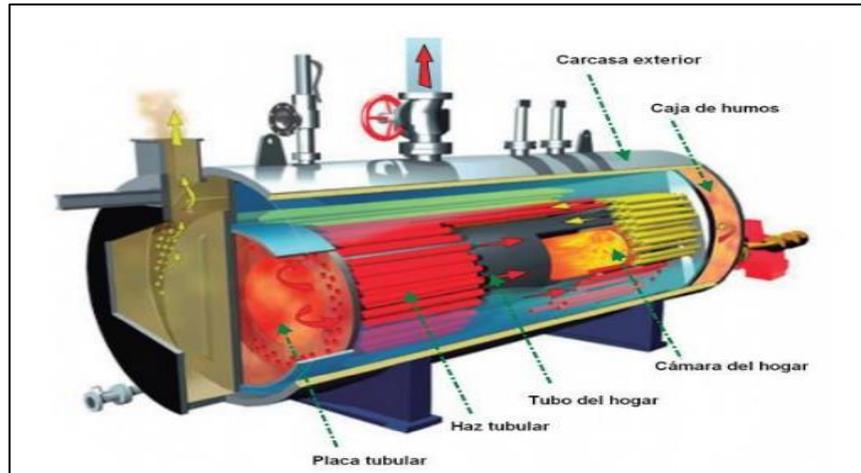
7.5.1.1.1. División

- Calderas horizontales: el haz de tubos está dispuesto de forma horizontal.
- Calderas verticales: el haz de tubos está dispuesto de forma vertical.
- Calderas de dos pasos de gases: Los gases de combustión inician la función de calentamiento de agua en la cámara de combustión para luego pasar por tubos con la misma función. (Uceda, 2014).
- Calderas de tres pasos de gases: Al igual que las de dos pasos inician calentando agua en la cámara de combustión, luego pasan a una cámara de tubos, para pasar finalizar por una segunda cámara de tubos (Uceda, 2014).

7.5.1.1.2. Partes

- Carcasa exterior: es la parte exterior con forma de cilindro y contiene insolación para que no tenga pérdidas de calor.
- Placas tubulares: placas laterales, forman en conjunto con la carcasa el cuerpo de presión.
- Tubo de hogar: en este se tiene lugar la combustión, es el elemento más importante, pero también es sumamente delicada, su forma geométrica determina la buena formación de la llama, debe tener gran resistencia a la dilatación. Suelen ser de forma circular, y debe ser más larga que la llama.
- Cámara de hogar: esta recibe los humos que vienen del hogar, se deben tomar en cuenta las altas temperaturas en su interior para el diseño. Esta cámara puede ser:
 - Cámara seca: el hogar no está enfriada por agua.
 - Cámara semiseca: parcialmente enfriada por agua.
 - Cámara húmeda: totalmente enfriada por agua.
- Haz tubular: tienen la función de llevar los gases de combustión de una caja de humos a otra.
- Puertas de registro: estas puertas deben ir del lado del fuego y del agua, su función es permitir la accesibilidad de la caldera para su limpieza y mantenimiento (Sanz, 2018).

Figura 10. **Partes de la caldera pirotubular**



Fuente: Sanz (2018). *Manual práctico del operador de calderas industriales*.

7.5.1.2. **Calderas acuatubulares**

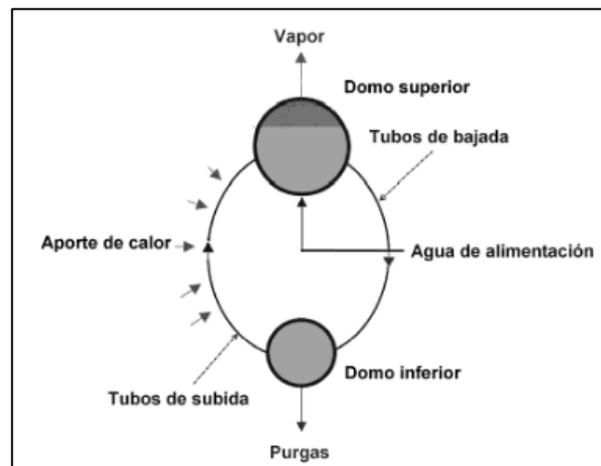
Son las que el agua está contenida en los tubos de acero que están rodeados por la llama y los gases calientes, con estas calderas se pueden producir vapor a elevadas presiones. Su tamaño es más compacto, pero tienen una carga térmica superior (Santiago, 2014).

También se les define como las calderas en que el agua se desplaza por los tubos mediante el calentamiento por el contrario los gases de combustión se desplazan por el exterior de los mismos. Su aplicación es en los rangos de presión de trabajo mayores a 22bar (Uceda, 2014).

Su volumen de agua es bajo, su título de vapor es de 0.85 un valor bajo, esto indica que su contenido de agua por unidad de masa es alto, alrededor de 15 % en condiciones normales y originales del equipo. Su exigencia de calidad

de agua para alimentación es muy alta en relación con otro tipo de calderas (Uceda, 2014).

Figura 11. **Esquema del funcionamiento de una caldera acuatubular**



Fuente: Sanz (2018). *Manual práctico del operador de calderas industriales*.

7.5.1.2.1. **Parámetros de funcionamiento y características**

- Temperatura de vapor sobrecalentado puede ser de 550° C y las presiones serán de 35 a 185 Kg/cm².
- La producción de vapor es de 20 a 200Tm/hora, y muestran un rendimiento de 90 %.
- Pueden utilizar combustibles sólidos.

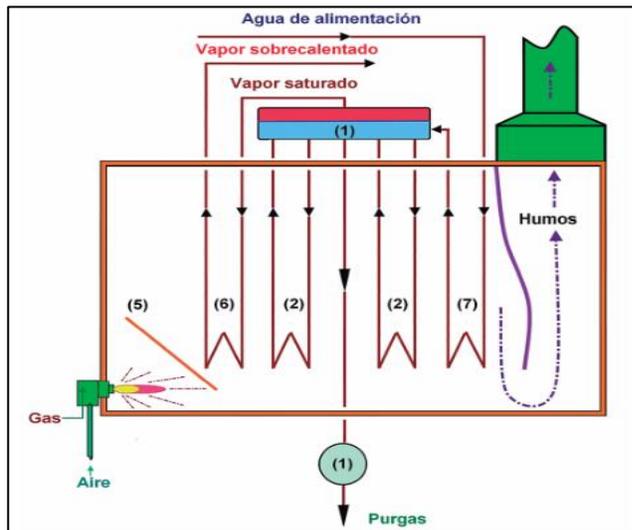
- El domo no necesita tener superficie tubular de calefacción, suelen tener dimensiones de diámetro menores que las pirotubulares eso hace que soporte mayores presiones (Sanz, 2018).

7.5.1.2.2. Partes

- Domo (1): es el depósito donde se acumula el agua y vapor.
- Haz vaporizador (2): son los tubos donde se realiza la convección de la caldera desde el domo inferior al superior.
- Colectores (3): reciben el agua de varios tubos para juntar todas las entradas en un único tubo hacia el domo.
- Hogar (4): en él se lleva a cabo la combustión, sus paredes pueden ser de materiales refractarios, o de parte de los tubos del haz de tubos.
- Pantalla (5): elementos para guiar los humos.
- Sobrecalentador (6): se encarga de elevar la temperatura de vapor arriba de la de saturación, lo forman un sistema de tubos en los cuales inciden los humos calientes.
- Economizador (7): elemento opcional recupera el calor sensible de los gases de salida para aumentar la temperatura del agua o aire de alimentación.

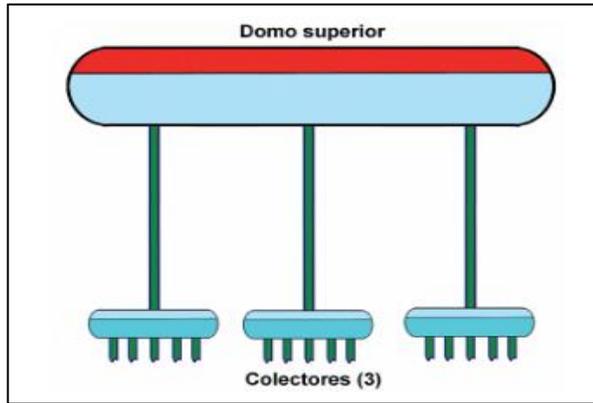
- Calentador de aire (8): es un intercambiador de calor, utilizado para el precalentamiento de aire antes de ingresar al quemador, este aprovecha el calor residual de los humos de la chimenea.
- Recalentador (9): este eleva la temperatura de un vapor que viene del proceso sin entrar a la caldera (Sanz, 2018).

Figura 12. **Esquema de una caldera acuatubular**



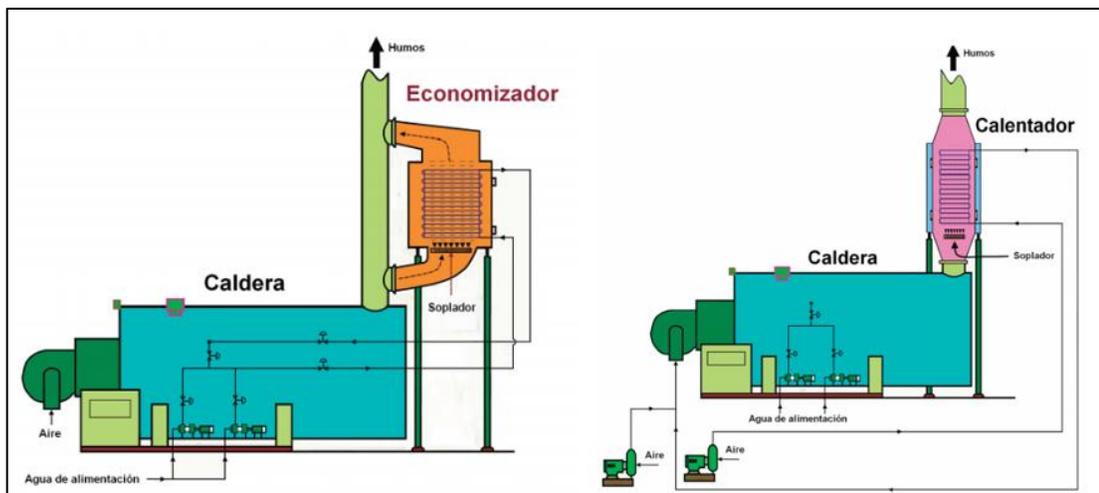
Fuente: Sanz (2018). *Manual práctico del operador de calderas industriales.*

Figura 13. **Esquema de un colector**



Fuente: Sanz (2018). *Manual práctico del operador de calderas industriales.*

Figura 14. **Esquema de un economizador y calentador**



Fuente: Sanz (2018). *Manual práctico del operador de calderas industriales.*

7.5.2. División de calderas por su tecnología

Dependiendo de la temperatura a la cual las calderas calientan el agua producto del calor de combustión del combustible que utilizan pueden ser de agua caliente (temperaturas debajo de 95°C) o de agua sobrecalentada (por encima de 100°C) estas últimas es el caso de interés de la investigación actual (calderas de vapor) (Uceda, 2014).

7.5.3. Aspectos de diseño, selección de potencia

La potencia nominal puede variar dependiendo la presión de trabajo del generador, y de la temperatura del agua, la potencia se determina al multiplicar el vapor producido por la diferencia de entalpia de vapor menos la entalpia del agua de alimentación, dividiendo el resultado entre las pérdidas de la caldera:

$$P = (m \cdot (h_{\text{vapor}} - h_{\text{agua}})) / \eta$$

Donde:

P= potencia térmica de combustión (KW/h)

m= flujo másico de vapor saturado (Kg/h)

h_{vapor} =entalpia de vapor saturado a la presión máxima de trabajo (KW/Kg)

h_{agua} =entalpia del agua a temperatura de alimentación (KW/Kg) (Sanz, 2018).

7.6. Combustión

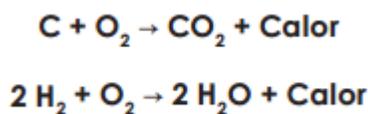
La mayoría de las actividades de la sociedad están basadas en el uso de los distintos tipos de energía, desde la iluminación de nuestros hogares, utilización de motores eléctricos, equipos tecnológicos, y en fuentes de demandas térmicas.

Para las demandas térmicas es fundamental el proceso de combustión.

La combustión es una serie de procesos fisicoquímicos en los que el combustible se combina con un comburente (oxígeno), generando la formación de calor, luz y productos resultantes de la oxidación.

La reacción de combustión corresponde a la oxidación del carbón y del hidrógeno, a través del oxígeno (Domínguez, 2004).

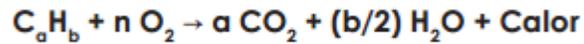
Figura 15. **Reacción de combustión**



Fuente: Domínguez (2013). *Calderas Industriales Eficientes*.

Pero en la naturaleza no se encuentran habitualmente en estado puro, por lo que los combustibles tienen una composición general que se puede expresar como C_aH_b , y su reacción es:

Figura 16. **Reacción de general de combustión**



Fuente: Domínguez (2013). *Calderas Industriales Eficientes*.

7.6.1. **Fases de la combustión**

Esta anterior reacción de combustión se divide en tres fases que son:

- Fase de pre-reacción: en esta fase el combustible es descompuesto dando lugar a formación de radicales, los cuales son compuestos inestables y activos, de esta forma el carbono y el hidrógeno pueden reaccionar con el oxígeno. Los radicales pueden ser: H+, CO-, CH3+, OH-, O-.
- Fase de oxidación: se combinan los radicales del oxígeno de forma exotérmica formando la llama.
- Fase de terminación: en la cual se forman los componentes finales de una forma estable, obteniendo con esto los gases de combustión (Domínguez, 2004).

7.6.2. **Parámetros de temperatura en combustibles**

Tenemos dos parámetros importantes en la temperatura de los combustibles

- Temperatura de gasificación: es la temperatura en la que se da la gasificación del combustible.
- Temperatura de ignición: es la temperatura en la que el combustible en estado gaseoso se inflama de forma espontánea.

7.6.3. Tipos de combustión

- Combustión completa: en ella el combustible es quemado hasta el máximo grados posibles en la oxidación, por lo tanto, no se encontrará combustible en los humos.
- Combustión incompleta: en este tipo el combustible no es oxidado completamente, provocando inquemados en los humos que aún se siguen oxidando, este tipo de sustancias son los más comunes contaminantes.
- Combustión estequiométrica: es la reacción en la cual se utilizan las cantidades exactas de agentes de combustión para buscar no producir inquemados.
- Combustión con exceso de aire: es aquella reacción de combustión que se lleva a cabo en presencia de exceso de aire con el objetivo de tener una combustión completa.

Tabla I. **Porcentaje de exceso de aire por tipo de combustible**

Combustible	Exceso de aire (%)	CO ₂ (%)
Gaseoso	5-15	10-8
Líquido	15-25	14-12
Carbón	30-50	17-13
Biomasa (madera)	40-70	16-11

Fuente: Sanz (2018). *Manual práctico del operador de calderas industriales*.

Con la siguiente ecuación es posible determinar el exceso de aire con el que trabaja una caldera, todo esto en función de concentraciones de oxígeno y de CO₂ de los humos de combustión.

$$n = \frac{3,76 \times \% O_2}{1 - \% CO_2 - 4,76 \times \% O_2}$$

- Combustión con deficiencia de aire: es aquella reacción de combustión que se lleva a cabo en presencia de exceso de aire con el objetivo de tener una combustión completa.

7.6.4. Analizadores de gases de la combustión

Para obtener esos datos se utilizan equipos denominados analizadores de gases, dependiendo de su antigüedad pueden basarse de una muestra de humos tomada por succión en un orificio en la chimenea, o los modernos que se basan en fenómenos ópticos que pueden dar datos en tiempo real (Sanz, 2018).

7.6.4.1. Medición del CO₂, O₂ y opacidad

El antiguo equipo es denominado ORSAT de medida volumétrica, este absorbe de muestras de gas y a través de una solución indicadora da el dato de la concentración del gas. También consta con una bomba para analizar el humo a partir de la escala Bacharach que sirve la cantidad de inquemados en la reacción (Sanz, 2018).

Tabla II. Características de la combustión

N.º de Bacharach	Características de la combustión
1	Excelente. Hollín prácticamente nulo.
2	Buena. Hollín presente en valores muy reducidos.
3	Mediana. Hollín presente en cantidad que requiere una limpieza anual.
4	Pobre. El humo empieza a ser visible y se aprecia un ensuciamiento rápido.
5	Muy pobre. La cantidad de hollín hace necesarias varias limpiezas anuales.

Fuente: Sanz (2018). *Manual práctico del operador de calderas industriales.*

7.6.4.2. Medición del CO

Esta medición se realiza a los humos, se realiza a los combustibles gaseosos por ser imposible de detectar de forma visual, con anterioridad se utilizaban métodos de oxidación y coloración química. En la actualidad se emplean sondas electrónicas que miden concentraciones de cada tipo de gas en los humos de combustión (Sanz, 2018).

7.6.5. Parámetros de combustión

- Combustión con deficiencia de aire: es aquella reacción de combustión que se lleva a cabo en presencia de exceso de aire con el objetivo de tener una combustión completa.
- Temperatura de inflamación: temperatura mínima en la que un material inflamable desprende la cantidad necesaria de vapor para formar una mezcla inflamable con el aire de sus alrededores.
- Temperatura de auto ignición: es la temperatura a presión igual a una atmosfera, en la que alguna sustancia en contacto con el aire llegara a arder de forma espontánea si ninguna fuente de ignición.
- Poder comburívoro: se define como el mínimo volumen de aire seco necesario para la combustión en condiciones normales.
- Poder fumígeno: el volumen de los distintos productos que se obtienen de la combustión de la unidad de combustible (Domínguez, 2004).
- Coeficiente de exceso de aire (n): está definida como la relación existente entre el volumen de aire en una combustión y el volumen de aire en la reacción estequiometria.
 - Si n es igual a uno esto indica que se tiene la cantidad justa de aire para llevar a cabo la combustión.
 - Ni n menor a uno se entiende que la cantidad de aire presente en la combustión no es suficiente.
 - Y si n mayor a uno, esto indica que se tiene exceso de aire en la combustión (Domínguez, 2004).

- Rendimiento de la combustión: es la relación existente entre el calor útil y el calor que aporta el combustible, esto presentado en porcentaje (Domínguez, 2004).

7.6.6. Pérdidas de calor en la combustión

- Pérdidas por radiación: son las pérdidas que tiene la combustión por las emisiones de calor hacia el entorno.
- Pérdidas en gases quemados: las pérdidas que se dan en los productos de la combustión y los gases inertes, ya que estos gases son evacuados a temperaturas mayores a la entrada del combustible y el comburente.
- Pérdidas en el vapor de agua: esta pérdida es generada por el vapor de agua generado en la combustión (Domínguez, 2004).

7.7. Límites de inflamabilidad

Son aquellas concentraciones mínimas o máximas de un gas mezclado con aire en las que pueden ser inflamables o no.

- Límite inferior de inflamabilidad: es la concentración mínima de gas mezclado con aire en la que no existe inflamabilidad al ponerse en contacto cualquier fuente de ignición.
- Límite superior de inflamabilidad: es la máxima concentración de vapor en el aire a partir de la cual no se da la combustión al tener contacto con una fuente de ignición (Domínguez, 2004).

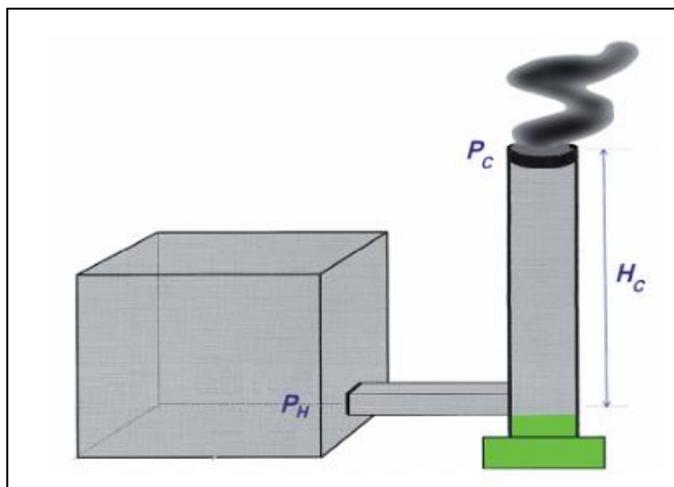
7.8. Tiro natural y tiro forzado

El tiro es definido como la facilidad o dificultad para que los humos sean llevados del interior de la caldera al exterior.

- Tiro Natural: la depresión que se origina en la parte baja de la chimenea, por la diferencia de presiones creadas por los humos contenidos en la misma y la columna de aire exterior, igual altura que la chimenea (H_c), está causada por la menor densidad de los humos calientes y la densidad del aire ambiente, que es más frío.

Como la presión exterior (P_c) es mayor que la que hay interior en la base de la chimenea (P_h), los humos experimentan un empuje que tiende a evacuarlos en sentido ascendente por la chimenea; este empuje es el tiro natural (Sanz, 2018, p. 65).

Figura 17. Diagrama de tiro natural

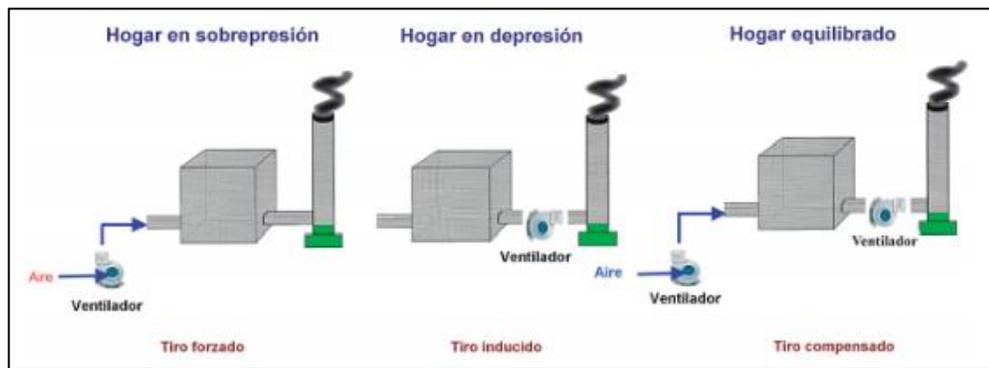


Fuente: Sanz (2018). *Manual práctico del operador de calderas industriales*.

La diferencia ($P_c - P_h$) se debe a la diferencia de pesos de ambas columnas, el tiro natural depende directamente de la altura de la chimenea.

- Tiro forzado: este es utilizado cuando el tiro natural no es suficiente para extraer los humos de la cámara de combustión, para lograr esa evacuación se necesitan ventiladores del tipo centrífugos (Sanz, 2018).

Figura 18. Diagrama de tiro forzado



Fuente: Sanz (2018). *Manual práctico del operador de calderas industriales*.

7.9. Quemadores

Es el elemento que se encarga de hacer la mezcla del combustible con el carburante de forma adecuada, con el objetivo de logra una reacción de combustión completa (Sanz, 2018).

- Funciones del quemador:
 - Aporta el aire y combustible a la cámara de combustión.
 - Mezcla el combustible y el aire de forma adecuada.
 - Enciende la combustión.

- Desplaza los productos de la combustión por la cámara de combustión (Sanz, 2018).

7.10. Rendimiento de la combustión

Para determinar el rendimiento de la reacción se utiliza la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{[\text{PCI} - \text{Pérdidas}] \times 100}{\text{PCI}} \%$$

Donde:

PCI=Poder calorífico inferior.

Pérdidas= Perdidas en la combustión (Sanz, 2018).

7.10.1. Pérdidas

- Pérdidas por calor sensible de humos (P1) estas dependen de la temperatura y caudal de los humos.
- Perdidas por inquemados (P2) son calculados de la siguiente forma:

$$P_{\text{inquemados}} = \frac{21}{21 - [\text{O}_2]} \times \left(\frac{[\text{CO}]}{3100} + \frac{[\text{hidrocarburos}]}{1000} + \frac{\text{Opacidad}}{65} \right) \%$$

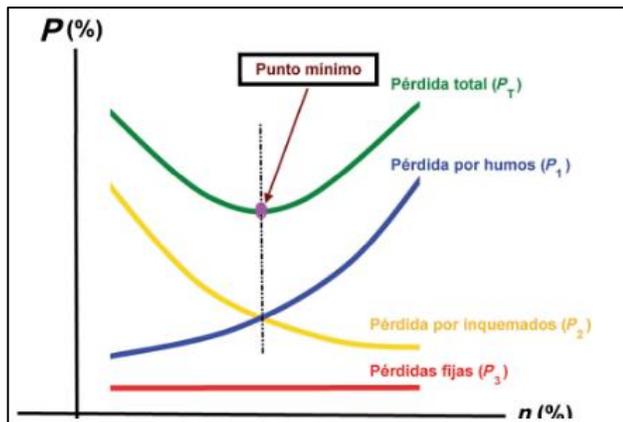
Donde:

$[\text{O}_2]$: Concentración en porcentaje de oxígeno en los humos.

$[\text{CO}]$: Concentración de monóxido de carbono en los humos en ppm.

[Hidrocarburos]: Concentración en porcentaje de hidrocarburos en los humos.
Opacidad: valor relativo dependiendo de un patron (Sanz, 2018).

Figura 19. Pérdidas (n) en una caldera



Fuente: Sanz (2018). *Manual práctico del operador de calderas industriales*.

7.11. Combustibles

Los combustibles han sido muy importantes en la historia de la humanidad, con la finalidad de satisfacer las demandas térmicas en forma de calor, y también para transformar el calor en trabajo o energía eléctrica.

Obtener esas energías tiene un costo económico, social y medio ambiental, para determinar estos costos se debe saber la fuente de energía, y con esto elegir la mejor opción posible de combustible.

Un combustible es un material capaz de liberar energía calorífica al reaccionar con oxígeno. Dicho de otro modo, son las sustancias que tienen tendencia a quemarse (Domínguez, 2004).

7.11.1. División de los combustibles

Existen distintos tipos de combustible, pero las hay tres divisiones donde podemos englobarlos.

- Combustibles sólidos: todas aquellas sustancias que las fuerzas de atracción de sus moléculas son más altas que las fuerzas que originan movimientos moleculares.
- Combustibles líquidos: todas aquellas sustancias que las fuerzas de movimientos moleculares son mayores que las fuerzas de atracción, lo que permite el movimiento molecular, se caracterizan por no tener una forma definida (Domínguez, 2004).
- Combustibles gaseosos: las sustancias que las fuerzas de movimientos moleculares son mucho mayores a las fuerzas de atracción entre moléculas. Sus moléculas tienen mucha distancia entre ellas. Estos tienen volumen y forma no definida. Ejercen una presión sobre las paredes del recipiente que los contiene (Domínguez, 2004).

7.11.2. Propiedades de los combustibles

Las combustibles tienen distintas propiedades que los caracterizan y los hacen ser identificados, a continuación, las más importantes.

- Poder calorífico: es la característica de mayor importancia de cualquier combustible. Se refiere a la cantidad de calor generado en la combustión completa de una unidad dada de combustible (Btu/lb) (Noguera, 2004).

- Poder calorífico superior (Hs): se le conoce como la cantidad de energía proporcionada por unidad de combustible enfriando los gases quemados hasta alcanzar la temperatura de 00C a presión atmosférica (Noguera, 2004).
- Poder calorífico inferior (Hi): es el poder calorífico superior pero sin tomar en cuenta el calor latente de condensación del vapor de agua producido en la combustión (Noguera, 2004).

Tabla III. **Poder calorífico de combustibles comunes**

Combustible	Unidad	Hi	Hs
Gas natural	(kWh/kg)	13,05	14,43
Propano comercial	(kWh/kg)	12,82	13,92
Butano comercial	(kWh/kg)	12,69	13,74
Gasóleo C	(kWh/kg)	11,56	12,23

Fuente: Domínguez (2004). *Calderas Industriales Eficientes*.

7.12. Agua de alimentación de calderas

A continuación, se muestran algunos detalles importantes a destacar del agua de alimentación de calderas.

7.12.1. Ciclo de agua de calderas

- La caldera recibe agua de alimentación previamente tratada, y una pequeña cantidad de condensados recuperados.

- El agua es convertida en vapor en el interior de la caldera.
- El agua líquida dentro de la caldera es cargada de las sustancias que contenía el agua que fue vaporizada.
- Se debe desconcentrar el agua a partir de purgas sistemáticas para eliminar el agua con exceso de sustancias (Cid, 2004).

7.12.2. Principales impurezas contenidas en el agua

Existen algunos componentes que contaminan el agua de las calderas, abajo se encuentra más información de algunos de ellos.

- Calcio y Magnesio

Son las sustancias más importantes que contienen todas las aguas naturales, estas pueden generar dureza total que es la cantidad de calcio y magnesio disuelto, dureza permanente, que son las sales de calcio y magnesio que quedan en el agua al finalizar un proceso de ebullición prologada, y dureza temporal son sales que precipitan en el proceso de ebullición (Cid, 2004).

- Materiales en suspensión

Son pequeñas partículas disueltas en el agua que están en el rango de tamaño de 0.001-0.2 micrómetros, y que pueden formar incrustación en el interior de la caldera (Cid, 2004).

- Sulfatos

Aumentan la salinidad del agua, pueden aportar precipitación de sulfato cálcico en el interior de la caldera, pueden originar costras duras en la superficie, la eliminación de esas costras es muy complicado (Cid, 2004).

- Hierro y cobre

Su presencia puede incrustarse en las paredes de la caldera, también pueden formar corrosiones en los tubos (Cid, 2004).

- Materia orgánica

Su presencia puede ocasionar una situación peligrosa, al ser unos aislantes al calor al estar presentes pueden provocar sobrecalentamiento y dañar la caldera. (Cid, 2004).

- Sílice

En algunas condiciones de baja alcalinidad y concentración alta de sílice y temperaturas elevadas la sílice precipita con el sulfato de calcio y puede formar incrustaciones muy duras (Cid, 2004).

7.13. Tratamientos fisicoquímicos del agua

Los tratamientos más utilizados son:

- Clarificación.
- Desendurecimiento.

- Des carbonatación.
- Desmineralización.
- Desgasificación (Cid, 2004).

7.14. Eficiencia energética en calderas

La eficiencia energética en calderas se obtiene al dividir la potencia útil dentro de la cantidad de calor aportado y puede ser de dos formas:

- Método directo:

$$\eta = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{aportada}}}$$

- Método indirecto:

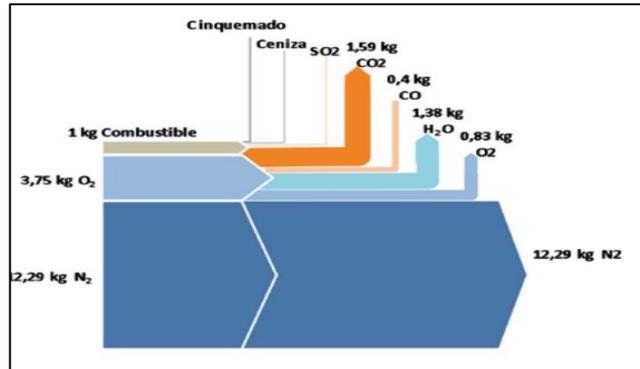
$$\eta = 1 - \frac{P_{\text{pérdidas}}}{P_{\text{aportada}}}$$

El rendimiento se calcula a partir de la carga nominal, pero en operación se obtiene un rendimiento máximo entre 70 - 80 % de la carga nominal (Agencia Andaluza de la Energía, 2007).

7.14.1. Balance de masa

En este tipo de equipos el balance de masa permite conocer los flujos y la composición de estos, este es el paso previo al balance energético (Agencia Andaluza de la Energía, 2007).

Figura 20. **Balance de masa de una combustión incompleta con exceso de aire**



Fuente: Agencia Andaluza de la Energía (2007). *Metodología para la elaboración de auditorías energéticas en la industria.*

7.14.2. Balance de energía

En este balance se aplica el primer principio de la termodinámica, es la igualdad de la suma de los calores entrantes más los calores de reacción y la suma de los calores salientes (Agencia Andaluza de la Energía, 2007).

Figura 21. **Esquema de balance de energía**



Fuente: Agencia Andaluza de la Energía (2007). *Metodología para la elaboración de auditorías energéticas en la industria.*

7.15. Medidas de ahorro y eficiencia energética

Hay distintas medidas para la disminución del gasto combustible en las calderas las cuales se presentan a continuación:

7.15.1. Control de la combustión

Se pretende liberar la mayor cantidad de energía que tenga el combustible, al lograr una completa combustión, utilizando exceso de aire, y disminuir la energía desperdiciada en los humos (Agencia Andaluza de la Energía, 2007).

Este control se puede lograr a partir de la implementación tecnológica de mecanismos de control que analicen de forma periódica los gases de combustión y realizando los respectivos ajustes para lograr los parámetros deseados en los gases.

También se pueden analizar los gases de forma continua instalando analizadores de oxígeno y de CO en los humos generados (Agencia Andaluza de la Energía, 2007).

7.15.2. Minimización de purgas

La finalidad de las purgas es mantener en parámetros adecuados la concentración de sólidos, la purga extrae el agua que tiene concentraciones elevadas de sólido dentro de la caldera y con esa agua se tienen pérdidas de calor.

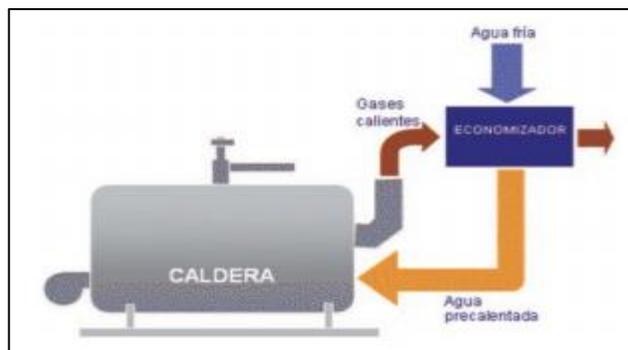
Para minimizar estas pérdidas es necesario determinar la cantidad óptima de purgas necesarias para mantener las condiciones del agua en parámetros

óptimos, pero que esto no impacte en gran medida a la eficiencia de la caldera (Agencia Andaluza de la Energía, 2007).

7.15.3. Recuperación del calor residual de gases

Consiste en instalar un intercambiador de calor tubular en la salida de los gases de combustión, en dicho intercambiador se hace circular agua que absorbe el calor de los gases de salida, esa agua con una mayor temperatura es utilizada en el proceso de generación de vapor, y con esto se obtienen ahorros de combustible (Agencia Andaluza de la Energía, 2007).

Figura 22. Esquema de un sistema economizador



Fuente: Agencia Andaluza de la Energía (2007). *Metodología para la elaboración de auditorías energéticas en la industria.*

7.15.4. Minimizar pérdidas por paredes

Un adecuado mantenimiento del refractario es muy importante para generar ahorros energéticos en la caldera, si no se tienen en adecuadas condiciones pueden causar pérdidas térmicas. Aislar un horno de forma adecuada mejora la eficiencia térmica hasta en 50 % (Agencia Andaluza de la Energía, 2007).

7.16. Energías renovables no convencionales

La principal característica de este tipo de energías es que en los procesos de transformación y aprovechamiento estos recursos no se consumen ni se agotan en escalas humanas de tiempo.

Este tipo de fuentes de energía son:

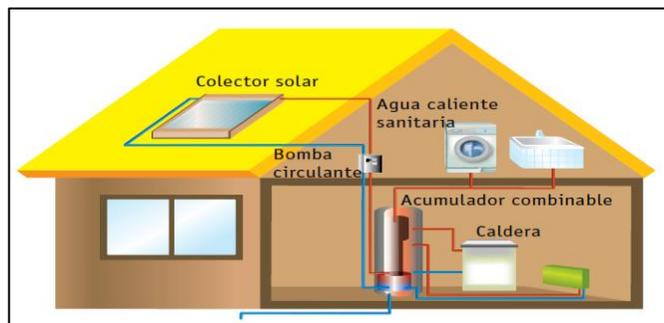
- Hidráulica
- Solar térmica
- Solar fotovoltaica
- Eólica
- Océanos

Tienen un lento desarrollo y la causa es que su utilización es estacional (Jara, 2006).

7.16.1. Energía térmica solar

Todas las energías renovables son originadas de la energía solar, todas son aprovechamientos indirectos de la solar, pero la energía solar ofrece una forma de utilizar la radiación solar como vía de calentamiento, y con esto disminuir el uso de combustibles, y electricidad. La forma de aprovechar la energía solar más antigua es al calentar nuestros hogares, pero también se utiliza en la industria para obtención de sal, fabricación de adobes, entre otros (Jara, 2006).

Figura 23. **Aplicación de energía solar en viviendas**



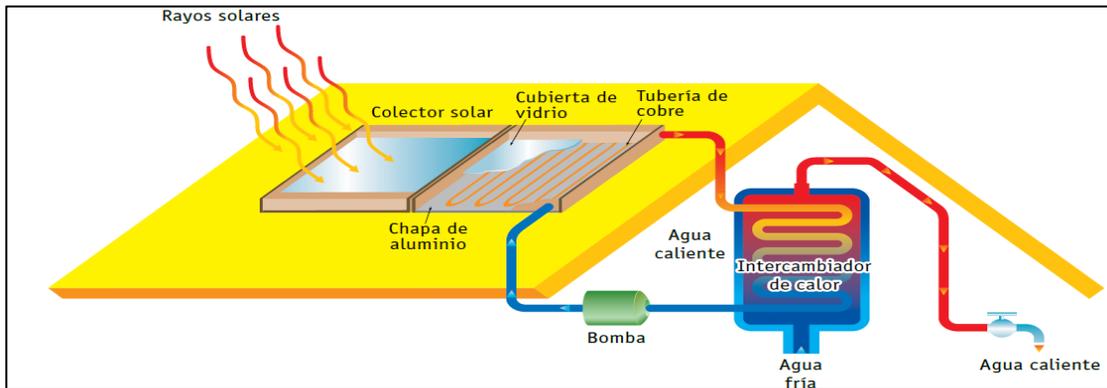
Fuente: Jara (2006). *Introducción a las energías renovables no convencionales*.

Para captar de forma más eficiente la energía solar térmica se cuenta con técnicas que la captan, almacenan, y la transmiten.

7.16.1.1. Tecnología solar activa de baja temperatura

Se basa en el uso de colectores de placa plana, es utilizada para temperaturas en el rango de 50 - 60° C, consiste en un colector que capta la radiación solar, un sistema de almacenamiento, transporte, y utilización. El panel es inclinado y orientado de una forma que aproveche de mejor manera la energía disponible (Jara, 2006).

Figura 24. **Aplicación de tecnología solar activa de baja temperatura**



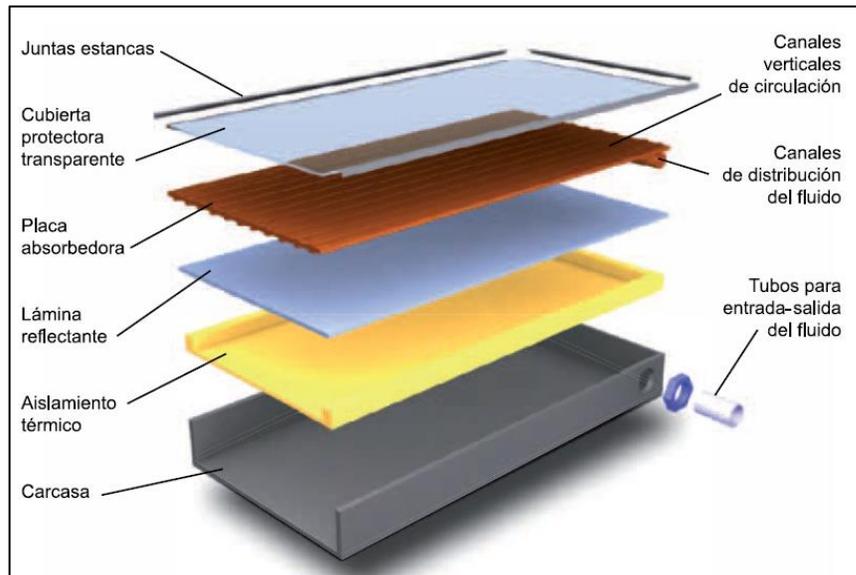
Fuente: Jara (2006). *Introducción a las energías renovables no convencionales*.

7.16.1.2. **Colectores de baja temperatura**

Estos captan la energía térmica solar, e impiden su salida al exterior constan de las siguientes partes:

- Cubierta frontal transparente.
- Placa captadora o superficie absorbente.
- Un circuito hidráulico por donde circula el fluido que ha de transferir el calor captado por la placa.
- Dispositivos de aislamiento térmico.
- Carcasa exterior protectora (Carta, Calero, Colmenar, y Castro, 2009).

Figura 25. Partes de un colector térmico



Fuente: Carta et al (2009). *Centrales de energías renovables*.

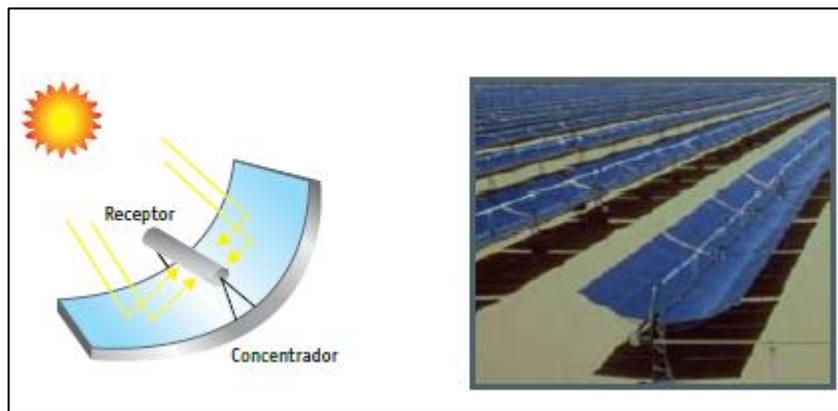
Las características generales que debe reunir un captador solar térmico son las siguientes:

- Resistente a las condiciones exteriores.
- Resistentes a temperaturas altas y bajas.
- Estable y duradero.
- Fácil de montar.
- Eficiente en conversión de energía (Carta et al, 2009)
- Pérdidas en un captador solar térmico:
 - Pérdidas por convección 12 %.
 - Pérdidas por radiación reflejada y absorbida 10 %.
 - Pérdida por radiación 8 %.
 - Pérdidas por conducción 4 %.

7.16.1.3. Energía Solar activa media y alta temperatura

Este tipo de tecnología es la menos desarrollada debido a que a partir de los 80° C la eficiencia de los colectores es baja, para mejorar esa eficiencia se hace necesario utilizar otro tipo de colectores, que tienen forma cilíndrica parabólica.

Figura 26. **Colectores cilíndricos parabólicos**



Fuente: Jara (2006). *Introducción a las energías renovables no convencionales*.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

HIPÓTESIS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes de la investigación

1.2. Industria jabonera

1.2.1. Historia

1.2.2. Definición de jabón

1.2.3. Saponificación

1.2.4. Materias primas

1.2.4.1. Álcali

1.2.4.2. Glicerina

1.2.4.3. Grasas y aceites

1.2.4.4. Sebo

1.2.4.5. Grasa vegetal

1.2.4.6. Aceites

1.2.5. Proceso de fabricación de jabón

1.2.5.1. Mezcla de grasas

- 1.2.5.2. Saponificación
- 1.2.5.3. Mezclado con aditivos
- 1.2.5.4. Secado
- 1.2.5.5. Refinado
- 1.3. Calderas de vapor
 - 1.3.1. Tipos de calderas de vapor
 - 1.3.1.1. Las calderas pirotubulares
 - 1.3.1.1.1. División de las calderas pirotubulares
 - 1.3.1.1.2. Partes de una caldera pirotubular
 - 1.3.1.2. Las calderas acuotubulares
 - 1.3.1.2.1. Parámetros de funcionamiento y características de las calderas acuotubulares
 - 1.3.1.2.2. Partes de la caldera acuotubular
 - 1.3.2. División de calderas por su tecnología
 - 1.3.2.1. Aspectos de diseño, selección de potencia
 - 1.3.3. Combustión
 - 1.3.3.1. Fases de la combustión
 - 1.3.3.2. Tipos de combustión
 - 1.3.3.3. Analizadores de gases de combustión
 - 1.3.3.4. Parámetros de combustión
 - 1.3.3.5. Pérdidas de calor en la combustión
 - 1.3.3.6. Límites de inflamabilidad
 - 1.3.3.7. Tiro natural y tiro forzado

1.3.4. Quemadores

1.3.4.1. Funciones del quemador

1.3.4.1.1. Rendimiento de la combustión

1.3.4.1.2. Pérdidas

1.3.4.1.3. Combustibles

1.3.4.2. División de los combustibles

1.3.5. Agua de alimentación de calderas

1.3.5.1. Ciclo de agua de calderas

1.3.5.2. Principales impurezas contenidas en el agua

1.3.5.2.1. Calcio y Magnesio

1.3.5.2.2. Materiales en suspensión

1.3.5.2.3. Sulfatos

1.3.5.2.4. Hierro y Cobre

1.3.5.2.5. Materia orgánica

1.3.5.2.6. Sílice

1.3.5.3. Tratamientos fisicoquímicos del agua

1.3.6. Eficiencia energética en calderas

1.3.6.1. Balance de masa

1.3.6.2. Balance de energía

1.3.7. Medidas de ahorro y eficiencia energética

1.3.7.1. Control de la combustión

1.3.7.2. Minimización de purgas

1.3.7.3. Recuperación del calor residual de gases de salida

1.3.7.4. Minimizar pérdidas por paredes

1.4. Energías renovables no convencionales

- 1.4.1. Energía térmica solar
 - 1.4.2. Tecnología solar activa de baja temperatura
 - 1.4.3. Colectores de baja temperatura
 - 1.4.4. Perdidas en un captador solar térmico
 - 1.4.5. Energía Solar activa media y alta temperatura
2. RECOLECCIÓN Y TABULACIÓN DE DATOS OPERACIONALES
- 2.1. Reconocimiento de las distintas áreas para toma de datos operacionales
 - 2.1.1. Libras de vapor generadas al día por la caldera de cascabillo (lb)
 - 2.1.2. Temperatura de ingreso del agua (oC)
 - 2.1.3. Presión de vapor (Lb)
 - 2.1.4. Densidad del combustible (Kg/m³)
 - 2.1.5. Cantidad de agua consumida por la caldera (Kg)
3. CÁLCULOS DE LOS DATOS OPERACIONALES DE LA CALDERA
- 3.1. Rendimiento semanal del cascabillo utilizado (Kg cascabillo/lb vapor)
 - 3.2. Consumo de cascabillo diario (Kg)
 - 3.3. Determinación de la eficiencia actual de la caldera
4. EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA ZONA
5. DEFINICIÓN DEL DISEÑO Y UBICACIÓN DEL SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE AGUA POR ENERGÍA SOLAR
- 5.1. Definición del área adecuada para instalar el sistema
 - 5.2. Definición del área mínima de instalación para cada panel de calentamiento solar

- 5.3. Determinación de la cantidad de colectores

- 6. CÁLCULOS DE LA CALDERA AL PRECALENTAR EL AGUA CON ENERGÍA SOLAR
 - 6.1. Determinación de la temperatura del agua de ingreso a la caldera en los distintos meses del año
 - 6.2. Determinación de la eficiencia energética al utilizar energía térmica solar

- 7. ESTIMAR LOS COSTOS DE INSTALACIÓN Y BENEFICIOS ECONÓMICOS.
 - 7.1. Cotización de la compra e instalación del sistema
 - 7.2. Determinación de los beneficios económicos mensuales de utilizar el sistema
 - 7.3. Determinación del tiempo de retorno de la inversión

- 8. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

9.1. Tipo de estudio

El presente estudio es de tipo cuantitativo descriptivo. En el que se evaluará si es factible aumentar la eficiencia energética de una caldera a través del empleo de energía solar como parte del precalentamiento de agua, a través de cálculos teóricos y toma de datos reales que permitan determinar la eficiencia de la caldera al utilizar energía solar y compararla con la condición actual.

9.2. Fases del estudio

A continuación, las fases del estudio.

Tabla IV. **Variables de la fase de estudio**

Variables	Definición conceptual	Definición operacional
Porcentaje de aumento de la eficiencia energética de la caldera (%)	Porcentaje de aumento de la eficiencia energética de la caldera al comparar precalentamiento por energía solar contra la eficiencia actual	Cálculo matemático utilizando ecuaciones teóricas y datos reales
Eficiencia de la caldera antes y después de la implementación del sistema de precalentamiento por energía solar	Porcentaje de eficiencia energética de la caldera al utilizar energía solar	Cálculo matemático utilizando ecuaciones teóricas y datos reales Porcentaje
Potencia energética disponible	Potencia energética disponible del combustible	Cálculo matemático teórico y real KWh

Continuación de la tabla IV

Variables	Definición conceptual	Definición operacional
Potencia energética del vapor	Potencia energética disponible del vapor	Cálculo matemático utilizando ecuaciones teóricas y datos reales KWh
Flujo de vapor	Flujo de vapor producido	Mediciones en medidor de flujo en Kg/h
Consumo de combustible	Cantidad de combustible consumido	Se medirá en Kilos a partir de toma de inventario diario de combustible Kg
Entalpia de vapor	Entalpia teórica que tiene el vapor a las condiciones de operación	Se tomará en KW/Kg
Entalpia de agua de alimentación	Entalpia teórica del agua a las condiciones de operación	Se tomará en KW/Kg
Capacidad calorífica del combustible	Capacidad calorífica teórica con la que cuenta el combustible	Se tomará en KW/Kg
Densidad del combustible	Densidad que presenta el combustible	Se medirá con probeta y balanza analítica (kg/m ³)
Irradiación térmica solar en la zona	Capacidad de irradiación térmica en la zona	Se tomarán datos disponibles en internet en KWh/m ²
Promedio de irradiación térmica solar en la zona mensual	Promedio mensual de la capacidad de irradiación térmica solar de la zona	Se tomarán datos disponibles en internet en KWh/m ²
Promedio de irradiación térmica solar en la zona por mes a las distintas horas del día	Promedio a distintas horas del día de la irradiación térmica solar de la zona	Se tomarán datos disponibles en internet en KWh/m ²
Cantidad de agua consumida por la caldera	Cantidad de agua al día que consume la caldera	Se tomarán datos diarios de flujo Kg
Flujo de agua capaz de calentar un panel solar	Cantidad de agua que tiene capacidad de calentar un panel solar	Según datos teóricos del fabricante Kg/h
Capacidad de almacenamiento del calentador solar	Cantidad de agua que puede almacenar el calentador solar	Según datos teóricos del fabricante Kg

Continuación de la tabla IV

Variables	Definición conceptual	Definición operacional
Costos de instalación	Costo que tendrá la compra e instalación del equipo	A partir de cotización de proveedor Q
Ahorro teórico de combustible	Cantidad de combustible que no será necesario utilizar	A partir de cálculos teóricos y datos reales Kg
Consumo diario de combustible, antes de precalentar el agua	Cantidad de combustible utilizado para precalentar el agua sin utilizar energía solar	A partir de mediciones diarias Kg

Fuente: elaboración propia.

9.2.1. Fase 1: exploración bibliográfica

Se describirá a partir de la teoría de la producción industrial de jabón, producción industrial de vapor, y utilización de energía térmica solar; sus procesos, materias primas, combustibles y necesidades energéticas. Con esta información se establecerá la base para el diseño del sistema de precalentamiento de agua, y se determinará la viabilidad del proyecto.

9.2.2. Fase 2: recolección de datos operacionales

Esta fase consiste en realizar mediciones de los datos operacionales actuales de la caldera, este procedimiento será realizado por el personal operativo del área, utilizando los instrumentos de medición existentes y realizando la toma de inventario de combustible, tendrá distintas frecuencias de medición que se explican en la siguiente tabla:

Tabla V. **Variables operacionales para recolectarse**

Variables	Periodicidad de la medición	Tiempo de ejecución
Flujo de vapor (Kg/h)	Diaria	1 mes
Consumo de combustible (Kg)	Diaria	1 mes
Temperatura de ingreso de agua (oC)	Diaria	1 mes
Presión de vapor (Lbf)	4 mediciones al día	1 mes
Densidad del combustible (Kg/m3)	Diaria	1 mes
Cantidad de agua consumida por la caldera (Kg)	Diaria	1 mes

Fuente: elaboración propia.

9.2.3. Fase 3: determinación de la eficiencia actual de la caldera

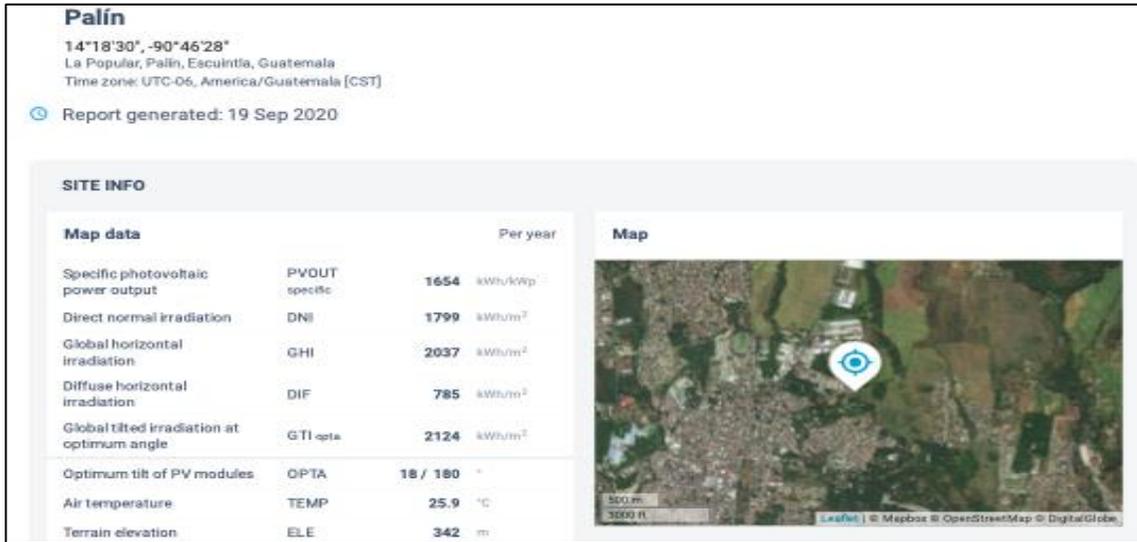
Utilizando como base los datos operacionales recolectados se determinará la eficiencia energética actual de la caldera utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ eficiencia} = \frac{\dot{m}_{\text{agua}}(h_{\text{vap}} - h_{\text{agua}})}{Cp_{\text{cascabillo}} \left(\frac{\dot{m}_{\text{cascabillo}}}{\rho_{\text{cascabillo}}} \right)}$$

9.2.4. Fase 4: determinación del potencial energético de la zona

Esta determinación se realizará consultando los datos reales que proporciona el sitio <https://globalsolaratlas.info/map>, en el se puede consultar la cantidad de energía solar irradiada en la zona en el transcurso del año, se determinarán los promedios diarios, las horas y meses con mayor potencial energético.

Figura 27. **Potencial energético de la zona de estudio**



Continuación de la figura 27.



Fuente: The World Bank Group. (2020). *Global Solar Atlas*. Recuperado de <https://globalsolaratlas.info/map>.

Esta información será tabulada en las siguientes tablas:

Tabla VI. **Irradiación solar promedio mensual en la zona**

Mes	Irradiación solar promedio en la zona (Kwh/m2)
Enero	
Febrero	
Marzo	
Abril	
Mayo	
Junio	
Julio	
Agosto	
Septiembre	
Octubre	
Noviembre	
Diciembre	

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Irradiación solar promedio mensual por hora**

	Hora/Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Irradiación solar promedio en la zona (Kwh/m2) por hora	0:00 a 1:00 am														
	1:00 a 2:00 am														
	2:00 a 3:00 am														
	3:00 a 4:00 am														
	4:00 a 5:00 am														
	5:00 a 6:00 am														
	6:00 a 7:00 am														
	7:00 a 8:00 am														
	8:00 a 9:00 am														
	9:00 a 10:00 am														
	10:00 a 11:00 am														
	11:00 a 12:00 am														
	12:00 a 1:00 pm														
	1:00 p 2:00 pm														
	2:00 p 3:00 pm														
	3:00 p 4:00 pm														
	4:00 p 5:00 pm														
	5:00 p 6:00 pm														
	6:00 p 7:00 pm														
	7:00 p 8:00 pm														
	8:00 p 9:00 pm														
	9:00 p 10:00 pm														
	10:00 p 11:00 pm														
	11:00 p 12:00 pm														

Fuente: elaboración propia.

9.2.5. Fase 5: definición del diseño y ubicación del sistema

Utilizando como base las dos fases anteriores se determinará la cantidad, y ubicación de los colectores solares a instalarse. Estos colectores deberán alimentar de forma constante de agua precalentada la operación de la caldera.

Para la determinación del número de colectores solares se utilizará el flujo de agua que consume la caldera, relacionándolo con el flujo de agua caliente que es capaz de administrar cada calentador solar, esto con la siguiente ecuación:

$$\text{Cantidad de colectores} = \frac{\dot{m}_{\text{aguacaldera}}}{\dot{m}_{\text{agua colector}}}$$

Al saber la cantidad de colectores necesarios podrán relacionarse con el potencial térmico de la zona en los distintos meses, se estimará la temperatura que tendrá el agua al momento de ingresar a la caldera, a partir de la cantidad de colectores también podrán ser determinados los costos de instalación.

9.2.6. Fase 6: determinación de la eficiencia energética al utilizar energía térmica solar

Esta determinación será un procedimiento teórico, en el cual se utilizarán los datos operacionales de la caldera, la demanda de vapor, las condiciones del agua de alimentación precalentada por energía solar térmica tomando en cuenta las nuevas temperaturas de ingreso, y las características del combustible, para dicho propósito se utilizará de nuevo la siguiente formula:

$$\% \text{ eficiencia} = \frac{\dot{m}_{\text{agua}}(h_{\text{vap}} - h_{\text{agua}})}{Cp_{\text{cascabillo}} \left(\frac{\dot{m}_{\text{cascabillo}}}{\rho_{\text{cascabillo}}} \right)}$$

Debido a que las distintas condiciones meteorológicas mensuales se determinará la eficiencia energética de la caldera en los distintos meses del año utilizando la siguiente tabla:

Tabla VIII. **Porcentaje de eficiencia energética de la caldera**

Mes	% Eficiencia energética de la caldera
Enero	
Febrero	
Marzo	
Abril	
Mayo	
Junio	
Julio	
Agosto	
Septiembre	
Octubre	
Noviembre	
Diciembre	

Fuente: elaboración propia.

9.2.7. Fase 7: estimar los costos de instalación y beneficios económicos

Tomando como base la definición del diseño realizada con anterioridad se solicitarán cotizaciones a distintos proveedores de este tipo de equipos se seleccionará la cotización que más se adapte al diseño y que sea mas conveniente económicamente y se realizará un análisis de retorno de inversión comparando los costos generales del sistema contra los ahorros de combustible que se tendrán por precalentar el agua.

Los costos relacionados a la implementación y los beneficios económicos del sistema serán detallados en las siguientes tablas:

Tabla IX. **Costos de instalación**

Concepto	Inversión (Q)
Costo de colectores solares térmicos	
Obra civil	
Materiales diversos	
Costos de instalación	

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Beneficios económicos teóricos**

Mes	Ahorro generado por disminución de consumo de combustible (Q)
Enero	
Febrero	
Marzo	
Abril	
Mayo	
Junio	
Julio	
Agosto	
Septiembre	
Octubre	
Noviembre	
Diciembre	

Fuente: elaboración propia.

9.2.8. Fase 8: viabilidad económica

A partir de los beneficios económicos mensuales estimados estos serán comparados con los costos de implementación del sistema y se determinará el tiempo de retorno de la inversión, tomando la decisión de la factibilidad del

proyecto si el tiempo de retorno es igual o menor a cinco años (tiempo según políticas de inversión de la empresa).

$$\textit{Tiempo retorno} = \frac{\textit{Inversión Total del proyecto}}{\textit{Ahorro anual teórico por la implementación del sistema}}$$

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS

La eficiencia de la caldera será determinada a partir de metodología teórica estándar establecida para este tipo de estudios, será aplicado el mismo método para la eficiencia actual y para la eficiencia que tendrá la caldera al utilizar un sistema economizador de combustible basado en el aprovechamiento de la energía térmica solar.

El diseño del sistema de precalentamiento de agua será realizado a partir de los parámetros actuales de operación de la caldera tomando como base de cálculo la cantidad de vapor demandado, la cantidad de agua consumida, la temperatura de ingreso de agua, las características físicas y energéticas del combustible.

Para el diseño y selección de los colectores solares se tomará en cuenta el potencial de irradiación térmico de la zona, la ubicación geográfica de la planta, y las características de captación propias del diseño de los paneles comerciales existentes en el mercado. Utilizando las siguientes herramientas de recolección de datos y estadísticas:

Herramientas de recolección de datos

- Tabla de flujo de vapor diario consumido.
- Tabla de temperatura de ingreso de agua.
- Tabla de presión de vapor.

- Tabla densidad del combustible.
- Tabla cantidad de agua consumida.
- Tabla irradiación solar mensual promedio de la zona.
- Tabla de irradiación solar promedio diaria.
- Tabla de eficiencia energética actual de la caldera.
- Tabla de eficiencia energética mensual de la caldera al utilizar el sistema economizador propuesto.

Herramientas estadísticas

- Media y desviación estándar de todas las mediciones.
- Diagrama de máximos y mínimos aplicado a el flujo de vapor.
- Diagrama de máximos y mínimos aplicado a la temperatura de ingreso de agua.
- Diagrama de máximos y mínimos aplicados a la presión de vapor.
- Diagrama de máximos y mínimos aplicados a la irradiación solar mensual promedio de la zona.
- Diagrama de máximos y mínimos aplicados a la irradiación solar promedio diario de la zona.

11. CRONOGRAMA

Tabla XI. Cronograma de actividades

Actividad	2021					
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Fase 1: Exploración bibliográfica	█					
Fase 2: Recolección de datos operacionales		█				
Fase 3: Determinación de la eficiencia energética actual			█			
Fase 4: Cuantificación de potencial solar				█		
Fase 5: Definición del diseño y ubicación del sistema					█	
Fase 6: Determinación de la eficiencia energética al utilizar energía solar						█
Fase 7: Estimar costos sobre la inversión						
Fase 5: Análisis financiero						
Fase 7: Discusión y evaluación de resultados						

Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

La presente investigación se realizará los recursos propios del estudiante teniendo en cuenta los siguientes recursos:

Tabla XII. **Recursos necesarios para la investigación**

Recurso	Costo
Viáticos	Q. 2,00.00
Honorarios asesores de tesis	Q. 2,500.00
TOTAL	Q. 4,500.00

Fuente: elaboración propia.

Siendo los recursos aportados suficientes para la investigación, se considera que es factible la realización del estudio.

13. REFERENCIAS

1. Agencia Andaluza de la Energía, (2007). *Metodología para la elaboración de auditorías energéticas en la industria*, Sevilla, España: Agencia Andaluza de Energía.
2. Appleton, H. y Simmons, W. (2016). *The Handbook of soap manufacture*. England: Anboco.
3. Arno, S., Klaus, J., Olindo, I., René, S. y Miro, Z. (2016). *The physics and engineering of photovoltaic conversion technologies*. England: UIT Cambridge Ltd.
4. Chucuy, R. (Marzo de 2017). Ahorro de energía primaria mediante precalentamiento del aire y agua en una unidad de generación de vapor. *IGNosis* 3(2). 365-375.
5. Domínguez, J., Cid, J., Martínez, J., Otaola, P., Sarco, S. y Pequerul J. (2004). *Guía básica de calderas industriales eficientes*. Madrid, España: Arias Montano.
6. Florez, M. (2017). *Ingeniería Básica de una planta de producción de jabón sólido*. (Tesis de maestría). Universidad de Sevilla, Sevilla, España. Recuperado de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/91407/fichero/TFG+MARTA+FLORES%252FTFG+1617+MARTA+FLORES+RODRIGUEZ.pdf>.

7. Fundación Telefónica. (Septiembre, 2013). Smart Energy. TIC y energía: un future eficiente. [Mensaje de un blog]. Recuperado de <https://www.informeticplus.com/smart-energy-tic-y-energia-un-futuro-eficiente-fundacion-telefonica>.
8. González, J. (2009). *Centrales de energías renovables: Generación eléctrica con energías renovables*. Madrid, España: Pearson Educación.
9. Jara, W. (2006). *Introducción a las energías renovables no convencionales*. Chile: Endesa.
10. Muñoz, M., Teni, S., y Vega, R. (2015). *Un diseño alternativo para el precalentamiento de aire de una caldera bagacera, caso caldera 6 de ingenio la Unión*. Guatemala: CENGICAÑA.
11. Oviedo, F. y Vargas, E. (2014). *Estudio de la reducción del consumo de combustible mediante el empleo de colectores solares para el precalentamiento del agua en calderas pirotubulares Hospital regional Eleazar Guzmán Barrón Nvo Chimbote*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional del Santa, Perú. Recuperado de <http://repositorio.uns.edu.pe/bitstream/handle/UNS/1996/30740.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

12. Quezada, M. (2015). *Propuesta para el empleo de energía solar como parte del precalentamiento de agua en las calderas del Hospital General San Juan De Dios*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/4373/1/Marco%20Antonio%20Quezada%20Gonz%C3%A1lez.pdf>.
13. Rivera, F. (2016). *Precalentamiento solar de aire de ingreso a calderas industriales y su evaluación técnica – económica*. (Tesis de licenciatura). Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso Chile. Recuperado de <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/23371/3560900257184UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
14. Schallenberg, J, Piemavieja, G., Hernández, C., Unamunzaga, P., García, R., Díaz, M., Cabrera, D., Martel, G., Prdilla, J., y Subiela, V. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*. Canarias, España: Instituto Tecnológico de Canarias.
15. Son Ha Group (2021). Productos personalizados. [Mensaje de un blog]. Recuperado de <https://www.alibaba.com/product-detail/180L-Eco-Plus-Solar-Water-Heater>.
16. Thomssen, E. (2016). *Soap-Making Manual. A practical handbook on the control in the modern soap*. England: Anboco.

17. Vega, Y. (2017). *Influencia del precalentamiento del agua de alimentación mediante energía solar en la eficiencia de una caldera piro tubular.* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga Colombia.

14. APÉNDICES

Apéndice 1. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Matriz de coherencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	VARIABLES	METODOLOGÍA	PLAN DE ACCIÓN
Pregunta principal ¿Es factible aumentar la eficiencia energética de una caldera a través del empleo de energía solar como parte del precalentamiento de agua en una industria jabonera?	Objetivo General Estimar el aumento de la eficiencia energética de una caldera al emplear energía solar como parte del precalentamiento de agua en una industria jabonera.	Porcentaje de aumento de la eficiencia energética de la caldera (%).	Cálculo matemático de diferencia energética.	Cálculos teóricos.
Preguntas auxiliares	Objetivos específicos			
1. ¿Cuál es la eficiencia energética de la caldera sin utilizar sistemas economizadores?	Calcular la eficiencia energética de la caldera sin utilizar sistemas economizadores	Eficiencia de la caldera antes de la implementación del sistema de precalentamiento por energía solar. (%) Potencia energética disponible del combustible. (KW/h) Potencia energética del vapor sin energía solar. (KW/h) Flujo de vapor sin energía solar. (Kg/h) Consumo de combustible sin energía solar. (Kg) Entalpia de vapor. (KW/Kg) Entalpia de agua de alimentación sin energía solar. (KW/Kg) Capacidad calorífica del combustible. (KW/Kg)	Balance energético, y determinación de porcentajes de potencia. Medición diaria de la potencia energética del vapor sin energía solar. (KW/h) Flujo de vapor sin energía solar. (Kg/h) Consumo de combustible sin energía solar. (Kg) Entalpia de vapor. (KW/Kg) Entalpia de agua de alimentación sin energía solar. (KW/Kg) Capacidad calorífica del combustible. (KW/Kg) temperatura de alimentación de agua.	Realizar un balance energético, a las distintas condiciones de operación para determinar la eficiencia de la caldera antes y después del precalentamiento del agua. Mediciones diarias de la temperatura de agua de alimentación y precalentada semana, a las 6, 12, 18 y 24 horas, (tiempo 1 semana) - Medición diaria del consumo de combustible (histórico año 2019 y 2020) - Consulta de bibliografía - Determinar la densidad diaria del combustible (tiempo 1 semana) - Cálculos teóricos.
2. ¿Cuál es la eficiencia energética de la caldera al utilizar precalentamiento de agua por energía solar?	Calcular la eficiencia energética de la caldera al utilizar precalentamiento de agua por energía solar.	Eficiencia de la caldera después de la implementación del sistema de precalentamiento por energía solar. (%) Potencia energética disponible del combustible. (KW/h) Potencia energética del vapor con energía solar. (KW/h) Flujo de vapor con energía solar. (Kg/h) - Potencia utilizada para precalentar el agua utilizando el vapor de caldera. (KW/h) Flujo de vapor utilizado para precalentar el agua. (Kg/h) Entalpia de agua de pozo. (KW/Kg) Entalpia de agua precalentada. (KW/Kg) Entalpia de vapor. Flujo de vapor sin energía solar. (KW/Kg) (KW/Kg) Irradiación térmica solar en la zona. (KWh/m ²)	Balance energético, y determinación de porcentajes de potencia. Medición diaria de la temperatura de alimentación de agua. Tablas de propiedades fisicoquímicas del agua y combustibles. Determinación de densidad materiales sólidos.	Realizar un balance energético, a las distintas condiciones de operación para determinar la eficiencia de la caldera antes y después del precalentamiento del agua. Mediciones diarias de la temperatura de agua de alimentación y precalentada, a las 6, 12, 18 y 24 horas (tiempo 1 semana) Medición diaria del consumo de combustible (histórico año 2019 y 2020). Consulta de bibliografía. Determinar la densidad diaria del combustible (tiempo 1 semana). Cálculos teóricos.
3. ¿Cuál es el potencial de energía térmica solar en la zona?	Determinar el potencial de energía térmica solar en la zona.	Irradiación térmica solar en la zona. (KWh/m ²)	Consulta de datos vía Web (Global Solar Atlas)	Consultar, y tabular la irradiación solar de la zona en el último año a través de las coordenadas de la industria, evaluando los datos mensuales y el promedio de irradiación a las distintas horas del día.
4. ¿Cómo debe ser el diseño del sistema precalentador de agua?	Definir el diseño y ubicación del sistema pre-calentador de agua.	Cantidad de agua consumida por la caldera. (Kg) Flujo de agua capaz de calentar un panel solar. (Kg/h) Capacidad de calentamiento del calentador solar. (Kg)	Mediciones del consumo de agua de la caldera en el último año. Especificaciones técnicas del panel solar.	Tabular los datos del consumo diario de agua del último año. (Histórico consumos 2019 y 2020) Solicitar a proveedores de paneles solares sus especificaciones técnicas.
5. ¿Cuáles son los costos de instalación del sistema de precalentamiento por energía solar y los beneficios económicos de su implementación?	Estimar los costos de instalación del sistema de precalentamiento por energía solar y los beneficios económicos de su implementación.	Costos de instalación. (Q) Ahorro teórico de combustible. (Q) Consumo diario de combustible, antes de precalentar el agua. (Kg) Capacidad calorífica del combustible. (KW/Kg) Diferencia de potencia necesaria para evaporar el agua antes y después del precalentamiento. (KW/h) Densidad del combustible. (Kg/m ³)	Cotización de proveedor. Uso de fórmula teórica Potencia energética de combustible y Potencia energética del agua. Tablas de propiedades fisicoquímicas del agua y combustibles.	Solicitar cotización a empresa proveedora de estos equipos. Medición diaria del consumo de combustible durante el último año. (Histórico consumo 2019-2020) Consulta de bibliografía.

Fuente: elaboración propia.

15. ANEXO

Anexo 1. Especificaciones del calentador de agua solar

Specification

Product name	Eco Plus Solar water heater 14 tubes
Model number	SH ECOPLUS58 - 180
Place of origin	Viet Nam
Item	Value
Dimensions	1580 X 1960X 1170 mm
Heat Source	Solar Energy
Type	Evacuated Tube
MOQ	500



Fuente: Son Ha Group (2021). Recuperado de <https://www.alibaba.com/product-detail/180L-Eco-Plus-Solar-Water-Heater>.

