

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

CAMPUS SUR

Facultad de Ingeniería



OPTIMIZACIÓN DE COMBUSTIÓN DE UNA CALDERA DE
BIOMASA EN UNA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE
PRODUCTOS DE CONSUMO MASIVO PARA CUIDADO DEL
HOGAR

Trabajo de graduación en modalidad de Tesis presentado por

Kevin Alexander Esquivel Girón

para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en Tecnología

Industrial

Guatemala

2018

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

CAMPUS SUR

Facultad de Ingeniería



OPTIMIZACIÓN DE COMBUSTIÓN DE UNA CALDERA DE
BIOMASA EN UNA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE
PRODUCTOS DE CONSUMO MASIVO PARA CUIDADO DEL
HOGAR

Trabajo de graduación en modalidad de Tesis presentado por

Kevin Alexander Esquivel Girón

para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en Tecnología

Industrial

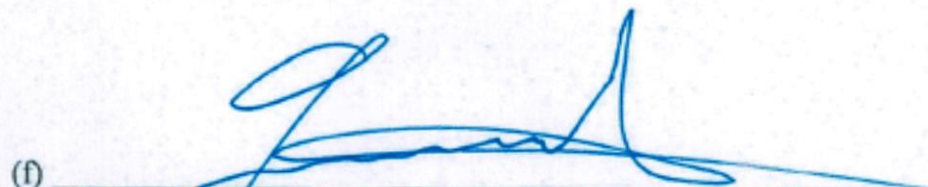
Guatemala

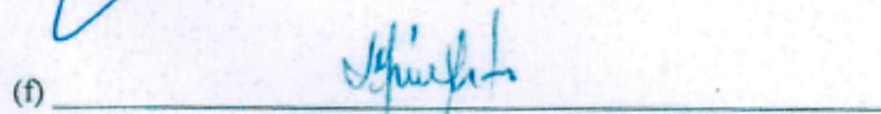
2018

Vo. Bo.:

(f) 
Ing. Cesar Oswaldo García Monterroso
Asesor

Tribunal Examinador.

(f) 
Ing. Cesar Oswaldo García Monterroso
Asesor

(f) 
Ing. Jorge Ramón Méndez Costa
Evaluador

(f) 
Ing. Fernando Rafael Rivera Turcios
Director

Fecha de aprobación: Guatemala, 13 de marzo 2018

AGRADECIMIENTO

A Dios	Por la vida y bendiciones recibidas.
A mis padres	Rosa Angélica Girón de Esquivel Hugo Enrique Esquivel Torres Por el cariño y apoyo brindado a lo largo de mi vida.
A mis hermanos	Ebher Enrique, Helen Elizabeth y Ángel David Para que les sirva de motivación y cumplan sus metas trazadas.
A mi abuela	Paulina de Girón Por su buen corazón, entusiasmo de ayudar al necesitado y estar junto a mí durante toda mi vida.
A mi asesor	Cesar Oswaldo García Monterroso Por su apoyo y motivación

PREFACIO

La siguiente investigación surge por la oportunidad de mejora que se notó en el rendimiento de la caldera principal dentro de una empresa manufacturera de productos de consumo masivo para cuidado del hogar. De esta manera el reto principal de la investigación consistió en evidenciar la problemática actual de la baja eficiencia en la combustión para analizar las interrelaciones que puedan afectar dentro del proceso de generación de vapor y así poder diseñar un sistema mecánico que aumente la eficiencia de la misma.

La empresa en mención se dedica a la fabricación y comercialización de productos de cuidado personal y del hogar de todo tipo de variantes, y en este caso la investigación apoyó principalmente a una de sus políticas de calidad social y ambiental: "*Garantizar la mejora continua del desempeño ambiental, social y económico de nuestros procesos.*" Ya que al mejorar la combustión también se puede reducir la expulsión de gases sumamente tóxicos como el CO (Monóxido de carbono) a la atmósfera, sabiendo que el CO₂ (Dióxido de carbono) producido en una combustión completa posee menor impacto a la salud que el CO; que es generado cuando la combustión no logra completarse.

Dentro las instalaciones de esta asociación se encuentran divisiones donde se separan varias subplantas de procesos independientes. Cada subplanta es productora de un diferente tipo de producto terminado. Para la fabricación de todos los productos de la empresa se cuenta con una caldera acuotubular alimentada por combustible biomásico (Cascabillo de café), que proporciona presión de vapor de 145 psig¹ (1.0 MPa) generalmente; para alimentar continuamente a cada subplanta.

Otro fin por el que me precisó investigar este tema es el interés de reconocer la fabricación de productos con propiedad, con procesos que van de la mano con un sistema de Gestión de Calidad en toda empresa. Razones como las mencionadas anteriormente ocasionan la investigación y resolución de los inconvenientes que puedan disminuir la calidad de los productos. Cabe destacar que este proyecto ha sido apoyado por la asociación beneficiada para que sea tomado en cuenta para nuevas modificaciones.

¹ *pound square inch gauge: libra/pulgada cuadrada manométrica*)

ÍNDICE

AGRADECIMIENTO	ii
PREFACIO	iii
LISTA DE TABLAS	vi
LISTA FIGURAS	vii
LISTA PLANOS	viii
RESUMEN	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBEJTIVOS	3
III. JUSTIFICACIÓN	4
IV. MARCO TEORICO	5
A. Concepto e información completa sobre una caldera	5
1. ¿Qué es una caldera?	5
B. Manejo adecuado de calderas	5
1. Obligaciones de los usuarios	5
2. Elementos que incorporan las calderas	6
3. Requisitos de seguridad de una caldera	8
C. Tipos de calderas	9
1. Calderas acuotubulares	9
2. Costo de vapor	12
3. Calderas pirotubulares	14
D. Transmisión de calor en calderas	14
E. Combustión	15
1. Características del combustible actual utilizado en caldera 1	15
2. Fases de la combustión	16
3. Tipos de combustión	16
4. Gases formados	17
5. Analizadores de gases de combustión	17
F. El tiro	19

G.	Control de combustión	20
1.	La cantidad de aire	20
2.	El tiro	20
3.	La temperatura del hogar	22
4.	El estado de la instalación	23
H.	Rendimiento	24
1.	Rendimiento por inquemados	25
V.	METODOLOGÍA	28
A.	Situación actual	28
1.	Análisis del proceso actual	29
B.	Cronograma de actividades	35
1.	Cronograma de actividades por semana	36
C.	Estimación de costos y ahorros	37
1.	Costo del vapor basado en el combustible para la caldera en evaluación	37
2.	Pérdidas	37
D.	Propuesta única	38
1.	Diseño final de sistema de recuperación de energía	42
VI.	PRESENTACION Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	53
VII.	CONCLUSIONES	56
VIII.	RECOMENDACIONES	57
IX.	BIBLIOGRAFÍA	58
X.	ANEXOS	60
XI.	GLOSARIO	62

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Energía requerida para producir una libra de vapor saturado en Mega Julios (BTU).....	13
Tabla 2: Contenido energético y eficiente de combustión de los combustibles	13
Tabla 3: Historial de porcentajes de humedad de cascabillo de café realizados en CC.....	15
Tabla 4: Mediciones de gases de combustión en chimenea de caldera 1	19
Tabla 5: Propiedades del cascabillo de café	22
Tabla 6: Historial de rendimientos de caldera 1	24
Tabla 7: Porcentajes de pérdidas de calor latente en vapor contenido en reacciones de combustión*	26
Tabla 8: Porcentajes que influyen en rendimiento de una caldera.....	26
Tabla 9: Parámetros técnicos de operación de la caldera de industria manufacturera de jabones	31
Tabla 10: Datos técnicos de cascabillo de café	31
Tabla 11: Especificaciones de tubería para gases.....	32
Tabla 12: Presupuesto aproximado para la instalación de la propuesta de diseño (materiales y servicio)	33
Tabla 13: Cronograma de actividades detalladas para la investigación	35
Tabla 14: Cronograma de actividades por semana	36
Tabla 15: Ahorro económico de propuesta y ahorro en Kg y Lb de cascabillo.....	53
Tabla 16: Datos para cálculo de ahorro de propuesta.....	60

LISTA FIGURAS

Figura 1: Plano estructural de caldera acuotubular evaluada	10
Figura 2: Suavizadores iónicos de agua para caldera 1	11
Figura 3: Tanque pulmón de precalentamiento de agua	11
Figura 4: Hogar de la caldera 1	12
Figura 5: Analizador de gases TESTO 320	18
Figura 6: Tiro forzado caldera 1 de biomasa	21
Figura 7: Tiro inducido caldera 1 de biomasa	21
Figura 8: Aislamiento térmico de tuberías de caldera de biomasa	23
Figura 9: Perspectiva de caldera 1 en estado actual	28
Figura 10: Diagrama representativo de caldera 1 diseño actual	30
Figura 11: Diagrama propuesto para el nuevo diseño de la caldera 1	34
Figura 12: Ruta crítica propuesta para el diseño de tubería	38
Figura 13: Ubicación de entrada de los disipadores de calor en tiro forzado	39
Figura 14: Ubicación de entrada de disipadores de calor en alimentación de combustible.....	39
Figura 15: Diseño 3D del disipador de calor de tiro forzado 1.....	40
Figura 16: Diseño 3D de disipador de calor de tiro forzado 2	40
Figura 17: Diseño 3D de secador de cascabillo	41
Figura 18: Diseño 3D de ingreso de gases de combustión y acople de ventilador	41
Figura 19: Diseño final ensamblado de tuberías en costado de caldera 1	42
Figura 20: Croquis de caldera 1 en estado actual sin aprovechamiento de calor	54
Figura 21: Ruta crítica de tubería	54
Figura 22: Croquis de caldera 1 propuesto para aprovechamiento de calor	55
Figura 23: Flujo de aire de la combustión de caldera 1 de Industria Jabonera	55
Figura 24: Tabla de ahorro de costos por aumento de eficiencia.	60

LISTA PLANOS

Plano 1: Diseño completo de tuberías ensambladas	43
Plano 2: Distribuidor de gas en alimentador de combustible	44
Plano 3: Tubo horizontal con disipador de calor para tiro forzado 1	45
Plano 4: Tubo horizontal con disipador de calor a tiro forzado 2	45
Plano 5: Tubo horizontal de acople a chimenea	47
Plano 6: Tubo vertical hacia tiro forzado	48
Plano 7: Tubo horizontal principal 1450 mm	49
Plano 8: Tubo horizontal final del sistema	50
Plano 9: Sección de tubo vertical del canal principal	51
Plano 10: Tubo oblicuo a 45° para ventilador inyector de exceso de aire y efecto Venturi para los gases de combustión	52

RESUMEN

El estudio fue realizado en las instalaciones de una empresa dedicada a la manufactura de productos cosméticos y de cuidado del hogar. En este lugar es donde la Caldera Acuotubular de capacidad de vapor de 7,257.50 Kg/h ofreció oportunidad de mejorar el rendimiento total; al carecer de un precalentador de aire de tiro forzado en su sistema, esto dio lugar a la búsqueda de opciones que brindaran un mayor aprovechamiento del calor que es expulsado por la chimenea. Este inconveniente fue la razón principal de la investigación realizada. El historial de rendimientos y la carencia del precalentador abrieron paso a buscar una alternativa que permita optimizar la combustión de la caldera a través de la recirculación de gases ya filtrados y expulsados por la chimenea hacia dos puntos críticos, esto con el fin de ayudar a aumentar la temperatura de la combustión e inyectar un exceso de aire para generar condiciones que permitan la combustión completa. Esto se logró diseñando un sistema de tuberías que viajan desde la salida gases de combustión en la chimenea hacia la entrada de aire de tiro forzado para el precalentamiento del aire y hacia el gusano helicoidal que transporta el cascabillo de café para que lo precaliente. Este acoplamiento promete aumentar la eficiencia actual de 85.42% a un 90%. Esta propuesta será producto de las mediciones realizadas en los puntos necesarios que cumplan con los valores requeridos para las siguientes variables de las fórmulas:

a) *Fórmula 1: Método Directo*

$$\text{RENDIMIENTO (\%)} = \frac{\text{Calor contenido en el vapor}}{\text{Calor contenido en el combustible quemado}} * 100$$

b) *Fórmula 2: Método Indirecto*

$$\text{RENDIMIENTO} = (100 - \text{pérdidas})\%$$

Lo que nos lleva a la siguiente fórmula \Rightarrow

c) *Fórmula 3: Pérdidas por inquemados*

$$P_{inq}(\%) = \frac{21}{21 - O_2} * \left(\frac{CO}{3100} + \frac{CH}{1000} + \frac{OP(\%)}{65} \right)$$

Donde:

- P_{inq} = Pérdidas por inquemados (expresada en %)
- O_2 = Porcentaje de Oxígeno
- CO = Cantidad en ppm de Monóxido de carbono

- CH = Cantidad en ppm de Hidrocarburos contenidos
- OP = Porcentaje de opacidad de los gases

Se conoce que cualquier medición de rendimiento se calcula la relación de: cantidad de energía ingresada al sistema y energía de salida. Como recomendación se solicita que este tipo de investigaciones cuente con herramientas críticas de medición, en este caso la organización se equipa con el medidor de gases TESTO 320 que a partir de la medición de porcentajes de gases a través de una sonda permitirá calcular el rendimiento con la fórmula 3.

Los diseños realizados para esta propuesta fueron trabajados asistidos por computadora por un software profesional denominado SolidWorks para dar una apariencia visual adecuada al lector. A consecuencia del diseño y los estudios realizados se logra proyectar un ahorro de combustible para la empresa en cuestión de hasta 42,000 Kg de cascabillo de café mensuales, lo que amerita un ahorro mensual en quetzales de hasta Q 26,800.00. Se recomienda que para el óptimo funcionamiento del sistema se lleve un control en el suministro de exceso de aire en el tiro forzado para mantener los inquemados al porcentaje más bajo.

I. INTRODUCCIÓN

La empresa en donde se desarrolló el estudio, es una industria manufacturera de productos de cuidado del hogar y personal en todo tipo de presentaciones, en la cual no se ha propuesto alguna opción de mejora en el diseño de la caldera acuotubular que ahí opera. El proceso de fabricación de vapor juega un papel importante en la operación de toda la empresa por ser la fuente principal de energía en la fabricación en casi todos los productos.

La energía calorífica generada por la caldera se utiliza en la maquinaria y equipo involucrado en el proceso de producción, principalmente en sistemas de bombeo y en el área de mezclas. El presente proyecto se enfocó en la rama de energía calorífica de la caldera para proponer un diseño que mejore el rendimiento de 85.42% a un 90%, a través de la investigación de la ruta crítica de recirculación de los gases de la chimenea para que pueda ser aprovechado su potencial calorífico y que permita a la empresa poder implementarlo en un futuro sin sacrificar una inversión alta de instalación. El vapor generado por la caldera en cuestión es utilizado para calentar la mezcla de productos semielaborados establecidos, para que éste se trabaje según los estándares de calidad establecidos para cada uno de ellos.

La empresa analizada cuenta con plantas de Lavandería, Barra y Corta Grasa. Todas estas plantas son alimentadas y/o apoyadas con energía proveniente de la caldera principal (Caldera 1) alimentada por cascabillo, de la cual se realizó el análisis, sin embargo las mejoras indicadas en este documento pueden implementarse al resto de calderas que sean alimentadas con otros combustibles y que no posean este sistema.

En la caldera 1 se percató la oportunidad de mejorar el diseño mecánico que desvía los gases de combustión, ya que no se estaba aprovechando al máximo el poder calorífico que estos aportan, este calor proveniente de los gases representa una pérdida importante de energía que al no ser bien utilizada, afectan los costos implicados en mantener un rendimiento aceptable de la caldera, al aprovechar esta energía también se ve afectado el tiempo de respuesta de la caldera en arranque en frío. La carencia de un precalentador de aire en el tiro forzado genera un diferencial de temperatura constante en el hogar de la caldera que no permite una quema eficiente del combustible. Así mismo, mejorar la combustión representa una reacción con menos productos de CO (Monóxido de carbono) o incluso nulos. El CO puede afectar directamente en la salud de los operarios al ser sumamente dañino.

La presente investigación describe el diseño actual de la caldera 1, que muestra la pérdida de energía calorífica de los gases de combustión que son descargados al ambiente directamente sin ser utilizados para precalentar el aire suministrado para la combustión, así mismo se presenta un diseño de Recuperación de Energía, que permitirá aumentar el rendimiento total de la caldera a un 90 % esperado según referencias. La

reutilización de los gases que actualmente son descargados al ambiente serán redirigidos a la entrada de tiro forzado donde disipará su calor por medio de radiación al conducto de inyección y también se diseñó una ruta hacia la inyección de combustible (cascabillo de café) para que pueda precalentarse y retirar el diferencial de humedad que ronda entre el 10% y el 15%.

Debido a que la caldera ya posee un proceso de precalentamiento de agua se obvió este punto en la mejora de rendimiento y el diseño se enfocó en los puntos antes mencionados del proceso, que son claves para el objetivo de recuperar el poder calorífico, que como se indicó previamente tiene un costo económico considerable, un beneficio adicional sería mejorar la seguridad industrial al evitar proliferaciones de CO al ambiente y afectar la salud de los colaboradores que transitan por las instalaciones, ya que se reduce la cantidad de ppm de CO en las reacciones, mejorando la combustión hasta acercarse a una completa reacción.

El aprovechamiento de la energía calorífica que actualmente se pierde en el proceso es clave para mejorar el rendimiento del proceso mismo, el cual tendrá un efecto dominó que alcanzará otras calderas instaladas en la organización, consiguiendo ahorros en consumo de combustible de hasta 42,000 Kg mensuales, y ahorros de costos utilizados en la elaboración del vapor llegando hasta Q 26,500 al mes. Esta propuesta en el diseño afecta la calidad del vapor, elevando la temperatura de la combustión y sobrecalentando el vapor para quitarle humedad. Al mejorar los niveles de rendimiento de la caldera 1, cuando sea implementada la propuesta por la organización, la gerencia podrá disponer de reproducir el diseño propuesto a las demás calderas de su dominio para seguir con el ciclo de mejora continua que es el objetivo de cualquier empresa rentable.

II. OBJETIVOS

A. General

Proponer un sistema mecánico estático a través de diseños de planos; que permitan optimizar la combustión del hogar principal de la caldera para elevar el rendimiento de 85.42 % a un 90% a través de la recirculación de gases hacia dos puntos críticos que reduzcan el consumo de combustible y mejoren la calidad de vapor.

B. Específicos

- Presentar un diseño a través de un software calificado para que permita la reutilización de los gases de combustión generados en el proceso para aumentar el rendimiento de la caldera.
- Proyectar un ahorro en quetzales del costo anual de consumo de combustible (cascabillo en Kg); siendo el consumo promedio de Q 470,500.00 mensuales, para conocer el impacto económico del diseño propuesto; a través del análisis de datos y el beneficio que representa incrementar la eficiencia de 85% a 90%.
- Definir la ruta crítica que llevará la instalación de las tuberías en la reutilización de gases para permitir el menor costo de instalación para la empresa con el análisis de las ubicaciones de los elementos de la caldera.

III. JUSTIFICACIÓN

La causa por la cual la caldera necesita una intervención de mejora en su diseño; es su rendimiento (85.42 %) por la falta de un sistema de precalentamiento de aire en el tiro forzado y la inyección de un exceso de aire que permita una combustión completa, esta razón representa un porcentaje importante en el rendimiento que puede ser mejorable mediante estudios de diseño mecánico para que sea implementado en un futuro por la empresa interesada para conseguir un ahorro representativo en el consumo anual de combustible. Se realizó la investigación para proponer un sistema que incremente el rendimiento de la combustión en la cámara principal y dar como resultado un incremento directo en la presión y temperatura del vapor suministrado, así como también mejorar el rendimiento del proceso y proporcionar vapor más seco. Esto se logró con la recirculación de los gases de chimenea a través de la ruta crítica hacia dos puntos importantes que ayudaron a que la combustión mejore, estos dos puntos son: 1) entrada de tiro forzado; para funcionamiento como precalentador de aire por medio de radiación y 2) entrada de combustible en hogar, para precalentar el cascabillo y disminuir la humedad antes de ser utilizado. El aumento de la eficiencia de la caldera da como resultado la reducción directa de los siguientes problemas: bajo poder calorífico del vapor que ofrece la caldera para su uso en los procesos, baja presión en la salida de la misma, condensados en las tuberías, mal aprovechamiento del combustible.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Concepto e información completa sobre una caldera

1. ¿Qué es una caldera?

Se entiende el término caldera como un compartimiento a presión en donde es transformada la energía calorífica a trabajo a presión por motivo de la evaporación de algún fluido.

Otra definición descrita por (Ministerio de Industria y Comercio Español, 2009) nos indica el siguiente significado: “Todo aparato a presión en donde el calor procedente de cualquier fuente de energía se transforma en utilizable, en forma de calorías, a través de un medio de transporte en fase líquida o vapor.”

En su significado más sencillo se sabe que una caldera es un tipo de vasija de metal, grande y redonda que sirve principalmente para calentar un líquido y evaporarlo, o bien, un mecanismo en el que el agua se calienta hasta su ebullición para producir vapor.

Según lo prescrito es válida la utilización de cualquier fuente de energía para la ebullición del fluido para que este sea considerado caldera, y entre los más utilizados se puede mencionar el bunker, diésel, gas natural, bagazo y pellet de madera, incluso hueso de aceituna, y en nuestro caso cascabillo de café. Siempre es necesario conocer cuáles son las obligaciones requeridas por ciertas normas para la operación y el manejo óptimo de los equipos y quiénes son los más involucrados. En el caso de una caldera se puede mencionar los siguientes involucrados: usuarios, la empresa mantenedora, el fabricante y la propia caldera. Considerando que el usuario y el operador son los más aferrados a las actividades diarias que tienen que ver con el funcionamiento de la caldera debemos recordar algunas obligaciones que pueden ser de gran ayuda al manejarla.

B. Manejo adecuado de calderas

1. Obligaciones de los usuarios

Las siguientes obligaciones son tomadas del Reglamento de Equipos a Presión, Capítulo V, Artículo 9, en la BOE Española, 2009. Y se consideran ejemplo coherente para la implementación en Guatemala.

- a. Conocer y aplicar las disposiciones e instrucciones del fabricante en lo referente a la utilización, medidas de seguridad y mantenimiento.
- b. El usuario deberá designar a una persona capacitada para realizar la operación de la caldera mientras esté en funcionamiento.

- c. En caso de que se produzca un fallo de alguno de los elementos de control o seguridad deberá adecuarse el sistema de vigilancia de la caldera, pasando a vigilancia directa, en tanto no se restablezcan las condiciones iniciales y se compruebe el correcto funcionamiento de los elementos averiados.
- d. El operador de la caldera deberá tener a su disposición un libro en el que se indiquen las características de la instalación y las actuaciones, controles o inspecciones realizadas. El libro podrá sustituirse por los correspondientes registros que incluyan una información equivalente. (Ministerio de Industria y Comercio Español, 2009)

Condiciones exigibles a los operadores

Los operadores son los más involucrados en todo el proceso de generación del vapor, controlando el suministro de entrada de combustible, regulando la entrada oxígeno al hogar de la caldera y reduciendo los residuos sólidos despedidos al ambiente, así como controlar la entrada de agua hacia las tuberías del domo de la caldera. Es por tal razón que todos los operadores deben de estar debidamente capacitados para las labores de responsabilidad requeridas.

- a. La Capacitación del operador: es recomendable que el operador sea instruido por el fabricante para conocer a su totalidad el funcionamiento y los aspectos técnicos para lograr una confiabilidad de operación titulada.
- b. Responsabilidad: para todos los implicados en el manejo de la caldera se le debe de responsabilizar tareas de vigilancia, supervisión y control del correcto funcionamiento que requieren una realización consciente de los peligros que se puedan dar durante las actividades, ya que se está manejando altas temperaturas y altas presiones. Disminuir los riesgos para evitar ocasionar una falsa maniobra puede ser la diferencia entre un funcionamiento óptimo y el desastre. Todo operador debe de actuar de manera inmediata ante cualquier falla del sistema de seguridad.

2. Elementos que incorporan las calderas

Las calderas son aparatos que están conformados con una lista exhaustiva de componentes que lo conforman, y al existir una gran variedad de calderas en el mercado; definir cada uno de los elementos de ellas significaría una labor difícil, es por esta razón que se mencionaran los principales elementos y sus accesorios para dar una visión general y facilitar la comprensión.

- | | |
|---|---|
| a. Hogar | l. Válvulas de retención |
| b. Calderines | m. Válvulas de purga |
| c. Economizadores | n. Indicadores de nivel |
| d. Precalentadores de aire | o. Manómetros |
| e. Calentadores de aire y agua | p. Termómetros |
| f. Sobrecalentadores de vapor | q. Presostatos |
| g. Recalentadores de vapor | r. Termostatos, entre otros. |
| h. Quemadores (para combustibles gaseosos y líquidos) | s. Separadores de vapor (Domos) |
| i. Ventiladores | t. Sistemas de alimentación de agua |
| j. Bombas de agua de alimentación | u. Sistema de purga |
| k. Válvulas de paso | v. Chimenea o conducto de salida de gases de combustión |

Para el interés y evaluación del nuevo diseño que permite la optimización de la combustión de la caldera, se tomaron en cuenta las siguientes partes: hogar de la caldera, precalentadores de aire, ventiladores y chimenea principalmente.

a. Hogar de caldera

En esta sección se produce la reacción de combustión, también conocida como Cámara de Combustión, consta de una entrada de aire por tiro forzado, una salida de aire de tiro inducido (los tiros de aire serán ubicados según sea el tipo y funcionamiento de la caldera), un quemador o puerta de hogar (dependiendo del tipo de combustible), un visor, un emparrillado en la parte inferior.

b. Precalentadores de aire

Cuando los gases de escape de la combustión no se aprovechan y son retirados del sistema hacia el ambiente por medio de la chimenea; no se aprovecha su calor. Este aprovechamiento de calor puede dar en el sistema un ahorro en combustible de hasta un 10 % (Saacke H., 2017).

Es por eso que la implementación de un Sistema Precaentador de aire es indispensable para proporcionar a la empresa responsable un ahorro considerable. Este sistema consta principalmente de reutilizar los gases del producto de la combustión para aprovechar su calor y precalentar el aire de entrada al hogar y así mejorar la eficiencia.

c. Ventiladores

Su función es vital para darle vida a la combustión dentro del hogar de la caldera, en nuestro caso el tipo de ventilador es de tiro forzado con succión de aire a temperatura ambiente. El tiro forzado también cumple la función de mezclar el combustible sólido para proporcionar una mejor quema del mismo.

d. Termómetros

Accesorios principales e indispensables para poder controlar temperaturas en todas las partes interesadas de la caldera.

e. Manómetros

Es un instrumento de medición utilizado para tomar una lectura de presiones manométricas de gases o líquidos. Cabe mencionar que la presión medible por estos instrumentos no es absoluta sino una referencia sobre la presión atmosférica y que nos sirve en este caso para ubicar la presión dentro de la caldera. Punto importante para la seguridad de los operadores, es recomendable que la presión sea de vacío para evitar expulsión de cualquier componente dentro de la caldera.

3. Requisitos de seguridad de una caldera

En toda actividad industrial se imponen reglas de operación de seguridad que ayudan a mejorar la integridad física de las personas, estas normas deben de estar regidas idealmente por reconocidas certificaciones. Estas se encargan directamente del control y velación de que lo estipulado se cumpla. El no apearse a estas normas podría ocasionar pérdidas de los recursos a la institución que realiza las operaciones.

Los sistemas de seguridad deben de poseer apartados de vigilancia que a su vez deben de cumplir los siguientes requisitos:

- a. Vigilancia directa: El operador de la caldera debe de asegurar su presencia en la sala de calderas o en la sala con repetición de las señales de las seguridades, para poder actuar de forma inmediata en caso de anomalía.
- b. Vigilancia indirecta: (...) el sistema de vigilancia de la caldera estará relacionado con los dispositivos de control de los que disponga. (Patiño M. Rosario y Sanz. A. Manuel (2014), p. 48)

C. Tipos de calderas

Existe una gran cantidad de clasificaciones para las calderas según sea la cualidad evaluada, cada una abarca un sistema distinto de funcionamiento, sin embargo, la clasificación que es de interés en estos momentos es la evaluación de las calderas según su disposición. Cuando nos referimos a disposición, nos referimos a la distribución de los elementos internos de la caldera que la hace diferente dependiendo de la necesidad que se tenga.

Atendiendo a la disposición de los fluidos las calderas se dividen en dos grandes segmentos:

- Calderas de tubos de agua o Acuotubulares
- Calderas de tubos de humo o Piro tubulares

1. Calderas Acuotubulares

Las calderas Acuotubulares son llamadas así por la circulación del fluido dentro de los tubos de calentamiento en la parte interna de la caldera, en esta, el fuego y/o los gases de combustión calientan la superficie de los tubos para la evaporación. Una de las ventajas que posee este tipo de caldera es que proporcionan una cantidad mayor de presión de vapor al sobrecalentarlo con mayor facilidad. Al ser un volumen relativamente bajo de fluido se necesita menos tiempo y temperatura para llegar a la ebullición dentro de los tubos. Cabe mencionar que en esta investigación el tipo de caldera evaluada es la de este tipo.

Al ser mayor la cantidad de calor suministrada por el hogar de combustión permite alcanzar una evaporación eficiente y por ende una generación de vapor de mayor calidad al ser sobrecalentado y reducirle la humedad.

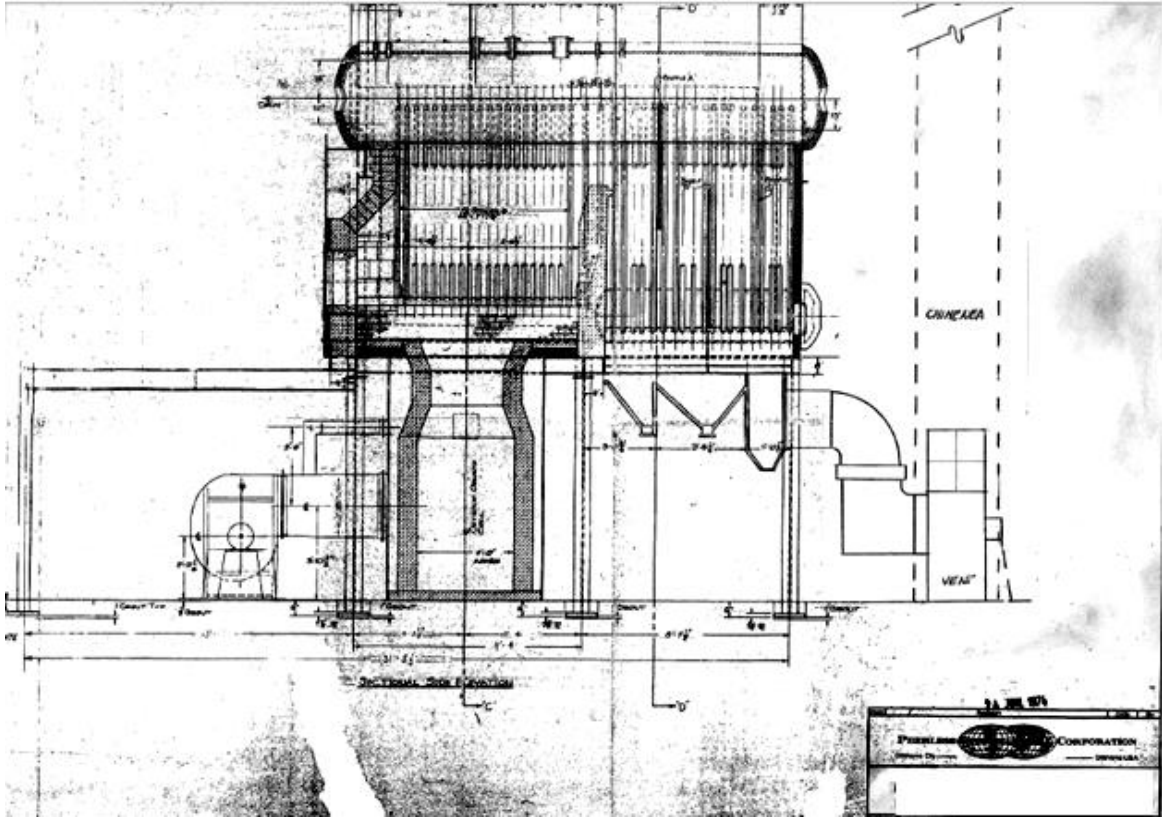


Figura 1: Plano estructural de caldera acuotubular evaluada

(Fuente: proporcionado por Industria Jabonera)

Funcionamiento de caldera acuotubular

El fin de esta definición del proceso es para analizar las variables que ayudaron con la elaboración del diseño de reingeniería en los sistemas ya existentes, que mejorarán la eficiencia de la misma cuando este sea implementado por la empresa. Se conocerá el proceso de arranque de la misma desde un paro total.

El proceso inicia con la verificación de los niveles de agua provenientes del pozo en el domo de almacenamiento y la verificación de fugas en todo elemento con riesgo, como empaques, roscados y acoples. Antes de ser introducida el agua a la tubería para su ebullición es tratada a través de tres suavizadores de agua como se indica en la Figura 2; que funcionan individualmente para bajar su dureza por medio de intercambiadores iónicos que eliminan los iones de dureza (Calcio y Magnesio) y son regenerados por sodio.



Figura 2: Suavizadores iónicos de agua para caldera 1

(Fuente: fotografía propia)

Después del suavizado el agua llega al tanque pulmón en donde será precalentada a 85 °C por medio del mismo vapor recirculado para lograr reducir la cantidad de O₂ en el agua y así reducir la cantidad de secuestrantes químicos, (Ver Figura 3). Al asegurar el correcto parámetro de nivel de agua entre un 70% a un 80% y que no existen fugas en todo el sistema, se procede con el proceso de ignición en el hogar (Figura 4) de forma manual hasta llegar a generar un fuego apropiado para la introducción del combustible (cascabillo de café).



Figura 3: Tanque pulmón de precalentamiento de agua

(Fuente: fotografía propia)

Seguido de esto se arrancan los ventiladores, iniciando con el tiro inducido operado de forma manual, seguido del arranque automatizado del tiro forzado junto con los alimentadores, todo esto con el fin de mantener un sistema de seguridad y que se aproveche el tiempo de combustión para no apagar el fuego generado.

Para mantener el fuego con una temperatura adecuada y que se genere la mayor combustión se mantienen controles de temperatura y de oxígeno en la parte de la chimenea, debido a que si el indicador de oxígeno da una lectura baja significa que la combustión está siendo deficiente, esto ayuda a regular la velocidad de los alimentadores. El vapor generado se mantiene en un control de entre 140 psig como mínimo a 150 psig como máximo generalmente, a una temperatura de 180 °C. Los gases expulsados al ambiente por la chimenea llevan una temperatura entre 250 °C a 275 °C. La proporción de generación de vapor de la caldera es controlada por la demanda de las subplantas de la empresa. El valor general de suministro que se maneja es de 7257.48 Kg/h de vapor.



Figura 4: Hogar de la caldera 1

(Fuente: fotografía propia)

2. Costo de vapor

En la generación de vapor al igual que cualquier otro producto puede ser calculado su valor, para esto se necesita tomar en cuenta variables económicas y técnicas como lo son:

- a. Precio de compra del combustible
- b. Presión del vapor generado por la caldera
- c. Temperatura del agua de alimentación en Fahrenheit

Con estos datos y con la ayuda de las siguientes tablas informativas recolectadas por el Departamento de Energía de los EEUU a través de su portal www.doe.gov en conjunto con Office of Industrial Technologies se logra realizar el cálculo del costo que comprende la generación de vapor en este caso en particular.

Tabla 1: Energía requerida para producir una librar de vapor saturado en Mega Julios (BTU)

Presión de trabajo N/m ² (psig)	Temperatura de agua de alimentación en °C (°F)				
	10 (50)	37.78 (100)	65.56 (150)	93.33 (200)	121.11 (250)
1.034 (150)	1.243 (1,178)	1.190 (1,128)	1.137 (1,078)	1.085 (1,028)	1.031 (977)
3.103 (450)	1.252 (1,187)	1.199 (1,137)	1.147 (1,087)	1.094 (1,037)	1.040 (986)
4.137 (600)	1.249 (1,184)	1.196 (1,134)	1.144 (1,084)	1.091 (1,034)	1.038 (984)

**Calculado a partir de tablas de vapor basadas en la diferencia entre las entalpías de vapor saturado y agua de alimentación por el Departamento de Energía de los EEUU Office of Industrial Technologies www.doe.gov*

Tabla 2: Contenido energético y eficiente de combustión de los combustibles

Tipo de combustible (unidad de venta)	Contenido de energía en Mega Julios/uni de venta (BTU / uni de venta)	Eficiencia de combustión (%)
Gas natural (termia)	105.500 (100,000)	81.7
Gas natural (pie cúbico)	1.086 (1,030)	81.7
Destilado / N ° 2 de aceite (Galón)	146.336 (138,700)	84.6
Destilado / N ° 6 de aceite (Galón)	157.940 (149,700)	86.1
Carbón (Tonelada)	28,486.508 (27,000,000)	87.6
Cascabillo de café (Kg)	17.485 (16,573)	87.7

Nota: la eficiencia de la combustión se basa en calderas equipadas con economizadores y precalentadores de aire y 3% de oxígeno en los gases de combustión. Departamento de Energía de los EEUU Office of Industrial Technologies www.doe.gov

La fórmula para determinar el costo de generación del vapor está dada por la relación entre el precio del combustible, el poder calorífico que aporta, la cantidad de energía necesaria para producir una libra de vapor por dicho combustible y la eficiencia de su reacción al ser combustionada. Todos estos elementos dan lugar a la siguiente fórmula: (U.S. DOE, 2017)

$$\text{Fórmula 4: Costo del vapor} = \left(PC \frac{Q}{Kg} \right) * \left(ECC \frac{BTU}{Kg} \right)^{-1} * \left(ERPV \frac{BTU}{Lb} \right) * \left(\frac{2200 Lb}{ton} \right) * \left(\frac{100}{\%efic} \right)$$

Donde:

ERPV = Energía Requerida para Producir 1 Lb de Vapor

ECC = Energía Calorífica de Combustible

PC = Precio de combustible

%efic = Porcentaje de eficiencia de combustión del combustible

3. Calderas Pirotubulares

Las calderas Pirotubulares son aquellas en donde el vapor es generado a través del calentamiento de tubos que llevan en su interior los gases de combustión para calentar el fluido hasta su punto de ebullición, generando así el vapor. La desventaja de este sistema es la falta de generaciones extremas de presiones a comparación de la Acuotubulares. Por lo cual no es utilizada en procesos que requieran presiones muy altas. El Dr.-Ing. Franz E. (2012) afirma en su informe técnico BOSCH de comparativas entre ambas calderas que: “Dependiendo del tamaño, las calderas Pirotubulares pueden alcanzarse presiones de hasta 3.0 MPa (30 bar) y temperaturas de hasta 300 °C en vapor sobrecalentado.”

Sin embargo, si comparamos una caldera Acuotubular con una Pirotubular que posean similares especificaciones técnicas y del mismo tamaño, no generarán las mismas capacidades.

D. Transmisión de calor en calderas

Se sabe por experiencia que al poseer un objeto caliente que entra en contacto con uno frío, el cuerpo con mayor temperatura transmite su calor hacia el otro cuerpo con menor temperatura. “(...) lo que conduce al concepto de temperatura como la fuerza necesaria para transferir energía en forma de calor” (Smith J., Van Ness H. y Abbott M., 1997, pág. 18).

En una caldera acuotubular la transmisión de calor se da a través del contacto de la superficie del hogar de combustión hacia el fluido caloportante², el cual al ser llevado a su punto de ebullición convertirá esa energía calorífica en trabajo. Un punto importante en esta situación para obtener un funcionamiento óptimo de la caldera es llevar el fluido a una temperatura prácticamente constante en donde la energía necesaria para evaporar el fluido no sea drásticamente forzada a aumentar. (Smith J. et al., 1997) afirman:

“(...) en términos más precisos, la rapidez con la que se transfiere calor de un cuerpo a otro es proporcional a la diferencia de temperatura entre los dos cuerpos; cuando no hay diferencia de temperatura, no existe transferencia neta de calor.”

Lo que nos indica que mientras exista más diferencia de temperatura entre la superficie del hogar de combustión y el fluido, más será afectada la eficiencia de la caldera. Esta dificultad se puede disminuir con la aislación completa del sistema hacia el ambiente para un control estricto de la temperatura.

² Fluido que absorbe el calor y lo transfiere para aumentar la temperatura de otra masa.

E. Combustión

La combustión consta principalmente de la liberación de energía calorífica por fenómenos naturales en reacciones químicas. Sin embargo, se entiende más a detalle este término a continuación para poder evaluar cualquier variable involucrada en la generación de calor por combustión dentro de las calderas.

Cuando tiene lugar una reacción química, los enlaces de las moléculas de los reactivos se rompen, y los átomos y electrones se agrupan para formar los productos. En las reacciones de combustión, la oxidación rápida de los elementos reactivos del combustible trae como consecuencia la liberación de energía al formarse los productos de la combustión. (Moran M. y Shapiro H., 2004, p. 701).

Los productos de la combustión pueden variar dependiendo del tipo de combustible que se utilice, la relación entre la cantidad de oxígeno y combustible; y las condiciones en las que se realice. Dependiendo de esto así será el resultado de la composición de los gases expulsados, algunos pueden ser más densos que otros, más húmedos o más oscuros a pesar que los productos son relativamente invisibles.

1. Características del combustible actual utilizado en caldera 1

El tipo de combustible es una decisión importante que debe de considerar el adquirente de una caldera, ya que sus propiedades caloríficas y la cantidad de humedad que pueda absorber este serán puntos críticos que le determinen el óptimo funcionamiento y aprovechamiento de la energía.

Según análisis hechos en laboratorios de calidad de la empresa evaluada, los porcentajes de humedad que se dieron en los periodos de julio a octubre de 2017 se mantienen entre un rango de 10% a un 15% aproximadamente:

Tabla 3: Historial de porcentajes de humedad de cascabillo de café realizados en CC

<i>Historial de análisis de humedades en cascabillo de café*</i>				
Fecha	%humedad muestra1	%humedad muestra 2	%humedad muestra 3	promedio
7-jul-17	15.67%	13.80%	14.30%	14.59%
14-jul-17	12.98%	14.00%	13.33%	13.44%
21-jul-17	14.00%	13.60%	13.55%	13.72%
11-ago-17	13.00%	13.76%	13.40%	13.39%
18-ago-17	12.80%	13.00%	13.10%	12.97%
25-ago-17	14.00%	12.00%	11.89%	12.63%
15-sep-17	11.00%	10.98%	10.00%	10.66%

<i>Historial de análisis de humedades en cascabillo de café*</i>				
22-sep-17	10.00%	9.98%	9.50%	9.83%
12-oct-17	9.56%	9.99%	10.00%	9.85%
20-oct-17	9.50%	10.11%	9.89%	9.83%
3-ene-18	11.73%	10.93%	11.55%	11.40%
4-ene-18	12.87%	13.04%	12.75%	12.89%
<i>*Fuente: Resultados de laboratorio Industria Jabonera</i>				12.10%

2. Fases de la combustión

Existen fases que se generan a partir de la combustión según (Consejo Nacional de Energía del Salvador, 2014) que son:

- a. Fase de preparación: da lugar a compuestos intermedios y muy activos para que el carbono y el hidrógeno puedan reaccionar con el oxígeno.
- b. Fase de oxidación: proceso en el que se desprende energía en forma de calor.
- c. Fase de terminación: se producen los gases de combustión.

3. Tipos de combustión

De acuerdo a condiciones externas variables, tipo y cantidad de combustible existen diferentes tipos de combustión que se generan a partir de estas.

- a. Combustión completa: reacción en la que se queman todos los combustibles de manera eficiente sin dejar ningún residuo en los humos.
- b. Combustión incompleta: reacción en la que el combustible no se oxida completamente, generando principalmente CO (Monóxido de carbono).
- c. Combustión estequiométrica: reacción basada en cantidades exactas necesarias para producir una combustión completa.
- d. Combustión con exceso de aire: como su nombre lo indica es la reacción que se genera con un porcentaje de aire superior a la estequiométrica para asegurar la combustión completa.
- e. Combustión con defecto de aire: reacción con porcentaje menor a la estequiométrica que produce la combustión incompleta. (Consejo Nacional de Energía del Salvador, 2014)

4. Gases formados

Como ya se mencionaba anteriormente, los gases formados por la combustión serán dependientes de condiciones reales que están involucradas. Se sabe idealmente que para poder generar una combustión completa y eliminar la cantidad de partículas inquemadas se debe de aumentar la cantidad de oxígeno y mantener un mezclado constante a una temperatura muy alta, sin embargo, no es de todo cierto ya que al aumentar la cantidad de oxígeno directamente estamos jugando con la calidad de la combustión debido a que este generara una mayor cantidad de gases y disminuirá su valor calorífico expulsado para calentar por radiación los tubos de agua. Se tiene un buen aporte al ambiente utilizando este método; sin embargo, debemos de conjugar el impacto ambiental y saludable de los gases de la caldera con la eficiencia y funcionalidad de la misma. Ya que la reacción completa de cualquier compuesto orgánico siempre genera los siguientes productos: $C + O_2 \rightarrow CO_2$ y al ser incompleta nos dará $C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO + 1,024 \frac{KJ}{Kg} C$.

Para esto es que se tomaron en cuenta únicamente las variables de temperatura y mezclado para poder diseñar el sistema de tuberías que aumente la eficiencia. La información arriba mencionada está secundada y afirmada en el siguiente párrafo.

Con un cierto exceso de aire se consigue que la combustión sea completa, pero trae consecuencia una reducción de la temperatura de la combustión, que a su vez reduce la transmisión de calor por radiación, aumentando las pérdidas de calor por la chimenea y generando un volumen de gases de combustión mayor por la misma. Por estas razones hay que trabajar con el menor exceso de aire posible sin que se produzcan inquemados (hollín) y así optimizar el rendimiento de la combustión de la caldera. (Sanz M. y Patiño R., 2014, pág. 61)

5. Analizadores de gases de combustión

Esto se controla a través de aparatos de medición en las chimeneas. Dando como principales resultados la cantidad porcentual de O_2 y CO_2 que son directamente proporcionales a la cantidad de aire en el sistema. No existe un parámetro establecido en donde se pretenda mantener un porcentaje fijo de cantidad de aire para la combustión; debido a que cada combustible es diferente y se quemarán en ambientes diferentes, por tal razón esto se queda a las pruebas empíricas que tiene cada caldera. En la industria involucrada se utiliza un aparato especial para la medición de los gases y cálculo de rendimiento de la caldera llamado TESTO 320.



Figura 5: Analizador de gases TESTO 320

(Fuente: Fotografía propia)

A través de este aparato se puede determinar el rendimiento de la caldera y el nivel de gases de CO_2 , CO y O_2 . Según la página oficial de la marca TESTO (Arenzana, 2017) indican que el funcionamiento del aparato es certificado por la normativa UNE-EN 50379-2:2013. Que trata sobre las especificaciones para aparatos eléctricos portátiles diseñados para medir los parámetros de los productos de la combustión en los conductos de evacuación de los aparatos de calefacción. TESTO 320 está perfectamente equipado para la medición de la combustión en sistemas de calefacción (gas y gasoil): el set está compuesto por el analizador de combustión testo 320 B, la sonda de combustión de 180 mm apta para todas las chimeneas del mercado y el alimentador/cargador USB. Tiene el equipo ideal para llevar a cabo análisis de gases de combustión y mediciones en calderas de manera eficiente.

a. Análisis de los gases de escape

La Tabla No. 2 da a conocer las mediciones que lleva a cabo el analizador de combustión TESTO 320 B en los gases muestreados en la chimenea de la organización involucrada, en este se menciona una tendencia descendente sobre la cantidad de CO , lo cual nos indica una mejora en la combustión, sin embargo para lograr una óptima combustión o combustión completa a través del sistema planteado se necesitan valores cero de CO , es decir, lograr una combustión completa; cuando los componentes de la combustión se oxidan completamente, y se forman dióxidos de carbonos (CO_2), agua líquida (H_2O) y en ocasiones (dependiendo del combustible), dióxido de azufre (SO_2), independientemente de la cantidad de aire empleada en la reacción. Esto significa que el oxígeno presente en el aire, ha sido suficiente para oxidar completamente los componentes sin dar lugar a la formación de CO .

Tabla 4: Mediciones de gases de combustión en chimenea de caldera 1

<i>Fecha</i>	<i>No. Medición</i>	<i>Temp. Ambiente (°C)</i>	<i>Temp. Gases Comb. (°C)</i>	<i>Porcentaje de CO2</i>	<i>Porcentaje de O2</i>	<i>Porcentaje de exceso de aire</i>	<i>CO presente (ppm)</i>
feb-16	1	89.8	472.1	11.29%	9.30%	77.70%	1557
	2	91.2	493.3	11.87%	8.70%	67.60%	3977
	3	ND	ND	ND	ND	ND	ND
jun-16	1	29.8	246.4	12.33%	7.00%	45.20%	ND
	2	29.9	246.3	12.77%	6.50%	46.20%	ND
	3	28.9	243.9	10.57%	9.00%	50.30%	3648
ago-16	1	31	258.2	12.80%	7.00%	43.60%	6954
	2	30.4	252.3	12.16%	7.70%	50.60%	2397
	3	28.1	255.6	12.20%	8.00%	50.30%	4560
sep-16	1	29	256.9	14.50%	7.80%	45.20%	2658
	2	30.2	252.8	14.25%	8.10%	40.20%	2158
	3	29.5	261.2	15.20%	8.10%	42.50%	2856
dic-16	1	29.8	154.8	8.45%	9.00%	45.80%	250
	2	31.5	155	9.85%	8.50%	46.80%	450
	3	31.4	157.2	9.64%	10.50%	50.10%	378

Fuente: Datos proporcionados por Industria Manufacturera

F. El tiro

“Se llama tiro a la diferencia de presión que existe entre los gases del hogar y el aire ambiente, lo que permite el paso necesario de aire para la combustión”. (Bahamondes, 2017)

El ingreso de aire al sistema se puede dar de forma natural, compensada o artificial dependiendo del proceso. Los sistemas de tiro natural no requieren más que una compuerta normalmente abierta por donde deban escapar los mismos gases de la combustión, en ésta; la combustión utiliza solo el aire necesario para que suceda la combustión, tomándola del ambiente por diferencias de densidades y temperaturas del aire, a mayor diferencia de temperatura, mayor será la velocidad de escape de los gases. “Este tiro natural, así definido, depende principalmente de la altura de la chimenea y por tanto es mayor cuanto mayor es su altura (H)” (Sanz M. y Patiño R., 2014, pág. 65). Sin embargo, si se desea controlar la combustión y generar temperaturas altas quemando de manera eficiente el combustible se debe de utilizar un sistema de tiro artificial independiente o compensado. El tiro artificial se divide en tiro forzado y tiro inducido, cada uno en lugares diferentes para funciones diferentes. Este sistema se utiliza principalmente cuando se tiene una

variación recurrente en el ingreso de combustibles sólidos. El tiro forzado obliga al aire a ingresar a sobrepresión dentro del hogar a través de ventiladores. Lo contrario que pasa con el tiro inducido que genera una depresión en la caldera, succionando los gases en la salida a chimenea.

La utilización del conjunto de tiro forzado e inducido en sincronía son llamados como Tiro Compensando, ya que optimiza más la combustión, y por consecuencia también aumenta la eficiencia de la caldera al mantener una temperatura elevada y controlada. Los tiros manejan un mecanismo de dámpers³ de flujo que varían la velocidad del aire a introducir en la caldera de una manera automática o manual.

G. Control de combustión

Según (Bahamondes, 2017) los principales problemas que afectan en una buena combustión son las siguientes:

1. La cantidad de aire

El aire es indispensable para que se produzca la combustión, se sabe que el oxígeno es el principal elemento que hace posible este fenómeno, pero, ¿qué pasaría si el fuego dentro del hogar de la caldera no estuviera recibiendo el suficiente oxígeno?, se produciría el fenómeno conocido popularmente como combustión incompleta, dicha reacción tiene como principal producto el CO que además de ser riesgoso para la salud de las personas se visualiza perfectamente al presentarse en los gases de escape como humos oscuros. Ahora bien, si en caso contrario, la combustión sobrepasa la cantidad ideal de oxígeno, se convertiría en una combustión con exceso de aire, que se considera como una ventaja para el sistema ya que proporciona una completa reacción que libera CO₂ y regala al sistema una mayor temperatura y aprovechamiento del combustible.

2. El tiro

La velocidad a la que ingresa el aire al sistema es crucial para la completa utilización del combustible, y la rápida expulsión de los gases de escape ayuda a la disminución del riesgo de que el fuego cese y se termine apagando. En la empresa evaluada, se utiliza el conjunto de tiro artificial compensado, inyectando aire a temperatura ambiente al hogar de la caldera a través del tiro forzado y regulándolo a través de dámpers manuales, ver Figura 6. Y expulsando los gases para mantener una presión estable dentro del hogar y liberando la reacción de toda contaminación y deficiencia, ver Figura 7.

³ Conjunto de compuertas de control de flujo de inyección

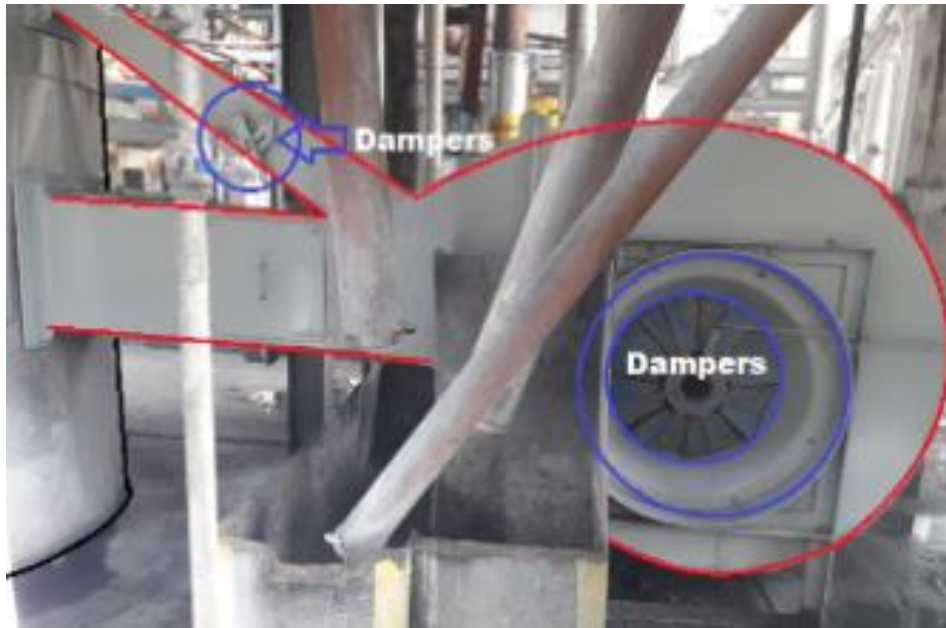


Figura 6: Tiro forzado caldera 1 de biomasa

(Fuente: fotografía propia)



Figura 7: Tiro inducido caldera 1 de biomasa

(Fuente: fotografía propia)

Para mejorar el proceso de quemado del combustible (Cascabillo de café) se propone en este punto del tiro forzado la introducción de disipadores de calor dentro de los viaductos que conducen al hogar y calentarlos por los gases de salida de la chimenea como lo verá más adelante.

3. La temperatura del hogar

Para poder comprender las temperaturas a manejar en cualquier reacción química es necesario comprender los siguientes puntos explicados por (Bahamondes, 2017):

- a. Temperatura o punto de inflamación: es la temperatura a la cual un combustible empieza a desprender vapores inflamables.
- b. Temperatura o punto de ignición: es la temperatura a la cual se inicia la combustión.

Ahora bien, mantener una alta temperatura dentro del hogar de la caldera es quizás una de las tareas más importantes en el manejo de estas máquinas, y siempre dependerá del tipo de combustible llegar a su punto de ignición, es decir, dependiendo del tipo de combustible necesitará más o menos temperatura para alcanzar a quemarse. Siendo Cascabillo de café el combustible utilizado en la empresa evaluada, se detalla que posee un Poder Calorífico de 17.50 MJ/kg \approx 4179 kcal a humedades entre 10% y 15% (Morán, 2013). Y se corrobora con la información de acuerdo a estudios realizados por (Palacios & Betancurt, 2005), la cascarilla del café presenta las siguientes propiedades:

Tabla 5: Propiedades del cascabillo de café

El poder calorífico es de aproximadamente 7458 Kcal/Kg.
El porcentaje de cenizas es de aproximadamente 0.6%
Su humedad promedio es de 5.4 %
El Material volátil es de 87.7 %
Densidad aparente promedio 0.33 g / cm ³
El tamaño de las partículas oscila entre 0.425 y 2.36 mm de diámetro

Fuente: Tesis de Rediseño de horno múltiple, para secado de café para ser alimentado con gas metano en empresa Transbrisas Morán, Eduardo José Uribe, USAC Guatemala.

Si se centra atención en dos datos relevantes como el poder calorífico y la humedad, se puede verificar que en la tabla se indica un dato mayor que lo que aclara (Morán, 2013) en cuanto a poder calorífico, tomando como referencia los resultados de hechos en los laboratorios de la organización involucrada; con termobalanzas, se encuentra el cascabillo con una humedad aproximada de entre 10% a 15% lo que explica porque en la tabla anterior indica un poder calorífico mayor, ya que este estará siempre ligado a la cantidad de humedad que le sea proporcionada al combustible y por ende variará la cantidad de temperatura necesaria para llevarla a su punto de ignición. Ya lo afirma así (FOCER, 2002) “(...) el poder calórico por unidad de masa está relacionado directamente con su contenido de humedad”.

4. El estado de la instalación

Cada uno de las variables hasta ahora mencionadas son de vital importancia para mantener la eficiencia de la caldera, pero donde encontramos la mayor cantidad de pérdidas caloríficas es en la estructura de la caldera, ya que en ellas se propaga el calor principalmente y si no se mantiene un buen aislamiento o mantenimiento se dejará salir el valioso calor, un ejemplo de ubicaciones en donde podemos tener pérdidas es; en sellado de compuertas, aislamiento de las tuberías, entradas de aire, estado de los ladrillos refractarios, entre otros. Analizando la estructura de la caldera de la empresa ahora evaluada se llega a la conclusión que su aislamiento está en condiciones aceptables y que no tendrán pérdidas considerables de calor. (Ver Figura 8).



Figura 8: Aislamiento térmico de tuberías de caldera de biomasa

(Fuente: fotografía propia)

H. Rendimiento

“El rendimiento de la combustión es el cociente entre el calor aprovechado y el calor aportado por el combustible, expresando el resultado en porcentaje (...)” (Sanz M. y Patiño R., 2014). Como se definió a un inicio para poder comprobar la eficiencia del nuevo sistema de recirculación se debe de tomar mediciones de temperaturas en el hogar de la caldera y en la salida principal de vapor, para comparación y análisis de la cantidad de calor suministrada por el combustible hacía el agua. La primera fórmula sería:

⁴Fórmula 1:

$$\text{RENDIMIENTO} = \frac{\text{Calor contenido en el vapor}}{\text{Calor contenido en el combustible quemado}} * 100$$

Sin embargo, como también se mencionó anteriormente, la organización involucrada posee el equipo TESTO 320 que es el encargado de brindar resultados importantes de los análisis de gases expulsados por la chimenea, entre ellos está el cálculo de rendimiento a través del dato de poder calorífico del cascabillo de café. Esto le permite al operador y al encargado de la caldera saber el estatus de la misma. Estos procedimientos de medición se realizan una vez al mes, dando los siguientes resultados:

Tabla 6: Historial de rendimientos de caldera 1

Fecha de medición	Medición 1	Medición 2	Medición 3
mar-16	74.60%	73.90%	
jun-16	88.10%	88.50%	84.10%
ago-16	87.70%	88.90%	86.50%
sep-16	88.90%	85.80%	87.50%
dic-16	88.50%	87.20%	85.20%
Promedio parcial	85.56%	84.86%	85.83%
	Promedio Total	85.42%	

Fuente: Datos proporcionados por Industria Jabonera

⁴ Fuente: (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de Energía, 2009)

1. Rendimiento por inquemados

Existe otra manera que se puede medir el rendimiento de una caldera, este es llamado rendimiento por inquemados, esta fórmula calcula la cantidad en porcentaje de pérdidas generadas por los inquemados medidos anteriormente por un aparato como el TESTO 320 y se lo resta a 100%. A partir de mediciones de O₂, CH (Hidrocarburos), CO₂ y otras variables se puede considerar la siguiente fórmula:

⁵Fórmula 2:

$$P_{inq}(\%) = \frac{21}{21 - O_2} * \left(\frac{CO}{3100} + \frac{CH}{1000} + \frac{OP(\%)}{65} \right)$$

Donde:

- P_{inq} = Pérdidas por inquemados (expresada en %)
- O₂ = Porcentaje de Oxígeno
- CO = Cantidad en ppm de Monóxido de carbono
- CH = Cantidad en ppm de Hidrocarburos contenidos
- OP = Porcentaje de opacidad de los gases

Este cálculo se puede realizar fácilmente si se posee el equipo de medición de gases de expulsión. Como se mencionó anteriormente el equipo de medición TESTO 320 está en total disposición para medir todos estos elementos, por lo cual automáticamente se realiza la operación dentro de su software para poder realizar el cálculo de rendimiento por inquemados.

Mientras existan menor cantidad de CH, CO y OP la eficiencia se logrará aumentar. Y la razón de esta investigación fue para proponer una oportunidad de mejora en el sistema, para aumentar la temperatura en el hogar de combustión y mejorar la eficiencia de la caldera.

Todo lo anterior da importancia al mejoramiento del rendimiento a través del proceso propio de combustión. Sin embargo, la empresa Testo menciona que el rendimiento total de la caldera está compuesto de dos términos (...) a) Rendimiento de Combustión, que indica la parte de la energía total que está disponible en el hogar de la caldera tras el proceso de combustión y b) Rendimiento del horno, que dependerá de diseño del horno y su funcionamiento. (Tiempo Real S.A., 2017)

⁵ Fuente: (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de Energía, 2009)

Tomando como referencia esto se puede entender que el diseño propuesto es una combinación de ambos incisos, ya que modificando la estructura del horno se puede optimizar el proceso de combustión dentro del hogar; al ingresar con aire caliente con un acoplamiento totalmente nuevo. Esto ayudará al mejor aprovechamiento del combustible para que sea quemado.

2. Pérdidas

El calor de los gases de una reacción química de combustión se considera como energía perdida en forma de vapor sobrecalentado por la cantidad de hidrógeno, que forma H₂O en cada reacción del combustible. Por lo tanto, se aprovecha esta energía como energía funcional dentro del sistema. El impacto que se puede generar en el sistema dependerá del tipo de combustible como lo indica la tabla siguiente:

*Tabla 7: Porcentajes de pérdidas de calor latente en vapor contenido en reacciones de combustión**

<i>Tipo de combustible</i>	<i>Energía perdida</i>
Gas natural	9% a 10%
Fuel-oil	5% a 6%
Carbón	3% a 4%

* *Medición de rendimiento con instrumentos TESTO para Tiempo Real S.A., 2017,*

Según Bahamondes (2017) los factores que influyen en el rendimiento de una caldera son los siguientes, considerando que un rendimiento de 70% es el que se logra generalmente en la práctica:

Tabla 8: Porcentajes que influyen en rendimiento de una caldera

<i>Razón</i>	<i>Porcentaje</i>
Por combustión incompleta	9.80 %
Por gases calientes de chimenea	14.00 %
Por cenizas o escorias	2.85 %
Por radiación y otras causas	3.35 %
Rendimiento de la caldera	70.0

Fuente: Asociación chilena de seguridad en informe de potencia y rendimiento de caldera
<http://www.achs.cl/portal/Paginas/Home.aspx>

a. Otros parámetros que afectan en el rendimiento de una caldera

Según Greenpyme and Nordic Developent Fund (2017) se consideran algunos otros factores para la evaluación de las pérdidas de rendimiento y a su vez secundan la información descrita en la Tabla 14, estos factores son:

- Nivel de exceso de aire
- Régimen de fuego
- Temperatura de los gases de chimenea
- Temperatura de agua de alimentación
- Temperatura de aire de combustión
- Suciedad de las superficies de transmisión de calor
- Purga
- Presión de vapor (fugas)
- Pérdidas de calor en la carcasa de la caldera
- Combustible

V. METODOLOGÍA

A. Situación actual

En el estado actual de la caldera como se muestra en la Figura 9 (sin precalentador de aire en tiro forzado) presenta un rendimiento de 85.42% como se menciona anteriormente, y no cuenta con un sistema de precalentamiento del combustible (cascabillo) para eliminar el exceso de humedad que pudo adquirir dentro de las bodegas. Tomando como referencia la información antes mencionada en la tabla 1 sobre el cascabillo de café, antes de ingresar a bodegas presenta una humedad promedio de 10% a 15%, sin embargo, en el proceso de descargar y almacenamiento se adquiere un porcentaje adicional que no se le es quitado antes de ingresar a quemarse en la caldera. Esta variable también es un factor importante en el rendimiento de la caldera.



Figura 9: Perspectiva de caldera 1 en estado actual

(Fuente: fotografía propia)

Implementar una extensión de tubería en la salida de la chimenea para que los gases de expulsión sean redirigidos de nuevo al sistema para el aprovechamiento de calor del mismo fue la opción elegida para aumentar su rendimiento.

1. Análisis del proceso actual

Actualmente, caldera 1 no cuenta con un sistema eficiente de aprovechamiento de la energía calorífica que le permita aumentar su rendimiento total, con una alimentación de cascabillo sin tratamiento; antes de su consumo y un tiro forzado con aire relativamente frío da lugar a que la combustión en la caldera sea más tardada y por supuesto menos eficiente.

En dicha caldera existe ya un sistema precalentador de agua instalado que en su momento permitió aumentar considerablemente el rendimiento y a su vez ahorrar en el consumo de energía que era necesario para calentar el agua. A lo largo del proceso se observó que la combustión de la caldera posee oportunidad de mejora, a simple vista también se nota por la opacidad de sus gases de combustión, lo cual está comprobado anteriormente con la cantidad de CO que expulsa al ambiente en conjunto con otros gases que indican que la combustión no está siendo realizada por completo, por lo que sus descargas de calor son desperdiciadas al irse directamente por la chimenea, dispersándose en el aire.

Al no darle otros usos; esto representa una pérdida de calor considerable para la caldera, ya que al perderse, se necesita consumir más combustible para cumplir con la demanda planificada. Al descargarse gases con inquemados al medio ambiente, se corre el riesgo de que a la salud de las personas ubicadas en espacios cercanos enfermen.

Como se observa en la Figura 10: el diseño actual de la caldera 1 desperdicia una gran cantidad de energía calorífica, al no ser utilizada por segunda vez en procesos que son de vital importancia para elevar el rendimiento. El diseño propuesto tiene impactos considerables aprobados por referencias válidas de que aumentará el rendimiento como mínimo a un postulado 90%.

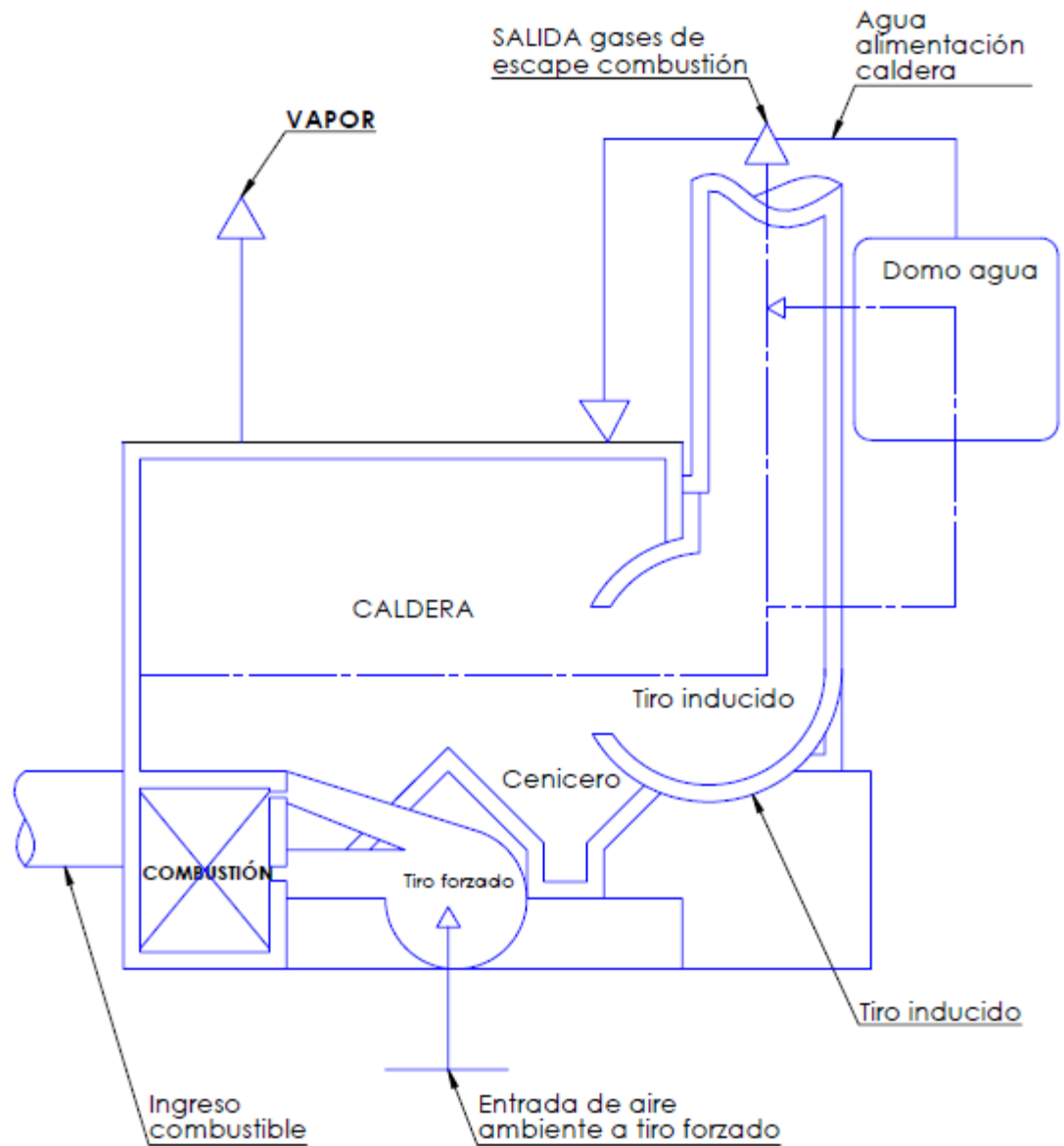


Figura 10: Diagrama representativo de caldera 1 diseño actual

(Fuente: diseño propio)

a. Etapas y herramientas de investigación

Para lograr realizar el objetivo de la investigación y el diseño en planos de las tuberías que optimizaran la combustión de la caldera se tuvieron que realizar las siguientes actividades obteniendo resultados durante el proceso, a continuación, se detalla el procedimiento del método utilizado:

- 1) Etapa 1: Observación y obtención de datos
- Se detectó la oportunidad de mejora en el sistema mecánico de la caldera a través de observación general del proceso de generación de vapor.
 - Se solicitaron datos históricos del funcionamiento de la caldera y mediciones de datos generales en las áreas que están involucradas con la eficiencia de la combustión, como los gases en la salida de la chimenea, presión de vapor en salida de caldera, consumo de combustible y temperaturas en distintas partes del proceso actual., de los cuales se determinaron los siguientes datos importantes para la investigación:

Tabla 9: Parámetros técnicos de operación de la caldera de industria manufacturera de jabones

Parámetros de operación de caldera 1*	
Flujo de vapor (Capacidad)	7,257.48 Kg/h (16,000 lb/h)
Presión vapor	min. 965.27 KPa (140 psig) Máx. 1.03 MPa (150 psig)
Temperatura de vapor (Promedio)	180 °C
Temperatura de agua de alimentación	85 °C
Temperatura de gases de combustión	min. 250 °C Máx. 275 °C
Potencia de la caldera	600 hp \approx 447.42 KW
Tiempo de operación de caldera	8,352 h/año
Promedio de consumo mensual de combustible	735,269 Kg
*Información proporcionada por Industria Jabonera	

Tabla 10: Datos técnicos de cascabillo de café

Especificaciones de combustible (Cascabillo de café)	
Precio	0.64 Q/Kg
Energía Calorífica	16,572.5 BTU/Kg \approx 4.857 KWh/Kg
% de combustión (eficiencia)	87.70%
*Información proporcionada por Industria Jabonera	

- Se realizaron mediciones dimensionales en la caldera, principalmente en los posibles tramos por donde se consideró pudiera atravesar el conjunto de tubos hasta llegar a su punto final. En el cual se determinó que la mejor ruta por donde pudiera instalarse la tubería de gases sería justo en un costado de la caldera para aprovechar el tramo recto más largo que permitiera el menor costo.

2) Etapa 2: Investigación y realización del diseño de planos

- a) Se analizó el tipo de material a utilizar en las tuberías que soportaría las temperaturas de los gases de 250 °C hasta 275 °C y que aportara un costo mínimo, quedando como material final el acero industrial negro, cédula 40, con diámetro nominal en el conducto principal de 3 pulgadas, y en las desviaciones para sus precalentadores diámetros de 2 pulgadas hasta ½ pulgada con cédula 30, para el aprovechamiento de la energía calorífica y que pudiera ser transmitida de mejor manera al ambiente dentro del tiro forzado.
- b) Se investigaron las especificaciones técnicas de los materiales a utilizar para la realización del diseño de un croquis de la ruta crítica de tuberías, quedando las siguientes especificaciones: (utilizando las remarcadas)

Tabla 11: Especificaciones de tubería para gases

DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS DE LA TUBERÍA PARA CONDUCCIÓN DE AGUA, GAS Y AIRE NMX-B-177

DIÁMETRO NOMINAL		DIÁMETRO EXTERIOR		ESPESOR		CED	PESO EXT. LISO		PESO POR TUBO (kg)		TUBOS/ TON.	PRESIÓN DE PRUEBA ASTM-A-53-A		SISTEMA PARA EMPACAR peso por paquete		
pulg.	mm	pulg.	mm	pulg.	mm		lb/pie	kg/m	extr. liso	c/roscay conle		lb/pulg. ²	kg/cm ²	Tubos/Paq.	kg	lb
1/2	13	0.840	21.3	0.109 0.147	2.77 3.73	40 80	0.85 1.09	1.27 1.62	8.13 10.37	8.20 10.44	123 97	700 850	50 60	127 127	1033 1317	2277 2903
3/4	19	1.050	26.7	0.113 0.154	2.87 3.91	40 80	1.13 1.47	1.69 2.20	10.82 14.08	10.92 14.12	93 71	700 850	50 60	127 127	1374 1781	3029 3926
1	25	1.315	33.4	0.133 0.179	3.38 4.55	40 80	1.68 2.17	2.50 3.24	16.00 20.74	16.16 20.90	63 48	700 850	50 60	91 91	1456 1887	3210 4160
1 1/4	32	1.660	42.2	0.140 0.191	3.56 4.85	40 80	2.27 3.00	3.39 4.47	21.70 28.61	21.90 28.81	46 35	1200 1800	85 127	91 61	1975 1745	4354 3847
1 1/2	38	1.900	48.3	0.145 0.200	3.68 5.08	40 80	2.72 3.63	4.05 5.41	25.92 34.62	26.20 34.90	39 29	1200 1800	85 127	91 61	2359 2112	5201 4656
2	50	2.375	60.3	0.154 0.218	3.91 5.54	40 80	3.65 5.02	5.44 7.48	34.82 48.87	35.28 48.34	29 21	2300 2500	162 176	61 32	2124 1532	4683 3377
2 1/2	64	2.875	73.0	0.203 0.160	5.05 4.06	40 NX	5.79 4.64	8.63 6.91	55.23 44.23	56.28 45.35	18 22	2500 1950	176 137	37 37	2041 1637	4500 3609
3	76	3.500	88.9	0.216 0.170	5.49 4.32	40 NX	7.58 6.05	11.29 9.01	72.26 57.66	73.78 59.19	14 17	2220 1930	156 136	19 19	1373 1096	3027 2416
4	102	4.500	114.3	0.237 0.188	6.02 4.78	40 NX	10.79 8.66	16.07 12.91	102.85 82.62	104.82 84.48	10 12	1900 1500	134 105	19 19	1953 1568	4306 3457

*Fuente: Información tomada de Acero BSV, empresa mexicana dedicada a la comercialización y distribución de distintos productos derivados del acero. La tubería cédula 40 cumple con la norma internacional ASTM A 53 Link: <http://acerobsv.com/tuberia-negra.html>

- c) Se diseñaron los planos mecánicos de la estructura a montar para la recirculación de gases con la ayuda del Software asistido SolidWorks.
- d) Se investigó con bases bibliográficas la funcionalidad de la propuesta de diseño para garantizar una mejora del rendimiento, dando como resultado una referencia positiva que promete un aumento de hasta un 14% más en condiciones perfectas.
- e) Se investigaron precios de instalación y de materiales a utilizar, a partir de esta investigación se presenta el listado de materiales a utilizar para poder realizar la propuesta de diseño:

Tabla 12: Presupuesto aproximado para la instalación de la propuesta de diseño (materiales y servicio)

No.	Cantidad	Descripción	Precio individual	Precio total
1	6	Tubo de hierro negro de 3"	Q504.00	Q3,024.00
2	2	Tubo de hierro negro de 2"	Q421.00	Q842.00
3	2	Tubo de hierro negro de 1/2"	Q100.00	Q200.00
4	1	Válvula de bola 1/2"	Q300.00	Q300.00
5	2	Cheque de 2"	Q1,850.00	Q3,700.00
6	1	Cheque de 1"	Q223.00	Q223.00
7	-	Soldadura	Q10,000.00	Q10,000.00
8	-	Aislamiento	Q50,000.00	Q50,000.00
INVERSIÓN APROXIMADA TOTAL				Q68,289.00

Fuente: Información basada en Tesis análisis de pérdidas y propuesta de recuperación de condensado en dos líneas de producción del área de lavandería de empresa manufacturera de jabón, Catherine Lissette Ortiz Hernández, UVG. 2016 y cotizaciones propias

3) Etapa 3: Análisis

- a) Se analizaron varias opciones que fueron propuestas y debatidas por interesados de la organización.
- b) Se presentó la propuesta óptima que representaba el costo más bajo con el mismo beneficio.
- c) Se analizó el funcionamiento teórico del nuevo sistema con referencias válidas para mejorar el rendimiento de la caldera. Quedando el diseño propuesto al siguiente diagrama:

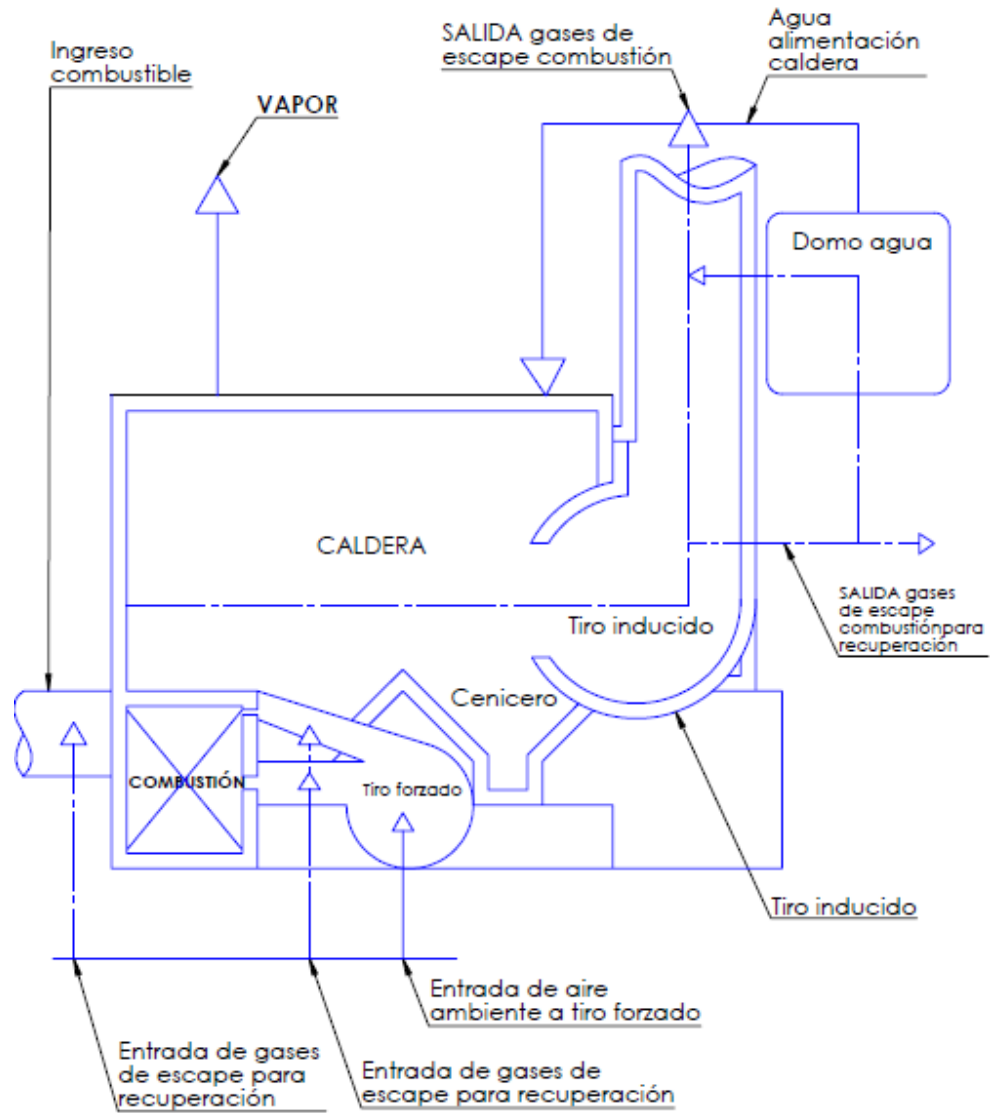


Figura 11: Diagrama propuesto para el nuevo diseño de la caldera 1

(Fuente: diseño propio)

4) Etapa 4: Conclusión

- a) Se presentó el diseño ganador con planos asistidos por computadora.

La secuencia de actividades realizadas estuvo dada por el cronograma siguiente.

B. Cronograma de actividades

Tabla 13: Cronograma de actividades detalladas para la investigación

	<i>Fecha estimada</i>	<i>Actividad</i>	<i>Herramientas</i>	<i>Observaciones</i>
Investigación preliminar	09/06/2017	Análisis del proceso completo de la caldera.	Planos, presencia e inducciones.	***
	23/06/2017	Medición de gases en salida de combustión.	Medidor de gases e históricos controlados.	Se determinó el impacto de los gases en la recirculación.
	30/06/2017	Análisis de datos obtenidos.	Internet, libros y referencias profesionales.	***
	07/07/2017	Medición de parámetros de entrada de la caldera. (combustible, temperatura aire y otros)	Termómetros, balanzas, hidrómetros, e históricos controlados entre otros.	***
	14/07/2017	Medición de parámetros de salida de la caldera. (presión de vapor, temperaturas y otros)	Manómetros, termómetros, hidrómetros e históricos controlados entre otros.	***
Investigación principal	21/07/2017	Indagación de fórmulas sobre rendimiento de la caldera.	Libros y material investigado.	Para referencia
	28/07/2017	Recopilación de datos de consumo y costos de la caldera en estado actual.	Registros documentales de la caldera y empresa.	***
	31/07/2017	Estudio de áreas a modificar para la recirculación.	Planos y mediciones físicas.	Se realizaron varias propuestas de dirección y toma de gases para la reducción de costos de inversión.
	05/08/2017	Investigación de mecanismos favorables para optimización.	Internet, libros y referencias profesionales.	
	12/08/2017	Investigación de funcionamiento de la propuesta.	Internet, libros y referencias profesionales.	
Elección y Conclusión	04/09/2017	Análisis de propuestas.	Libros y material investigado.	
	01/12/2017	Elección de propuesta que genera menor costo con mismos beneficios.	****	Con jefes y gerentes del área de calderas.
	08/12/2017	Diseño de nuevo conducto.	Software de diseño	Se utilizó el programa de diseño profesional Solid Works.
	16/12/2017	Conclusión	***	***
	16/12/2017	Redacción y presentación final de investigación.	Microsoft Office	La redacción y obtención de datos se trabajó en paralelo con todas las actividades.

Fuente: propia

1. Cronograma de actividades por semana

Tabla 14: Cronograma de actividades por semana

Actividad	Cronograma de actividades por semana																																				
	Jun					Jul				Ago					Sep.				Oct				Nov					Dic				Ene					
semana:	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	5	
Análisis del proceso completo de la caldera y medición de gases en salida de combustión, así como parámetros de entrada y salida de la caldera																																					
Análisis de rendimiento actual, consumo y costos de la caldera.																																					
Estudio de áreas a modificar para la recirculación																																					
Investigación de sistemas mecánicos favorables que se dirijan por la ruta crítica de la caldera para reducir costos de instalación.																																					
Diseño de propuesta óptima de diseño de estructura																																					
Presentación y aprobación de propuesta del plan elegido																																					
Redacción y presentación a asesor del trabajo impreso para revisión																																					
Revisión de detalles para impresión de trabajo de graduación final																																					
Impresión y presentación de trabajo de graduación a autoridades de la universidad																																					

Fuente: propia

C. Estimación de costos y ahorros

1. Costo del vapor basado en el combustible para la caldera en evaluación

Datos:

- Precio de compra del combustible: en este caso cascabillo de café (Q 0.64/Kg)
- Presión del vapor generado por la caldera: promedio de 999.74 KPa (145 psig)
- Temperatura del agua de alimentación en Fahrenheit: 85 °C (185 °F)

Reemplazando valores en la fórmula 4 mostrada anteriormente, el costo para la producción de vapor sería el siguiente:

$$\text{Costo del vapor} = \left(0.65133 \frac{Q}{Kg}\right) * \left(16,572.5 \frac{BTU}{Kg}\right)^{-1} * \left(1,028 \frac{BTU}{Lb}\right) * \left(\frac{2200 Lb}{ton}\right) * \left(\frac{100}{87.7}\right)$$
$$\text{Costo del vapor} = 101.3512 \frac{Q}{\text{tonelada de vapor}}$$

Aproximando el valor dado se tiene:

$$\text{Costo del vapor} \approx Q 100.00 \text{ por tonelada producida de vapor.}$$

Este es el costo que le lleva a la empresa para generar vapor.

2. Estimación de ahorros anuales en consumo de combustible

En este paso se considera el procedimiento a realizar para la obtención del ahorro estimado anual. (Procedimiento de cálculo, ver anexo).

- Para proyectar el ahorro anual que generará la utilización del mecanismo de recirculación se toma en cuenta los datos reales de la caldera, principalmente extrayendo el valor correspondiente al ahorro estimado para el aumento de eficiencia que representa el elevarse de un 85% a un 90%, este dato se mostrará más adelante en la Figura 23, con esto se logra determinar el ahorro en US\$ por aumento de eficiencia por cada US\$ 100.00 de combustible.
- Tomando en cuenta una tasa de cambio de Q 7.4 por cada US\$ 1.0 que se maneja actualmente. El valor dado en la Tabla 23 se considerará en quetzales.
- Se debe realizar la relación entre el valor ahorrado por cada US\$ 100.00 de combustible, dando un resultado adimensional.

- d. Seguido se debe de conocer el costo mensual de consumo de cascabillo de café para que sea multiplicado por el resultado de la relación anterior.
- e. A este resultado se le debe multiplicar por 12, que corresponde al año para recibir la cantidad total de ahorro proyectado anual.

3. Pérdidas

Como se puede observar en la Tabla 8, un factor representativo en el rendimiento de la caldera es la pérdida de gases calientes de chimenea; representado por un 14.00 %. Por lo que se comprueba el objetivo de la investigación de aumentar el rendimiento actual de la caldera de un 85.42% a más de un 90% debido a que el sistema actual no posee ningún precalentador en el tiro forzado. Si consideramos que el nuevo sistema no tendrá pérdidas de temperatura y de presión, se debería de llegar a consultar un rendimiento óptimo de la caldera de un 92% como mínimo, sin embargo, considerando las pérdidas reales de temperatura por el tramo largo de la instalación y la falta de una presión constante se asegura un aumento de por lo menos 90%.

D. Propuesta única

Para realizar la propuesta de diseño; se midieron todas las posibles rutas por donde se podría trazar el nuevo acoplamiento de la tubería. Las áreas involucradas en donde se propuso el diseño son los laterales de la caldera, extendiendo secciones que llegan primero al tiro forzado y siguiendo su ruta hasta desviarse al alimentador de combustible como lo indica la Figura 12.



Figura 12: Ruta crítica propuesta para el diseño de tubería

(Fuente: diseño propio)

El tiro forzado de la caldera 1 posee dos entradas en ángulo donde dispersa el aire, en ambas se propone introducir tuberías de ½” cédula 30 como disipadores de calor para que sean golpeados por el aire de ingreso (antes regulado) por los dämpers proporcionando a la cámara de combustión un mejor aprovechamiento del combustible. Ver Figura 13.

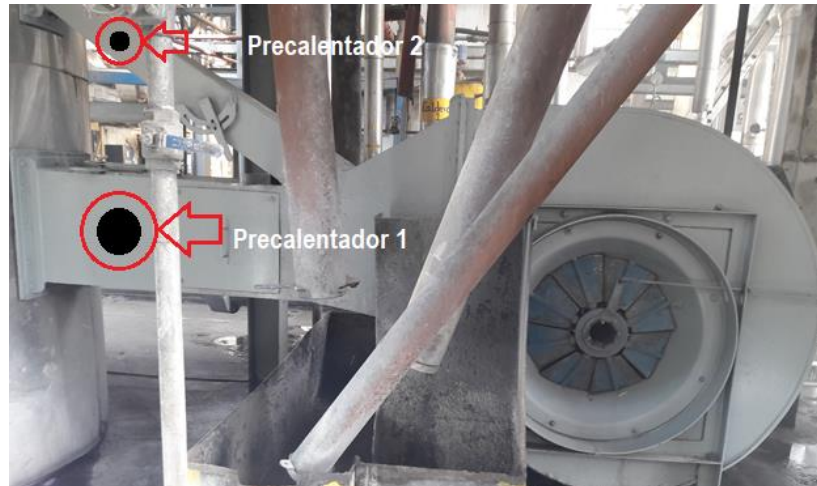


Figura 13: Ubicación de entrada de los disipadores de calor en tiro forzado

(Fuente: fotografía propia)

Al llegar a su destino en la entrada de aire del hogar, los gases continúan su curso por la tubería llegando hasta la parte inicial del sistema en donde se introduce el combustible a través de un tornillo helicoidal, a este se le introducirá tubos de ½” cédula 30 para la transmisión de calor por radiación.

Suministrando pequeñas cantidades de gases calientes por diminutos agujeros. Se pretende que con este diseño se disminuya la humedad de ingreso del combustible de 15% a un 10% como mínimo por ser ésta la cantidad de humedad mayor que poseen los gases de combustión. Ver Figura 14.



Figura 14: Ubicación de entrada de disipadores de calor en alimentación de combustible

(Fuente: fotografía propia)

La estructura de las tuberías será soldada con material de acero industrial hierro negro cédula 40 en ducto principal y cédula 30 en los disipadores. El diseño que se utilizará en los disipadores es el siguiente:

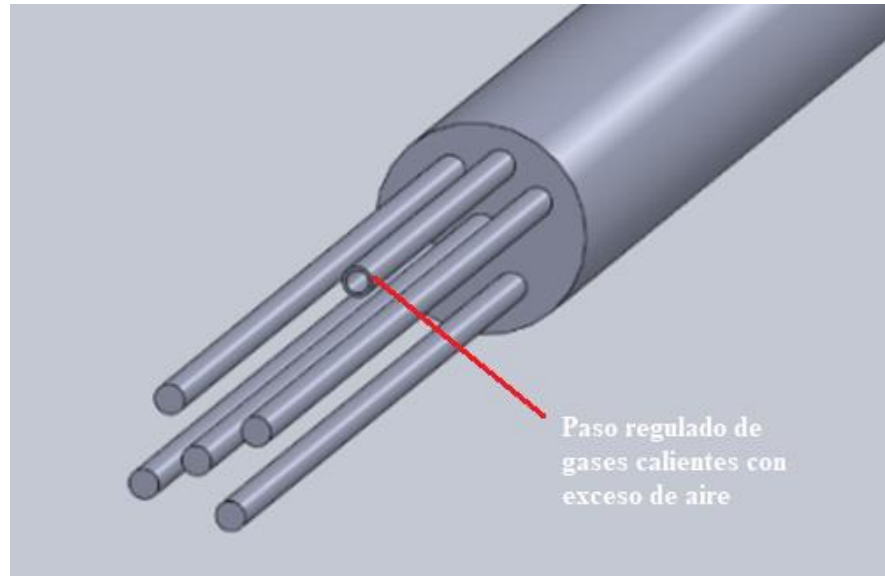


Figura 15: Diseño 3D del disipador de calor de tiro forzado 1

(Fuente: diseño propio)

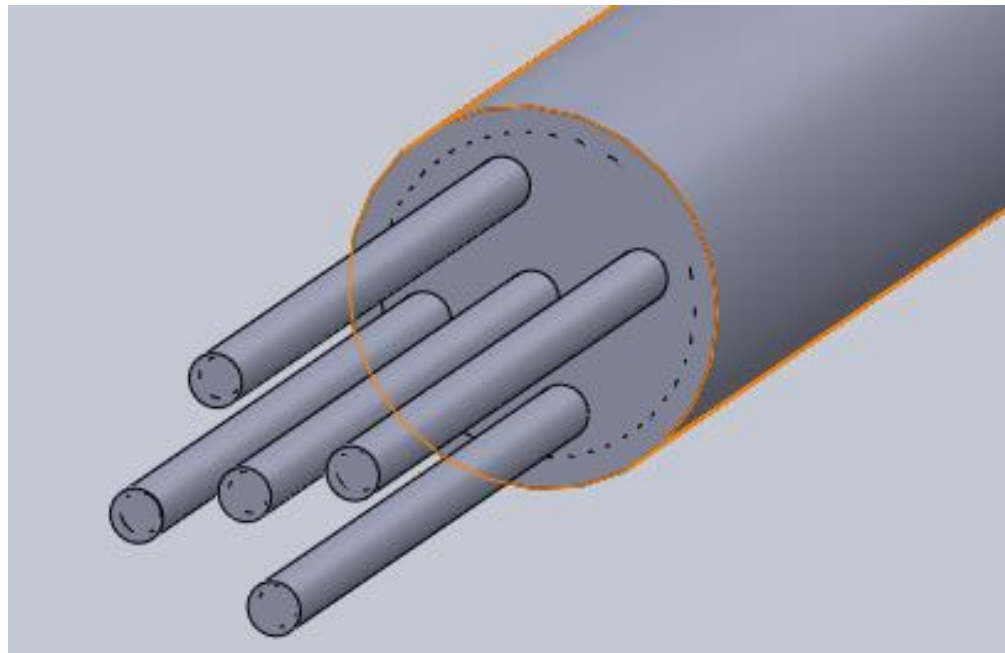


Figura 16: Diseño 3D de disipador de calor de tiro forzado 2

(Fuente: diseño propio)

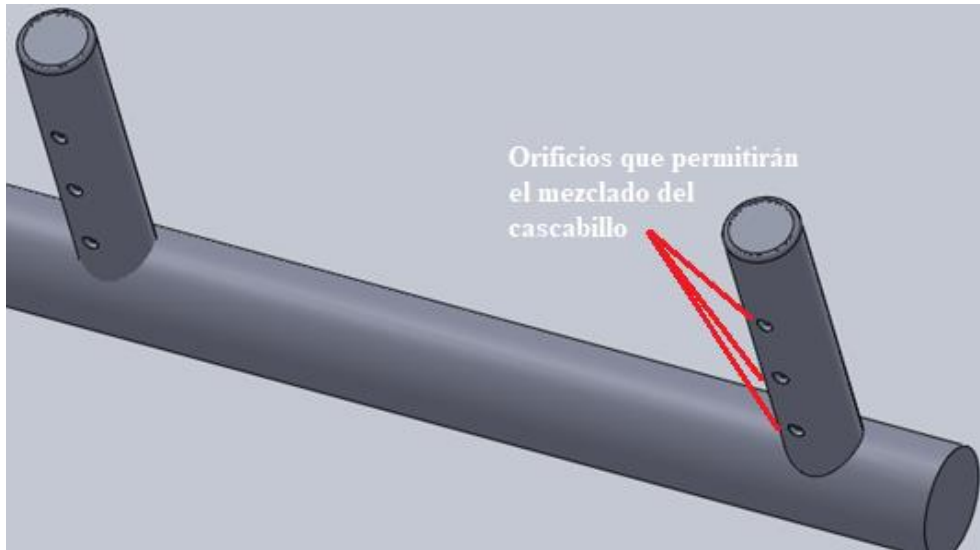


Figura 17: Diseño 3D de secador de cascabillo

(Fuente: diseño propio)

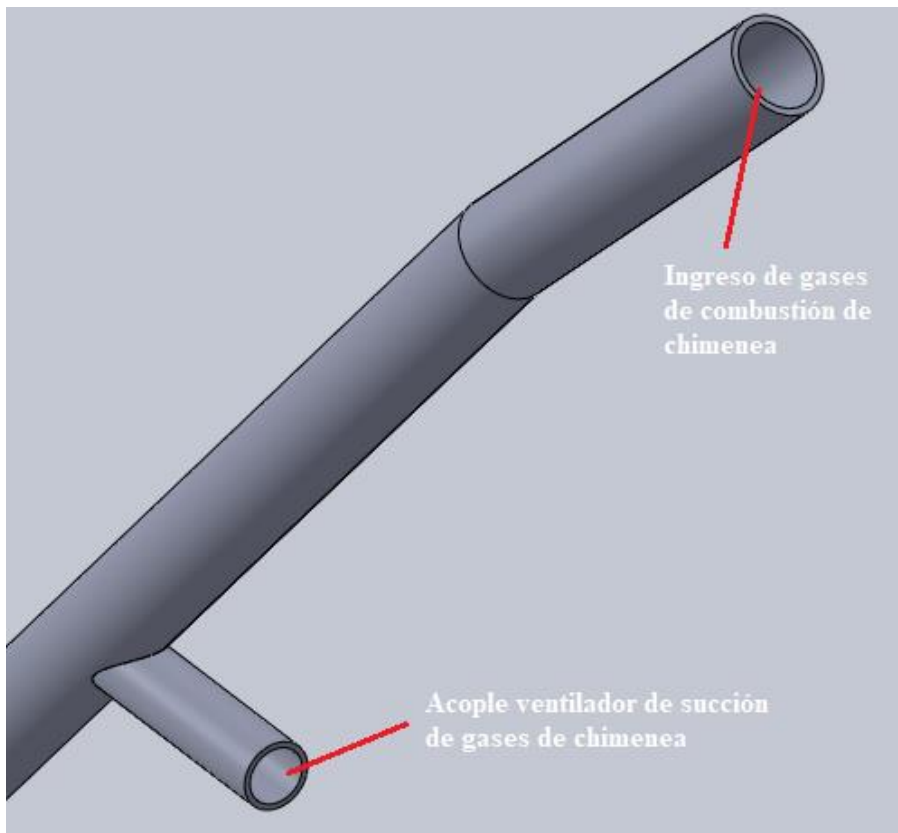


Figura 18: Diseño 3D de ingreso de gases de combustión y acople de ventilador

(Fuente: diseño propio)

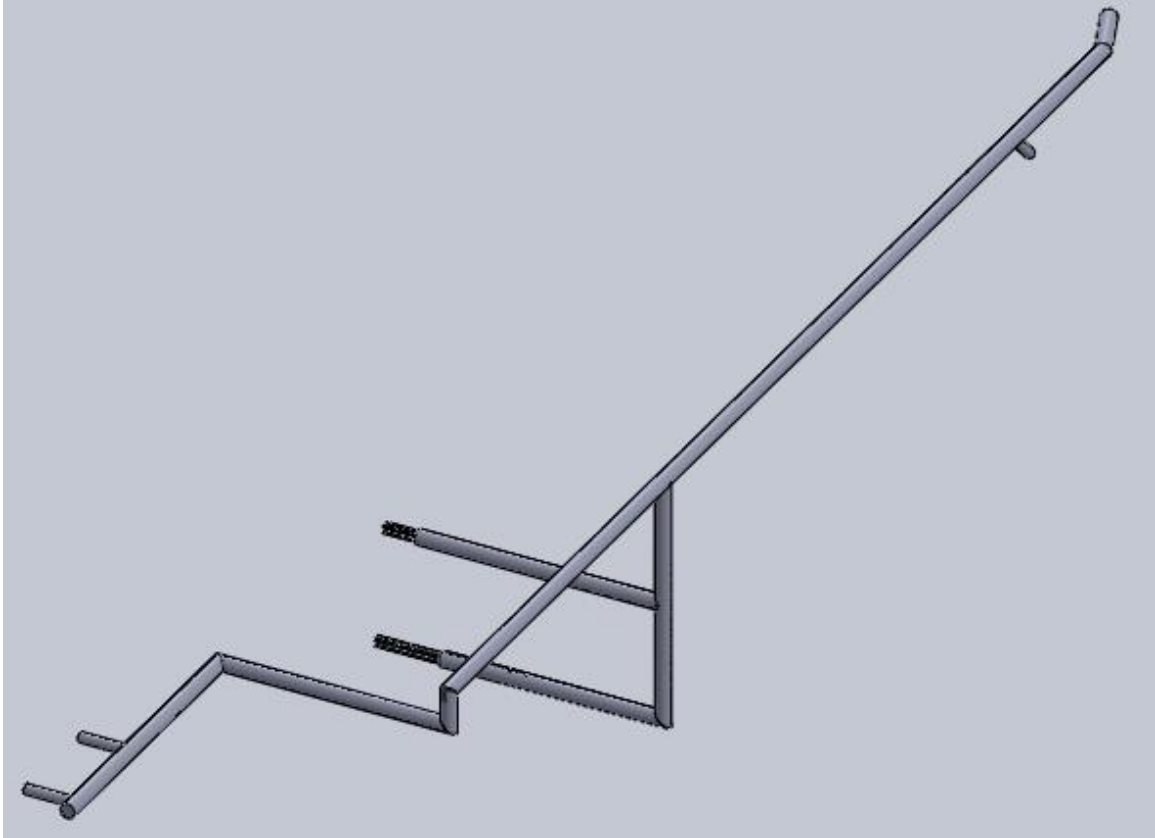


Figura 19: Diseño final ensamblado de tuberías en costado de caldera 1

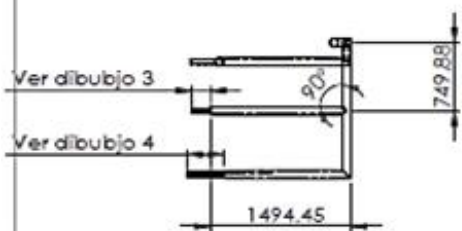
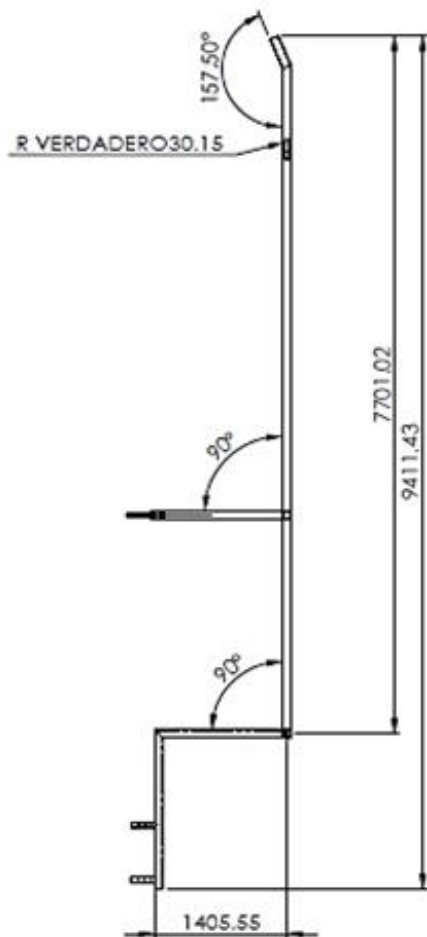
(Fuente: diseño propio)

1. Diseño final de sistema de recuperación de energía

Estos planos fueron realizados a través del programa profesional de diseño SolidWorks. Este software cubre todos los aspectos de desarrollo de los productos con flujos de trabajo integrado y sin problemas para diseño y verificación, posee diseño sostenible, comunicación y administración de datos. El diseñador e ingeniero pueden abarcar múltiples disciplinas con facilidad, acortando el ciclo de diseño, aumentando la productividad y entregando productos de total originalidad.

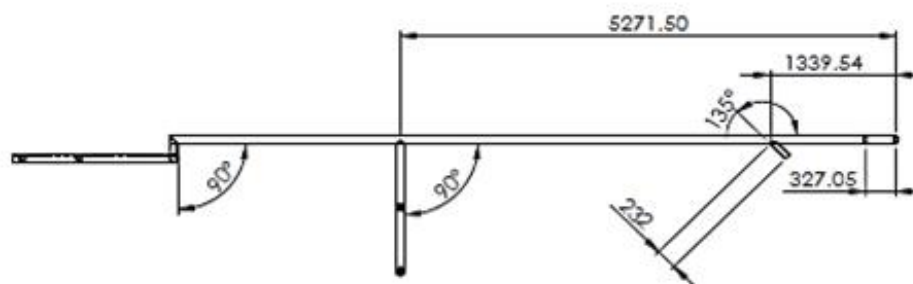
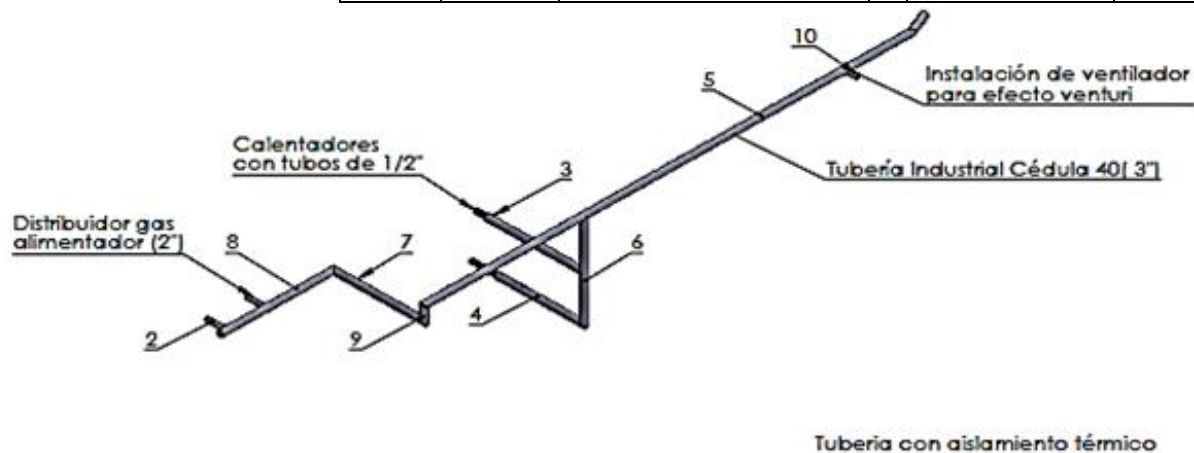
A continuación, se presenta la propuesta final de diseño que permitirá al sistema de la caldera aumentar su rendimiento siendo calculado a través de la fórmula 1 directamente. Con el diseño propuesto se asegura calentar el aire ingresado por el tiro forzado a la cámara de combustión a una temperatura igual o similar a la de los gases de combustión y a su vez proporcionar una cantidad de exceso de aire al sistema para generar una combustión completa.

Plano 1: Diseño completo de tuberías ensambladas

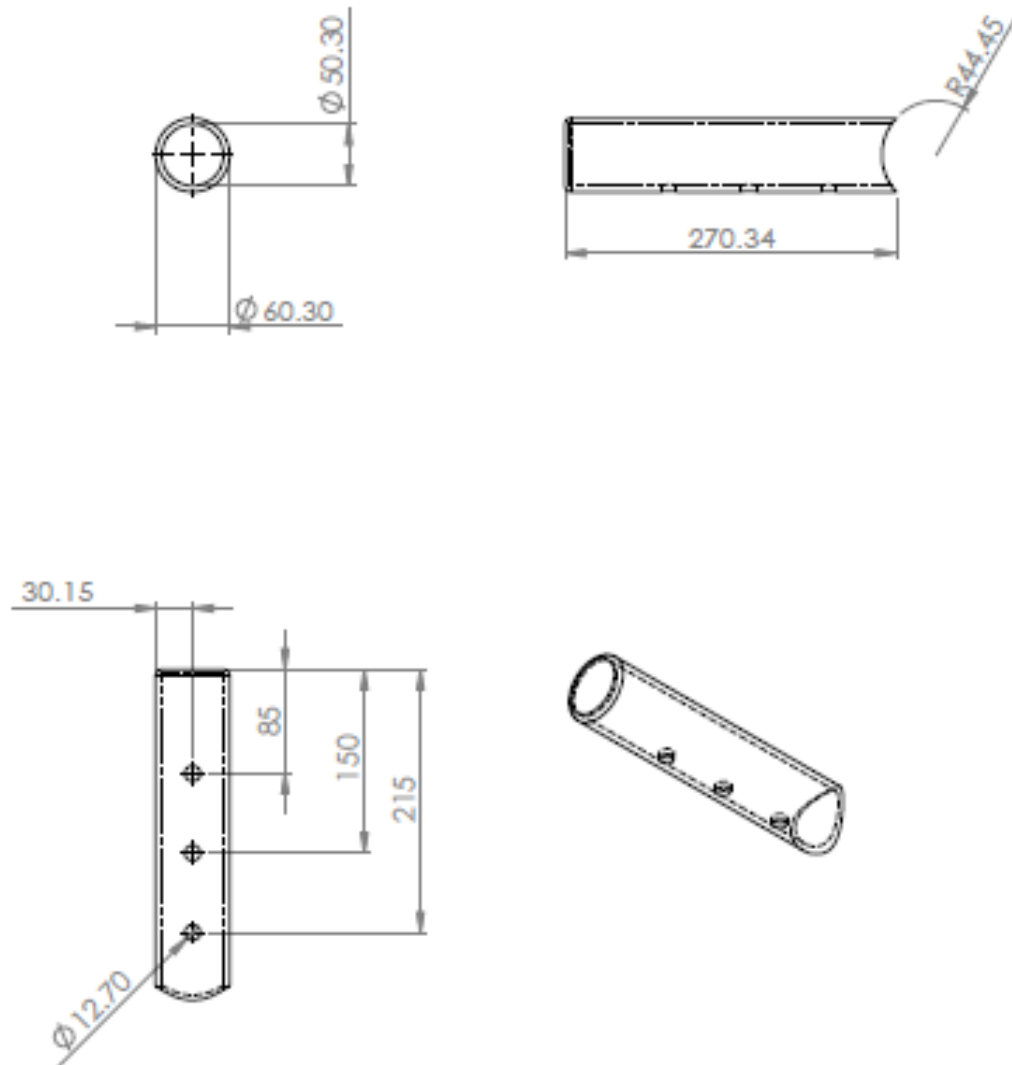


- 2: Distribuidor gas alimentador
- 3: Tubo horizontal 1450 + calentadores fro
- 4: Tubo horizontal 1350 + calentadores fro
- 5: Tubo horizontal principal + acople a chimenea
- 6: Tubo vertical 1500 fro
- 7: Tubo horizontal 1450 principal
- 8: Tubo horizontal 1750 final
- 9: Tubo vertical 300 principal
- 10: Tubo diagonal para venturi

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm		ACABADO: NA		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		REVISIÓN: NA	
ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: +/- 5 mm				TITULO: ENSAMBLE COMPELTO DE TUBERIAS			
Nombre	Esquivel K.	Firma		Fecha			
Verif.	García C.						
Aprob.	García C.						
Fabr.		MATERIAL: Acero Industrial para tuberías, Cédula 40, diámetro nominal de 3 pulg.				No. DIBUJO: 1	A3
Calid		PESO: NA				ESCALA: 1:100	HOJA 1 DE 1

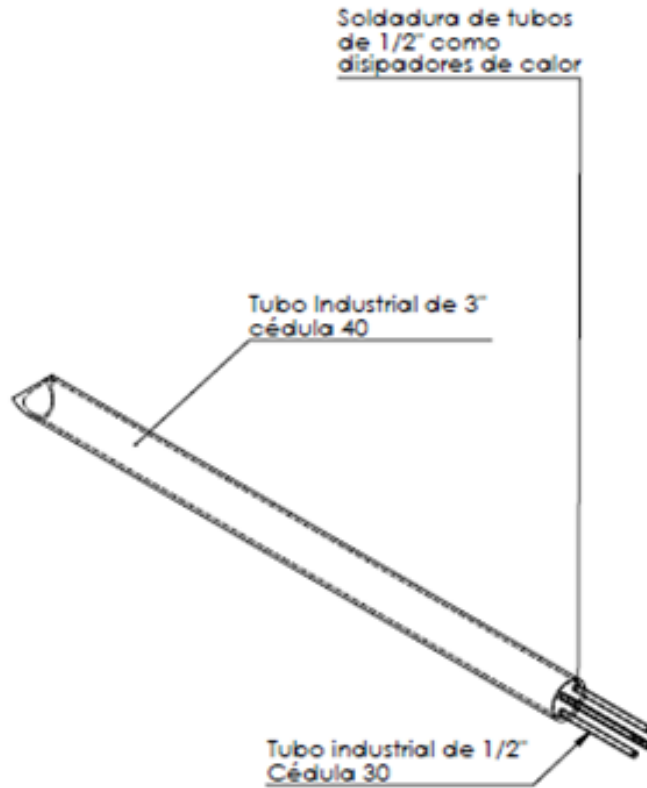
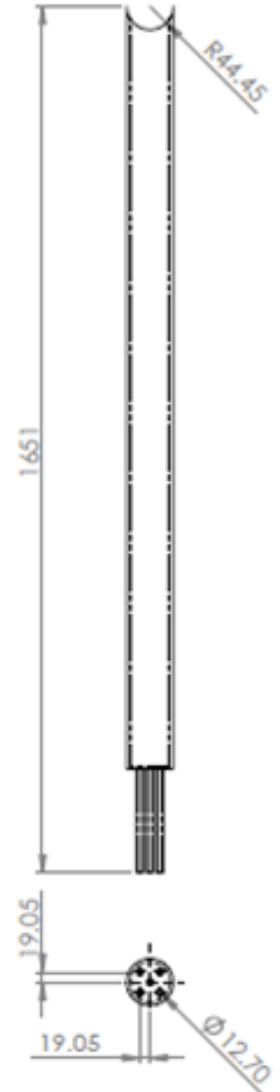


Plano 2: Distribuidor de gas en alimentador de combustible



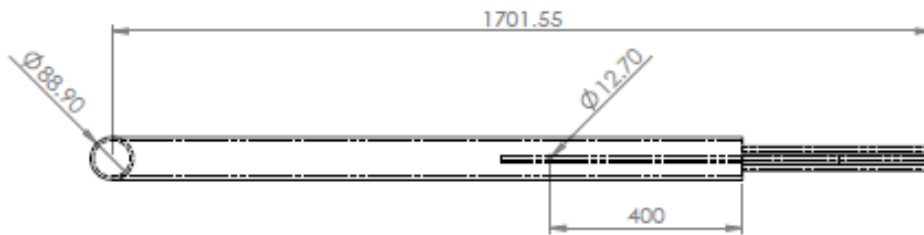
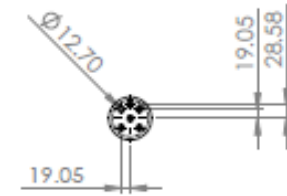
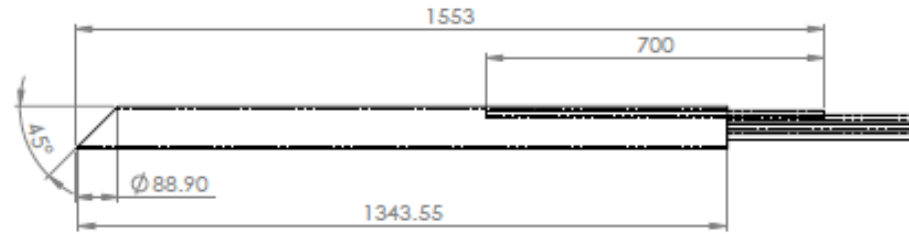
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: +/- 5 mm			ACABADO: NA		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	REVISIÓN: NA
	Nombre	Firma	Fecha		TITULO: DISTRIBUIDOR GAS ALIMENTADOR	
Dibujo	Esquivel K.					
Verif.	García C.					
Aprob.	García C.					
Fabr.		MATERIAL: Acero Industrial para tuberías, Cédula 30, diámetro nominal de 2 pulg.			No. DIBUJO: 2	A4
Calid						
		PESO: NA			ESCALA: 1:5	HOJA 1 DE 1

Plano 3: Tubo horizontal con disipador de calor para tiro forzado 1



REVISIÓN: NA		TÍTULO:				A3		HOJA 1 DE 1	
REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		TUBO HORIZONTAL 1450 + CALENTADORES TIRO				No. DIBUJO: 3		ESCALA: 1:20	
ACABADO: NA									
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm		Fecha				MATERIAL:			
ACABADO SUPERFICIAL:		Firma				Tubería acero negro cédula 40 de 2" para conducto y cédula 30 de 1/2" para disipadores		PESO: NA	
TOLERANCIAS: +/- 5 mm		Nombre		Esquivel K		García C.		García C.	
		Dibujo		Verif.		Aprob.		Fa br. Ca lid	

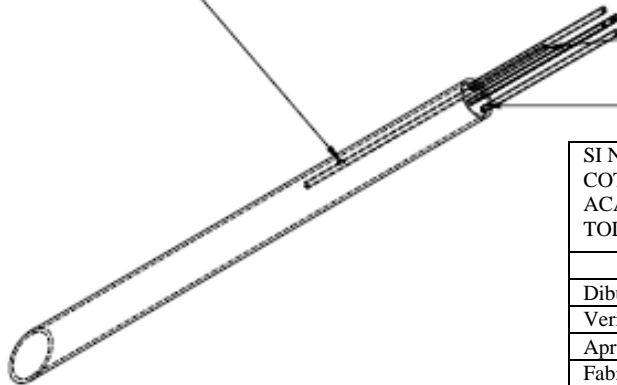
Plano 4: Tubo horizontal con dissipador de calor a tiro forzado 2



Agujero de acople de válvula manual de paso de gases

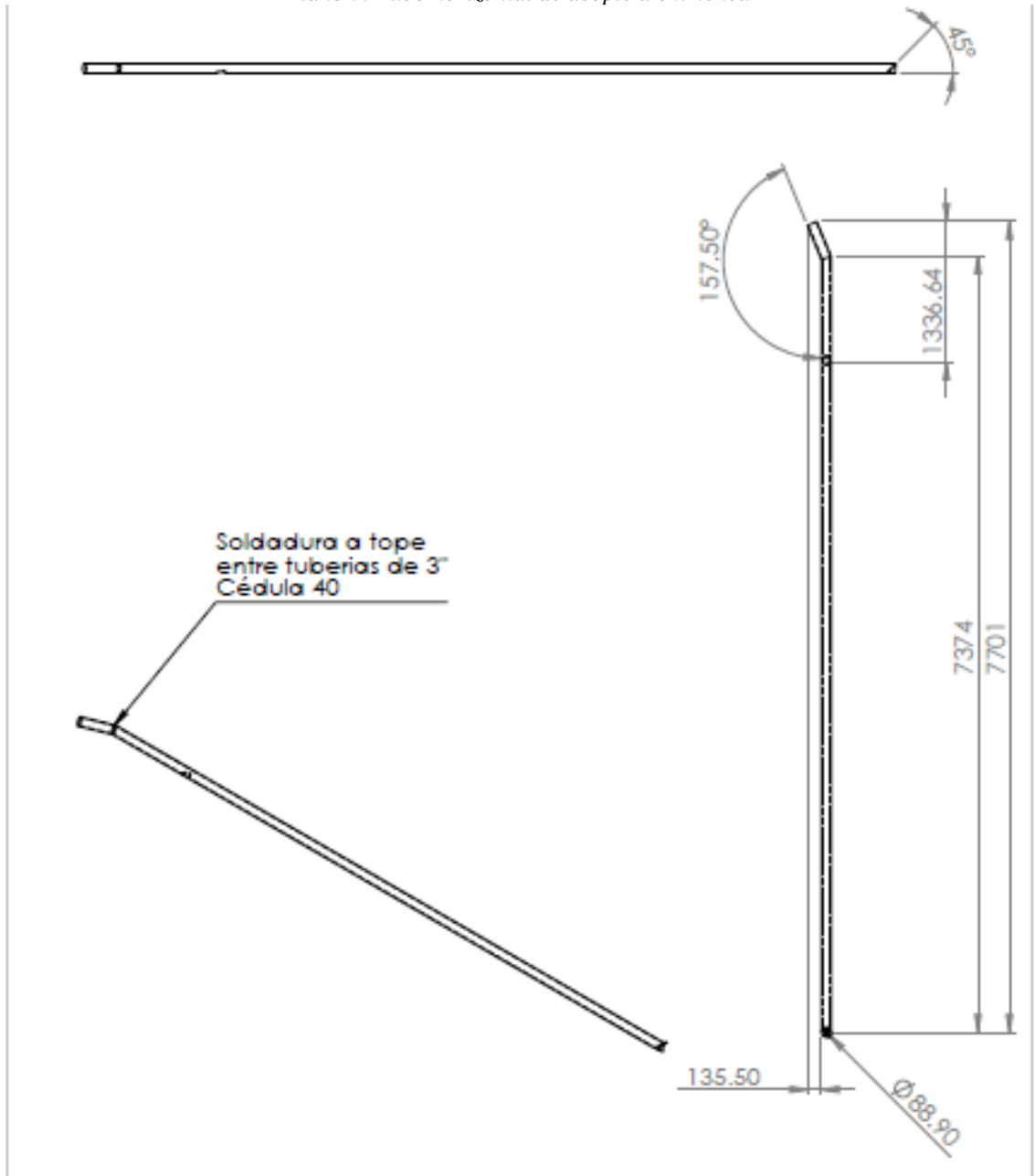
Tubo abierto para paso de gases

Soldadura de tubos de 1/2" a tope para disipación de calor



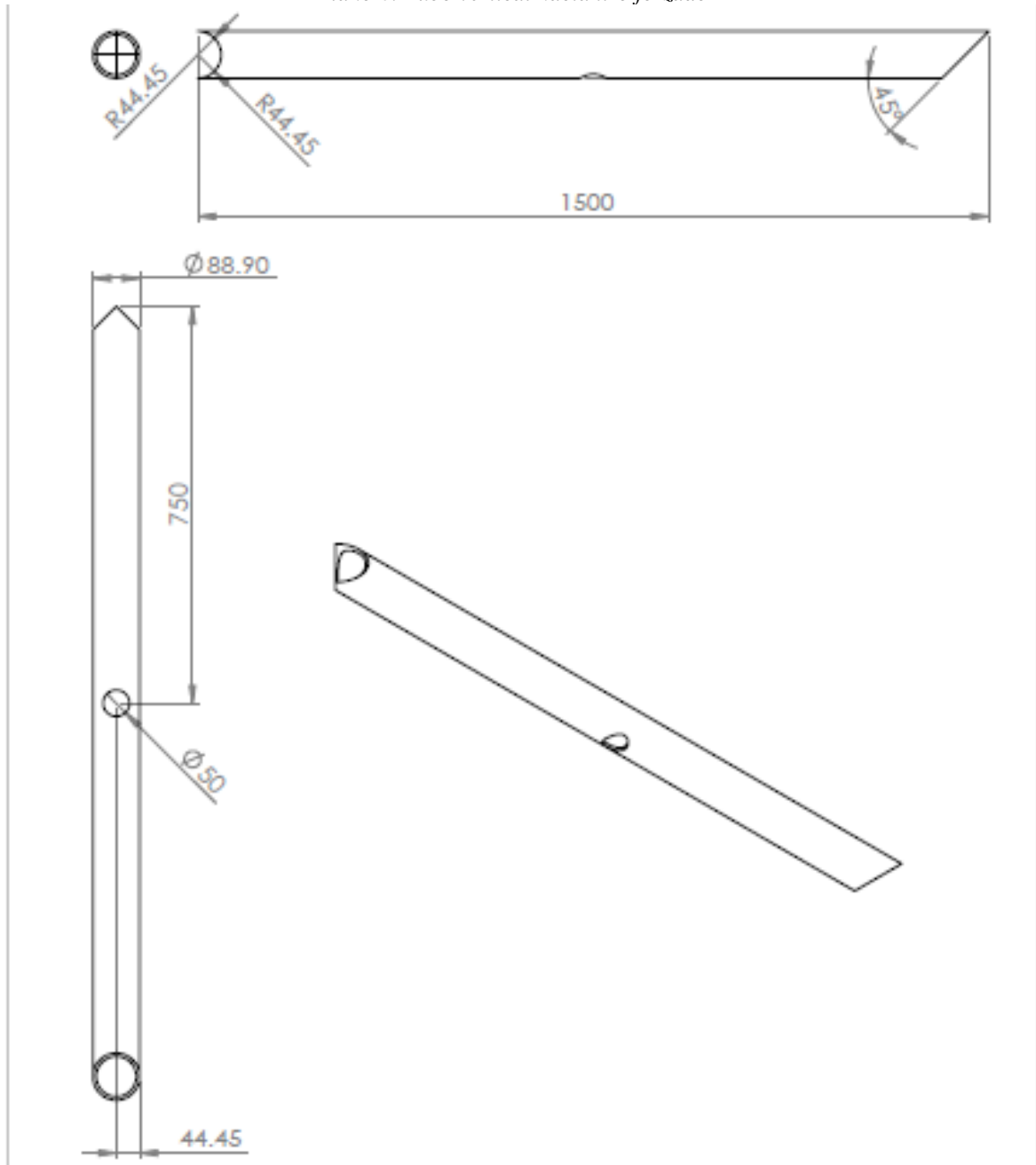
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: +/- 5 mm			ACABADO: NA		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	REVISIÓN: NA
	Nombre	Firma	Fecha		TITULO:	
Dibujo	Esquivel K.				TUBO HORIZONTAL 1350 + CALENTADORES TIRO	
Verif.	García C.					
Aprob.	García C.					
Fabr.		MATERIAL: Tubería acero negro cédula 40 de 3" para conducto y cédula 30 de 1/2" para dissipadores			No. DIBUJO: 4	A3
Calid		PESO: NA			ESCALA: 1:10	HOJA 1 DE 1

Plano 5: Tubo horizontal de acople a chimenea



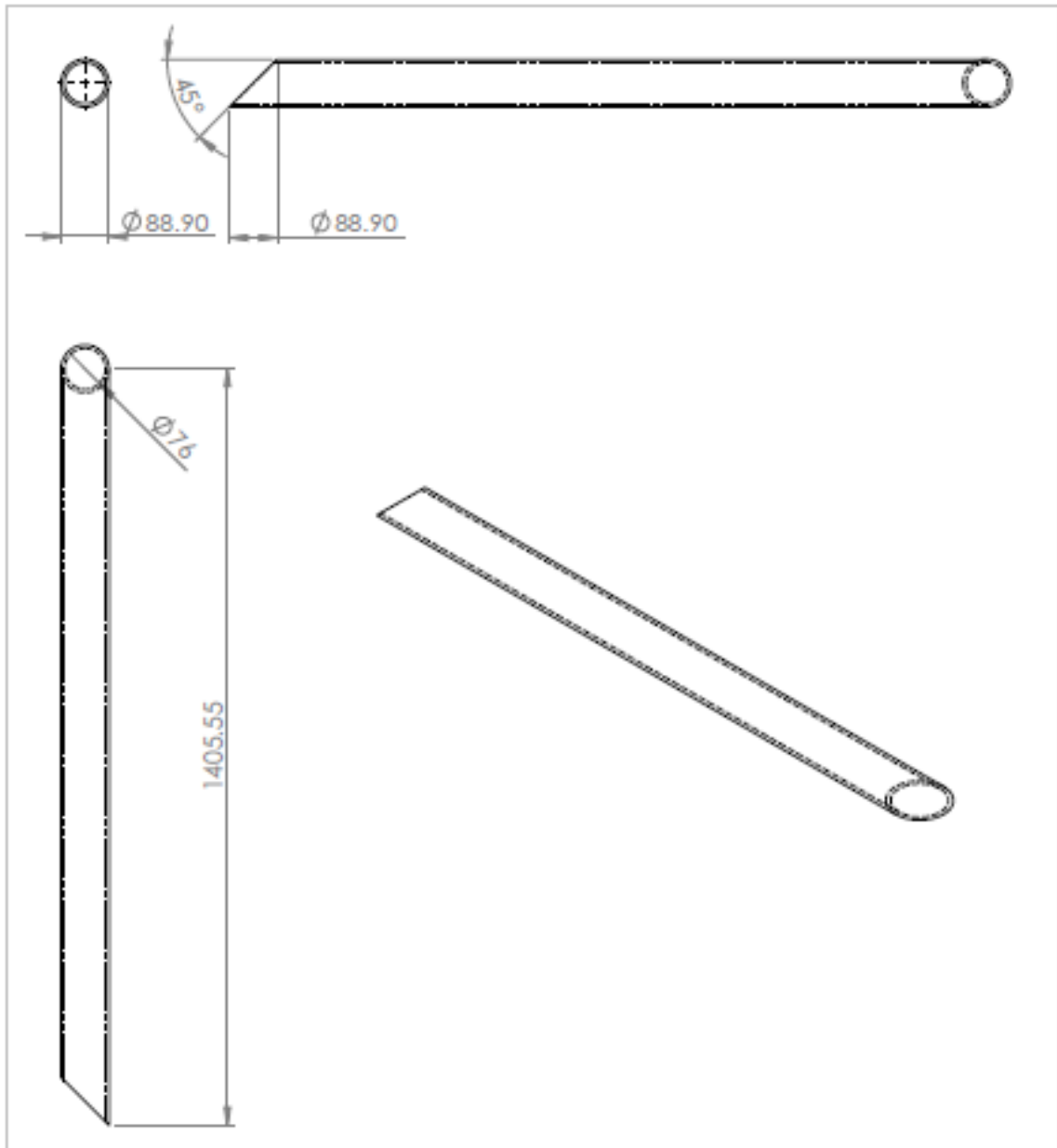
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: +/- 5 mm			ACABADO: NA		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	REVISIÓN: NA
	Nombre	Firma	Fecha		TITULO:	
Dibujo	Esquivel K.				TUBO HORIZONTAL PRINCIPAL ACOPLA A CHIMENEA	
Verif.	García C.					
Aprob.	García C.					
Fabr.		MATERIAL: Tubería acero negro cédula 40, Diámetro Nominal de 3"			No. DIBUJO: 5	A4
Calid		PESO: NA			ESCALA: 1:100	HOJA 1 DE 1

Plano 6: Tubo vertical hacia tiro forzado



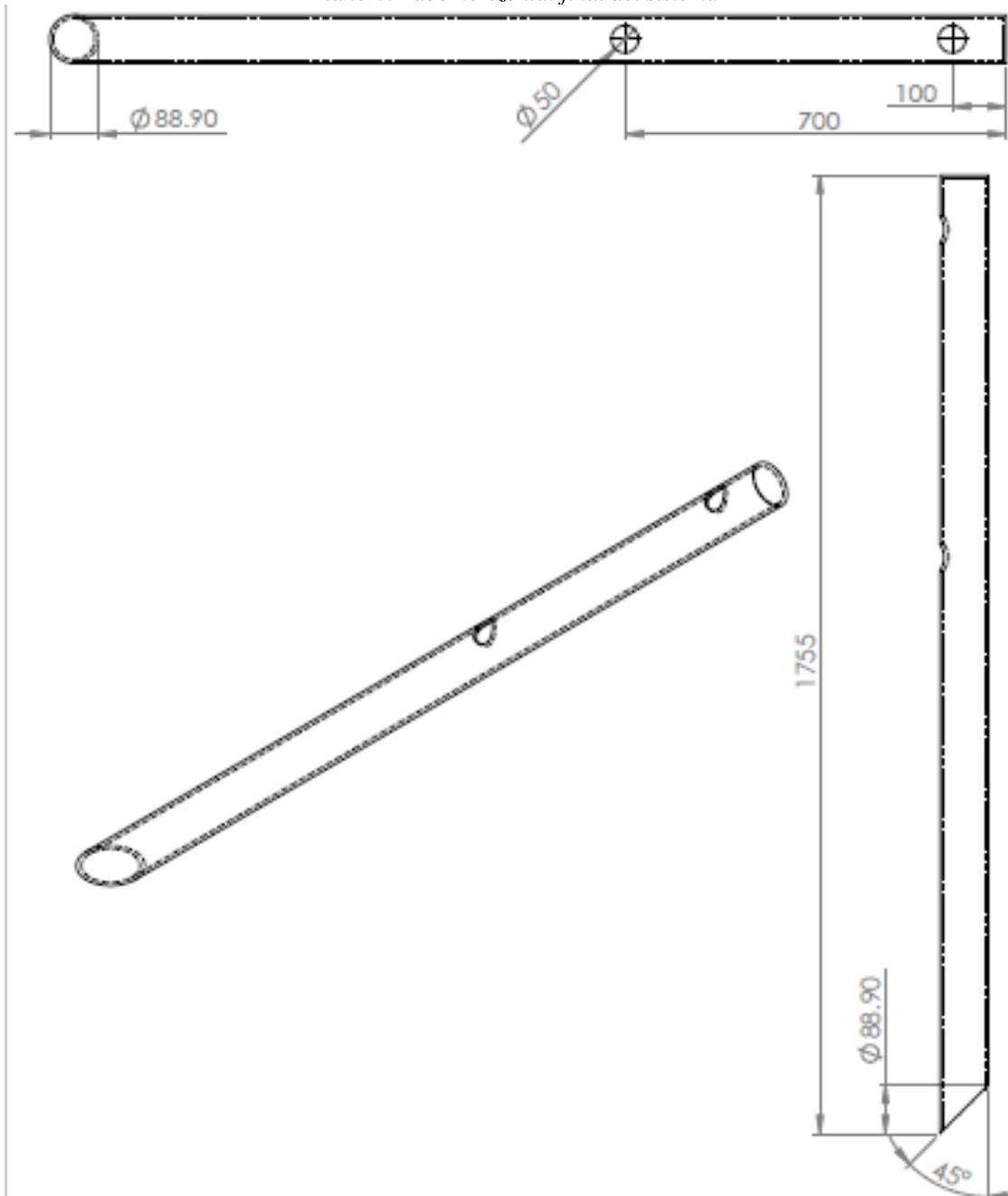
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: +/- 5 mm			ACABADO: NA		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	REVISIÓN: NA
	Nombre	Firma	Fecha		TITULO:	
Dibujo	Esquivel K.				TUBO VERTICAL 1500 TIRO	
Verif.	García C.					
Aprob.	García C.					
Fabr.		MATERIAL: Tubería Industrial de acero negro cédula 40, Diámetro Nominal de 3"				
Calid					No. DIBUJO: 6	A4
		PESO: NA			ESCALA: 1:20	HOJA 1 DE 1

Plano 7: Tubo horizontal principal 1450 mm



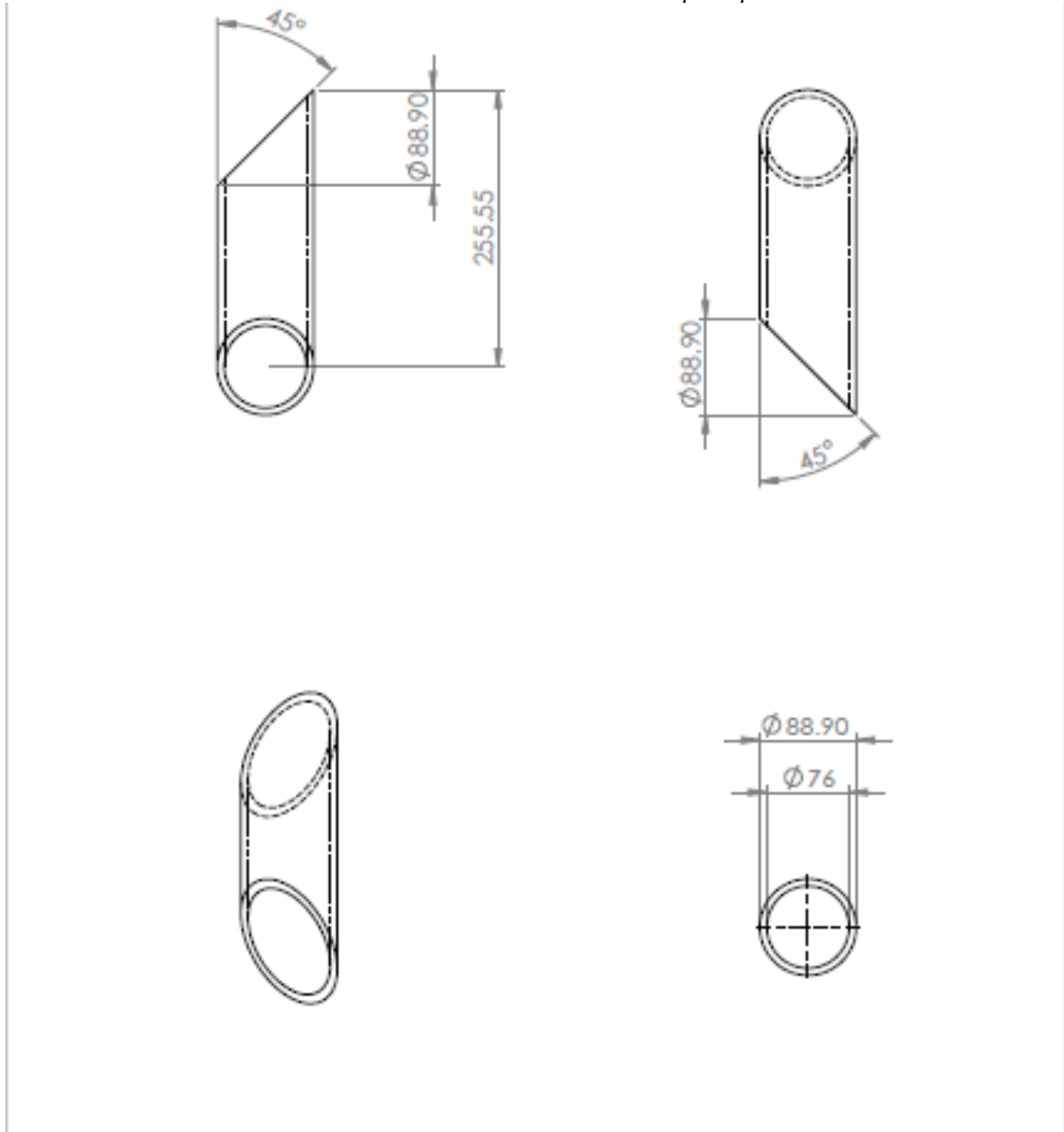
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: +/- 5 mm			ACABADO: NA		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		REVISIÓN: NA	
	Nombre	Firma	Fecha	TITULO:				
Dibujo	Esquivel K.			TUBO HORIZONTAL 1450 PRINCIPAL				
Verif.	García C.							
Aprob.	García C.							
Fabr.	MATERIAL: Tubería Industrial de acero negro cédula 40, Diámetro Nominal de 3"			No. DIBUJO: 7		A4		
Calid	PESO: NA			ESCALA: 1:20		HOJA 1 DE 1		

Plano 8: Tubo horizontal final del sistema



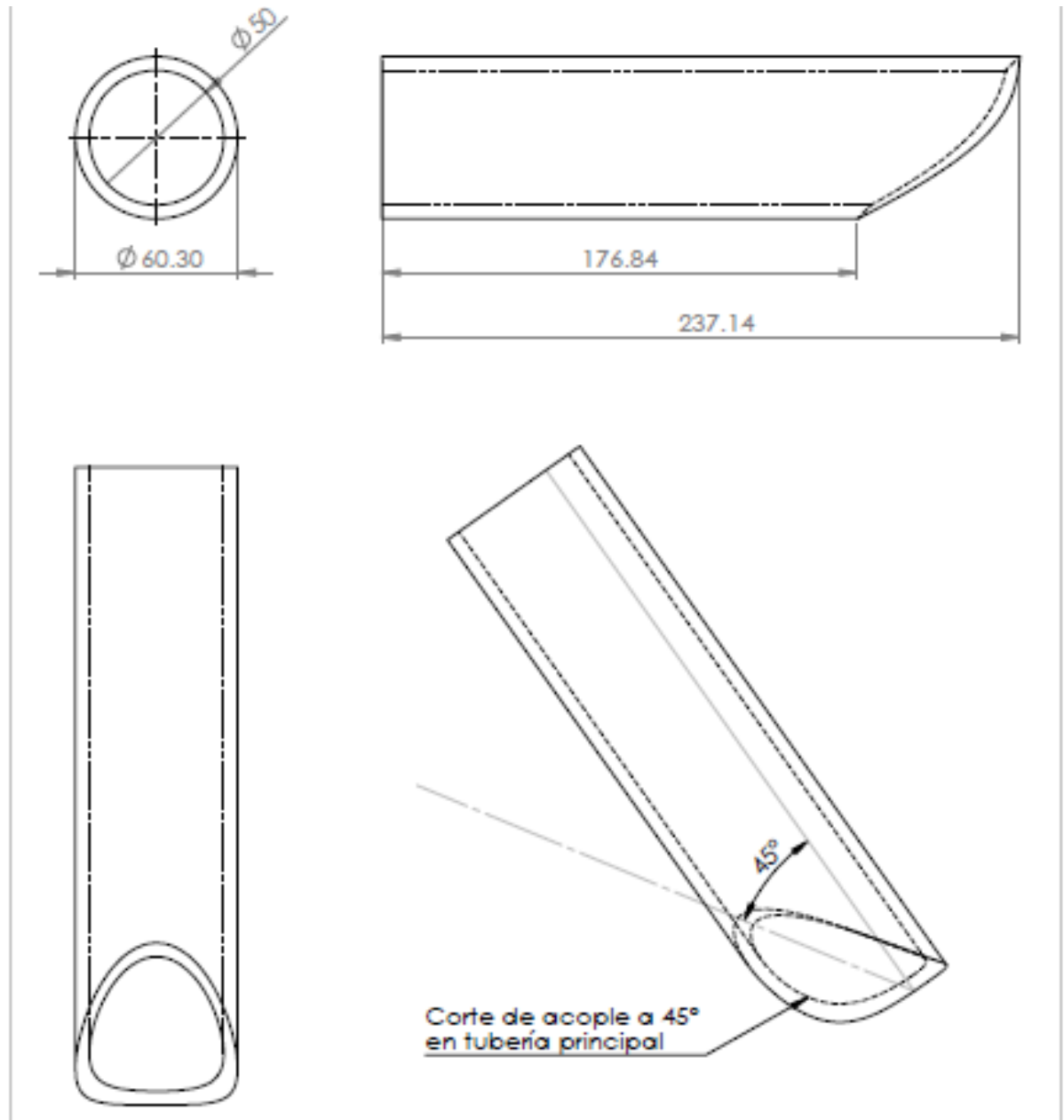
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: +/- 5 mm			ACABADO: NA		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		REVISIÓN: NA	
	Nombre	Firma	Fecha	TITULO:				
Dibujo	Esquivel K.			TUBO HORIZONTAL 1750 FINAL				
Verif.	García C.							
Aprob.	García C.							
Fabr.	MATERIAL: Tubería Industrial de acero negro cédula 40, Diámetro Nominal de 3"			No. DIBUJO: 8		A4		
Calid	PESO: NA			ESCALA: 1:20		HOJA 1 DE 1		

Plano 9: Sección de tubo vertical del canal principal



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: +/- 5 mm			ACABADO: NA		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		REVISIÓN: NA	
	Nombre	Firma	Fecha		TITULO: TUBO VERTICAL 300 PRINCIPAL			
Dibujo	Esquivel K.							
Verif.	García C.							
Aprob.	García C.							
Fabr.		MATERIAL: Tubería Industrial de acero negro cédula 40, Diámetro Nominal de 3"			No. DIBUJO: 9		A4	
Calid		PESO: NA			ESCALA: 1:5		HOJA 1 DE 1	

Plano 10: Tubo oblicuo a 45° para ventilador inyector de exceso de aire y efecto Venturi para los gases de combustión



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: +/- 5 mm			ACABADO: NA		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	REVISIÓN: NA
	Nombre	Firma	Fecha		TITULO:	
Dibujo	Esquivel K.				TUBO DIAGONAL PARA VENTURI	
Verif.	García C.					
Aprob.	García C.					
Fabr.		MATERIAL: Tubería Industrial de acero negro cédula 40, Diámetro Nominal de 3"			No. DIBUJO: 10	A4
Calid		PESO: NA			ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para la implementación del proyecto de “Recuperación de energía calorífica”, se propone una inversión total de Q 68,289.00, que incluye todos los materiales y accesorios necesarios para completarlo.

Los cálculos preliminares tanto de recuperación económica como los ahorros en la caldera 1 se detallan a continuación, (Ver anexos):

- El ahorro proyectado mensual económico en la caldera 1 al aumentar su rendimiento actual de 85.42% a 90% será de aproximadamente Q 26,348.00, haciendo un ahorro anual de Q 316,176.00. (Tabla 15)
- La inversión será recuperada aproximadamente en 2 meses y 18 días.
- El ahorro proyectado mensual de combustible entre el rendimiento actual (85% aproximadamente) y el nuevo rendimiento (90%) será de aproximadamente 41,168.75 kilogramos, haciendo un ahorro anual de 494,025 kilogramos de cascabillo de café. Midiendo en lb serían 90,761.56 lb mensuales, haciendo un ahorro anual de 1,089,138.69 lb de cascabillo de café. (Tabla 15).

Tabla 15: Ahorro económico de propuesta y ahorro en Kg y Lb de cascabillo

Ahorro en quetzales al implementar propuesta			
Q 316,176.00	Anual	Q 26,348.00	Mensual
Ahorro en kg de cascabillo de café			
494,025	Kg anual	41,168.75	Kg mensual
Ahorro en Libras de cascabillo de café			
1,089,138.69	Libras anuales	90,761.56	Libras mensuales

- Diagrama antes y después
 - Se define la ruta crítica que permite un ahorro en instalación y materiales en un tramo recto a un costado de la caldera. (ver figura 21)

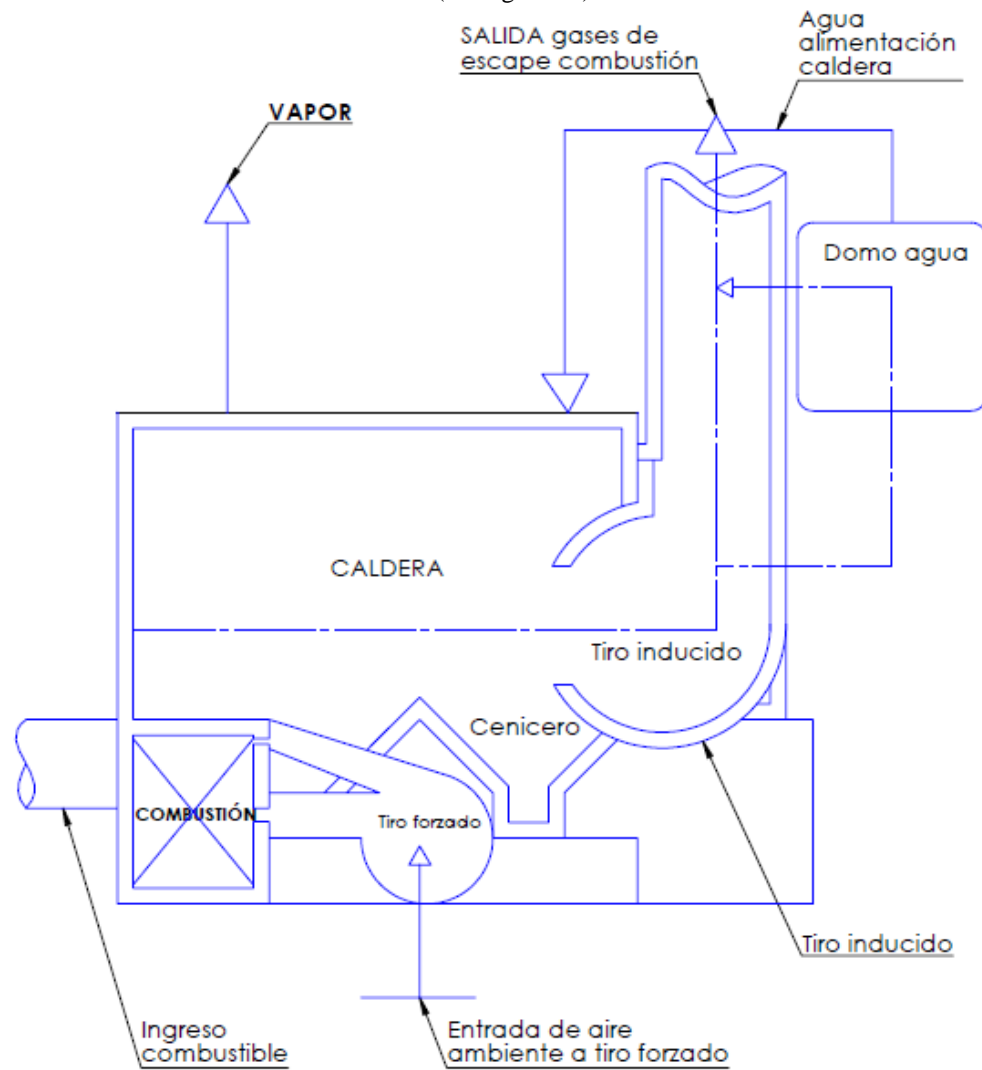


Figura 20: Croquis de caldera 1 en estado actual sin aprovechamiento de calor

(Fuente: diseño propio)



Figura 21: Ruta crítica de tubería

(Fuente: fotografía propia)

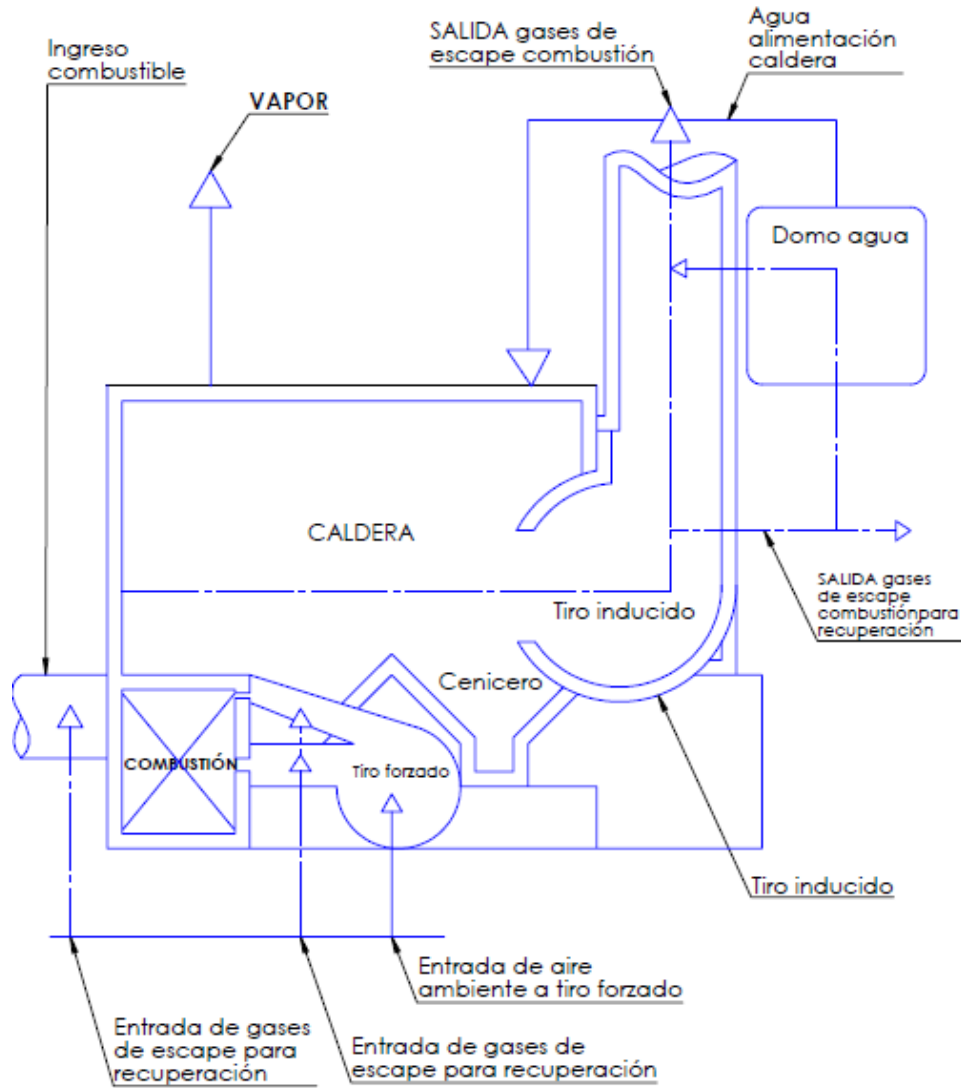


Figura 22: Croquis de caldera 1 propuesto para aprovechamiento de calor

(Fuente: diseño propio)

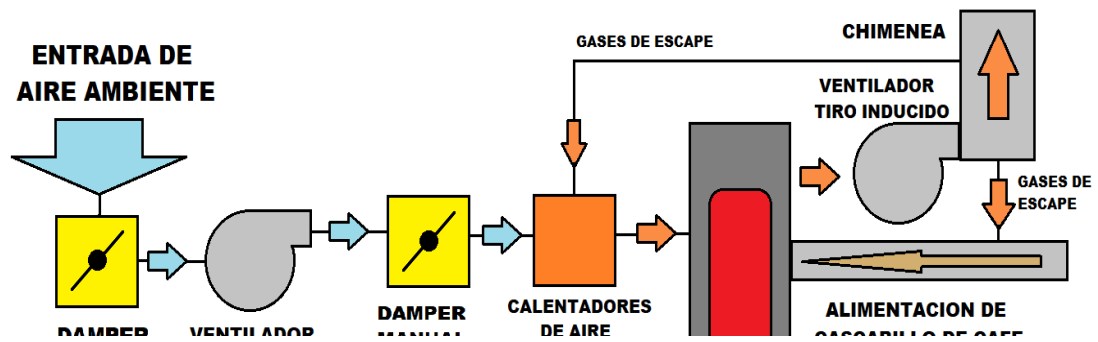


Figura 23: Flujo de aire de la combustión de caldera 1 de Industria Jabonera

(Fuente: diseño propio)

VII. CONCLUSIONES

- Se tiene como resultado una propuesta de recirculación eficiente de los gases de combustión para cumplir con el objetivo principal y recuperar el calor que se pierde en la chimenea. Esto para aumentar el rendimiento total de la combustión de un 82.45% a un 90% que es el fin principal de esta investigación.
- Al momento de aplicar el proyecto y la reutilización de los gases recuperados, la proyección del ahorro mensual económico que presentará la caldera será aproximadamente de Q 26,348.00 mensuales, lo que aporta un ahorro anual de Q 316,176.00.
- Con el aprovechamiento del calor de la chimenea para un secado de combustible se proyecta un ahorro mensual del consumo de cascabillo de café en 41,168.75 Kg, haciendo un ahorro anual de 494,025 Kg.
- La ruta crítica que llevará la instalación será a un costado de la caldera 1, definiendo un máximo trayecto recto para evitar costos de soldadura en acoples de desvío. El costo de inversión propuesto es de Q 68,289.00, recuperable en tres meses aproximadamente.

VIII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda controlar la humedad de la bodega de almacenamiento de cascabillo de café a valores entre 10% y 15% para beneficiar a la buena combustión en la caldera y asegurar un ahorro mensual de consumo de cascabillo de café hasta 50,000 Kg.
- Reducir la velocidad del motor de impulsa el gusano helicoidal para alimentación de combustible de 200 rpm a rangos entre 170 y 175 rpm por menor demanda de combustible. (ahorro de hasta 14% según referencias anteriores).
- La organización jabonera deberá intensificar el uso de buenas prácticas de operación en sus calderas para garantizar su buen funcionamiento y evitar daños que afecten su rendimiento. Entre las prácticas importantes está: Ajuste del exceso de aire por válvula manual, ajuste de temperatura y cantidad de inyección del combustible al hogar, ajuste del tiro, mantener la carga de la caldera a un rango no mayor de un 70% para garantizar un funcionamiento normal, mantener en buen estado todos los componentes y tuberías entre otras.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Arenzana, R. J. (22 de octubre de 2017). *INSTRUMENTOS TESTO*, S.A. Obtenido de <https://www.testo.com/es-ES/analizador-de-combusiton-testo-320-b/p/0563-3223-70>
- Bahamondes, P. A. (28 de octubre de 2017). *Asociación Chilena de Seguridad*. Obtenido de Potencia y rendimiento de la Caldera: <http://www.achs.cl/portal/Paginas/Home.aspx>
- Click Renovables SL. (diciembre de 2017). *Click Renovables*. Recuperado el Diciembre de 2017, de <http://www.clickrenovables.com/>
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de Energía. (2009). *Página oficial de Gobierno de México*. Recuperado el diciembre de 2017, de http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/93854/calderas_02.pdf
- Consejo Nacional de Energía del Salvador. (Diciembre de 2014). *Inventario y caracterización de Calderas en el Salvador*. Recuperado el diciembre de 2017, de <http://www.cne.gob.sv/>
- Dominguez C. José, Santiago C. Jaime, Uceda M. Juan, Garrido O. Pablo, Lahoz P. Javier y Almeida J. (2012). *Calderas Industriales Eficientes*. (E. y. D. G. de Industria, Ed.) Madrid, España, España: Consejería de Economía, Empleo y Hacienda. Recuperado el 04 de noviembre de 2017, de http://www.madrid.org/cs/Satellite?c=CM_Publicaciones_FA&cid=1354387776057&language=es&pagename=ComunidadMadrid%2FEstructura&site=ComunidadMadrid
- FOCER, F. d. (2002). *Manuales sobre energia renovables BIOMASAS*. San José, C.R.
- Greenpyme and Nordic Developent Fund. (Diciembre de 2017). *Corporación Interamericana de inversiones*. Obtenido de Proyecto Pesic: <http://pesic.org/Archivos%20de%20Descarga/2014%20Eventos/04%20Taller%20GREENPYME%202014/Taller%20%20Sistemas%20de%20Vapor/2%20-%20Eficiencia%20en%20Calderas.pdf>
- Hernández, C. L. (2016). *Análisis de pérdidas y propuestas de recuperación de condensado en dos líneas de producción del área de lavandería de empresa manufacturera de jabón*. Guatemala.
- Ministerio de Industria y Comercio Español. (5 de febrero de 2009). *Reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias*. Recuperado el 4 de noviembre de 2017, de Agencia Estatal Boletín de Estado: <http://www.boe.es/boe/dias/2009/02/05/>
- Morán, E. J. (2013). *Tesis de Rediseño de horno múltiple, para secado de café para ser alimentado con gas metano en empresa Transbrisas*. Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala.

- Palacios, L., & Betancurt, E. (02 de Agosto de 2005). Caracterización de propiedades fluidodinámicas de lechos fluidizados en frío con mezclas de carbón - biomasa, usados en procesos de co- gasificación. Medellín, Medellín, Colombia.
- Saacke H. (05 de noviembre de 2017). *Grupo SAACKE*. (S. L. H, Productor) Obtenido de www.saake.com: <https://www.saacke.com/es/productos/modulos-de-modernizacion-see/>
- Sanz M. y Patiño R. (2014). *Manual Práctico del Operador de Calderas Industriales*. Madrid, España.: Ediciones Paraninfo S.A.
- Severns W., D. H. (1982). *Energía mediante vapor, aire o gas* (5ta. ed.). Barcelona, Barcelona, España: Reverté S.A.
- Shapiro, M. M. (2004). *Fundamentos de la Termodinámica Técnica* (2da. ed.). España: Reverté S.A.
- Smith J., Van Ness H. y Abbott M. (1997). *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química* (5ta. ed.). México: McGraw Hill.
- Tiempo Real S.A. (28 de Junio de 2017). *Tiempo Real SA*. Recuperado el 01 de noviembre de 2017, de Formación en control de procesos: <http://www.tiemporeal.es/archivos/optimizacioncombustion.pdf>
- U.S. DOE. (Diciembre de 2017). *United State Departament of Energy*. Recuperado el diciembre de 2017, de <https://www.energy.gov/>

X. ANEXOS

A. Proyección de ahorro anual en quetzales

Para calcular el ahorro mensual que generará el cambio de rendimiento al aplicar el nuevo diseño de recirculación de gases se tomó la siguiente tabla:

AHORRO DE COSTOS POR AUMENTO DE EFICIENCIA									
AHORRO POR CADA US\$ 100 DE COSTO DE COMBUSTIBLES EN VIRTUD DEL AUMENTO DE LA EFICIENCIA DE LA COMBUSTION. SE SUPONE UNA RADIACION CONSTANTE Y PERDIDAS NO DETERMINADAS.									
Con base en una eficiencia original de:	HASTA UN AUMENTO DE LA EFICIENCIA DE:								
	55 o/o	60 o/o	65 o/o	70 o/o	75 o/o	80 o/o	85 o/o	90 o/o	95 o/o
50 o/o	\$9.10	\$16.70	\$23.10	\$28.60	\$33.30	\$37.50	\$41.20	\$44.40	\$47.40
55	—	8.30	15.40	21.50	26.70	31.20	35.30	38.90	42.10
60	—	—	7.70	14.30	20.00	25.00	29.40	33.30	37.80
65	—	—	—	7.10	13.30	18.80	23.50	27.80	31.60
70	—	—	—	—	6.70	12.50	17.60	22.20	26.30
75	—	—	—	—	—	6.30	11.80	16.70	21.10
80	—	—	—	—	—	—	5.90	11.10	15.80
85	—	—	—	—	—	—	—	5.60	10.50
90	—	—	—	—	—	—	—	—	5.30

Figura 24: Tabla de ahorro de costos por aumento de eficiencia.

**Datos obtenidos por la Corporación Interamericana de inversiones en conjunto con (Greenpyme and Nordic Development Fund, 2017).*

1. Datos actuales de caldera:

Tabla 16: Datos para cálculo de ahorro de propuesta

Tiempo de funcionamiento de caldera 1	8,352 horas/año
Tiempo de proyección de ahorro	12 meses
Precio de cascabillo de café	0.64 Q/Kg
Consumo mensual de combustible	Q 470,500 mensuales
Parámetro de aumento de eficiencia propuesto	85,42% a 90%

Fuente: datos proporcionados por Industria Manufacturera.

Tomando en cuenta estos datos reales de la caldera y extrayendo el valor correspondiente al ahorro estimado para el aumento de eficiencia, se tiene ahorro en US\$ por aumento de eficiencia de 85% a 90% de:

US\$ 5.60 por cada US\$ 100.00 de costo de combustible

Tomando en cuenta una tasa de cambio de Q 7.4 por cada US\$ 1.0 que se maneja actualmente. Nos da un valor en Quetzales de:

Q 41.44 por cada Q 740.00 de costo de cascabillo de café

Realizando la relación entre ambos queda:

$$\frac{Q\ 41.44}{Q\ 740.00} = 0.056$$

Sabiendo que el costo mensual de consumo de cascabillo de café es de Q 470,500 al mes el resultado queda de la siguiente forma:

$$470,500 \frac{Q}{mes} * 0.056 = 26,348.00 \frac{Q}{mes}$$

Multiplicando por 12 meses nos da la cantidad total de ahorro proyectado anual:

$$Q\ 26,348.00 * 12 = \mathbf{Q\ 316,176.00\ Anual}$$

a. Proyección de ahorro anual en Kilogramos de combustible

Tomando en cuenta el precio indiciado en la tabla 15 para el combustible sabemos que por cada Q 0.64 logramos comprar 1 Kg de cascabillo, aplicando la inversa nos queda:

$$\left(\frac{0.64\ Q}{Kg}\right)^{-1} = \frac{1\ Kg}{0,64\ Q} \rightarrow 1.5625 \frac{Kg}{Q}$$

Con este dato, se procede a calcular el ahorro en Kilogramos de cascabillo de café que representa la propuesta de nuevo diseño. Sabiendo que el ahorro en quetzales es de Q 26,348.00 se tiene:

$$26,348.00 \frac{Q}{mes} * 1.5625 \frac{Kg}{Q} = 41,168.75 \frac{Kg}{mes}$$

Multiplicando por 12 para encontrar el ahorro anual se tiene:

$$41,168.75 \frac{Kg}{mes} * 12 = \mathbf{494,025 \frac{Kg}{año}}$$

XI. GLOSARIO

- **Acuotubular:** Conjunto de conductos por los cuales circula vapor de agua.
- **BTU:** British Thermal Unit / Unidad Térmica Británica, representa la cantidad de energía que se requiera para elevar en un grado Fahrenheit la temperatura de una libra de agua en condiciones atmosféricas normales.
- **CC:** Control de Calidad.
- **Caloportante:** Fluido que absorbe el calor y lo transfiere para aumentar la temperatura de otra masa.
- **CH:** Hidrocarburos.
- **CO:** Monóxido de carbono.
- **Dámper:** Conjunto de compuertas de control de flujo de inyección.
- **Dureza de gua:** Es aquella que contiene un alto nivel de minerales, en particular sales.
- **Hogar:** Lugar caloportador recubierto con material refractario donde es quemado el combustible.
- **Intercambiador iónico:** Sistema que permite la separación de sales en el agua.
- **O₂:** Oxígeno.
- **OP:** Opacidad de gases.
- **Piro tubular:** Conjunto de conductos por los cuales circulan gases calientes.
- **Tiro:** Diferencia de presión que existe entre los gases del hogar y el aire ambiente.