



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

**ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y DE COMBUSTIÓN DE UNA
CALDERA UTILIZADA EN UNA PLANTA DE FABRICACIÓN DE ALIMENTOS
Y PROPUESTA PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA DE OPERACIÓN**

Marvin Antonio Aguilar Tucubal

Asesorado por el Ing. Federico Guillermo Salazar Rodríguez

Guatemala, mayo de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y DE COMBUSTIÓN DE UNA
CALDERA UTILIZADA EN UNA PLANTA DE FABRICACIÓN DE ALIMENTOS
Y PROPUESTA PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA DE OPERACIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MARVIN ANTONIO AGUILAR TUCUBAL

ASESORADO POR EL ING. FEDERICO GUILLERMO SALAZAR RODRÍGUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MAYO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|--|
| DECANO | Ing. Angel Roberto Sic García |
| VOCAL I | |
| VOCAL II | Ing. Pablo Christian de León Rodríguez |
| VOCAL III | Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa |
| VOCAL IV | Br. Narda Lucía Pacay Barrientos |
| VOCAL V | Br. Walter Rafael Véliz Muñoz |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|--|
| DECANO | Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos |
| EXAMINADOR | Dr. Adolfo Antonio Gramajo Narciso |
| EXAMINADOR | Ing. Renato Giovanni Ponciano Sandoval |
| EXAMINADOR | Ing. Erwin Manuel Ortiz Castillo |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y DE COMBUSTIÓN DE UNA CALDERA UTILIZADA EN UNA PLANTA DE FABRICACIÓN DE ALIMENTOS Y PROPUESTA PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA DE OPERACIÓN

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 20 de noviembre de 2013.

Marvin Antonio Aguilar Tucubal



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 25 de marzo de 2015

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
Director
Escuela de Ingeniería Química

Respetable Ingeniero Monzón:

Con un cordial saludo me dirijo a su persona para informarle que he asesorado y aprobado el informe final de Trabajo de Graduación titulado: **“ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y DE COMBUSTIÓN DE UNA CALDERA UTILIZADA EN UNA PLANTA DE FABRICACIÓN DE ALIMENTOS Y PROPUESTA PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA DE OPERACIÓN”**. Elaborado por el estudiante de Ingeniería Química Marvin Antonio Aguilar Tucubal con número de carné 201020492. Considero que el informe final de Trabajo de Graduación desarrollado satisface los requisitos exigidos; por lo que solicito se sirva remitirlo para su respectiva revisión.

Agradezco la atención a la presente.

Atentamente,

Federico G. Salazar R.
INGENIERO QUÍMICO
COLEGIADO 201

Ing. Federico Guillermo Salazar Rodríguez
Colegiado No. 201
ASESOR

PROGRAMA DE INGENIERÍA
QUÍMICA ACREDITADO POR
Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería
Período 2013 - 2015

Guatemala, 13 de abril de 2015.
Ref. EIQ.TG-IF.018.2015.

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **160-2013** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFÓRME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Marvin Antonio Aguilar Tucubal**.
Identificado con número de carné: **2010-20492**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.


Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y DE COMBUSTIÓN DE UNA CALDERA UTILIZADA EN UNA PLANTA DE FABRICACIÓN DE ALIMENTOS Y PROPUESTA PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA DE OPERACIÓN

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Federico Guillermo Salazar Rodríguez**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Otto Raúl De León De Paz
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EiQ.TG.052.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **MARVIN ANTONIO AGUILAR TUCUBAL** titulado: "ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y DE COMBUSTIÓN DE UNA CALDERA UTILIZADA EN UNA PLANTA DE FABRICACIÓN DE ALIMENTOS Y PROPUESTA PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA DE OPERACIÓN". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, mayo 2015

Cc: Archivo
VMMV/ale



AAI





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y DE COMBUSTIÓN DE UNA CALDERA UTILIZADA EN UNA PLANTA DE FABRICACIÓN DE ALIMENTOS Y PROPUESTA PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA DE OPERACIÓN**, presentado por el estudiante universitario: **Marvin Antonio Aguilar Tucubal**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'ARSIC', written over a horizontal line.

Ing. Angel Roberto Sic García
DECANO



Guatemala, mayo de 2015

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por guiarme, darme la determinación y salud, así como todas las herramientas para desenvolverme.
- Mis padres** Jorge Aguilar y Violeta Tucubal de Aguilar. Mis impulsores, formadores, ejemplo y pilares. Su esfuerzo y amor me motivan.
- Mis hermanos** Jonhatan, Giovanni, Bryan y Wendy Aguilar, por su apoyo, cariño e impulsarme a ser mejor.
- Mi familia** Por su apoyo, motivación y sus enseñanzas.
- Mis amigos** Por sacar lo mejor de mí, su presencia mejora mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|---|---|
| Universidad de San Carlos de Guatemala | Mi casa de estudios, por darme la oportunidad de superarme a nivel profesional y personal. |
| Facultad de Ingeniería | Por brindarme los conocimientos y principios necesarios para ser un buen profesional. |
| Ing. Federico Salazar | Por su apoyo, los conocimientos compartidos, su motivación y por inspirarme a lo largo de la carrera. |
| Ing. Otto Raúl de León | Por su constante motivación y su influencia para ser una mejor persona y un mejor profesional. |

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | V |
| LISTA DE SÍMBOLOS | VII |
| GLOSARIO | IX |
| RESUMEN..... | XIII |
| OBJETIVOS..... | XV |
| INTRODUCCIÓN | XVII |
| | |
| 1. ANTECEDENTES | 1 |
| | |
| 2. MARCO TEÓRICO..... | 3 |
| 2.1. Calderas y generación de vapor..... | 3 |
| 2.1.1. Conceptos fundamentales | 4 |
| 2.1.1.1. Entalpía del líquido | 4 |
| 2.1.1.2. Saturación..... | 4 |
| 2.1.1.3. Balance de materia y energía | 5 |
| 2.1.1.3.1. Balance de materia..... | 5 |
| 2.1.1.3.2. Balance de energía | 5 |
| 2.1.2. Eficiencia | 7 |
| 2.1.3. Clasificación de las calderas según disposición de fluidos | 7 |
| 2.1.3.1. Calderas pirotubulares..... | 7 |
| 2.1.3.1.1. Calderas horizontales..... | 8 |
| 2.1.3.1.2. Calderas verticales | 9 |
| 2.1.3.1.3. Componentes fundamentales | 9 |

| | | | |
|------|------------|--|----|
| | 2.1.3.2. | Calderas acuotubulares..... | 11 |
| | 2.1.4. | Descripción del proceso de evaporación..... | 12 |
| | 2.1.5. | Tablas de vapor..... | 13 |
| 2.2. | | Transferencia de calor..... | 13 |
| | 2.2.1. | Conducción | 14 |
| | 2.2.2. | Convección..... | 14 |
| | 2.2.3. | Radiación | 15 |
| 2.3. | | Combustión | 16 |
| | 2.3.1. | Definición..... | 16 |
| | 2.3.1.1. | Fase de prerreacción (formación de radicales)..... | 17 |
| | 2.3.1.2. | Fase de oxidación | 18 |
| | 2.3.1.3. | Fase de terminación..... | 18 |
| | 2.3.2. | Triángulo de combustión | 18 |
| | 2.3.3. | Tipos de combustión | 20 |
| | 2.3.3.1. | Combustión completa..... | 20 |
| | 2.3.3.2. | Combustión incompleta..... | 20 |
| | 2.3.3.3. | Combustión teórica o estequiométrica | 20 |
| | 2.3.3.4. | Combustión con exceso de aire | 21 |
| | 2.3.3.5. | Combustión con defecto de aire..... | 21 |
| | 2.3.4. | Teoría de la llama..... | 21 |
| | 2.3.4.1. | Características de la llama | 22 |
| | 2.3.4.1.1. | Temperatura final de la llama..... | 22 |
| | 2.3.4.1.2. | Temperatura máxima teórica de la llama | 22 |

| | | | |
|----|------------|--|----|
| | 2.3.4.1.3. | Velocidad de propagación de la llama..... | 23 |
| | 2.3.4.2. | Clasificación de las llamas..... | 24 |
| | 2.3.4.3. | Estabilidad de las llamas | 25 |
| | 2.3.5. | Recuperación de calor contenido en los gases de combustión (economizadores)..... | 25 |
| 3. | | DISEÑO METODOLÓGICO | 29 |
| | 3.1. | Variables..... | 29 |
| | 3.1.1. | Descripción de variables a manipular | 30 |
| | 3.2. | Delimitación del campo de estudio | 30 |
| | 3.3. | Recursos humanos disponibles..... | 30 |
| | 3.4. | Recursos materiales disponibles | 30 |
| | 3.5. | Técnica cuantitativa..... | 31 |
| | 3.6. | Recolección y ordenamiento de la información | 31 |
| | 3.6.1. | Recolección de la información para la eficiencia de combustión | 31 |
| | 3.6.2. | Recolección de la información para la eficiencia de la caldera | 31 |
| | 3.7. | Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información | 32 |
| | 3.7.1. | Cálculo de la eficiencia de combustión..... | 32 |
| | 3.7.2. | Cálculo de la eficiencia de operación | 34 |
| | 3.7.3. | Cálculo del ahorro de combustible..... | 37 |
| | 3.7.4. | Cálculo del beneficio energético..... | 39 |
| | 3.7.5. | Cálculo del ahorro económico | 40 |
| | 3.7.6. | Cálculo del aumento en la eficiencia de operación..... | 40 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.8. | Análisis estadístico..... | 42 |
| 3.8.1. | Número de repeticiones. | 42 |
| 3.8.2. | Eficiencia de combustión..... | 43 |
| 3.8.3. | Eficiencia de operación de caldera..... | 45 |
| 4. | RESULTADOS..... | 47 |
| 5. | DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 53 |
| | CONCLUSIONES..... | 57 |
| | RECOMENDACIONES | 59 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 61 |
| | APÉNDICES..... | 63 |
| | ANEXOS..... | 71 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Vista esquemática de una caldera pirotubular | 3 |
| 2. | Detalle de caldera pirotubular horizontal..... | 9 |
| 3. | Proceso de ebullición del agua | 12 |
| 4. | Representación del triángulo de combustión | 19 |
| 5. | Economizador | 27 |
| 6. | Eficiencias de combustión obtenidas, respecto al día de toma de datos | 43 |
| 7. | Eficiencias de operación de caldera obtenidas, respecto al día de toma de datos | 45 |
| 8. | Eficiencia de combustión obtenida por fecha de toma de datos | 47 |
| 9. | Eficiencia de operación obtenida por fecha de toma de datos | 48 |
| 10. | Representación gráfica de la inclusión del economizador..... | 50 |

TABLAS

| | | |
|------|---|----|
| I. | Variables del proceso para el cálculo de la eficiencia de operación | 29 |
| II. | Datos estadísticos de dispersión de las eficiencias de combustión | 44 |
| III. | Datos estadísticos de dispersión de las eficiencias de operación de caldera | 46 |
| IV. | Eficiencia media de combustión..... | 48 |
| V. | Eficiencia media de operación de la caldera | 49 |
| VI. | Beneficios de la inclusión del economizador..... | 51 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|-----------------|---|
| $\Delta\eta$ | Cambio en la eficiencia de operación |
| ρ_w | Densidad del agua |
| ρ_c | Densidad del combustible |
| η_c | Eficiencia de combustión |
| η | Eficiencia de operación de la caldera |
| $\% \eta$ | Eficiencia porcentual |
| E_w | Energía en el agua de alimentación |
| E_v | Energía en el vapor de salida |
| E_{GC} | Energía en los gases de combustión |
| Q_{GC} | Energía perdida por combustión |
| E_c | Energía proporcionada por el combustible |
| H_v | Entalpía de vapor a las condiciones dadas |
| H_w | Entalpía del agua líquida a las condiciones dadas |
| e | Error estimado |
| \dot{m}_c | Flujo másico de combustible |
| \dot{m}_w | Flujo másico del agua de alimentación |
| \dot{Q}_w | Flujo volumétrico del agua de alimentación |
| \dot{Q}_c | Flujo volumétrico del combustible |
| PC | Poder calorífico del combustible |
| $\% \Delta\eta$ | Porcentaje del cambio en la eficiencia de operación |
| P_B | Precio del bunker |
| $P_{Caldera}$ | Presión de la caldera |

| | |
|----------------|--|
| P | Probabilidad de éxito |
| Q | Probabilidad de fracaso |
| T_{EA} | Temperatura de entrada del agua |
| T_{GC} | Temperatura de los gases de combustión |
| T_m | Temperatura del medio |
| T_N | Temperatura neta |
| t | Tiempo |
| t_{ciclo} | Tiempo del ciclo |
| $z_{\alpha/2}$ | Variable aleatoria de la distribución normal |
| V | Volumen |
| V_w | Volumen de agua |
| V_C | Volumen de combustible |

GLOSARIO

| | |
|----------------------------|--|
| Aislante térmico | Sustancias que dificultan el paso de calor, a través del mismo, y que tienen, por tanto, una baja conductividad térmica. |
| Balance de energía | Aplicación de la primera ley de la termodinámica: “ <i>La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma</i> ”. |
| Balance de masa | Aplicación de la ley de conservación de la masa: “ <i>La materia no se crea ni se destruye, solo se transforma</i> ”. |
| Bunker | Combustible residual que se obtiene de la destilación y refinación de los hidrocarburos. |
| Caldera | Máquina o dispositivo de ingeniería diseñado para generar vapor. |
| Caldera pirotubular | Calderas en que los gases de combustión pasan por el interior de los tubos que se encuentran sumergidos en el agua. |
| Combustible | Cualquier material capaz de liberar energía cuando se oxida de forma violenta con desprendimiento de calor. |

| | |
|---------------------------------|--|
| Economizador | Intercambiador de calor constituido por bancos tubulares, que se utilizan para calentar el agua de alimentación de la caldera por medio de los gases de combustión. |
| Eficiencia | Relación entre la energía útil y la energía invertida. |
| Eficiencia de combustión | Eficacia de la caldera para convertir la energía interna contenida en el combustible en energía calórica, para la conversión de agua del estado líquido a vapor. |
| Eficiencia de operación | Capacidad de la caldera de convertir el agua de alimentación en vapor, considerando las pérdidas energéticas por los gases de combustión, lo cual, para fines del presente estudio, se relaciona con la eficiencia energética del sistema como el valor, léase parte numérica, de ambas. |
| Eficiencia energética | Capacidad de la caldera de convertir agua líquida en vapor, reduciendo al mínimo las pérdidas. |
| Fluido comparsa | Fluido utilizado en un intercambiado de calor para enfriar o calentar el fluido patrón, según sea el requerimiento. |

| | |
|--------------------------------|--|
| Fluido patrón | Fluido de interés en el proceso, el que representa beneficios, que según el requerimiento del mismo, es enfriado o calentado mediante un fluido comparsa en un intercambiado de calor. |
| Intercambiador de calor | Dispositivo diseñado para el intercambio de calor entre dos fluidos (fluido patrón y comparsa), que se encuentran a temperaturas diferentes y evita al mismo tiempo que se mezclen entre sí. |
| Manómetro | Instrumento de medición para la presión de fluidos contenidos en recipientes cerrados. |
| Poder calorífico | Cantidad de energía que la unidad de masa de materia puede desprender al producirse una reacción química de oxidación. |
| Polinomio de Lagrange | Polinomio que interpola un conjunto de datos dado. Llamado así en honor a Joseph-Louis de Lagrange. |
| Vapor saturado | Vapor en equilibrio con su fase líquida a una determinada presión y temperatura. |
| Vapor sobrecalentado | Vapor que se encuentra a una temperatura mayor que la de saturación a una presión determinada. |

RESUMEN

El presente trabajo de graduación es un estudio energético del sistema de generación de vapor de una planta de fabricación de alimentos, donde se utiliza una caldera de 125 hp de la línea Cleaver Brooks, así como la propuesta para el mejoramiento de la eficiencia de operación de la misma.

Con una metodología lógica y fundamentada en balances de masa y energía, se desarrolló el procedimiento pertinente para la toma, ordenamiento y procesamiento de los datos necesarios en la obtención de la eficiencia de combustión y la eficiencia de operación de la caldera, las cuales fueron los parámetros principales para la propuesta de la inclusión de un economizador para aumentar la eficiencia del proceso.

La eficiencia de combustión promedio obtenida fue del 85,875 %, mientras que la eficiencia de operación promedio de la caldera fue del 68,678 %. Dado que la eficiencia de combustión es mayor al 80 % y luego de realizar una revisión de variables operativas del manejo y uso de la caldera, la propuesta se basó en la inclusión de un equipo externo en el que se aprovechará el contenido energético de los gases de combustión, resultando así como la mejor opción un economizador, que básicamente es un intercambiador de calor que se coloca en la chimenea de una caldera, donde se utiliza como fluido caliente los gases de combustión (fluido comparsa) y como fluido frío el agua de alimentación a la caldera (fluido patrón).

Los beneficios teóricos al instalar un economizador en la salida de los gases de combustión de la caldera son: aumento de la eficiencia de operación

de la caldera de un 2,12%, lo que representa un ahorro económico de Q. 62 288,808 anuales.

La toma de datos fue desarrollada en una planta de fabricación de alimentos ubicada en Chimaltenango, Guatemala.

OBJETIVOS

General

Realizar una propuesta de incremento en la eficiencia de operación para el sistema de generación de vapor en una planta de fabricación de alimentos, con base en la obtención de la eficiencia de combustión y eficiencia de operación de la caldera.

Específicos

1. Establecer la eficiencia de combustión de la caldera por medio de las tablas de eficiencia de combustión del bunker.
2. Calcular la eficiencia de operación de la caldera por medio de balances de materia y energía.
3. Proponer el plan de mejoras de operación en función del análisis de eficiencia realizado.
4. Determinar el beneficio energético de la implementación de la propuesta para el incremento de la eficiencia de operación de la caldera.

INTRODUCCIÓN

En Guatemala se cuenta con un sector industrial relativamente diversificado, donde la mayoría de sus procesos requieren la aportación de calor de diferentes formas (vapor, vapor sobrecalentado, fluidos térmicos), el medio energético más utilizado es el vapor, de manera que se torna imprescindible la presencia de calderas para su producción.

El objetivo de una caldera es producir energía en forma de vapor por medio de la aplicación directa del calor resultante de la combustión de una materia combustible, de manera eficiente y rentable; por lo que es importante considerar el costo de la generación de vapor.

A través de la combustión, las purgas en la caldera y las líneas de distribución de vapor, léase generación, distribución y consumo de vapor, se presentan pérdidas energéticas en el proceso, de las cuales algunas pueden ser disminuidas de manera considerable, a través del manejo adecuado de algunos puntos críticos de control.

Dado que la producción de vapor por medio de calderas genera, inevitablemente, pérdidas de calor, es necesario conocer la eficiencia de la caldera y la eficiencia de combustión, de modo que se pueda conocer el porcentaje de estas pérdidas, identificar los puntos más significativos y trabajar en planes de contingencia para disminuirlas o la adaptación de equipos externos para aprovechar la energía que se pierde de diversas maneras.

Utilizar de manera eficiente el vapor generado implica el uso de aislantes térmicos en las líneas de distribución y en las líneas del retorno de condensado, así como la utilización de precalentadores del aire de alimentación de las calderas, el uso de trampas de vapor en puntos adecuados y el mantenimiento apropiado de las calderas, por los problemas de incrustaciones, principalmente.

En la actualidad existen dos tipos de calderas de vapor: pirotubulares y para potencia; las cuales son para procesos industriales y para generar energía eléctrica, respectivamente. En una caldera pirotubular, la eficiencia, de manera sencilla, se define como la relación entre el calor absorbido por el agua y el calor generado por el combustible utilizado, razón que se obtiene a través de un balance de materia y energía. La eficiencia de la combustión se consigue a través de equipos utilizados para la medición de gases de combustión y las tablas de eficiencia de combustión, según el tipo de combustible utilizado.

El estudio realizado es con base en una caldera pirotubular utilizada en una planta de fabricación de alimentos, la obtención de la eficiencia de combustión y de operación de la caldera y los beneficios de la inclusión de un economizador en la misma.

1. ANTECEDENTES

Actualmente, en la empresa no se cuentan con registros de la eficiencia real a la que está trabajando la caldera, sino solo con la suposición de la eficiencia otorgada por el proveedor de la caldera, esta es de la línea Cleaver Brooks de 125 hp, conectada en serie con otra caldera de la misma línea de 150 hp, que se activa solo en caso de que la demanda de vapor no sea abastecida por la primera.

En el 2005, Fidel Pérez Macal de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala realizó la investigación a nivel de tesis: *Análisis térmico de la caldera pirotubular marca Power Master modelo 54.*

En el 2009, Rufino Gregorio Siquiná Sánchez de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala realizó la investigación a nivel de tesis: *Análisis termodinámico para el mejoramiento de la eficiencia de operación de la caldera del ingenio Tzulá.*

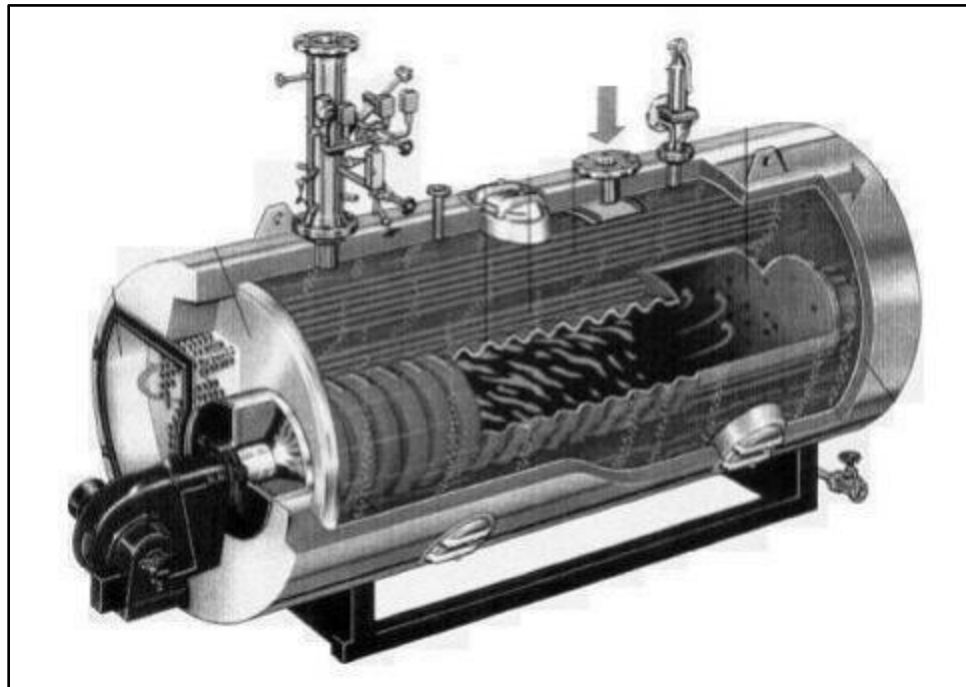
En el 2012, Heidi Andrea Lara Molina de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala realizó la investigación a nivel de tesis: *Propuesta para incrementar la eficiencia del sistema de vapor en una planta de fabricación de productos cosméticos.*

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Calderas y generación de vapor

La caldera es un recipiente metálico, cerrado, destinado a producir vapor, mediante la acción del calor generado por la quema de un combustible.

Figura 1. **Vista esquemática de una caldera pirotubular**



Fuente: *Termodinámica de equipos industriales: eficiencia energética de una caldera.*
http://www.tec.url.edu.gt/boletin/URL_13_QUI03.pdf. Consulta: 15 de octubre de 2013.

2.1.1. Conceptos fundamentales

Para comprender el mecanismo que utiliza una caldera para la generación de vapor, se torna imprescindible conocer los siguientes conceptos:

2.1.1.1. Entalpía del líquido

El calentamiento del agua, hasta alcanzar una temperatura determinada a una presión dada, causará que esta entre en ebullición y de esta forma el vapor sea liberado.

El calor requerido para llevar el agua desde 32 °F, que es la temperatura o punto base para el estudio de las propiedades del agua y del vapor, hasta el punto de ebullición, es lo que se conoce como entalpía del líquido saturado.

2.1.1.2. Saturación

Cuando el agua está en ebullición, ambos, el agua y el vapor liberado, tienen una misma temperatura que se llama temperatura de saturación. Para cada presión a la que ebulle el agua existe solamente una temperatura de saturación y viceversa.

El calor agregado durante la ebullición, que es utilizado para pasar el agua de su estado líquido a vapor, se denomina entalpía de evaporación. La suma de la entalpía del líquido saturado más la entalpía de evaporación, da la entalpía del vapor saturado, que equivale al calor agregado para llevar el agua desde 32 °F hasta vapor a una presión dada.

2.1.1.3. Balance de materia y energía

Los balances de materia y energía son una de las herramientas más importantes con las que cuenta la ingeniería de procesos, se utilizan para contabilizar los flujos de materia y energía entre un determinado proceso industrial y los alrededores o entre las distintas operaciones que lo integran.

2.1.1.3.1. Balance de materia

Se debe tomar en cuenta que la masa de un sistema permanece invariable, cualquiera que sea la transformación que ocurra dentro de él, por lo que el balance de materia se basa en la ley de la Conservación de la Materia, enunciada por Lavoisier que propone que: “La materia no se crea ni se destruye, solo se transforma”. Así, en el sistema de la caldera, por parte del combustible al ser sometido a combustión con el aire y una fuente de ignición, se transforma en los productos de la combustión (depende de cual sea el caso, como se verá más adelante) y el agua líquida que entra, sale en forma de vapor con alto contenido energético, que es el objetivo del uso de la caldera.

Con base en los principios y condiciones del sistema se puede aplicar la ecuación general de balance:

$$Entrada + formación = salida + consumo + acumulación$$

2.1.1.3.2. Balance de energía

Se basa en la ley de la Conservación de la Energía, que indica que en un proceso, “la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma”.

En un balance total de energía se toman en cuenta las transferencias de energía a través de los límites del sistema. Ciertos tipos de energía están asociados a la masa que fluye, otros tipos, como el calor y el trabajo son solo formas de transmisión de energía.

Existen seis tipos de energía:

- El trabajo: representa una transferencia entre el sistema y el entorno.
- El calor: se manifiesta como un flujo de energía que fluye por la frontera del sistema debido a una diferencia de temperatura con el entorno.
- Energía cinética: se asocia a la velocidad relativa del sistema respecto al reposo.
- Energía potencial: es la que posee el sistema en relación a su masa sobre un campo gravitacional o electromagnético.
- Energía interna: es la medida macroscópica de energías molecular, atómica y subatómica.
- Entalpía: representa la energía interna más el cambio debido a diferenciales de presión y/o volumen.

En un sistema en el que no hay cambios de energía cinética y potencial, el contenido de energía puede ser elevado por medio de transferencia de calor en forma de conducción, convección, radiación o por expansión mecánica (trabajo). Es decir, que los cambios en la energía interna de un sistema se manifiestan como generación de trabajo y calor.

2.1.2. Eficiencia

El objetivo de una caldera, además de generar vapor, es realizar con la máxima eficiencia posible la transferencia de calor, definiendo la eficiencia de la caldera como: la relación entre la cantidad de energía contenida en el vapor generado y la cantidad de energía suministrada por la quema del combustible en la caldera, por lo tanto, el término se refiere al aprovechamiento del combustible para la generación de vapor.

Dado que las pérdidas de energía se hacen presentes en cualquier sistema que involucre intercambio de calor, la eficiencia de la caldera siempre es menor al 100 %, pero con las prácticas y mantenimiento adecuado, además de algunos equipos adicionales que favorecen la combustión, las pérdidas pueden reducirse de manera considerable. La eficiencia de la caldera está dada por:

$$\eta = \frac{\dot{m}_w(H_v - H_w)}{\dot{m}_c PC}$$

2.1.3. Clasificación de las calderas según disposición de fluidos

Las calderas se clasifican en función del paso del fluido portador del calor a través de los tubos de intercambio.

2.1.3.1. Calderas pirotubulares

Son aquellas en las que los gases de la combustión circulan por el interior de los tubos y el líquido se encuentra en una cámara atravesada por dichos

tubos. Son de aplicación, principalmente, cuando la presión de trabajo es inferior a los 22 bar.

El vapor producido por estas calderas suele tener un título de vapor cercano a 1, es decir, que el contenido de agua por unidad de masa es bajo (3 %), no siendo necesario, en la mayoría de casos, instalar equipos auxiliares complementarios.

Las exigencias de la calidad del agua de alimentación son menores a las requeridas por las calderas acuotubulares.

Las calderas pirotubulares se clasifican en función de la disposición del haz tubular en:

2.1.3.1.1. Calderas horizontales

El haz de tubos está dispuesto de la parte delantera a la trasera de la caldera.

Figura 2. **Detalle de caldera pirotubular horizontal**



Fuente: *Calderas industriales eficientes.*

<http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-basica-calderas-industriales-eficientes-fenercom-2013.pdf>. Consulta: 15 de octubre de 2013.

2.1.3.1.2. Calderas verticales

El haz tubular está dispuesto de la parte inferior a la parte superior de la caldera.

2.1.3.1.3. Componentes fundamentales

Los componentes que forman las calderas pirotubulares son los siguientes:

- Envoltente exterior o virola exterior

Este elemento es de forma cilíndrica y es el encargado de contener los fluidos (agua/vapor) y evitar que estos salgan al exterior, en la misma van montadas las tubuladuras de control y supervisión, tales como: los controles de

nivel, los indicadores ópticos de nivel y orificios de inspección del lado de agua, entre otros.

- Cámara de combustión u hogar de combustión

La cámara de combustión, de construcción cilíndrica y disposición horizontal puede fabricarse en ejecución lisa u ondulada, en función del tamaño de la caldera y de la presión de trabajo de la misma. Es la encargada de contener la llama del quemador e iniciar el intercambio de energía por radiación.

- Cámara de inversión de gases

Este elemento es el encargado de reconducir los gases de la combustión hacia el haz tubular o paso de gases, haciendo cambiar de dirección a los mismos. Por regla general, esta cámara está totalmente refrigerada por agua, y construida de forma cilíndrica y horizontal. En calderas de bajo rendimiento, uno de los dos fondos no está refrigerado por agua, sino que lo está de una mampostería de cemento refractario.

- Fondo delantero y trasero exterior

De forma circular van soldados a la virola exterior y, al igual que esta, evitan que los fluidos salgan al exterior. En estas piezas van soldados los tubos de humos de gases de II (2º) y III (3º) paso de gases, así como puertas de registro e inspección y cajones recolectores de gases.

- Fondo delantero y trasero interior (solo en calderas de tres pasos de gases)

De forma circular van soldados a la virola de la cámara de inversión. Su misión es la de contener los productos de la combustión. En el fondo delantero van soldados los tubos de segundo paso de gases y en el fondo trasero van soldados entre este y el fondo trasero exterior unos tubos huecos (tubos *stay*) para dar al conjunto robustez y flexibilidad.

- Haz tubular (de 1 o 2 secciones en función de las calderas de 2 o 3 pasos de gases)

Son conjuntos formados por una cantidad variable de tubos, por los cuales circulan los gases de la combustión por su interior. Son los encargados de la transmisión de calor por convección.

2.1.3.2. Calderas acuotubulares

Son aquellas calderas en las que el fluido de trabajo se desplaza por el interior de tubos durante su calentamiento y los gases de combustión circulan por el exterior de los mismos. Son de aplicación cuando se requiere una presión de trabajo por encima de los 22 bar.

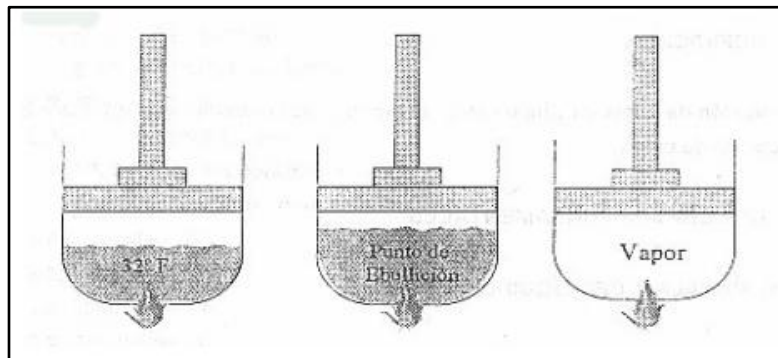
En el caso de las calderas de vapor, el título de vapor es muy bajo (0,85), es decir, que el contenido de agua por unidad de masa es muy alto (15 %) sino se le añaden subconjuntos de secadores del vapor, tales como recalentadores o sobrecalentadores.

Las exigencias de la calidad del agua de alimentación a estas calderas, suele ser superior al requerido para otro tipo de calderas.

2.1.4. Descripción del proceso de evaporación

Si se calienta una libra de agua dentro de un cilindro con un pistón, al cual se le puede aplicar diferentes presiones, se observará que la misma secuencia de eventos ocurre en cada nivel de presión.

Figura 3. Proceso de ebullición del agua



Fuente: *Manual de operación de calderas.*

<http://www.sisman.utm.edu.ec/libros/FACULTAD%20DE%20CIENCIAS%20MATEM%C3%81TICAS%20F%C3%82SICAS%20Y%20QU%C3%8DMICAS/INGENIER%C3%8DA%20MEC%C3%81NICA/09/Calderas/Libros/libro%20Calderas.pdf>. Consulta: 15 de octubre de 2013.

Primero, la temperatura del agua se eleva y su volumen se incrementa ligeramente.

Después comienza la ebullición, el volumen se incrementa grandemente y la temperatura permanece constante hasta que todo el agua se ha convertido en vapor.

Si se aumenta la presión en el cilindro, la cantidad de calor requerida para llevar el agua a su punto de ebullición, también aumenta mientras que el calor necesario para evaporarla tiende a disminuir.

2.1.5. Tablas de vapor

Aunque las propiedades del vapor y el agua están definidas por la naturaleza, ellas pueden ser medidas y tabuladas. Estas tablas contienen información organizada con respecto a presión y temperatura. En ellas, para cada condición se dan los valores correspondientes de: volumen específico, entalpía, entropía, energía interna, entre otros datos de interés. Las tablas más comunes cubren información hasta 1 600 °F y 5 500 psia, pero debido a la tendencia moderna de usar generadores de vapor de más altas presiones se han diseñado tablas hasta 15 000 psia.

2.2. Transferencia de calor

La transferencia de calor puede ocurrir por medio de uno de tres mecanismos: conducción, convección y radiación, dichos mecanismos, todos, tanto los de transferencia de calor, como los de *momentum* y masa, así como los de los fenómenos eléctricos y otros en la naturaleza, siguen la misma ecuación global de transferencia. A esta ecuación se le conoce como la ecuación fenomenológica de los fenómenos de transporte naturales.

$$Flujo = \frac{Gradiente * \acute{a}rea\ de\ contacto * tiempo\ de\ operaci3n}{Resistencia * distancia\ a\ cruzar}$$

2.2.1. Conducción

Es la transferencia de calor desde un punto de un material hacia otro del mismo material o hacia un material contiguo. El calor es visualizado como una actividad molecular; realmente es la vibración de las moléculas de un material. Cuando una parte de un material es calentada, la vibración molecular en ese punto aumenta. Este incremento de la actividad molecular es transmitido a las moléculas adyacentes, y estas a su vez, lo transmiten a otras moléculas estableciéndose un flujo de calor desde el punto caliente hasta las zonas más frías.

Las sustancias difieren grandemente en su habilidad para conducir el calor. Los gases y los vapores son considerados pobres conductores, los líquidos son mucho mejores y los metales son los mejores conductores. La habilidad de conducción del calor es conocida como conductividad térmica.

Este mecanismo está regido por la ley de Fourier, la cual indica que la velocidad de transferencia de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo.

$$Q_c = \frac{k * A_c * \Delta T}{l}$$

2.2.2. Convección

Como se describió en el punto anterior, la transferencia de calor por conducción es un movimiento de energía a través de un material. En contraste, la transferencia por convección tiene lugar debido a un movimiento del mismo material calentado.

Cuando un fluido es calentado, su densidad disminuye. Si parte de una masa de un fluido es calentada, la parte más fría y más pesada tiende a desplazar la más caliente, entonces la porción que estaba fría se calienta, y a su vez es desplazada. El resultado es un flujo continuo de fluido frío hacia el área caliente y de fluido caliente alejándose de dicha área estableciéndose una corriente por convección. El movimiento del fluido caliente se convierte en un medio de transferencia de calor.

Cuando la sola diferencia de densidades establece el flujo, se llama convección natural. Cuando un propulsor o bomba ayuda a establecer, dicho flujo se llama convección forzada.

La ecuación para la transferencia de calor por convección es la siguiente:

$$Q_{Cx} = U * A * \Delta T$$

2.2.3. Radiación

Todos los cuerpos irradian energía. La radiación no requiere un medio de transmisión, ella se produce tanto a través del vacío como de un gas; la radiación se propaga como las ondas de la luz. Un cuerpo expuesto a radiación se calienta solamente sobre el lado expuesto.

La cantidad de energía que irradia un cuerpo depende del tamaño, la forma y la sustancia, pero, principalmente de su temperatura absoluta.

2.3. Combustión

La casi totalidad de las actividades de la sociedad se basan en el uso de la energía en sus distintas expresiones, desde el uso de un vector energético como es la electricidad para la iluminación, motores eléctricos y equipos electrónicos, hasta el uso de fuentes de energía como los combustibles sólidos, líquidos y gaseosos en la cobertura de demandas térmicas.

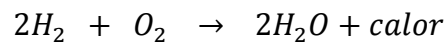
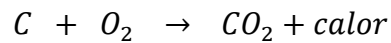
Precisamente en este último uso de la energía, la cobertura de demandas térmicas para sus distintos usos, el proceso fundamental utilizado es la combustión de los denominados combustibles.

Por otra parte, no basta simplemente con realizar la cobertura de las demandas térmicas, sino que por el coste económico creciente de las fuentes de energías, sus existencias finitas y el interés de que el impacto de las actividades sea el menor razonablemente posible, hace que se deba conocer adecuadamente este proceso, para ejecutarlo con la mayor eficiencia posible y con los combustibles más adecuados.

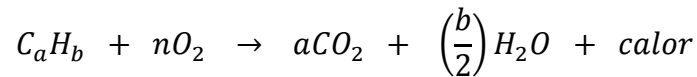
2.3.1. Definición

Combustión es el conjunto de procesos físicoquímicos en los que un elemento combustible se combina con otro elemento comburente (generalmente oxígeno en forma de O_2 gaseoso), desprendiendo luz, calor y productos químicos resultantes de la reacción (oxidación). Como consecuencia de la reacción de combustión se tiene la formación de una llama, esta es una masa gaseosa incandescente que emite luz y calor.

Las reacciones básicas de combustión corresponden a las reacciones de oxidación del carbono (C) y del hidrógeno (H) mediante oxígeno, que puede aportarse en forma pura (oxicombustión) o mediante el aporte de aire que lo contiene en una proporción media del 21 %. Estas reacciones son:



Pero estos dos componentes químicos no se encuentran habitualmente en estado puro para actuar como combustibles (salvo el carbono en el carbón de origen fósil). Los combustibles tienen una composición general que se puede expresar como C_aH_b y cuya reacción de combustión es:



La combustión no es realmente una única reacción química, sino que se pueden distinguir tres fases en la reacción de combustión.

2.3.1.1. Fase de prerreacción (formación de radicales)

El combustible se descompone dando lugar a la formación de radicales, que son unos compuestos intermedios inestables y muy activos, para que, de este modo, el carbono y el hidrógeno puedan reaccionar con el oxígeno. Estos radicales son del tipo H^+ , CO^- , CH_3^+ (en el caso del metano), OH^- , O^- .

2.3.1.2. Fase de oxidación

En esta fase se produce la combinación entre radicales y el oxígeno de un modo exotérmico. Es cuando tiene lugar la propagación de la llama.

2.3.1.3. Fase de terminación

En esta fase se forman los compuestos estables finales. El conjunto de estos compuestos se denominan: gases de combustión.

Aun existiendo en el conjunto de estas reacciones, algunas endotérmicas y otras exotérmicas, el balance global es netamente exotérmico.

2.3.2. Triángulo de combustión

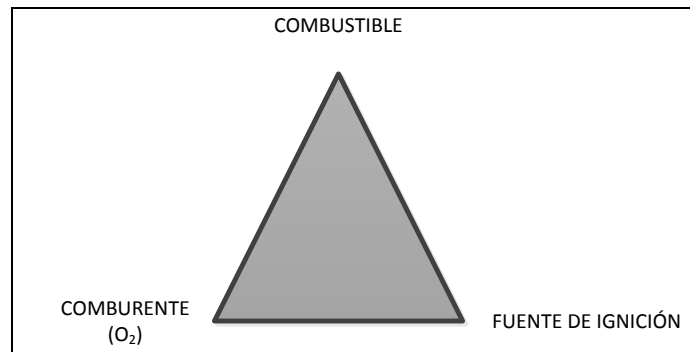
Para que se produzca la combustión, deben encontrarse en el espacio y en el tiempo tres elementos:

- Combustible
- Comburente
- Fuente de ignición

El combustible y el comburente se deben encontrar en unas proporciones adecuadas, no produciéndose la combustión fuera de esas condiciones. Adicionalmente, es precisa una fuente de energía que produzca el inicio de la combustión, lo que se denomina fuente de ignición, y que después mantenga esta combustión.

El conjunto de estos tres elementos se denomina triángulo de combustión, o triángulo del fuego, del cual se puede concluir que para mantener la combustión deben estar presentes todos los elementos.

Figura 4. **Representación del triángulo de combustión**



Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, para que se inicie la combustión, es necesario que el combustible se encuentre en forma gaseosa. Por ello, los combustibles líquidos y sólidos precisan calentarse, primero para que desprendan vapores que puedan inflamarse. En consecuencia se pueden diferenciar para cada material los siguientes:

- Temperatura de gasificación: el combustible se gasifica.
- Temperatura de ignición: el combustible ya gasificado se inflama espontáneamente.

2.3.3. Tipos de combustión

De acuerdo con el nivel de combustión alcanzado y la cantidad de comburente aportado a la combustión, se pueden dar los siguientes tipos de combustión:

2.3.3.1. Combustión completa

Es aquella reacción en la que el combustible se quema hasta el máximo grado posible de oxidación. En consecuencia, no habrá sustancias combustibles en los humos. En los productos de la combustión se puede encontrar N_2 , CO_2 , H_2O y SO_2 .

2.3.3.2. Combustión incompleta

Es aquella reacción en la que el combustible no se oxida completamente. Se forman sustancias, denominadas inquemados, que todavía pueden seguir oxidándose, por ejemplo, CO . Otros inquemados pueden ser: H_2 , C_nH_m , H_2S y C . Estas sustancias son los contaminantes más comunes que escapan a la atmósfera en los gases de combustión.

2.3.3.3. Combustión teórica o estequiométrica

Es la combustión realizada con la cantidad teórica de oxígeno estrictamente necesaria para producir la oxidación total del combustible sin que se produzcan inquemados. En consecuencia, no se encuentra O_2 en los humos, ya que el O_2 aportado a la combustión se consume completamente en la misma.

2.3.3.4. Combustión con exceso de aire

Es la combustión que se lleva a cabo con una cantidad de aire superior a la estequiométrica. Tiende a no producir inquemados y es típica la presencia de O_2 en los humos. Si bien la incorporación de aire permite evitar la combustión incompleta y la formación de inquemados, trae aparejada la pérdida de calor en los productos de combustión, reduciendo la temperatura de combustión, la eficiencia y la longitud de llama.

2.3.3.5. Combustión con defecto de aire

En esta combustión, el aire disponible es menor que el necesario para que se produzca la oxidación total del combustible. Por lo tanto, se producen inquemados.

2.3.4. Teoría de la llama

La llama es el espacio físico donde se produce una reacción de combustión que emite calor y luz. Como la combustión es una reacción exotérmica (libera calor), los gases producidos en la misma adquieren temperaturas elevadas, con lo que emiten radiación en parte luminosa, lo que da la característica de color en la llama, pudiendo ser esta de distintos colores o prácticamente invisible, como es el caso de la combustión del hidrógeno.

Para que una llama se mantenga estable en el tiempo, en la zona de combustión, la velocidad de aporte de la mezcla de combustible y comburente debe ser igual a la velocidad con la que se propaga la combustión, es decir, la velocidad de propagación de la llama.

Por otra parte, para que se mantenga esta llama, el aporte de combustible y comburente debe encontrarse en una proporción situada dentro de los límites fijados por los límites inferior y superior de inflamabilidad.

2.3.4.1. Características de la llama

Las características básicas de la llama son las siguientes:

2.3.4.1.1. Temperatura final de la llama

También se denomina temperatura teórica de combustión o temperatura adiabática de combustión. Es la temperatura que se obtendría en una combustión estequiométrica con mezcla perfectamente homogénea y en un tanque que permita evitar cualquier pérdida de calor al exterior.

En muchos casos, basta con valorar de modo aproximado el calor liberado para determinar la temperatura adiabática de combustión. Esta temperatura aumenta con la potencia calorífica del combustible y disminuye con la capacidad calorífica de los productos de combustión.

2.3.4.1.2. Temperatura máxima teórica de la llama

Es la temperatura que se alcanza cuando la cantidad de aire empleada en la combustión es la cantidad estequiométricamente necesaria para ello. Se trata de un valor ideal, ya que las condiciones estequiométricas son imposibles de conseguir en la realidad. Las temperaturas máximas de la llama son 200-300 °C inferiores a la temperatura máxima teórica de la llama.

Si se está utilizando combustible gaseoso con capacidad calorífica baja, para conseguir elevar la temperatura de combustión habrá que precalentar la mezcla antes de que llegue a la temperatura de combustión. En la llama se distinguen tres zonas, que son:

- Reductora: también se llama dardo primario. Existe aquí un defecto de oxígeno, es la zona más interna.
- Oxidante: hay exceso de oxígeno. Se llama también dardo primario, es la zona más externa y no está tan claramente definida como la reductora.
- Normal: es la zona que queda entre una y otra.

2.3.4.1.3. Velocidad de propagación de la llama

Es la velocidad a la cual se produce la combustión de la mezcla aire-gas que sale por el quemador, y se mide en centímetros por segundo. Según va saliendo la mezcla inflamable por la cabeza del quemador, el frente de llama va avanzando y quemando la mezcla.

La velocidad de propagación o avance de la llama depende de:

- La proporción entre el combustible y el comburente con que se realiza la mezcla previa (coeficiente de exceso de aire).
- Las características del combustible.

- Las características del comburente: los gases no combustibles, como el nitrógeno presente en el aire ambiente, disminuyen la velocidad de propagación, al contrario que los gases combustibles, como el hidrógeno, que la aumentan.
- La temperatura de la mezcla: a medida que aumenta la temperatura de la mezcla, aumenta la velocidad de propagación.

2.3.4.2. Clasificación de las llamas

Las llamas se pueden clasificar según confluyan los reactivos a la zona de combustión en:

- Llamas de premezcla: la mezcla se produce previa a la zona de llama.
- Llamas de difusión: la mezcla se produce en la misma zona de llama.

En la práctica pueden presentarse llamas de tipo intermedio, es decir, llamas parcialmente premezcladas, o en las que una de las corrientes es laminar y la otra turbulenta.

Según el tipo de movimiento de los fluidos que intervienen, también se clasifican en llamas laminares y turbulentas.

Las llamas laminares se caracterizan por tener números de Reynolds bajos, inferiores a 2 000, mientras que las turbulentas tienen números de Reynolds mayores de 4 000.

2.3.4.3. Estabilidad de las llamas

Para que la llama quede adherida al quemador y, por tanto, sea estable, debe existir un equilibrio entre la velocidad de salida de la mezcla combustible por el quemador y la velocidad de avance de la llama.

La inestabilidad de la llama se produce por:

- Aumento de la velocidad de salida de la mezcla aire-combustible, en relación a la velocidad de avance de la llama hasta un límite que pueda producir un despegue o desprendimiento de la llama.
- Disminución de la velocidad de salida de la mezcla aire-combustible, en relación a la velocidad de avance de la llama hasta un límite que pueda producir un retroceso de la llama.

Este último fenómeno suele ser frecuente en gases con alto contenido en hidrógeno, debido a su alta velocidad de propagación de llama.

2.3.5. Recuperación de calor contenido en los gases de combustión (economizadores)

Los principios físicos sobre la técnica de la recuperación del calor contenido en los productos de la combustión de las calderas se describen de una manera profunda en los manuales específicos sobre la materia.

Existen dos reglas basadas en la experiencia para determinar el ahorro potencial de combustible si se utiliza un economizador.

1. Un incremento en la temperatura del agua de alimentación de 11 °F (6,110 °C), reduce el consumo de combustible en un 1 %.
2. Una reducción en la temperatura de los gases de combustible en la chimenea de 40 °F (22,221 °C), reduce el consumo de combustible en un 1 %.

El aumento de la eficacia del grupo caldera-economizador se produce debido a dos factores:

1. Reducción de las pérdidas en la chimenea y recuperación de la energía sobre el calor latente:

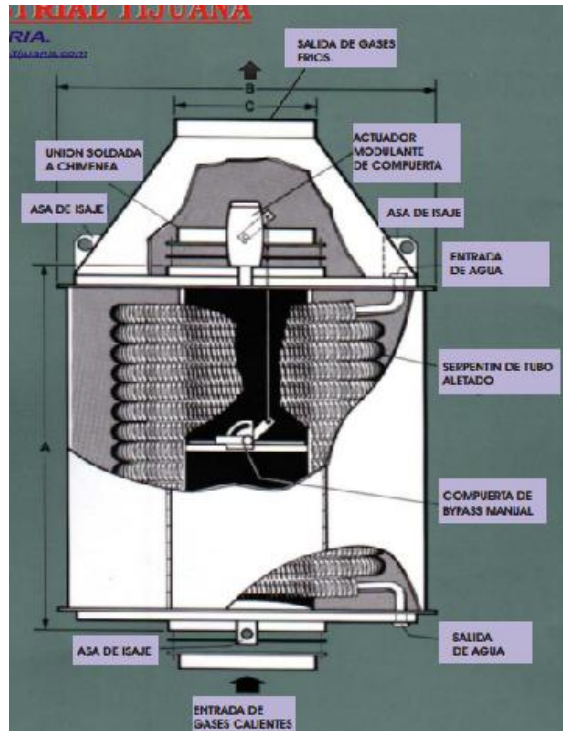
El uso de un intercambiador de gases/agua reduce notablemente la temperatura de salida de los gases de combustión desde 10 hasta 25 K, respecto a la temperatura de retorno del agua de la calefacción.

Por este motivo, para una de temperatura de retorno comprendida entre 30 y 70 °C, se puede esperar un incremento del rendimiento entre un 5 y un 5,8 %.

2. Recuperación de energía térmica del calor latente de condensación:

Dicha fase de adquisición del calor de los humos es efectiva cuando la temperatura del agua de retorno se sitúa por debajo del punto de condensación de los humos de combustión, la cual es de, aproximadamente, 57 °C para los gases de gas natural. En el caso de valores de temperatura de retorno comprendidos entre los 50 y los 30 °C, se puede esperar un incremento del rendimiento entre un 4 y un 10 %.

Figura 5. Economizador



Fuente: *La verdadera economía está en la recuperación de calor.*

<http://www.industrialtijuana.com/pdf/ECONHOJAWEB.pdf>. Consulta: 15 de enero de 2015.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Las variables que se utilizaron para realizar el presente estudio, así como su relación, son descritas en la siguiente tabla:

Tabla I. **Variables del proceso para el cálculo de la eficiencia de operación**

| Variable | Unidad de medida | Relación | |
|-----------------------------------|-------------------|---------------|-------------|
| | | Independiente | Dependiente |
| Tiempo del ciclo | [s] | x | |
| Presión caldera | [psi] | x | |
| Temperatura de entrada del agua | [°C] | x | |
| Porcentaje de gases de combustión | [-] | x | |
| Volumen de agua | [m ³] | | x |
| Volumen de combustible | [gal] | | x |

Fuente: elaboración propia.

3.1.1. Descripción de variables a manipular

La única variable manipulada fue el tiempo del ciclo en estudio. La cual incide en los consumos horarios de agua y combustible; siendo las demás variables designadas como variables de proceso.

3.2. Delimitación del campo de estudio

El estudio se limitó a la obtención de la eficiencia de operación de la caldera por un balance de materia y energía, la eficiencia de combustión por medio de las tablas de combustión del bunker, utilizando para la medición de los gases de combustión un equipo bacharach y la propuesta de la inclusión de un economizador para incrementar la eficiencia de operación de la caldera.

3.3. Recursos humanos disponibles

3. Investigador: Marvin Antonio Aguilar Tucubal
4. Asesor: Ing. Qco. Federico Guillermo Salazar Rodríguez
5. Gerente de Mantenimiento: Ing. Mco. Marco Zamora
6. Jefe de mantenimiento en planta: Otto Cortéz

3.4. Recursos materiales disponibles

- Caldera pirotubular de 125 hp marca Cleaver Brooks
- Caldera pirotubular de 150 hp marca Cleaver Brooks
- Medidores de nivel del agua y combustible
- Termómetro ubicado en el tanque de agua de alimentación
- Manómetro ubicado en la salida del vapor de la caldera
- Medidor de gases de combustión bacharach

- Cronómetro.

3.5. Técnica cuantitativa

El trabajo de graduación fue de carácter cuantitativo, experimental y comparativo respecto a la toma de datos de las variables antes descritas.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Los procedimientos realizados para la recolección de la información fueron los siguientes:

3.6.1. Recolección de la información para la eficiencia de combustión

- Con un equipo bacharach se obtuvo el porcentaje de dióxido de carbono contenido en la salida de los gases de combustión.
- Con un termómetro ubicado en el área de calderas se tomó la temperatura ambiente.
- Con un termómetro en la salida de los gases de combustión se tomó la temperatura de los mismos.

3.6.2. Recolección de la información para la eficiencia de la caldera

- Se definió la toma de datos en los días de lunes a viernes, en promedio de 15 horas de producción diaria.

- Fue medido el volumen de combustible y agua en los tanques de almacenamiento, mediante la curva de calibración de cada tanque, dada la diferencia de altura al iniciar y finalizar el periodo establecido.
- Se tomó la presión de salida del vapor en el manómetro contenido en la caldera.
- Con un termómetro en el tanque de alimentación, se midió la temperatura de entrada del agua a la caldera.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Para la tabulación y ordenamiento de los datos obtenidos, se utilizaron las tablas de toma de datos originales para la eficiencia de combustión y para la eficiencia de operación (ver apéndices 3 y 4).

Para la obtención de la eficiencia de combustión, la eficiencia de operación y los beneficios de la inclusión del economizador, los datos obtenidos fueron procesados de la siguiente manera:

Los valores de referencia para la muestra de los cálculos necesarios, serán los correspondientes a la corrida número uno, es decir, la del día 10 de febrero de 2014 (ver fila número 1 de los apéndices del 3 al 7 y del anexo 3).

3.7.1. Cálculo de la eficiencia de combustión

La temperatura neta se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$T_N = T_{GC} - T_m$$

Tomando:

$$T_{GC} = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

$$T_m = 18,8 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

$$T_N = (200 - 18,8) \text{ }^{\circ}\text{C} = 181,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Con el valor obtenido de dióxido de carbono mediante el equipo bacharach y la temperatura neta, se procedió a utilizar las tablas de eficiencia de combustión del bunker (ver anexo 2), para encontrar el valor de la eficiencia de combustión. Dado que algunos valores no se encontraban de manera exacta expresados en las tablas, se utilizó como método de interpolación, el polinomio de Lagrange.

Tomando la ecuación de la eficiencia de combustión, se encontrará el valor del calor perdido por los gases de combustión:

$$\eta_c = 1 - \frac{Q_{GC}}{E_c} = 1 - \frac{Q_{GC}}{\dot{m}_c PC}$$

Despejando para la energía perdida en los gases de combustión:

$$Q_{GC} = (1 - \eta_c)(\dot{m}_c PC)$$

Tomando:

$$\eta_c = 0,862.$$

$$\dot{m}_c = 0,01813 \text{ kg/s}.$$

$$PC = 40\,325 \text{ kJ/kg (anexo 3)}.$$

$$Q_{GC} = (1 - 0,862) \left(0,01813 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) \left(40\,325 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 100,917 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

3.7.2. Cálculo de la eficiencia de operación

Se obtuvo el volumen del agua y combustible de manera directa, dado el cambio en la altura de los fluidos en los tanques durante el periodo establecido.

El flujo volumétrico se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = \frac{V}{t}$$

Tomando:

$$V = 9 \text{ m}^3 \text{ de agua}$$

$$t = 15 \text{ h}$$

$$\dot{Q} = \frac{9 \text{ m}^3}{15 \text{ h}} = 0,6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Dado que se trabajó con el sistema internacional de medidas, se realizó la conversión pertinente:

$$\dot{Q} = 0,6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * \frac{1 \text{ h}}{3\,600 \text{ s}} = 1,67 * 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Los flujos máxicos se obtuvieron mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{m} = \dot{Q} * \rho$$

Tomando:

$$\dot{Q} = 1,67 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\rho = 980,4 \text{ kg/m}^3 \text{ (anexo 3)}$$

$$\dot{m} = \left(1,67 * 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) * \left(980,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = 0,163 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

La ecuación para la eficiencia de operación se obtuvo mediante el siguiente balance de energía:

$$E_C + E_W = E_V + E_{GC}$$

De las cuales, las formas de energía se pueden expresar mediante:

$$E_C = \dot{m}_C PC$$

$$E_W = \dot{m}_w * H_w$$

$$E_V = \dot{m}_V * H_V$$

$$E_{GC} = (1 - \eta_C)(\dot{m}_C PC)$$

Tomando en consideración que, la caldera trabaja en forma continua en su ciclo de operación, el total de agua de alimentación a la caldera es transformada en vapor, por lo tanto:

$$\dot{m}_v = \dot{m}_w$$

Sustituyendo en la ecuación del balance de energía:

$$[\dot{m}_c PC] + [\dot{m}_w * H_w] = [\dot{m}_w * H_v] + [(1 - \eta_c)(\dot{m}_c PC)]$$

Simplificando la ecuación y tomando en cuenta el principio de conservación de la energía:

$$1 = \frac{\dot{m}_w(H_v - H_w)}{\eta_c \dot{m}_c PC}$$

Considerando la presencia de pérdidas energéticas, debido a la radiación, purgas y otras alteraciones que se puedan presentar en el sistema, además de la suposición de que la diferencia de energía entre el agua de alimentación y el vapor saturado en la salida de la caldera se da debido al contenido energético de la combustión, la eficiencia de operación de la caldera se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\dot{m}_w(H_v - H_w)}{\eta_c \dot{m}_c PC}$$

Tomando:

$$\dot{m}_w = 0,163 \text{ kg/s}$$

$$H_v = 2\,761,35 \text{ kJ/kg (anexo 3)}$$

$$H_w = 272,00 \text{ kJ/kg (anexo 3)}$$

$$\eta_c = 0,862$$

$$\dot{m}_c = 0,0181 \text{ kg/s}$$

$PC = 40\,325 \text{ kJ/kg}$ (anexo 3)

$$\eta = \frac{0,163 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * \left(2\,761,35 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 272,00 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)}{(0,862) * \left(0,0181 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) * \left(40\,325 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)} = 0.6552$$

Representando la eficiencia en porcentaje:

$$\% \eta = 0,6453 * 100 = 65,52 \%$$

3.7.3. Cálculo del ahorro de combustible

Mediante la ecuación de la eficiencia de operación, despejando para el flujo másico del combustible, se obtuvo el cambio en el ahorro del mismo. Trabajando con la eficiencia de operación media (0,6868) y tomando en cuenta los enunciados:

1. “Un incremento en la temperatura del agua de alimentación de 11 °F (6,110 °C), reduce el consumo de combustible en un 1 %.
2. Una reducción en la temperatura de los gases de combustible en la chimenea de 40 °F (22,221 °C), reduce el consumo de combustible en un 1 %” [1].

Tomando en cuenta el primer enunciado, dado que la temperatura de alimentación promedio es de 65,7 °C y la temperatura de ebullición del agua en

¹ *La verdadera economía está en la recuperación de calor.* [en línea] <<http://www.industrialtijuana.com/pdf/ECONHOJAWEB.pdf>> Consulta: 15 de enero de 2015.

condiciones estándar es de 100 °C, el porcentaje en la reducción del combustible corresponde a:

$$\frac{100\text{ °C} - 65,7\text{ °C}}{6,110\text{ °C}} = 5,614\%$$

Tomando en cuenta el segundo enunciado, dado que la temperatura promedio de los gases de combustión es de 207,84 °C y que no puede ser menor a 100 °C, que es la temperatura de ebullición del agua en condiciones estándar, ya que se violaría la segunda ley de la termodinámica, el porcentaje en la reducción del combustible corresponde a:

$$\frac{207,84\text{ °C} - 100\text{ °C}}{22,221\text{ °C}} = 4,853\%$$

Dado que se deben cumplir ambos enunciados, se debe tomar el valor más bajo del porcentaje de ahorro de combustible. Además se tomó un factor de seguridad del 30 % para asegurar el proceso, quedando así el porcentaje de ahorro de combustible:

$$4,853\% * (1 - 0,30) = 3,397\%$$

Por fines prácticos, el porcentaje de ahorro del combustible se definió en un 3 %.

Mediante el despeje del flujo másico del combustible de la ecuación de la eficiencia de operación de la caldera, trabajando con la eficiencia de operación media (0,6868), se obtuvo la cantidad de combustible utilizada, de la siguiente manera:

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{m}_w(H_v - H_w)}{\eta * \eta_c * PC}$$

$$\dot{m}_c = \frac{0,163 \frac{kg}{s} * \left(2\,761,35 \frac{kJ}{kg} - 272,00 \frac{kJ}{kg} \right)}{(0,6868) * (0,862) * \left(40\,325 \frac{kJ}{kg} \right)} = 0,0170 \frac{kg}{s}$$

Tomando en cuenta el 3 % de ahorro en el combustible:

$$\text{Ahorro de combustible} = \left(0,0170 \frac{kg}{s} \right) * (0,03) = 5,110 * 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

Dado que el tiempo de operación medio aproximadamente es de 15 horas diarias, el ahorro de combustible anual se obtuvo mediante la siguiente conversión:

$$\begin{aligned} \text{Ahorro de combustible anual} &= 5,110 * 10^{-4} \frac{kg}{s} * \frac{3\,600\ s}{1h} * \frac{15h}{1\ día} * \frac{365\ día}{1\ año} \\ &= 10\,071,810 \frac{kg}{año} \end{aligned}$$

3.7.4. Cálculo del beneficio energético

Conociendo el valor del ahorro de combustible anual, se pudo obtener el beneficio o ahorro energético anual mediante la siguiente ecuación:

$$E_c = \dot{m}_c PC$$

Tomando:

$$\dot{m}_C = 10\,071,810 \text{ kg/año}$$

$$PC = 40\,325 \text{ kJ/kg (anexo 3)}$$

$$E_C = \left(10\,071,810 \frac{\text{kg}}{\text{año}}\right) * \left(40\,325 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) = 406\,145\,728,979 \frac{\text{kJ}}{\text{año}}$$

3.7.5. Cálculo del ahorro económico

Luego de las conversiones pertinentes, el precio del bunker es de Q. 6,184/kg, con lo que se obtuvo el ahorro económico que el ahorro del combustible representa, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Ahorro económico} = \dot{m}_C * P_B$$

Tomando:

$$P_B = \text{Q. } 6,184/\text{kg}$$

$$\text{Ahorro económico} = \left(10\,071,810 \frac{\text{kg}}{\text{año}}\right) * \left(6,184 \frac{\text{Q}}{\text{kg}}\right) = 62\,288,808 \text{ Q/año}$$

3.7.6. Cálculo del aumento en la eficiencia de operación

Tomando la diferencia entre el combustible utilizado y el ahorro del mismo, mediante la ecuación de la eficiencia de operación de la caldera se obtuvo el aumento en esta, de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{\dot{m}_w(H_v - H_w)}{\eta_c \dot{m}_c PC}$$

Tomando:

$$\dot{m}_w = 0,163 \text{ kg/s}$$

$$H_v = 2\,761,35 \text{ kJ/kg (anexo 3)}$$

$$H_w = 272,00 \text{ kJ/kg (anexo 3)}$$

$$\eta_c = 0,862$$

$$\dot{m}_c = (0,0173 - 5,110 \cdot 10^{-4}) \text{ kg/s}$$

$$PC = 40\,325 \text{ kJ/kg (anexo 3)}$$

$$\eta = \frac{0,163 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * \left(2\,761,35 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 272,00 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)}{(0,862) * \left((0,0173 - 5,110 * 10^{-4}) \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) * \left(40\,325 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)} = 0,7082$$

Por lo que, el aumento en la eficiencia de operación es:

$$\Delta\eta = 0,7082 - 0,6764 = 0,0212$$

Porcentualmente:

$$\% \Delta\eta = 2,12 \%$$

3.8. Análisis estadístico

Con el fin de establecer el número idóneo de repeticiones para obtener la mayor exactitud y precisión posible, experimentalmente hablando, se tomó la distribución de probabilidad normal de Gauss de la siguiente manera:

3.8.1. Número de repeticiones

Mediante la ecuación:

$$n = \frac{z_{\alpha/2}^2 * P * Q}{e^2}$$

Tomando:

$$P = 0,95$$

$$Q = 0,05$$

$$z_{\alpha/2} = 1,96$$

$$e = 0,2$$

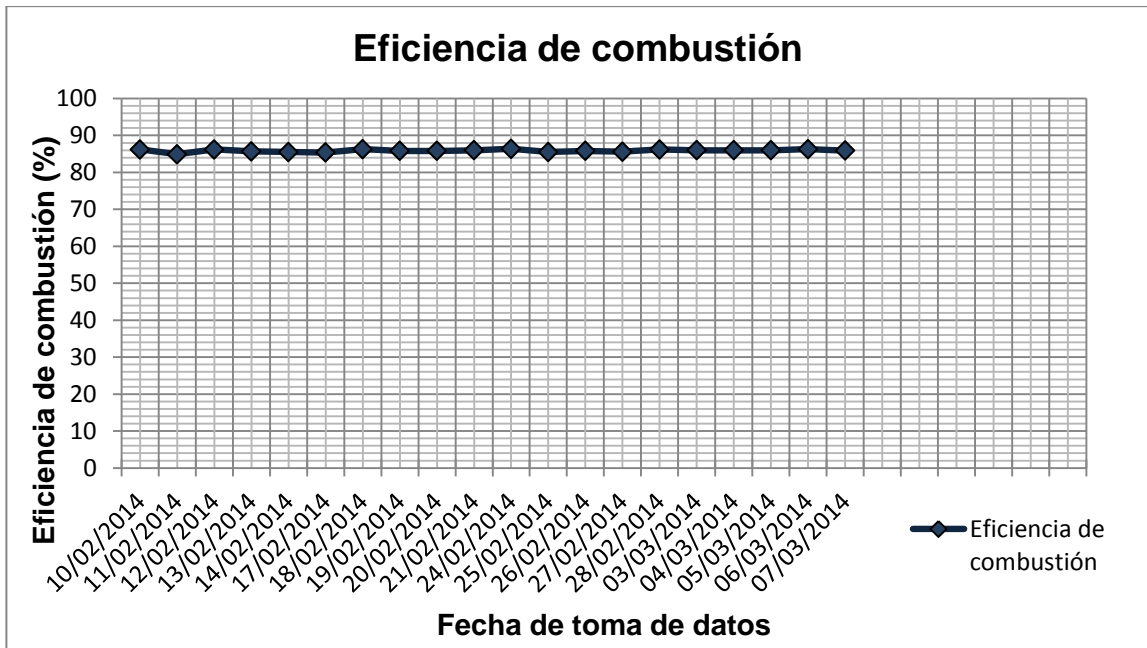
$$n = \frac{(1,96)^2 * (0,95) * (0,05)}{(0,2)^2} = 4,56$$

Por lo tanto, el número mínimo de repeticiones para obtener una confiabilidad del 95 % es de 5. Con el fin de asegurar el proceso, así como la exactitud en los cálculos, se trabajó con 20 repeticiones.

3.8.2. Eficiencia de combustión

Dado que los resultados obtenidos, tabulados en el apéndice 5, deben ser precisos entre sí, se graficó la eficiencia de combustión obtenida por día de toma de datos para observar y cuantificar la variación entre estas.

Figura 6. **Eficiencias de combustión obtenidas, respecto al día de toma de datos**



Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Datos estadísticos de dispersión de las eficiencias de combustión**

| Dato estadístico | Valor |
|-------------------------------|--------------|
| Media aritmética (%) | 85,875 |
| Varianza | 0,137 |
| Desviación estándar | 0,370 |
| Coefficiente de variación (%) | 0,431 |
| Valor máximo (%) | 86,400 |
| Valor mínimo (%) | 84,900 |
| Rango (%) | 1,500 |

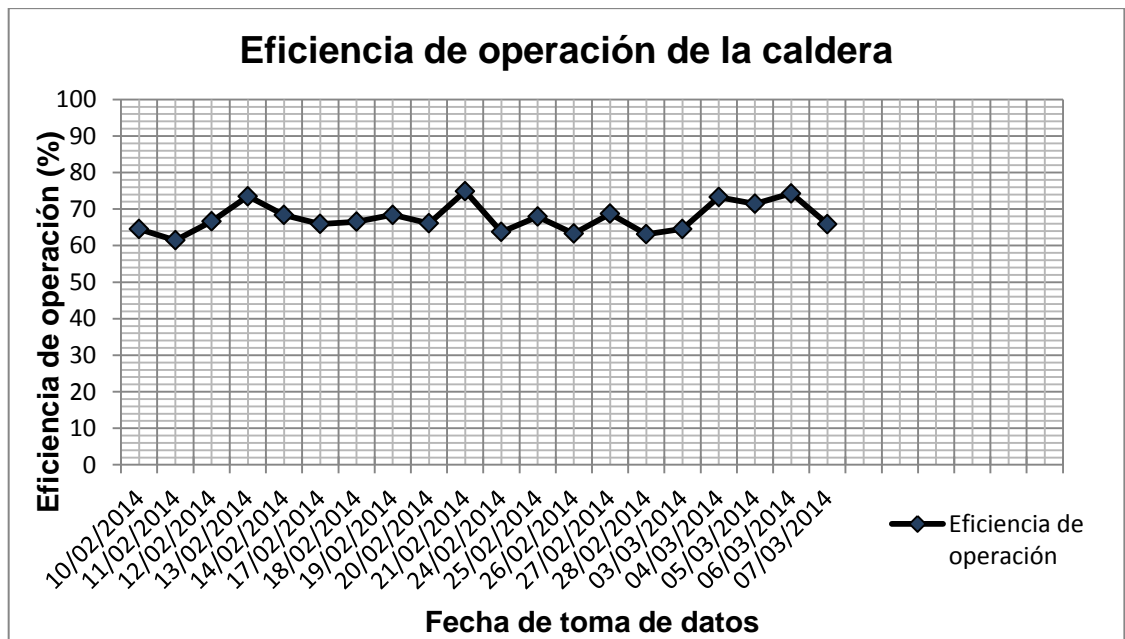
Fuente: elaboración propia.

Dado que el coeficiente de variación es menor al 10 %, no se descartó ninguno de los datos obtenidos en las repeticiones, garantizando así la confiabilidad de los resultados de la eficiencia de combustión obtenidos.

3.8.3. Eficiencia de operación de caldera

Dado que los datos de la eficiencia de operación de la caldera obtenidos, son del mismo carácter que los de la eficiencia de combustión, el análisis fue el mismo, estos datos se encuentran tabulados en el apéndice 7.

Figura 7. Eficiencias de operación de caldera obtenidas, respecto al día de toma de datos



Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Datos estadísticos de dispersión de las eficiencias de operación de caldera**

| Dato estadístico | Valor |
|-------------------------------|--------------|
| Media aritmética (%) | 68,678 |
| Varianza | 16,460 |
| Desviación estándar | 4,057 |
| Coefficiente de variación (%) | 5,908 |
| Valor máximo (%) | 76,059 |
| Valor mínimo (%) | 62,387 |
| Rango (%) | 13,672 |

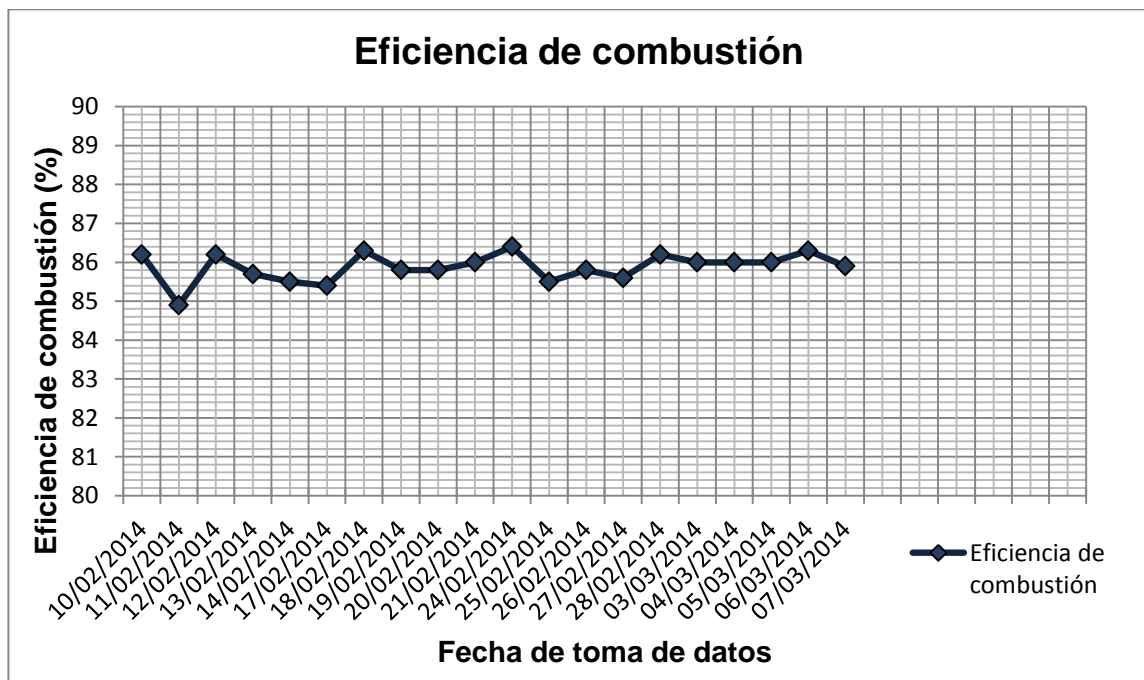
Fuente: elaboración propia.

Dado que el coeficiente de variación es menor al 10 %, no se descartó ninguno de los datos obtenidos en las repeticiones, garantizando así la confiabilidad de los resultados de la eficiencia de operación de la caldera obtenidos.

4. RESULTADOS

- Eficiencia de combustión

Figura 8. Eficiencia de combustión obtenida por fecha de toma de datos



Fuente: elaboración propia (ver apéndice 5).

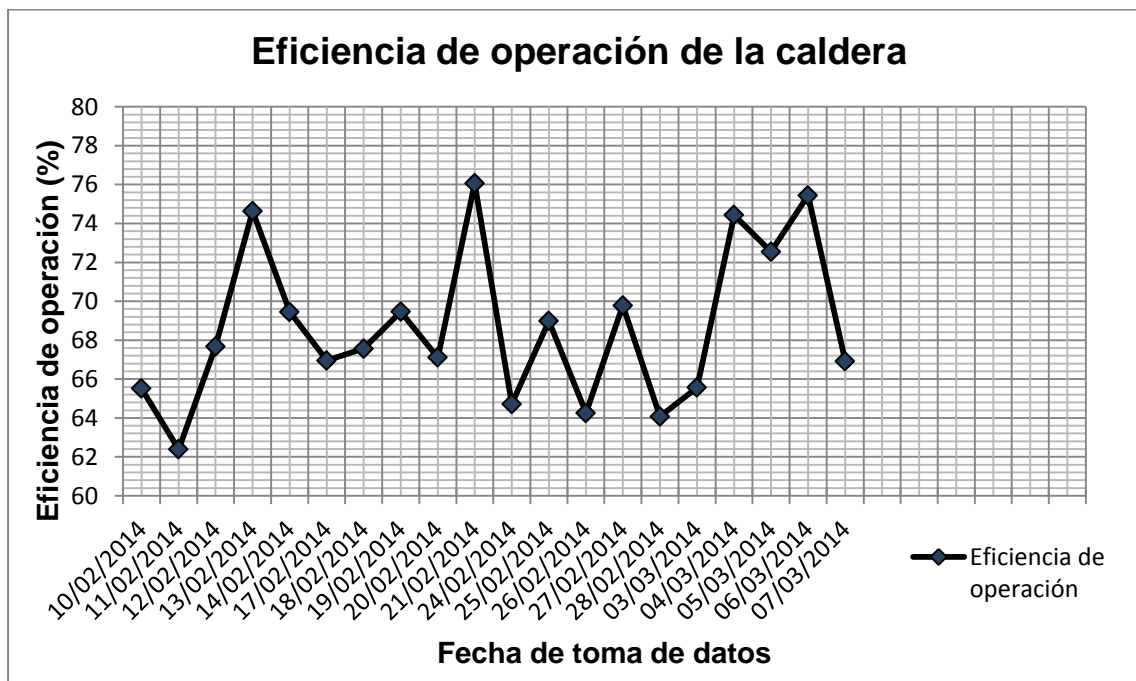
Tabla IV. **Eficiencia media de combustión**

| |
|---|
| <p>Eficiencia media de combustión ($\bar{\eta}_c$)</p> |
| <p>85,875 %</p> |

Fuente: elaboración propia (ver apéndice 5).

- Eficiencia de operación de la caldera.

Figura 9. **Eficiencia de operación obtenida por fecha de toma de datos**



Fuente: elaboración propia (ver apéndice 7).

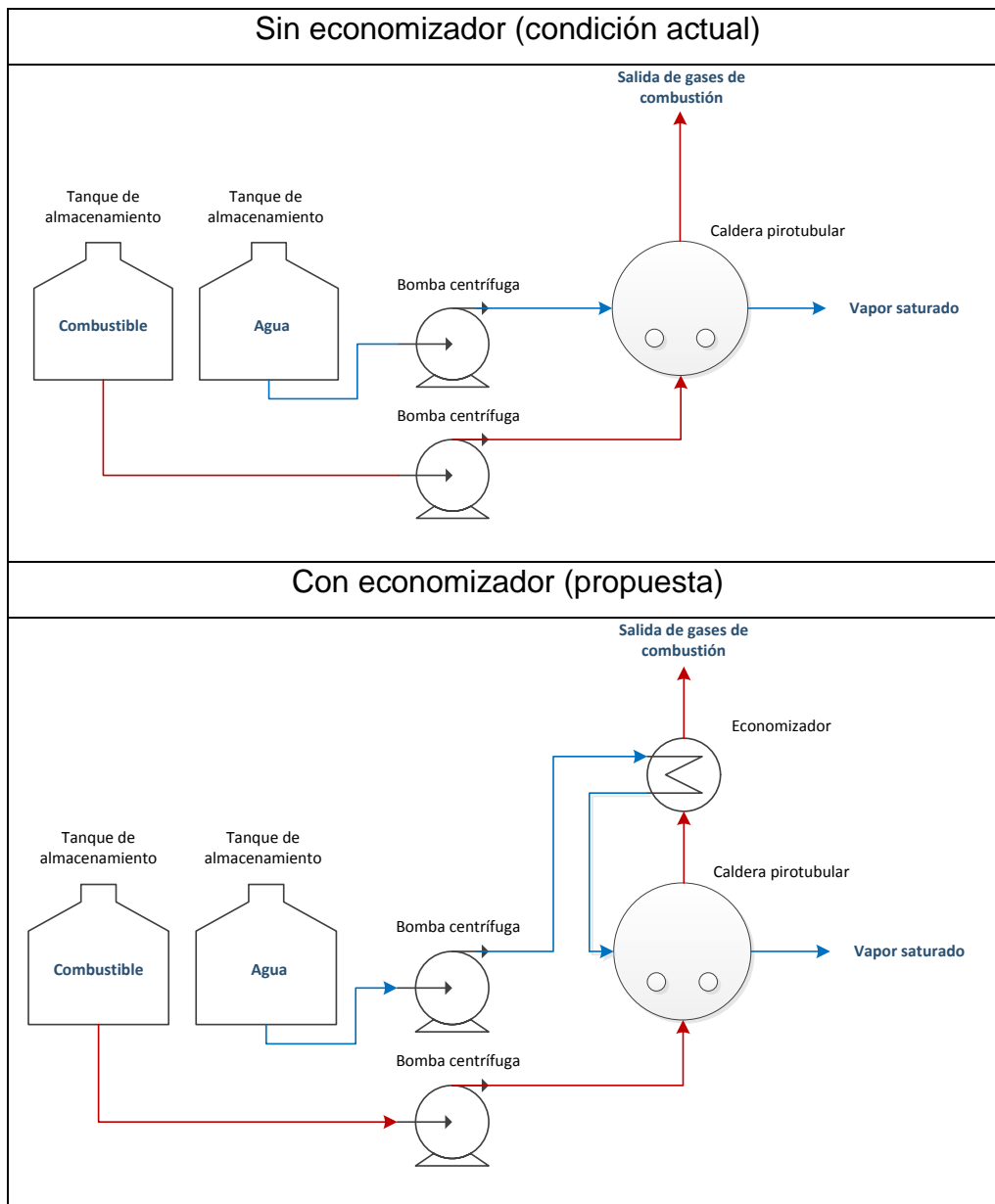
Tabla V. **Eficiencia media de operación de la caldera**

| |
|--|
| Eficiencia media de operación de la caldera ($\bar{\eta}$) |
| 68,678 % |

Fuente: elaboración propia (ver apéndice 7).

- Inclusión de un economizador como propuesta para el aumento de la eficiencia de operación

Figura 10. Representación gráfica de la inclusión del economizador



Fuente: elaboración propia.

- Aumento en la eficiencia, ahorro de combustible, beneficio energético y ahorro económico de la inclusión del economizador

Tabla VI. **Beneficios de la inclusión del economizador**

| Descripción | Valor | Unidades |
|---------------------------------------|--------------|-----------------|
| Aumento en la eficiencia de operación | 2,120 | % |
| Ahorro de combustible | 10 071,810 | kg/año |
| Beneficio energético | 406 145,729 | MJ/año |
| Ahorro económico | 62 288,808 | Q/año |

Fuente: elaboración propia (ver apéndice 8).

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Conocer la eficiencia de la caldera que se utiliza para la generación de vapor en cualquier proceso es imprescindible, debido a que otorga el requerimiento energético de la transformación, por medio de las operaciones unitarias pertinentes, de la materia, lo que a su vez representa un costo significativo en el proceso, razón principal por la que fue realizado el presente estudio.

La eficiencia de combustión, que se define como la eficacia de la caldera para convertir la energía interna contenida en el combustible (bunker) en energía calórica para ser usada en el proceso, fue obtenida mediante un equipo Bacharach y las tablas de eficiencia de combustión del bunker. La figura 8 es una gráfica de la eficiencia de combustión obtenida, por día de toma de datos, esta muestra un comportamiento prácticamente constante en el valor de la eficiencia de combustión, generando un coeficiente de variación del 0,431 % (tabla II) y un valor medio del 85,875 % (tabla IV), el cual es un valor aceptable en la industria y también a nivel operativo en la planta, debido a que se considera el hecho de que la combustión no se da al 100 %, por lo tanto queda un remanente de combustible sin reaccionar y gases de combustión con alto contenido energético; que si bien se pueden disminuir, no es beneficioso de manera significativa cuando se tiene una eficiencia de combustión mayor al 80 %. Razón por la cual la propuesta no fue basada en el mejoramiento de la combustión de la caldera.

La eficiencia de operación, definida como la capacidad de la caldera de convertir el agua de alimentación en vapor saturado, fue obtenida mediante el

balance de masa y energía en la caldera, considerando la presencia de pérdidas energéticas, debido a la radiación, purgas y otras alteraciones que se puedan presentar en el sistema, además de la suposición de que la diferencia de energía entre el agua de alimentación y el vapor saturado en la salida de la caldera, se da debido al contenido energético de la combustión. La figura 9 es una gráfica de la eficiencia de operación, obtenida mediante la ecuación generada por los estatutos antes descritos, por día de toma de datos. Esta muestra un comportamiento que varía en el rango de 62,387 % y 76,059 %, que generan un coeficiente de variación del 5,908 % (tabla III), por lo que no hubo necesidad de descartar ninguno de los datos obtenidos, garantizando así la confiabilidad de los resultados obtenidos en la eficiencia de operación de la caldera, que generan un valor medio del 68,678 % (tabla V), el cual, si bien no es un valor alarmante, negativamente hablando, tampoco es un valor óptimo para la rentabilidad del proceso que involucra la generación de vapor de la caldera.

Dado el valor de la eficiencia de combustión y la revisión de variables operativas del manejo y uso de la caldera, la propuesta se basó en la inclusión de un equipo externo que mejore el aprovechamiento de la energía perdida en los gases de combustión. El equipo más óptimo para el aprovechamiento de esa energía es el economizador, que básicamente es un intercambiador de calor que se coloca en la chimenea de una caldera, que utiliza como fluido caliente los gases de combustión (fluido comparsa) y como fluido frío el agua de alimentación a la caldera (fluido patrón). La figura 10 es una representación gráfica de la inclusión del economizador al sistema. La diferencia radica en que el sistema sin economizador direcciona el flujo de agua de alimentación directamente del tanque de almacenamiento a la caldera y el sistema con el economizador direcciona el flujo de agua de alimentación del tanque de almacenamiento al economizador (donde el calor contenido en los gases de

combustión, es transferido al agua de alimentación) y luego, como agua de alimentación precalentada, a la caldera.

Los beneficios de la inclusión de un economizador al sistema, fueron calculados mediante un balance de energía y los fundamentos basados en la experiencia de los distribuidores de estos equipos, como se especificó en la página 37.

Al realizar el análisis comparativo entre los dos enunciados, tomando en cuenta las temperaturas medias del agua de alimentación y los gases de combustión, con base en la segunda ley de la termodinámica, se tomó el porcentaje de ahorro de combustible menor y además se utilizó un factor de seguridad del 30 % para garantizar los valores de los beneficios en el proceso, lo que genera teóricamente un ahorro anual de Q. 62 288,808, que se refleja en un ahorro de combustible anual de 10 071,810 kg y provoca a su vez un aumento en la eficiencia de operación del 2,12 % (tabla VI).

Además de los beneficios antes descritos, los economizadores presentan las siguientes ventajas:

- Reducen la emisión de gases calientes a la atmósfera
- Reducen la posibilidad de que se produzca un *shock* térmico
- Liberan capacidad para producir vapor adicional para el proceso

La inclusión del economizador, no solo aumentaría la rentabilidad del proceso, si no ayudaría a aumentar la vida útil del sistema de generación de vapor, lo que lo hace una opción bastante significativa a considerar.

CONCLUSIONES

1. La eficiencia de combustión promedio obtenida mediante las tablas de eficiencia de combustión del bunker es del 85,875 %.
2. La eficiencia de combustión del sistema cumple con los estatutos industriales y operativos de la planta de fabricación de alimentos.
3. Con base en los balances de masa y energía pertinentes, la eficiencia de operación promedio obtenida es del 69,678 %.
4. Con base al análisis de eficiencias realizado, la mejor propuesta para el aumento de la eficiencia de operación de la caldera, es la inclusión de un economizador.
5. El beneficio energético, léase ahorro energético, de la inclusión de un economizador es de 406 145,729 MJ/año, que representa un ahorro de combustible de 10 071,810 kg/año y a su vez un ahorro económico de Q. 62 288,808 anuales.
6. La inclusión del economizador proyecta un aumento del 2,12 % en la eficiencia de operación de la caldera.

RECOMENDACIONES

1. Al instalar el economizador se debe regular nuevamente la alimentación de combustible a la caldera, así como el ajuste del exceso de aire, debido a las nuevas condiciones térmicas del agua de alimentación.
2. Para la instalación del economizador, la distancia entre este y el inicio de la chimenea de la caldera, debe ser la menor posible, para el mejor aprovechamiento del contenido energético de los gases de combustión.
3. Tomar mediciones diarias del contenido de dióxido de carbono con el equipo Bacharach, debido a que es el único parámetro que no se realiza a diario.
4. Realizar un estudio anual de la eficiencia de operación de la caldera, para asegurar la uniformidad de la misma y poder encontrar posibles deficiencias en el sistema.

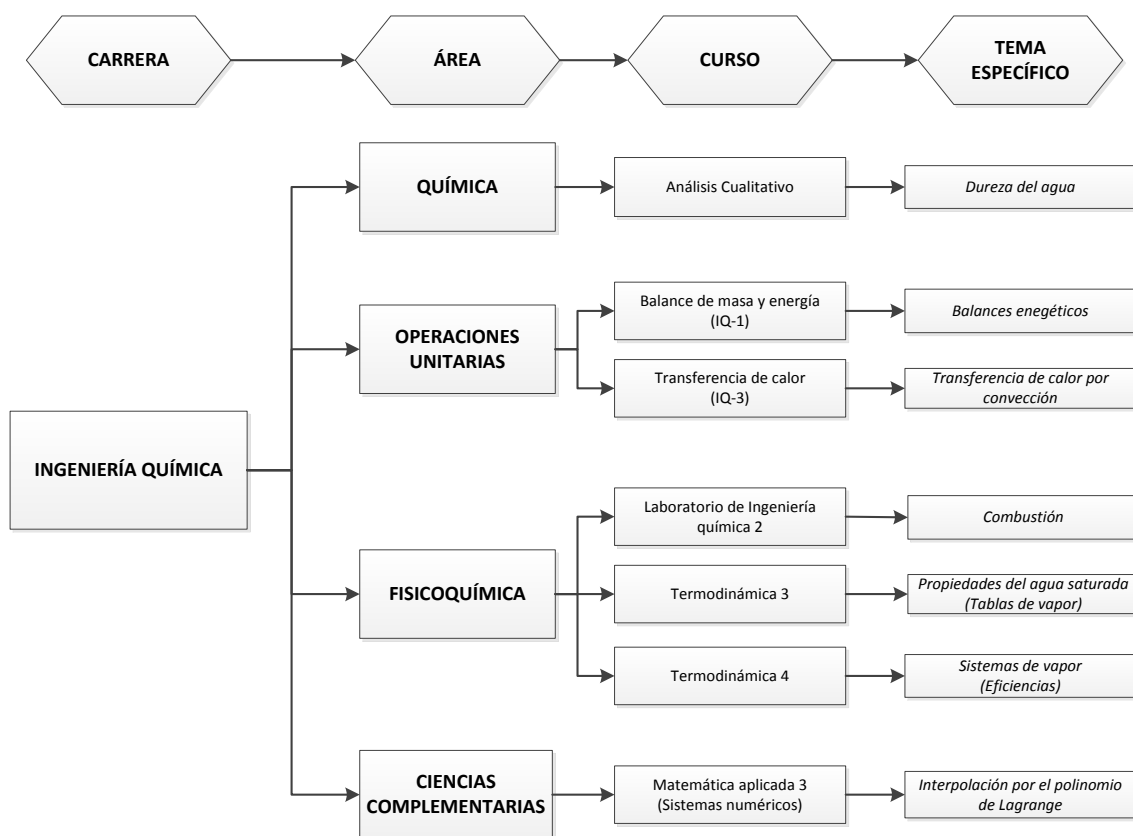
BIBLIOGRAFÍA

1. CENGEL, Yunus A. *Transferencia de calor y masa un enfoque práctico*. 3a ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2007. 854 p.
2. *Economizadores y calentadores de aire*. [en línea]. <<http://files.pfernandezdiez.es/CentralesTermicas/PDFs/19CT.pdf>> [Consulta: 14 de enero de 2015].
3. ECOPETROL. *Manual de operación de calderas*. [en línea]. <<http://www.sisman.utm.edu.ec/libros/FACULTAD%20DE%20CIENCIAS%20MATEM%C3%81TICAS%20F%C3%8DSICAS%20Y%20QU%C3%8DMICAS/INGENIER%C3%8DA%20MEC%C3%81NICA/09/Calderas/Libros/libro%20Calderas.pdf>> [Consulta: 15 de octubre de 2013].
4. FENERCOM. *Calderas industriales eficientes*. [en línea]. <<http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-basica-calderas-industriales-eficientes-fenercom-2013.pdf>> [Consulta: 15 de octubre de 2013].
5. INDUSTRIAL TIJUANA. *La verdadera economía está en la recuperación de calor*. [en línea]. <<http://www.industrialtijuana.com/pdf/ECONHOJAWEB.pdf>> [Consulta: 15 de enero de 2015].
6. McCABE, Warren L. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 4a ed. México: McGraw-Hill, 2002. 459-461 p.

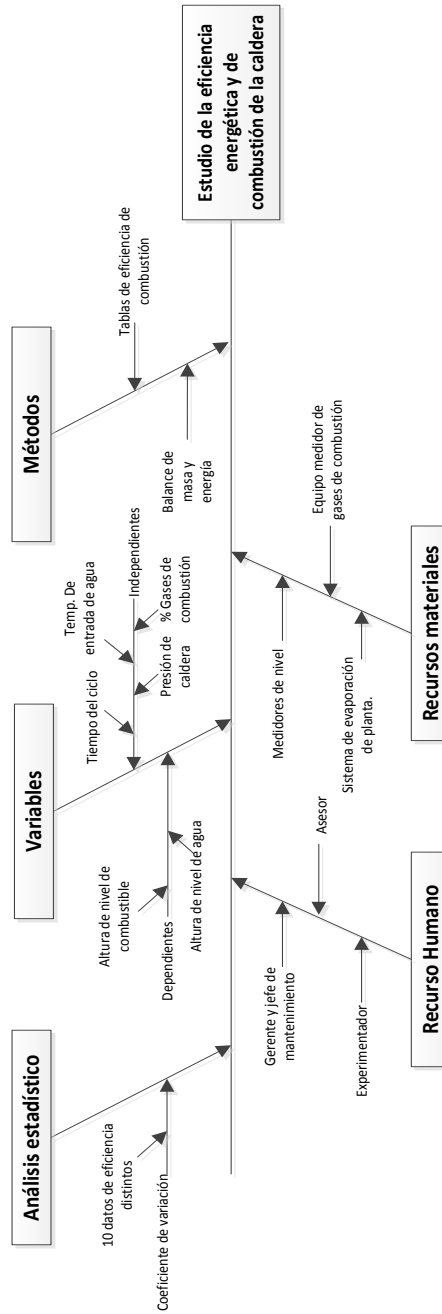
7. PERRY, Robert H. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 8a ed. New York: McGraw-Hill, 2008.
8. SANTIZO, Mario. *Principios de generación de vapor* en: actas del XXVIII Congreso Nacional de estudiantes de Ingeniería Química, Guatemala 30 de septiembre – 05 de octubre de 2013. 30–33 p.
9. SEVERNS, W.H. *Energía mediante vapor, aire o gas*. España: Reverté, 2007. 126–128 p.
10. SMITH, J.M.; VAN NESS, H.C. *Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química*. 2a ed. México: McGraw-Hill, 1989. 592–597 p.
11. *Termodinámica de equipos industriales: eficiencia energética de una caldera*. [en línea]. <http://www.tec.url.edu.gt/boletin/URL_13_QUI03.pdf> [Consulta: 15 de octubre de 2013].

APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3.

**Tabla de datos originales–eficiencia de
combustión**

| Fecha | %CO₂ | %O₂ | T_m (°C) | T_{GC} (°C) |
|--------------|------------------------|-----------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| 10/02/2014 | 13,4 | 4,7 | 18,8 | 200,0 |
| 11/02/2014 | 13,6 | 4,1 | 18,0 | 230,0 |
| 12/02/2014 | 13,4 | 3,6 | 20,0 | 200,0 |
| 13/02/2014 | 13,6 | 4,5 | 19,4 | 212,0 |
| 14/02/2014 | 12,9 | 4,8 | 19,4 | 208,0 |
| 17/02/2014 | 13,3 | 5,0 | 21,0 | 218,0 |
| 18/02/2014 | 13,6 | 4,3 | 20,1 | 201,0 |
| 19/02/2014 | 13,5 | 4,0 | 21,3 | 211,4 |
| 20/02/2014 | 13,4 | 4,8 | 21,0 | 210,0 |
| 21/02/2014 | 13,1 | 3,5 | 20,3 | 201,4 |
| 24/02/2014 | 13,8 | 3,5 | 26,3 | 211,0 |
| 25/02/2014 | 13,5 | 4,2 | 20,2 | 201,0 |
| 26/02/2014 | 13,4 | 3,6 | 19,4 | 210,0 |
| 27/02/2014 | 13,4 | 3,6 | 21,5 | 215,0 |
| 28/02/2014 | 13,9 | 4,6 | 19,5 | 205,0 |
| 03/03/2014 | 13,6 | 4,5 | 19,5 | 208,0 |
| 04/03/2014 | 13,2 | 3,5 | 20,3 | 203,0 |
| 05/03/2014 | 13,3 | 5,0 | 21,2 | 205,0 |
| 06/03/2014 | 13,6 | 3,5 | 20,0 | 200,0 |
| 07/03/2014 | 13,4 | 4,8 | 19,6 | 207,0 |

Fuente: planta de fabricación de alimentos ubicada en Chimaltenango, Guatemala.

Apéndice 4.

Tabla de datos originales–eficiencia de operación de la caldera

| Fecha | T_{EA} (°C) | $P_{Caldera}$ (psi) | t_{ciclo} (h) | V_w (m³) | V_C (gal) |
|--------------|-------------------------------------|---|---------------------------------------|---|-----------------------------------|
| 10/02/2014 | 65 | 100 | 15 | 9 | 268,08 |
| 11/02/2014 | 72 | 90 | 15 | 12 | 374,40 |
| 12/02/2014 | 48 | 90 | 16 | 12 | 358,43 |
| 13/02/2014 | 54 | 100 | 15 | 12 | 323,16 |
| 14/02/2014 | 66 | 100 | 15 | 11 | 310,90 |
| 17/02/2014 | 70 | 95 | 15 | 10 | 290,62 |
| 18/02/2014 | 75 | 100 | 14 | 7 | 197,40 |
| 19/02/2014 | 75 | 100 | 15 | 9 | 248,30 |
| 20/02/2014 | 66 | 100 | 14 | 6 | 174,88 |
| 21/02/2014 | 68 | 100 | 9 | 5 | 127,71 |
| 24/02/2014 | 60 | 90 | 15 | 9 | 273,35 |
| 25/02/2014 | 62 | 90 | 15 | 10 | 285,90 |
| 26/02/2014 | 69 | 100 | 15 | 10 | 302,34 |
| 27/02/2014 | 71 | 100 | 14 | 10 | 277,76 |
| 28/02/2014 | 73 | 100 | 14 | 10 | 299,04 |
| 03/03/2014 | 48 | 95 | 16 | 9 | 278,34 |
| 04/03/2014 | 66 | 90 | 15 | 8 | 209,38 |
| 05/03/2014 | 75 | 95 | 15 | 8 | 210,66 |
| 06/03/2014 | 66 | 100 | 16 | 7 | 180,45 |
| 07/03/2014 | 65 | 100 | 9 | 6 | 175,59 |

Fuente: planta de fabricación de alimentos ubicada en Chimaltenango, Guatemala.

Apéndice 5.

Datos calculados para la obtención de la eficiencia de combustión

| T_N (°C) | Q_{GC} (kJ/s) | η_c (%) |
|---------------------------------------|--------------------|-----------------|
| 181,2 | 100,917 | 86,2 |
| 212,0 | 154,217 | 84,9 |
| 180,0 | 126,495 | 86,2 |
| 192,6 | 126,059 | 85,7 |
| 188,6 | 122,973 | 85,5 |
| 197,0 | 115,744 | 85,4 |
| 180,9 | 79,041 | 86,3 |
| 190,1 | 96,180 | 85,8 |
| 189,0 | 72,579 | 85,8 |
| 181,1 | 81,287 | 86,0 |
| 184,7 | 101,409 | 86,4 |
| 180,8 | 113,084 | 85,5 |
| 190,6 | 117,113 | 85,8 |
| 193,5 | 116,900 | 85,6 |
| 185,5 | 120,612 | 86,2 |
| 188,5 | 99,654 | 86,0 |
| 182,7 | 79,962 | 86,0 |
| 183,8 | 80,451 | 86,0 |
| 180,0 | 63,222 | 86,3 |
| 187,4 | 112,561 | 85,9 |
| Eficiencia media de combustión | | 85,9 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6.

Conversiones realizadas para la obtención de la eficiencia de operación de la caldera

| $P_{Caldera}$ (kPa) | t_{ciclo} (s) | V_C (m ³) |
|------------------------|--------------------|----------------------------|
| 689,50 | 54 000 | 1,0148 |
| 620,55 | 54 000 | 1,4173 |
| 620,55 | 57 600 | 1,3568 |
| 689,50 | 54 000 | 1,2233 |
| 689,50 | 54 000 | 1,1769 |
| 655,03 | 54 000 | 1,1001 |
| 689,50 | 50 400 | 0,7472 |
| 689,50 | 54 000 | 0,9399 |
| 689,50 | 50 400 | 0,6620 |
| 689,50 | 32 400 | 0,4834 |
| 620,55 | 54 000 | 1,0347 |
| 620,55 | 54 000 | 1,0822 |
| 689,50 | 54 000 | 1,1445 |
| 689,50 | 50 400 | 1,0514 |
| 689,50 | 50 400 | 1,1320 |
| 655,03 | 57 600 | 1,0536 |
| 620,55 | 54 000 | 0,7926 |
| 655,03 | 54 000 | 0,7974 |
| 689,50 | 57 600 | 0,6831 |
| 689,50 | 32 400 | 0,6647 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7.

Datos calculados para la obtención de la eficiencia de operación de la caldera

| Q_w (m ³ /s) | Q_c (m ³ /s) | \dot{m}_w (kg/s) | \dot{m}_c (kg/s) | η (%) |
|--|------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| 1,667E-04 | 1,879E-05 | 0,163 | 1,786E-02 | 65,518 |
| 2,222E-04 | 2,625E-05 | 0,217 | 2,494E-02 | 62,387 |
| 2,083E-04 | 2,356E-05 | 0,206 | 2,239E-02 | 67,667 |
| 2,222E-04 | 2,265E-05 | 0,219 | 2,153E-02 | 74,634 |
| 2,037E-04 | 2,179E-05 | 0,200 | 2,071E-02 | 69,454 |
| 1,852E-04 | 2,037E-05 | 0,181 | 1,936E-02 | 66,952 |
| 1,389E-04 | 1,483E-05 | 0,135 | 1,409E-02 | 67,565 |
| 1,667E-04 | 1,741E-05 | 0,162 | 1,654E-02 | 69,465 |
| 1,190E-04 | 1,313E-05 | 0,117 | 1,248E-02 | 67,114 |
| 1,543E-04 | 1,492E-05 | 0,151 | 1,418E-02 | 76,059 |
| 1,667E-04 | 1,916E-05 | 0,164 | 1,821E-02 | 64,720 |
| 1,852E-04 | 2,004E-05 | 0,181 | 1,905E-02 | 68,987 |
| 1,852E-04 | 2,119E-05 | 0,181 | 2,014E-02 | 64,259 |
| 1,984E-04 | 2,086E-05 | 0,194 | 1,983E-02 | 69,788 |
| 1,984E-04 | 2,246E-05 | 0,194 | 2,135E-02 | 64,078 |
| 1,563E-04 | 1,829E-05 | 0,155 | 1,739E-02 | 65,565 |
| 1,481E-04 | 1,468E-05 | 0,145 | 1,395E-02 | 74,433 |
| 1,481E-04 | 1,477E-05 | 0,144 | 1,404E-02 | 72,546 |
| 1,215E-04 | 1,186E-05 | 0,119 | 1,127E-02 | 75,443 |
| 1,852E-04 | 2,051E-05 | 0,182 | 1,950E-02 | 66,919 |
| Eficiencia media de operación de la caldera | | | | 68,678 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8.


Beneficios de la inclusión del economizador

| Descripción | Valor | Unidades |
|---------------------------------------|--------------|-----------------|
| Aumento en la eficiencia de operación | 2,12 | % |
| Ahorro de combustible | 10 071,810 | kg/año |
| Beneficio energético | 406 145,729 | MJ/año |
| Ahorro económico | 62 288,808 | Q/año |

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Certificado de pruebas y datos del bunker utilizado en la planta de fabricación de alimentos



OIL TEST INTERNACIONAL


Client : AMERICAS PSAT HOUSTON / TRAFIGURA AG / UNOPETROL
Client Reference : N/A
Our Reference : OTIGT13-1297 Lab. Reference: 0925-2013
Terminal : PUERTO SAN JOSE / OTSA
Location : PUERTO SAN JOSE, GUATEMALA
Product ⁽¹⁾ : FUEL OIL
Sample Obtained by ⁽²⁾ : OTI GUATEMALA / OPERACIONES
Sample Obtained from : SHIP TANK 'S JP (17,324) 3S (17,327) 4P (2,675) 4S (2,675) COMPOSITE SAMPLE
Sample Date : BEFORE DISCHARGE MT LOBELIA
Sample Analyzed by : OTI GUATEMALA
Analysis Date : AUGUST 29, 2013

Analysis Report

Analyzed Witness ⁽²⁾

| Test | Units | Method | Specifications | Results |
|---------------------------|---------|----------|----------------|---------|
| Gravity API @60°F | Degrees | D 287 | report | 11.9 |
| Water by Distillation | Vol % | D 95 | 0.5 max | 0.1 |
| Sulphur | wt % | D 4294 | 3.0 max | 1.925 |
| Flash Point | °C | D 93 | 60 min | 65.0 |
| Kinematic Viscosity @50°C | cSt | D 445 | report | 572.7 |
| Pour Point | °C | D 97 | 24 max | 0 |
| Ash | wt % | D 482 | 0.1 max | 0.053 |
| Conrad Carbon Residue | wt % | D 189 | report | 14.8 |
| Vanadium | mg/kg | D 5863 A | 300 max | 236 |
| Asphaltenes | wt % | IP 143 | report | 11.6 |
| Heat of combustion net | MD/kg | D 4868 | 40.0 min | 40.325 |
| Sediments by extraction | wt % | D 473 | report | 0.025 |

Remarks:


JAVIER ESCOBAR
 TECNICO DE LABORATORIO

Oil Test Internacional

⁽¹⁾ Our responsibility in the witnessing of analysis is solely to witness that the analysis is conducted on the correct sample and the standard method indicated by the client. Therefore the Client agrees that Oil Test Internacional is not responsible for the condition of apparatus, instrumentation and measuring devices, and that accepts calibration data, reagents, etc., as presented.

⁽²⁾ Analysis report corresponds to the sample supplied to the laboratory by (see above "Sample Obtained by")

This Report of Analysis may not be reproduced partially without the written permission of Oil Test Internacional

Emisor: 2009-11-25
Rev: 02
PO11088

Fuente: Planta de fabricación de alimentos ubicada en Chimaltenango, Guatemala.

Anexo 2.

Tablas de eficiencia de combustión del bunker

Tabla 1 de 4

Temperatura neta (°F)

| Alre | %O ₂ | %CO ₂ | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 | 280 | 290 | 300 |
|-------|-----------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0.0 | 0.0 | 16.5 | 91.4 | 91.2 | 91.0 | 90.8 | 90.6 | 90.4 | 90.2 | 90.0 | 89.8 | 89.6 | 89.4 | 89.1 | 89.0 | 88.8 |
| 2.3 | 0.5 | 16.1 | 91.3 | 91.1 | 90.9 | 90.7 | 90.5 | 90.3 | 90.1 | 89.0 | 89.7 | 89.5 | 89.3 | 88.9 | 88.9 | 88.6 |
| 4.7 | 1.0 | 15.7 | 91.3 | 91.0 | 90.8 | 90.6 | 90.4 | 90.2 | 90.0 | 89.9 | 89.6 | 89.4 | 89.2 | 88.8 | 88.7 | 88.5 |
| 7.3 | 1.5 | 15.3 | 91.2 | 91.0 | 90.8 | 90.5 | 90.3 | 90.1 | 89.9 | 89.8 | 89.5 | 89.3 | 88.0 | 88.5 | 88.6 | 88.4 |
| 10.0 | 2.0 | 14.9 | 91.1 | 90.9 | 90.7 | 90.4 | 90.2 | 90.0 | 89.8 | 89.6 | 89.3 | 89.1 | 88.8 | 88.5 | 88.3 | 88.1 |
| 12.8 | 2.5 | 14.5 | 91.0 | 90.8 | 90.6 | 90.3 | 90.1 | 89.9 | 89.7 | 89.4 | 89.2 | 89.0 | 88.8 | 88.4 | 88.3 | 88.1 |
| 15.8 | 3.0 | 14.1 | 90.9 | 90.7 | 90.5 | 90.2 | 90.0 | 89.8 | 89.6 | 89.3 | 89.1 | 88.9 | 88.6 | 88.2 | 88.2 | 87.9 |
| 18.9 | 3.5 | 13.8 | 90.8 | 90.6 | 90.4 | 90.1 | 89.9 | 89.7 | 89.4 | 89.2 | 88.9 | 88.7 | 88.5 | 88.1 | 88.0 | 87.8 |
| 22.3 | 4.0 | 13.4 | 90.7 | 90.5 | 90.2 | 90.0 | 89.8 | 89.5 | 89.3 | 89.0 | 88.8 | 88.6 | 88.3 | 87.9 | 87.8 | 87.6 |
| 25.8 | 4.5 | 13.0 | 90.6 | 90.4 | 90.1 | 89.9 | 89.6 | 89.4 | 89.1 | 89.9 | 88.6 | 88.4 | 88.5 | 87.7 | 87.6 | 87.4 |
| 29.6 | 5.0 | 12.6 | 90.5 | 90.3 | 90.0 | 89.8 | 89.5 | 89.2 | 89.0 | 88.7 | 88.5 | 88.2 | 87.3 | 87.5 | 87.5 | 87.2 |
| 33.6 | 5.5 | 12.2 | 90.4 | 90.1 | 89.9 | 89.6 | 89.3 | 89.1 | 88.8 | 88.6 | 88.3 | 88.0 | 87.1 | 87.3 | 87.2 | 87.0 |
| 37.9 | 6.0 | 11.8 | 90.3 | 90.0 | 89.7 | 89.5 | 89.3 | 88.9 | 88.7 | 88.4 | 88.1 | 87.8 | 87.0 | 87.3 | 87.0 | 86.8 |
| 42.4 | 6.5 | 11.4 | 90.1 | 89.8 | 89.6 | 89.3 | 89.0 | 88.7 | 88.5 | 88.2 | 87.9 | 87.6 | 87.8 | 87.1 | 86.8 | 86.5 |
| 47.3 | 7.0 | 11.0 | 90.0 | 89.7 | 89.4 | 89.1 | 88.8 | 88.6 | 88.3 | 88.0 | 87.7 | 87.4 | 87.6 | 86.8 | 86.5 | 86.3 |
| 52.6 | 7.5 | 10.6 | 89.8 | 89.5 | 89.2 | 88.9 | 88.6 | 88.3 | 88.1 | 87.8 | 87.5 | 87.2 | 87.4 | 86.6 | 86.3 | 86.0 |
| 58.2 | 8.0 | 10.2 | 89.6 | 89.3 | 89.0 | 88.7 | 88.4 | 88.1 | 87.8 | 87.5 | 87.2 | 86.9 | 87.1 | 86.3 | 86.0 | 85.7 |
| 64.3 | 8.5 | 9.8 | 89.5 | 89.1 | 88.8 | 88.5 | 88.2 | 87.9 | 87.6 | 87.3 | 86.9 | 86.6 | 86.9 | 86.0 | 85.7 | 85.3 |
| 71.0 | 9.0 | 9.4 | 89.3 | 88.9 | 88.6 | 88.3 | 88.0 | 87.6 | 87.3 | 87.0 | 86.6 | 86.3 | 85.6 | 85.7 | 85.3 | 85.0 |
| 78.2 | 9.5 | 9.0 | 89.0 | 88.7 | 88.4 | 88.0 | 87.7 | 87.4 | 87.0 | 86.7 | 86.3 | 86.0 | 85.3 | 85.3 | 85.0 | 84.6 |
| 86.0 | 10.0 | 8.6 | 88.8 | 88.5 | 88.1 | 87.8 | 87.4 | 87.0 | 86.7 | 86.3 | 86.0 | 85.6 | 84.0 | 84.9 | 84.5 | 84.2 |
| 94.6 | 10.5 | 8.3 | 88.6 | 88.2 | 87.8 | 87.4 | 87.1 | 86.7 | 86.3 | 86.0 | 85.6 | 85.2 | 84.6 | 84.5 | 84.1 | 83.7 |
| 104.1 | 11.0 | 7.9 | 88.3 | 87.9 | 87.5 | 87.1 | 86.7 | 86.3 | 86.0 | 85.6 | 85.2 | 84.8 | 83.3 | 84.0 | 83.6 | 83.2 |
| 114.5 | 11.5 | 7.5 | 88.0 | 87.6 | 87.1 | 86.7 | 86.3 | 85.9 | 85.5 | 85.1 | 84.7 | 84.3 | 83.9 | 83.5 | 83.1 | 82.7 |
| 126.1 | 12.0 | 7.1 | 87.6 | 87.2 | 86.8 | 86.3 | 85.9 | 85.5 | 85.1 | 84.6 | 84.2 | 83.8 | 82.4 | 82.9 | 82.5 | 82.1 |
| 139.1 | 12.5 | 6.7 | 87.2 | 86.8 | 86.3 | 85.9 | 85.4 | 85.0 | 84.5 | 84.1 | 83.6 | 83.2 | 82.9 | 82.3 | 81.8 | 81.4 |
| 153.7 | 13.0 | 6.3 | 86.8 | 86.3 | 85.8 | 85.4 | 84.9 | 84.4 | 83.9 | 83.5 | 83.0 | 82.5 | 81.3 | 81.5 | 81.1 | 80.6 |
| 170.2 | 13.5 | 5.9 | 86.3 | 85.8 | 85.3 | 84.8 | 84.3 | 83.8 | 83.3 | 82.8 | 82.2 | 81.7 | 80.7 | 80.7 | 80.2 | 79.7 |
| 189.1 | 14.0 | 5.5 | 85.7 | 85.2 | 84.6 | 84.1 | 83.6 | 83.0 | 82.5 | 82.0 | 81.4 | 80.9 | 89.0 | 79.8 | 79.2 | 78.7 |
| 210.9 | 14.5 | 5.1 | 85.1 | 84.5 | 83.9 | 83.3 | 82.8 | 82.2 | 81.6 | 81.0 | 80.4 | 79.9 | 79.3 | 78.7 | 78.1 | 77.5 |
| 236.4 | 15.0 | 4.7 | 84.3 | 83.7 | 83.1 | 82.4 | 81.8 | 81.2 | 80.6 | 79.9 | 79.3 | 78.7 | 78.1 | 77.4 | 76.8 | 76.2 |

Tabla 2 de 4

Temperatura neta (°F)

| Aire | %O ₂ | %CO ₂ | 310 | 320 | 330 | 340 | 350 | 360 | 370 | 380 | 390 | 400 | 410 | 420 | 430 | 440 |
|-------|-----------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0.0 | 0.0 | 16.5 | 88.6 | 88.4 | 88.2 | 87.9 | 87.7 | 87.5 | 87.3 | 87.1 | 86.7 | 86.4 | 86.3 | 86.1 | 85.9 | 88.8 |
| 2.3 | 0.5 | 16.1 | 88.4 | 88.2 | 88.0 | 87.8 | 87.6 | 87.4 | 87.2 | 87.0 | 86.8 | 86.5 | 86.3 | 86.1 | 85.9 | 85.7 |
| 4.7 | 1.0 | 15.7 | 88.3 | 88.1 | 87.9 | 87.7 | 87.4 | 87.2 | 87.0 | 86.8 | 86.6 | 86.4 | 86.1 | 85.9 | 85.7 | 85.5 |
| 7.3 | 1.5 | 15.3 | 88.2 | 87.9 | 87.7 | 87.5 | 87.3 | 87.1 | 86.8 | 86.6 | 86.4 | 86.2 | 86.0 | 85.7 | 85.5 | 85.3 |
| 10.0 | 2.0 | 14.9 | 88.0 | 87.8 | 87.6 | 87.3 | 87.1 | 86.9 | 86.7 | 86.4 | 86.2 | 86.0 | 85.8 | 85.5 | 85.3 | 85.1 |
| 12.8 | 2.5 | 14.5 | 87.9 | 87.6 | 87.4 | 87.2 | 86.9 | 86.7 | 86.5 | 86.3 | 86.0 | 85.5 | 85.6 | 86.3 | 85.1 | 84.9 |
| 15.8 | 3.0 | 14.1 | 87.7 | 87.5 | 87.2 | 87.0 | 86.8 | 86.5 | 86.3 | 86.1 | 85.8 | 85.6 | 85.3 | 86.1 | 84.9 | 84.6 |
| 18.9 | 3.5 | 13.8 | 87.5 | 87.3 | 87.0 | 86.8 | 86.6 | 86.3 | 86.1 | 85.8 | 85.6 | 85.4 | 85.1 | 84.9 | 84.6 | 84.4 |
| 22.3 | 4.0 | 13.4 | 87.3 | 87.1 | 86.8 | 86.6 | 86.4 | 86.1 | 85.9 | 85.6 | 85.4 | 85.1 | 84.9 | 84.6 | 84.4 | 84.1 |
| 25.8 | 4.5 | 13.0 | 87.1 | 86.9 | 86.6 | 86.4 | 86.1 | 85.9 | 85.6 | 85.4 | 85.1 | 84.9 | 84.6 | 84.3 | 84.1 | 83.8 |
| 29.6 | 5.0 | 12.6 | 86.9 | 86.7 | 86.4 | 86.2 | 85.9 | 85.6 | 85.4 | 85.1 | 84.9 | 84.6 | 84.3 | 84.1 | 83.8 | 83.5 |
| 33.6 | 5.5 | 12.2 | 86.7 | 86.5 | 86.2 | 85.9 | 85.6 | 85.4 | 85.1 | 84.8 | 84.6 | 84.3 | 84.0 | 83.0 | 83.5 | 83.2 |
| 37.9 | 6.0 | 11.8 | 86.5 | 86.2 | 85.0 | 85.7 | 85.4 | 85.1 | 84.8 | 84.6 | 84.3 | 84.0 | 83.7 | 83.4 | 83.2 | 82.9 |
| 42.4 | 6.5 | 11.4 | 86.2 | 85.7 | 85.7 | 85.4 | 85.1 | 84.8 | 84.5 | 84.2 | 84.0 | 83.7 | 83.4 | 83.1 | 82.8 | 82.5 |
| 47.3 | 7.0 | 11.0 | 86.0 | 85.7 | 85.4 | 85.1 | 84.8 | 84.5 | 84.2 | 83.9 | 83.6 | 83.3 | 83.0 | 82.7 | 82.4 | 82.1 |
| 52.6 | 7.5 | 10.6 | 85.7 | 85.4 | 85.1 | 84.8 | 84.5 | 84.2 | 83.9 | 83.6 | 83.3 | 82.9 | 82.6 | 82.3 | 82.0 | 81.7 |
| 58.2 | 8.0 | 10.2 | 85.4 | 85.0 | 84.7 | 84.4 | 84.1 | 83.8 | 83.5 | 83.2 | 82.9 | 82.5 | 82.2 | 81.9 | 81.6 | 81.3 |
| 64.3 | 8.5 | 9.8 | 85.0 | 84.7 | 84.4 | 84.1 | 83.7 | 83.4 | 83.1 | 82.8 | 82.4 | 82.1 | 81.8 | 81.5 | 81.1 | 80.8 |
| 71.0 | 9.0 | 9.4 | 84.7 | 84.3 | 84.0 | 83.7 | 83.3 | 83.0 | 82.6 | 82.3 | 82.0 | 81.6 | 81.3 | 81.0 | 80.6 | 80.3 |
| 78.2 | 9.5 | 9.0 | 84.3 | 83.9 | 83.6 | 83.2 | 82.9 | 82.5 | 82.2 | 81.8 | 81.5 | 81.1 | 80.8 | 80.4 | 80.1 | 79.7 |
| 86.0 | 10.0 | 8.6 | 83.8 | 83.5 | 83.1 | 82.7 | 82.4 | 82.0 | 81.7 | 81.3 | 80.9 | 80.6 | 80.2 | 79.8 | 79.5 | 79.1 |
| 94.6 | 10.5 | 8.3 | 83.4 | 83.0 | 82.6 | 82.2 | 81.8 | 81.5 | 81.1 | 80.7 | 80.3 | 79.9 | 79.6 | 79.2 | 78.8 | 78.4 |
| 104.1 | 11.0 | 7.9 | 82.8 | 82.4 | 82.0 | 81.7 | 81.3 | 80.9 | 80.5 | 80.1 | 79.7 | 79.3 | 78.9 | 78.5 | 78.1 | 77.7 |
| 114.5 | 11.5 | 7.5 | 82.3 | 81.8 | 81.4 | 81.0 | 80.6 | 80.2 | 79.8 | 79.4 | 78.9 | 78.5 | 78.1 | 77.7 | 77.3 | 76.8 |
| 126.1 | 12.0 | 7.1 | 81.6 | 81.2 | 80.8 | 80.3 | 79.9 | 79.4 | 79.0 | 78.6 | 78.1 | 77.7 | 77.3 | 76.8 | 76.4 | 75.9 |
| 139.1 | 12.5 | 6.7 | 80.9 | 80.4 | 80.0 | 79.5 | 79.1 | 78.6 | 78.2 | 77.7 | 77.2 | 76.8 | 76.3 | 75.8 | 75.4 | 74.9 |
| 153.7 | 13.0 | 6.3 | 80.1 | 79.6 | 79.1 | 78.6 | 78.2 | 77.7 | 77.2 | 76.7 | 76.2 | 75.7 | 75.2 | 74.7 | 74.2 | 73.8 |
| 170.2 | 13.5 | 5.9 | 79.2 | 78.7 | 78.2 | 77.6 | 77.1 | 76.6 | 76.6 | 76.1 | 75.6 | 75.1 | 74.5 | 74.0 | 73.5 | 72.5 |
| 189.1 | 14.0 | 5.5 | 78.1 | 77.6 | 77.1 | 76.5 | 76.0 | 75.4 | 74.9 | 74.3 | 73.7 | 73.2 | 72.6 | 72.1 | 71.5 | 71.0 |
| 210.9 | 14.5 | 5.1 | 76.9 | 76.4 | 75.8 | 75.2 | 74.6 | 74.0 | 73.4 | 72.8 | 72.2 | 71.6 | 71.0 | 70.4 | 69.8 | 69.2 |
| 236.4 | 15.0 | 4.7 | 75.5 | 74.9 | 74.3 | 73.6 | 73.0 | 72.4 | 71.7 | 71.1 | 70.5 | 69.8 | 69.2 | 68.5 | 67.9 | 67.2 |

Tabla 3 de 4

| Temperatura neta (°F) | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Aire | %O ₂ | %CO ₂ | 450 | 460 | 470 | 480 | 490 | 500 | 510 | 520 | 530 | 540 | 550 | 560 | 570 | 580 |
| 0.0 | 0.0 | 16.5 | 85.7 | 85.4 | 85.0 | 84.8 | 84.6 | 84.4 | 84.2 | 83.9 | 83.7 | 83.5 | 83.3 | 83.1 | 83.1 | 82.9 |
| 2.3 | 0.5 | 16.1 | 85.5 | 85.3 | 84.8 | 84.6 | 84.4 | 84.2 | 83.9 | 83.7 | 83.5 | 83.3 | 83.1 | 82.9 | 82.9 | 82.6 |
| 4.7 | 1.0 | 15.7 | 85.3 | 85.1 | 84.6 | 84.4 | 84.2 | 83.9 | 83.7 | 83.5 | 83.3 | 83.1 | 82.8 | 82.6 | 82.6 | 82.4 |
| 7.3 | 1.5 | 15.3 | 85.1 | 84.8 | 84.4 | 84.2 | 83.9 | 83.7 | 83.5 | 83.3 | 83.0 | 82.8 | 82.6 | 82.3 | 82.3 | 82.1 |
| 10.0 | 2.0 | 14.9 | 84.8 | 84.6 | 84.2 | 83.9 | 83.7 | 83.5 | 83.2 | 83.0 | 82.8 | 82.5 | 82.3 | 82.1 | 82.1 | 81.8 |
| 12.8 | 2.5 | 14.5 | 84.6 | 84.4 | 83.9 | 83.7 | 83.4 | 83.2 | 83.0 | 82.7 | 82.5 | 82.3 | 82.0 | 81.8 | 81.8 | 81.5 |
| 15.8 | 3.0 | 14.1 | 84.4 | 84.1 | 83.7 | 83.4 | 83.2 | 82.9 | 82.7 | 82.4 | 82.2 | 82.0 | 81.7 | 81.5 | 81.5 | 81.2 |
| 18.9 | 3.5 | 13.8 | 84.1 | 83.9 | 83.4 | 83.1 | 82.9 | 82.6 | 82.4 | 82.1 | 81.9 | 81.6 | 81.4 | 81.1 | 81.1 | 80.9 |
| 22.3 | 4.0 | 13.4 | 83.9 | 83.6 | 83.1 | 82.8 | 82.6 | 82.3 | 82.1 | 81.8 | 81.6 | 81.3 | 81.1 | 80.8 | 80.8 | 80.5 |
| 25.8 | 4.5 | 13.0 | 83.6 | 83.3 | 82.8 | 82.5 | 82.3 | 82.0 | 81.7 | 81.5 | 81.2 | 81.0 | 80.7 | 80.4 | 80.4 | 80.2 |
| 29.6 | 5.0 | 12.6 | 83.3 | 83.0 | 82.5 | 82.2 | 81.9 | 81.7 | 81.4 | 81.1 | 80.9 | 80.6 | 80.3 | 80.0 | 80.0 | 79.8 |
| 33.6 | 5.5 | 12.2 | 82.9 | 82.7 | 82.1 | 81.8 | 81.6 | 81.3 | 81.0 | 80.7 | 80.5 | 80.2 | 79.9 | 79.5 | 79.6 | 79.4 |
| 37.9 | 6.0 | 11.8 | 82.6 | 82.4 | 81.8 | 81.5 | 81.2 | 80.9 | 80.6 | 80.3 | 80.0 | 79.8 | 79.5 | 79.2 | 79.2 | 78.9 |
| 42.4 | 6.5 | 11.4 | 82.2 | 82.0 | 81.4 | 81.1 | 80.8 | 80.5 | 80.2 | 79.9 | 79.6 | 79.3 | 79.0 | 78.7 | 78.7 | 78.4 |
| 47.3 | 7.0 | 11.0 | 81.8 | 81.7 | 80.9 | 80.6 | 80.3 | 80.0 | 79.7 | 79.4 | 79.1 | 78.8 | 78.5 | 78.2 | 78.2 | 77.9 |
| 52.6 | 7.5 | 10.6 | 81.4 | 81.2 | 80.5 | 80.2 | 79.9 | 79.6 | 79.2 | 78.9 | 78.6 | 78.3 | 78.0 | 77.7 | 77.7 | 77.4 |
| 58.2 | 8.0 | 10.2 | 81.0 | 80.8 | 80.0 | 79.7 | 79.4 | 79.0 | 78.7 | 78.4 | 78.1 | 77.7 | 77.4 | 77.1 | 77.1 | 76.8 |
| 64.3 | 8.5 | 9.8 | 80.5 | 80.3 | 79.5 | 79.1 | 78.8 | 78.5 | 78.1 | 77.8 | 77.5 | 77.1 | 76.8 | 76.5 | 76.5 | 76.1 |
| 71.0 | 9.0 | 9.4 | 79.9 | 79.8 | 78.9 | 78.6 | 78.2 | 77.9 | 77.5 | 77.2 | 76.8 | 76.5 | 76.1 | 75.8 | 75.8 | 75.4 |
| 78.2 | 9.5 | 9.0 | 79.4 | 79.2 | 78.3 | 77.9 | 77.5 | 77.2 | 76.8 | 76.5 | 76.1 | 75.8 | 75.4 | 75.0 | 75.0 | 74.7 |
| 86.0 | 10.0 | 8.6 | 78.7 | 78.6 | 77.6 | 77.2 | 76.9 | 76.5 | 76.1 | 75.7 | 75.4 | 75.0 | 74.6 | 74.2 | 74.2 | 73.9 |
| 94.6 | 10.5 | 8.3 | 78.0 | 78.0 | 76.9 | 76.5 | 76.1 | 75.7 | 75.3 | 74.9 | 74.5 | 74.1 | 73.7 | 73.3 | 73.3 | 72.9 |
| 104.1 | 11.0 | 7.9 | 77.3 | 77.3 | 76.0 | 75.6 | 75.2 | 74.8 | 74.4 | 74.0 | 73.6 | 73.2 | 72.8 | 72.4 | 72.4 | 72.0 |
| 114.5 | 11.5 | 7.5 | 76.4 | 76.5 | 75.1 | 74.7 | 74.3 | 73.9 | 73.4 | 73.0 | 72.6 | 72.2 | 71.7 | 71.3 | 71.3 | 70.9 |
| 126.1 | 12.0 | 7.1 | 75.5 | 75.6 | 74.1 | 73.7 | 73.3 | 72.8 | 72.4 | 71.9 | 71.5 | 71.0 | 70.6 | 70.1 | 70.1 | 69.6 |
| 139.1 | 12.5 | 6.7 | 74.4 | 74.6 | 73.0 | 72.6 | 72.1 | 71.6 | 71.1 | 70.7 | 70.2 | 69.7 | 69.2 | 68.8 | 68.8 | 68.3 |
| 153.7 | 13.0 | 6.3 | 73.3 | 73.5 | 71.8 | 71.3 | 70.8 | 70.3 | 69.8 | 69.3 | 68.8 | 68.3 | 67.8 | 67.2 | 67.3 | 66.8 |
| 170.2 | 13.5 | 5.9 | 71.9 | 72.3 | 70.3 | 69.8 | 69.3 | 68.8 | 68.2 | 67.7 | 67.2 | 66.6 | 66.1 | 65.6 | 65.6 | 65.0 |
| 189.1 | 14.0 | 5.5 | 70.4 | 80.9 | 68.7 | 68.2 | 67.6 | 67.0 | 66.5 | 65.9 | 65.3 | 64.7 | 64.2 | 63.6 | 63.6 | 63.0 |
| 210.9 | 14.5 | 5.1 | 68.6 | 67.4 | 66.8 | 66.2 | 65.6 | 65.0 | 64.4 | 63.8 | 63.2 | 62.6 | 62.0 | 61.4 | 61.4 | 60.7 |
| 236.4 | 15.0 | 4.7 | 66.6 | 65.3 | 64.6 | 64.0 | 63.3 | 62.7 | 62.0 | 61.4 | 60.7 | 60.1 | 59.4 | 68.7 | 58.7 | 58.1 |

Tabla 4 de 4

Temperatura neta (°F)

| Aire | % O ₂ | %CO ₂ | 590 | 600 | 610 | 620 | 630 | 640 | 650 | 660 | 670 | 680 | 690 | 700 | 710 | 720 |
|-------|------------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0.0 | 0.0 | 16.5 | 82.7 | 82.4 | 82.2 | 82.0 | 81.8 | 81.6 | 81.3 | 81.1 | 80.9 | 80.7 | 80.5 | 80.2 | 80.0 | 79.8 |
| 2.3 | 0.5 | 16.1 | 82.4 | 82.2 | 82.0 | 81.7 | 81.5 | 81.3 | 81.1 | 80.8 | 80.6 | 80.4 | 80.2 | 79.9 | 79.7 | 79.5 |
| 4.7 | 1.0 | 15.7 | 82.1 | 81.9 | 81.7 | 81.5 | 81.2 | 81.0 | 80.8 | 80.6 | 80.3 | 80.1 | 79.9 | 79.6 | 79.4 | 79.2 |
| 7.3 | 1.5 | 15.3 | 81.9 | 81.6 | 81.4 | 81.2 | 81.0 | 80.7 | 80.5 | 80.3 | 80.0 | 79.8 | 79.5 | 79.3 | 79.1 | 78.8 |
| 10.0 | 2.0 | 14.9 | 81.6 | 81.4 | 81.1 | 80.9 | 80.6 | 80.4 | 80.2 | 79.9 | 79.7 | 79.5 | 79.2 | 79.0 | 78.7 | 78.5 |
| 12.8 | 2.5 | 14.5 | 81.3 | 81.0 | 80.8 | 80.6 | 80.3 | 80.1 | 79.8 | 79.6 | 79.3 | 79.1 | 78.9 | 78.6 | 78.4 | 78.1 |
| 15.8 | 3.0 | 14.1 | 81.0 | 80.7 | 80.5 | 80.2 | 80.0 | 79.7 | 79.5 | 79.2 | 79.0 | 78.7 | 78.5 | 78.2 | 78.0 | 77.7 |
| 18.9 | 3.5 | 13.8 | 80.6 | 80.4 | 80.1 | 79.9 | 79.6 | 79.4 | 79.1 | 78.9 | 78.6 | 78.3 | 78.1 | 77.8 | 77.6 | 77.3 |
| 22.3 | 4.0 | 13.4 | 80.3 | 80.0 | 79.8 | 79.5 | 79.2 | 79.0 | 78.8 | 78.5 | 78.2 | 77.9 | 77.7 | 77.4 | 77.1 | 76.9 |
| 25.8 | 4.5 | 13.0 | 79.9 | 79.6 | 79.4 | 79.1 | 78.8 | 78.6 | 78.3 | 78.0 | 77.8 | 77.5 | 77.2 | 76.9 | 76.7 | 76.4 |
| 29.6 | 5.0 | 12.6 | 79.5 | 79.2 | 79.0 | 78.7 | 78.4 | 78.1 | 77.9 | 77.6 | 77.3 | 77.0 | 76.7 | 76.5 | 76.2 | 75.9 |
| 33.6 | 5.5 | 12.2 | 79.1 | 78.8 | 78.5 | 78.2 | 77.9 | 77.7 | 77.4 | 77.1 | 76.8 | 76.5 | 76.2 | 76.0 | 75.7 | 75.4 |
| 37.9 | 6.0 | 11.8 | 78.6 | 78.3 | 78.0 | 77.7 | 77.5 | 77.2 | 76.9 | 76.6 | 76.3 | 76.0 | 75.7 | 75.4 | 75.1 | 74.8 |
| 42.4 | 6.5 | 11.4 | 78.1 | 77.8 | 77.5 | 77.2 | 76.9 | 76.6 | 76.3 | 76.0 | 75.7 | 75.4 | 75.1 | 74.8 | 74.5 | 74.2 |
| 47.3 | 7.0 | 11.0 | 77.6 | 77.3 | 77.0 | 76.7 | 76.4 | 76.1 | 75.8 | 75.4 | 75.1 | 74.8 | 74.5 | 74.2 | 73.9 | 73.6 |
| 52.6 | 7.5 | 10.6 | 77.0 | 76.7 | 76.4 | 76.1 | 75.8 | 75.5 | 75.1 | 74.8 | 74.5 | 74.2 | 73.9 | 73.5 | 73.2 | 72.9 |
| 58.2 | 8.0 | 10.2 | 76.4 | 76.1 | 75.8 | 75.5 | 75.1 | 74.8 | 74.5 | 74.1 | 73.8 | 73.5 | 73.1 | 72.8 | 72.5 | 72.1 |
| 64.3 | 8.5 | 9.8 | 75.8 | 75.4 | 75.1 | 74.8 | 74.4 | 74.1 | 73.7 | 73.4 | 73.1 | 72.7 | 72.4 | 72.0 | 71.7 | 71.3 |
| 71.0 | 9.0 | 9.4 | 75.1 | 74.7 | 74.4 | 74.0 | 73.7 | 73.3 | 73.0 | 72.6 | 72.3 | 71.9 | 71.5 | 71.2 | 70.8 | 70.5 |
| 78.2 | 9.5 | 9.0 | 74.3 | 73.9 | 73.6 | 73.2 | 72.8 | 72.5 | 72.1 | 71.7 | 71.4 | 71.0 | 70.6 | 70.3 | 69.9 | 69.5 |
| 86.0 | 10.0 | 8.6 | 73.5 | 73.1 | 72.7 | 72.3 | 72.0 | 71.6 | 71.2 | 70.8 | 70.4 | 70.0 | 69.6 | 69.3 | 68.9 | 68.5 |
| 94.6 | 10.5 | 8.3 | 72.6 | 72.2 | 71.7 | 71.4 | 71.0 | 70.6 | 70.2 | 79.8 | 69.4 | 69.0 | 68.6 | 68.2 | 67.8 | 67.4 |
| 104.1 | 11.0 | 7.9 | 71.5 | 71.1 | 70.7 | 70.3 | 69.9 | 69.5 | 69.1 | 68.6 | 68.2 | 67.8 | 67.4 | 67.0 | 66.5 | 66.1 |
| 114.5 | 11.5 | 7.5 | 70.4 | 70.0 | 69.6 | 69.1 | 68.7 | 68.3 | 67.8 | 67.4 | 66.9 | 66.5 | 66.1 | 65.6 | 65.2 | 64.7 |
| 126.1 | 12.0 | 7.1 | 69.2 | 68.7 | 68.3 | 67.8 | 67.4 | 66.9 | 66.4 | 66.0 | 65.5 | 65.1 | 64.6 | 64.1 | 63.7 | 63.2 |
| 139.1 | 12.5 | 6.7 | 67.8 | 67.3 | 66.8 | 66.4 | 65.9 | 65.4 | 64.9 | 64.4 | 63.9 | 63.5 | 63.0 | 62.5 | 62.0 | 61.5 |
| 153.7 | 13.0 | 6.3 | 66.2 | 65.7 | 65.2 | 64.7 | 64.2 | 63.7 | 63.2 | 62.7 | 62.2 | 61.6 | 61.1 | 60.6 | 60.1 | 59.6 |
| 170.2 | 13.5 | 5.9 | 64.5 | 63.9 | 63.4 | 62.9 | 62.3 | 61.8 | 61.2 | 60.7 | 60.1 | 59.6 | 59.1 | 58.5 | 58.0 | 57.4 |
| 189.1 | 14.0 | 5.5 | 62.5 | 61.9 | 61.3 | 60.7 | 60.2 | 59.6 | 59.0 | 58.4 | 57.8 | 57.3 | 56.7 | 56.1 | 55.5 | 54.9 |
| 210.9 | 14.5 | 5.1 | 60.1 | 59.5 | 58.9 | 58.3 | 57.7 | 57.0 | 56.4 | 55.8 | 55.2 | 54.6 | 53.9 | 53.3 | 52.7 | 52.1 |
| 236.4 | 15.0 | 4.7 | 57.4 | 56.8 | 56.1 | 55.4 | 54.8 | 54.1 | 53.4 | 52.8 | 52.1 | 51.4 | 50.7 | 50.1 | 49.4 | 48.7 |

Fuente: SANTIZO, Mario. "Principios de generación de vapor". En: Actas del XXVIII Congreso nacional de estudiantes de ingeniería química, (Guatemala 30 de septiembre – 05 de octubre de 2013). 30-33 p.

Anexo 3.

**Datos bibliográficos para la obtención de la eficiencia
de operación de la caldera**

| ρ_w (kg/m ³) | ρ_c (kg/m ³) | H_v (kJ/kg) | H_w (kJ/kg) | PC (kJ/kg) |
|----------------------------------|----------------------------------|------------------|------------------|-----------------|
| 980,40 | 950,417 | 2761,35 | 272,0 | 40 325 |
| 976,38 | 950,417 | 2756,88 | 301,4 | 40 325 |
| 988,89 | 950,417 | 2756,88 | 200,9 | 40 325 |
| 985,64 | 950,417 | 2761,35 | 226,0 | 40 325 |
| 979,80 | 950,417 | 2761,35 | 276,2 | 40 325 |
| 977,50 | 950,417 | 2759,22 | 293,0 | 40 325 |
| 974,70 | 950,417 | 2761,35 | 313,9 | 40 325 |
| 974,70 | 950,417 | 2761,35 | 313,9 | 40 325 |
| 979,80 | 950,417 | 2761,35 | 276,2 | 40 325 |
| 978,64 | 950,417 | 2761,35 | 284,6 | 40 325 |
| 983,30 | 950,417 | 2756,88 | 251,1 | 40 325 |
| 979,63 | 950,417 | 2756,88 | 259,5 | 40 325 |
| 978,08 | 950,417 | 2761,35 | 288,8 | 40 325 |
| 976,92 | 950,417 | 2761,35 | 297,2 | 40 325 |
| 975,76 | 950,417 | 2761,35 | 305,5 | 40 325 |
| 988,89 | 950,417 | 2759,22 | 200,9 | 40 325 |
| 979,80 | 950,417 | 2756,88 | 276,2 | 40 325 |
| 974,70 | 950,417 | 2759,22 | 313,9 | 40 325 |
| 979,80 | 950,417 | 2761,35 | 276,2 | 40 325 |
| 980,40 | 950,417 | 2761,35 | 272,0 | 40 325 |

Fuente: SMITH, J.M.; VAN NESS, H.C. *Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química*.
592–597 p.