



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

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA MEJORA EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA CALDERA DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

Stefanie María Montenegro Quiñonez

Asesorado por la MSc. Inga. Ingrid Lorena Benítez Pacheco

Guatemala, marzo de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA MEJORA EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA CALDERA DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

STEFANIE MARÍA MONTENEGRO QUIÑONEZ

ASESORADO POR LA MSC. INGA. INGRID LORENA BENÍTEZ PACHECO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, MARZO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|----------------------------------------|
| DECANO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| VOCAL I | Ing. Angel Roberto Sic García |
| VOCAL II | Ing. Pablo Christian de León Rodríguez |
| VOCAL III | Ing. José Milton de León Bran |
| VOCAL IV | Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez |
| VOCAL V | Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|-------------------------------------|
| DECANO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| EXAMINADOR | Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio |
| EXAMINADOR | Ing. César Ariel Villela Rodas |
| EXAMINADOR | Ing. Jorge Mario Estrada Asturias |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA MEJORA EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA CALDERA DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela Estudios de Postgrado, con fecha 7 de febrero de 2017.



Stefanie María Montenegro Quiñonez



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala



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

ADSE-MEAPP-002-2017

Guatemala, 07 de febrero de 2017.

Director
Carlos Salvador Wong
Escuela de **Ingeniería Química**
Presente.


Estimado Director:

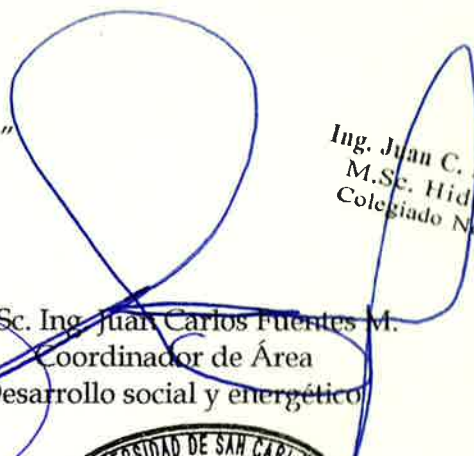
Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del (la) estudiante **Stefanie María Montenegro Quiñonez** carné número **2010-20190**, quien opto la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la **Maestría en Energía y Ambiente**.

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

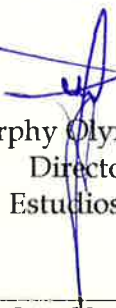
Sin otro particular, atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


MSc. Licda. Ingrid Lorena Benitez Pacheco
Licda. Ingrid Lorena Benitez Pacheco
Asesor (a)
Química
Maestría Ciencia y Tecnología
del Medio Ambiente
Colegiado No. 1974


MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes M.
Coordinador de Área
Desarrollo social y energético

Ing. Juan C. Fuentes M.
M.Sc. Hidrología
Colegiado No. 2,504


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



Cc: archivo
/la



Ref.EIQ.TG.013.2017

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el informe de la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la estudiante, **STEFANIE MARÍA MONTENEGRO QUIÑONEZ**, ha optado por la modalidad de estudios de postgrado para el proceso de graduación de pregrado, que para ello el estudiante ha llenado los requisitos establecidos en el normativo respectivo y luego de conocer el dictamen de los miembros del tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el **Informe del Diseño de Investigación del Programa de Maestría en ENERGÍA Y AMBIENTE** titulado **"DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA MEJORA EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA CALDERA DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN"**. Procede a **VALIDAR** el referido informe, ya que reúne la coherencia metodológica requerida por la Escuela.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Dav
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, marzo de 2017

Cc: Archivo
CSWD/ale

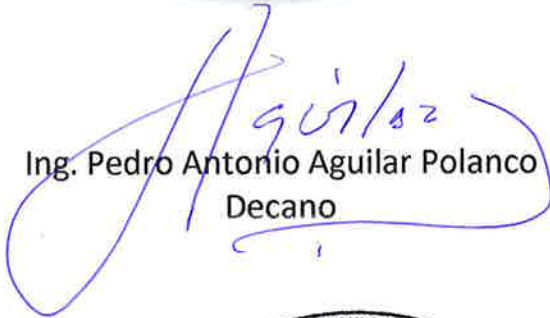




DTG. 153.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA MEJORA EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA CALDERA DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN**, presentado por el estudiante universitario: **Stefanie María Montenegro Quiñonez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, marzo de 2017

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser la base de mi vida y no permitir que me aleje de Él, por ser mí guía, mi serenidad, mi fuerza y mi paz.
- Mis padres** Luis Alberto Montenegro y Dora Leticia Quiñonez, por brindarme las herramientas para salir adelante, por su esfuerzo y por no permitir que nos faltase el pan de cada día y el amor.
- Mi mamá** Dora Leticia Quiñonez, por ser mi apoyo incondicional, por inculcarme valores y enseñarme a crecer, por ser ejemplo de fuerza, perseverancia y amor. Por ser mi mayor orgullo y mí ejemplo a seguir.
- Mis hermanos** Carlos Alberto y Luis Aníbal Montenegro, por ser ejemplo en mi vida de triunfo y admiración, por sus enseñanzas y apoyo. Por cuidarme y velar por mí.
- Mis sobrinos** Santiago Andrés, Matilde Abigail y Sebastián Adré Montenegro, por ser luz en mi vida.

Mi mejor amiga

María José Ponce, por ser como una hermana para mí, por su amistad y por ser mi compañera incondicional.

Mi novio

Alan Vásquez Dardón, por su amor sincero, por todo su apoyo, por ser mi amigo, compañero, mi amor y una bendición en mi vida.

Mis primos

Jennifer, Josseline, Pablo y Javier Pineda, Carlos y Javier Montenegro. Por ser como mis hermanos, por su apoyo, amor y amistad incondicional.

Mis amigos

Sandra Ayala, Sofía Motta, Berny Yach, Danilo Ajcip, Edy Boanerges, Irwin Palomo, Diego Salazar, Héctor Mendoza, por todos los momentos compartidos, por su amistad y apoyo.

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Universidad de San Carlos de Guatemala | Por ser mi <i>alma mater</i> que me brindó los conocimientos universales para el ejercicio profesional. |
| Facultad de Ingeniería | Por las herramientas, principios y conocimientos necesarios para desarrollarme como profesional. |
| Ing. Jorge Godínez Lemus | Por su apoyo y orientación en el desarrollo de este trabajo. |

ÍNDICE GENERAL

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | V |
| LISTA DE SÍMBOLOS | VII |
| GLOSARIO | XI |
| RESUMEN..... | XV |
| INTRODUCCIÓN | XVII |
| 1. ANTECEDENTES | 1 |
| 2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA | 5 |
| 3. JUSTIFICACIÓN | 7 |
| 4. OBJETIVOS | 9 |
| 5. ESQUEMA DE SOLUCIÓN..... | 11 |
| 6. MARCO TEÓRICO..... | 13 |
| 6.1. Calderas de vapor | 13 |
| 6.1.1. Clasificación de las calderas acorde la disposición de los fluidos | 14 |
| 6.1.1.1. Calderas acuotubulares..... | 15 |
| 6.1.1.2. Calderas pirotubulares..... | 16 |
| 6.1.1.2.1. Diseño de calderas pirotubulares..... | 16 |
| 6.1.1.2.2. Diseño térmico..... | 18 |
| 6.2. Economizadores..... | 19 |
| 6.2.1. Recuperación del calor de los gases de combustión | 19 |
| 6.2.1.1. Inyección de aire caliente en la caldera..... | 20 |
| 6.3. Termodinámica..... | 20 |
| 6.3.1. Primera Ley de la Termodinámica | 20 |
| 6.3.2. Segunda Ley de la Termodinámica | 21 |

| | | |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.3.2.1. | Entropía..... | 23 |
| 6.3.2.2. | Exergía..... | 24 |
| 6.3.2.2.1. | Eficiencia exergética | 25 |
| 6.3.2.2.2. | Eficiencia exergética en calderas..... | 26 |
| 6.3.2.2.3. | Método de Análisis Exergético | 27 |
| 6.4. | Medición de parámetros energéticos | 29 |
| 6.4.1. | Instrumentos de medición | 30 |
| 6.4.1.1. | Manómetros | 30 |
| 6.4.1.2. | Termómetros..... | 30 |
| 6.4.1.3. | Control de presión de vapor, Presuretrol..... | 30 |
| 6.5. | Dimensionamiento del área de caldera | 31 |
| 6.5.1. | Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química, USAC | 31 |
| 6.6. | Impacto ambiental de los gases de combustión..... | 31 |
| 6.6.1. | Acciones correctoras..... | 33 |
| 7. | HIPÓTESIS..... | 35 |
| 8. | ÍNDICE PROPUESTO | 37 |
| 9. | METODOLOGÍA | 39 |
| 9.1. | Tipo de estudio..... | 39 |
| 9.2. | Fases del estudio | 39 |
| 9.2.1. | Fase 1: Exploración bibliográfica | 39 |
| 9.2.2. | Fase 2: Recolección de datos | 40 |
| 9.2.2.1. | Definición del ambiente del sistema | 40 |
| 9.2.2.2. | Idealizaciones necesarias para la construcción de un modelo manejable..... | 40 |
| 9.2.2.3. | Análisis de acuerdo con la primera y segunda ley de la termodinámica..... | 41 |

| | | |
|----------|----------------------------------------------|----|
| 9.2.2.4. | Eficiencia Exergética | 45 |
| 9.2.3. | Fase 3: Análisis de datos..... | 47 |
| 9.2.4. | Fase 4: Propuesta de método y usos | 49 |
| 10. | TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN | 51 |
| 11. | CRONOGRAMA..... | 53 |
| 12. | RECURSOS Y FACTIBILIDAD | 55 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 57 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. | | |
| 1. | Esquema de una caldera elemental de vapor | 13 |
| 2. | Detalle de caldera acuotubular..... | 15 |
| 3. | Componentes de una caldera pirotubular de 4 pasos | 17 |
| 4. | Transferencia de exergía asociada a una transferencia de trabajo | 25 |
| 5. | Proceso de intercambio de calor en la caldera..... | 41 |
| 6. | Proceso de combustión en la caldera | 43 |
| 7. | Mecanismo de transferencia de calor entre dos fluidos | 59 |
| 8. | Economizador en paralelo con la caldera..... | 50 |
| 9. | Propuesta de funcionamiento..... | 50 |
| 10. | Cronograma de ejecución de la investigación | 53 |

TABLAS

| | | |
|------|--------------------------------------------------------------------|----|
| I. | Especificaciones técnicas de la caldera marca HURST, de 30Hp | 47 |
| II. | Temperatura de los gases de combustión de chimenea | 49 |
| III. | Recursos necesarios para la investigación..... | 55 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $Z_{\alpha/2}$ | Área bajo la curva con un nivel de confianza del 95% |
| bar | Bares |
| HP | caballo de fuerza |
| bhp | Caballos de fuerza de frenado |
| Q | Caudal |
| <i>Cred</i> | Créditos de energía (calor sensible del aire de combustión, del agua de alimentación y el combustible) |
| CO2 | Dióxido de carbono |
| ε | Eficiencia exergética |
| $\dot{E}1$ | Eficiencia final |
| $\dot{E}2$ | Eficiencia inicial |
| <i>n</i> | Eficiencia térmica de la caldera |
| H_A | Entalpía específica del agua de alimentación |
| h_1 | Entalpía específica del fluido a la entrada del sistema |
| h_2 | Entalpía específica del fluido a la salida del sistema |
| H_v | Entalpía específica del vapor producido |
| <i>E</i> | Error máximo |
| <i>e</i> | Exergía de flujo específico |
| $\dot{E}Q$ | Exergía de los gases de combustión |
| Ep | Exergía del producto |
| Er | Exergía del recurso |

| | |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------|
| \dot{Q} | Flujo de calor |
| $\dot{Q}_{gas atm}$ | Flujo de calor de los gases de combustión a presión atmosférica |
| \dot{E}_{aire} | Flujo exergético específico del aire |
| \dot{E}_{comb} | Flujo exergético específico del combustible |
| \dot{E} | Flujo exergético específico total |
| \dot{E}_{pc} | Flujo exergético específico total en el proceso de combustión |
| \dot{m}_1 | Flujo másico de entrada del fluido de trabajo |
| \dot{m}_2 | Flujo másico de salida del fluido de trabajo |
| C | Flujo másico del combustible quemado |
| V | Flujo másico del vapor producido |
| $^{\circ}C$ | Grados Celsius |
| $J/^{\circ}C$ | Julio por grado Celsius |
| K | Kelvin |
| KJ/mol | Kelvin y Julio por mol |
| kW | Kilo vatio |
| Kg/s | Kilogramo por segundo |
| $psig$ | Libras del manómetro por pulgada cuadrada |
| Lb/h | Libra por hora |
| CO | Monóxido de carbono |
| N | Número de corridas |
| Pa | Pascal |
| PCI | Poder calorífico inferior del combustible quemado |
| $\%$ | Porcentaje |
| p | Probabilidad de éxito |
| q | Probabilidad de fracaso |

| | |
|----------------------|--------------------------------------------------------------|
| T_0 | Temperatura a la entrada del sistema |
| T_c | Temperatura a la salida del sistema |
| $T_{\text{gas atm}}$ | Temperatura de los gases de combustión a presión atmosférica |

GLOSARIO

| | |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Balance de energía | Aplicación de la primera ley de la termodinámica: “La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma”. |
| Balance de masa | Aplicación de la ley de conservación de la masa: “La materia no se crea ni se destruye, solo se transforma”. |
| Cogeneración | Producción simultánea de calor útil y electricidad a partir de un mismo combustible o fuente de energía primaria. |
| Combustible | También llamados oxidantes, son un tipo de sustancias que provocan o favorecen la inflamación de combustibles. |
| 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. |
| Energía Interna | Variable termodinámica que representa el contenido energético a nivel molecular. |
| Entalpía | Variable termodinámica que expresa la cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno. |
| Entropía | Medida de la degradación del potencial energético. |
| Estado muerto | Punto de referencia utilizado en el análisis exergético, en el cual no se atribuye la energía proporcionada por el ambiente. |
| Exergía | Variable termodinámica que permite determinar el potencial de trabajo útil de una cantidad de energía que se puede obtener por la interacción espontánea entre un sistema y su entorno. |
| Flujo másico | Velocidad a la que la masa de una sustancia pasa a través de una superficie dada, magnitud que expresa la variación de la masa en el tiempo. |
| Gases de efecto invernadero | Gases de la atmósfera que provocan la acumulación del calor entre la atmósfera y la litósfera, evitando su normal escape al espacio exterior. |
| Operaciones | Estudios sistemáticos de las etapas de un proceso |

| | |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Unitarias | de transformación de materia donde existe un intercambio de energía. |
| Proceso adiabático | Proceso en que un sistema no pierde ni gana calor. |
| Temperatura adiabática | Temperatura sin pérdida de calor hacia el entorno. |
| Toberas | Dispositivo diseñado para transformar entalpía en energía cinética. |
| Turbina | Son máquinas que desarrollan par y potencia en el eje como resultado de la variación de la cantidad de movimiento del fluido que pasa a través de ellas. |
| Válvula de admisión de aire | Válvula de tipo mariposa que regula la entrada de aire a la caldera. |
| Variables intensivas | VARIABLES que no dependen de la cantidad de materia del sistema, cuyo valor permanece inalterable al subdividir el sistema inicial en varios subsistemas. |

RESUMEN

El presente diseño de investigación representa un análisis exergético del sistema de generación de vapor de la caldera del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Tiene como finalidad proponer un diseño de operación de la caldera que incremente su eficiencia energética y disminuya el costo de combustible utilizado para su funcionamiento.

Se propone un análisis exergético para el aprovechamiento del calor emanado de los gases de combustión de chimenea, para la recirculación de aire caliente a la válvula de admisión de aire de la caldera. 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.

Se propone la inclusión de un economizador en la chimenea para el aprovechamiento del calor emitido por los gases de combustión, el cual se utilizará para el calentamiento del aire que entra en la válvula de admisión de aire de la caldera. Esto incrementa la eficiencia energética de la caldera y disminuye los costos del combustible utilizado para su funcionamiento.

INTRODUCCIÓN

El diseño de operación de las calderas de vapor utilizadas para el funcionamiento de diferentes industrias, laboratorios y plantas piloto, representa un indicador de la eficiencia que estas pueden presentar. Dado que los diseños de operación que no implementan economizadores de energía en las calderas, representan un aumento de costos energéticos y aportes al calentamiento global dado por la combustión de los gases de chimenea, en la actualidad, se han innovado diferentes métodos para la implementación de dichos economizadores.

Existen diferentes métodos para incrementar la eficiencia energética de las calderas de vapor por medio de economizadores de energía, dentro de los cuales se encuentra el aprovechamiento del calor de los gases de chimenea producidos en la combustión para precalentar el aire que entra en la válvula de la caldera. Dentro de los métodos utilizados para evaluar la eficiencia térmica de la caldera se encuentra el análisis exergético el cual representa una técnica relativamente nueva que se basa en el concepto de exergía, como el potencial de producir trabajo útil que poseen diferentes formas de energía en relación con un ambiente determinado.

El análisis exergético permitirá evaluar el incremento en la eficiencia energética de la caldera que se obtendrá mediante la implementación de un economizador que permitirá precalentar el aire que entrará a la válvula de admisión de aire de la caldera. Esto disminuirá las emisiones de gases de efecto invernadero y los costos, tanto energéticos como en el consumo de combustible utilizado para el funcionamiento de la caldera.

El estudio consiste en proponer un diseño de operación para el aprovechamiento del calor de los gases de combustión de chimenea, en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de San Carlos de Guatemala, para precalentar el aire que entrará a la válvula de admisión de aire de la caldera. La eficiencia será evaluada mediante un análisis exergético que permitirá determinar, a través de balances de masa y energía, la eficiencia energética de la caldera con la implementación de un economizador de energía.

En el capítulo 1 se presentarán las bases teóricas del método de análisis exergético y sus principales preceptos. En el capítulo 2 se obtendrán los datos de consumos de energía y diseño de operación de la caldera y los datos correspondientes al uso de la energía antes de la implementación del economizador y los datos posteriores a su implementación.

En el capítulo 3 se hará un análisis comparativo de los datos y se propondrá un diseño para el aprovechamiento del calor de los gases de combustión para la inyección de aire caliente en la válvula de admisión de aire de la caldera. Se propondrá un análisis exergético para utilizar como base en estudios de eficiencia de energía calorífica en calderas de vapor.

En el capítulo 4 se discutirá acerca del método exergético implementado y la propuesta de diseño. Finalmente, se presentarán las conclusiones obtenidas del estudio y recomendaciones pertinentes para la continuidad del mismo.

1. ANTECEDENTES

En Guatemala no se encontraron estudios publicados relacionados con el aprovechamiento de los gases de combustión de chimenea para la inyección de aire caliente en calderas pirotubulares; sin embargo, se presentan estudios similares en la implementación de sistemas de recuperación de calor y análisis exergéticos en ciclos de potencia. A continuación, se presentan algunos casos de estudio con datos importantes de sistemas de recuperación de calor en Guatemala y casos publicados internacionalmente de eficiencias exergéticas en ciclos de potencia y temas relacionados a la inyección de aire caliente en calderas.

En la tesis doctoral “Análisis exergético de nuevos ciclos de potencia”, Martínez (2004), se presentó un análisis exergético de los ciclos termodinámicos para determinar la eficiencia energética o exergética en ciclos de generación de potencia que utilicen de combustible hidrógeno y comburente oxígeno u otros de similares características. Se determinó que para propósitos prácticos es conveniente definir un estado de referencia para el análisis de la exergía física, el cual se representa con una temperatura ambiente de 25°C y presión atmosférica de 1,013 bar, variables intensivas iguales al del estado muerto. Este dato es de utilidad en el presente estudio, dado que se establecerá dicho estado de referencia en el análisis exergético.

En el artículo “Inyección de aire secundario caliente en calderas de vapor bagaceras y su influencia en el rendimiento térmico”, Golato, Aso, Paz y Cárdenas (2005), se determinó que, si se realiza la medición de temperatura caliente en un punto muy próximo a la salida del calentador, dicha temperatura difiere de la correspondiente al ingreso al hogar por lo que se asume como dato de entrada la temperatura de los gases de combustión, las concentraciones de

las trazas encontradas de hidrocarburos no quemados en los gases de combustión se consideran despreciables, el rendimiento de la caldera sin la inyección de aire caliente es de 64,15 %, el rendimiento energético de la caldera aumenta en 1,62 puntos equivalente a un 2,52 % con respecto al sistema sin optimizar, alcanzando un valor del 65,77 % y que, al aumentar el rendimiento energético de la caldera, los gases de efluentes de chimenea disminuyen en un 2,45 %. Estos datos se utilizarán como datos indicadores y comparativos en la determinación de la eficiencia exérgica de la caldera con el diseño propuesto para el aprovechamiento del calor liberado por los gases de combustión para la inyección de aire caliente en la caldera.

En el artículo “Metodología de cálculo de la eficiencia térmica de generadores de vapor”, Golato, Colombres, Aso, Correa y Paz (2008), se analizó la eficiencia térmica de un sistema generador de vapor-precalentador de aire, encontrando que los mayores valores del coeficiente de variación porcentual corresponden a la concentración de monóxido de carbono, lo cual se atribuyó a la sensibilidad que presenta este elemento a los cambios en el proceso de combustión. Esta especificación es de utilidad en la interpretación de resultados, dadas las variaciones que pueden presentarse de acuerdo con el proceso de combustión y las temperaturas obtenidas.

En el artículo “Aplicación del método exérgico para determinar pérdidas separadas e irreversibilidades en calderas bagaceras”, Hernández, González y Mestizo (2007), se realizaron un diagnóstico energético y exérgico de una caldera, respecto a las pérdidas de energía se encontró que las pérdidas más significativas dentro del diagnóstico energético son en los gases de chimenea, cuyo valor alcanza 32,7 %. Las pérdidas debidas a la humedad del aire y a la presencia de CO de carbono en los gases de combustión son de baja influencia debido a su pequeño valor de 0,57 %. Las pérdidas incontroladas que se determinaron por balance presentan un valor muy elevado del 12,3 % por lo que se deben identificar cuáles son las causas que las provocan. Las pérdidas

totales son de 47 %, con una eficiencia de 53 % en la caldera. Estos datos se utilizarán como datos indicadores y comparativos en la determinación de la eficiencia exérgica de la caldera.

En la tesis de licenciatura “Cogeneración de vapor mediante el aprovechamiento de los gases de escape de un motor de combustión interna”, Castellanos (1999), propone diseñar un sistema de recuperación de energía mediante un sistema de cogeneración con base en el principio de intercambio de calor, aprovechando el calor que emanan los gases de combustión. Se determinó que, al aprovechar el calor que emanan los gases de combustión, se obtiene el vapor equivalente al producido por una caldera de aproximadamente 150 HP. Este será un dato comparativo al evaluar el vapor producido en la caldera, del laboratorio de operaciones unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, al aprovechar el calor que liberan los gases de combustión para la inyección de aire caliente en la caldera. Esta tesis representa el único estudio en Guatemala relacionado al aprovechamiento del calor de los gases de una combustión.

2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

El uso de calderas de vapor en los laboratorios de operaciones unitarias exige la implementación de diferentes mecanismos para optimizar la energía suministrada para minimizar los impactos negativos causados al ambiente, reducir costos en combustibles y conseguir un mejor rendimiento en los procesos.

La falta de economizadores de energía en las calderas representa un aumento de costos energéticos y aportes al calentamiento global dado por la combustión de los gases de chimenea. Existen diferentes métodos para incrementar la eficiencia energética de las calderas de vapor por medio de economizadores de energía. Entre ellos, se encuentra el aprovechamiento del calor de los gases de chimenea producidos en la combustión en la caldera. La exergía permite determinar el potencial de trabajo útil de una cantidad de energía que se puede obtener por la interacción espontánea entre un sistema y su entorno, lo cual establece las bases para el análisis de la eficiencia energética que se obtiene al aprovechar el calor que producen los gases de combustión. Sin embargo, en la actualidad, no existe un análisis de este tipo para la caldera del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

El consumo de combustible utilizado para el funcionamiento de las calderas de vapor representa un indicador de la eficiencia energética de la caldera. Esta disminuye al presentarse un incremento en el consumo del combustible y representa un aumento en la emisión de gases de combustión de chimenea.

El uso de calderas de vapor en el laboratorio de operaciones unitarias representa gastos en la compra de combustible. Aproximadamente, se requieren cinco galones de diesel para cuatro horas de funcionamiento de la caldera de 10 hp. En este contexto se propone un diseño para la inyección de aire caliente a la caldera, aprovechando el calor producido por los gases de combustión de chimenea, para incrementar la eficiencia energética. Sin embargo, actualmente en el laboratorio de operaciones unitarias, no se cuenta con un estudio exergético que proponga el diseño para el aprovechamiento del calor de los gases de combustión de la caldera.

Con la información detallada se pueden formular las siguientes interrogantes:

- ¿En cuánto se podría aumentar la eficiencia energética en la caldera del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de San Carlos de Guatemala, aprovechando el calor que liberan los gases de combustión de la chimenea?
- ¿Cuál es la cantidad de consumo energético en la caldera del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala?
- ¿Cuál será la propuesta de diseño para el aprovechamiento del calor producido por los gases de combustión de chimenea para la inyección del aire caliente a la caldera?
- ¿De cuánto sería el ahorro en costos de combustible al aprovechar el calor producido por los gases de combustión de chimenea para la inyección de aire caliente?

3. JUSTIFICACIÓN

La investigación por realizar se concentra en la línea de eficiencia energética de la Maestría en Energía y Ambiente.

La eficiencia energética representa uno de los mayores retos que enfrentan los laboratorios de operaciones unitarias, ya que se encuentra asociada a costos, regulaciones ambientales y relaciones sociales.

La inyección de aire caliente, con el aprovechamiento del calor emanado de los gases de combustión de chimenea, en las calderas de vapor constituye una poderosa técnica que encierra un procedimiento termodinámico para incrementar la eficiencia energética de la caldera. Este incremento aportará una optimización técnico-económica en laboratorios de operaciones unitarias y en las industrias donde se empleen calderas de vapor. Se seleccionó un análisis exergético para determinar la eficiencia térmica de la caldera con inyección de aire caliente, porque permite analizar la eficiencia dada por la interacción entre un sistema y su entorno la cual se da entre el aire frío previo a inyectarse en la caldera con el calor emanado de los gases de combustión de chimenea. De esta manera se logra la disminución de consumo y costo económico.

Este trabajo presentará un detalle del método implementado para incrementar la eficiencia energética en calderas de vapor, para la disminución en el consumo de combustible y los costos de servicios, específicamente en laboratorios de operaciones unitarias. Los continuos incrementos en costo de combustibles, en especial en Guatemala donde todos son importados, confieren mayor relevancia a este tipo de estudios.

Esta investigación aportará una herramienta básica para incrementar la eficiencia energética de las calderas de vapor, lo cual es de gran utilidad para ingenieros en procesos que apliquen operaciones unitarias en diferentes industrias y laboratorios. Asimismo, será muy útil en las gestiones ambientales y de mitigación, ya que su aplicación disminuye los impactos por contaminación térmica dada por la emisión de gases de chimenea.

El estudio beneficia a la facultad de Ingeniería y a la escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, como aporte bibliográfico y como método para la disminución tanto en los costos del combustible, como en los aportes en el calentamiento global, al ambiente y las comunidades cercanas a los sitios de producción. Además, el Ministerio de Energía y Minas y el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales contarán con un aporte bibliográfico. También impacta en la matriz energética el poder reducir la dependencia de combustibles importados, orientando hacia eficiencia y el correcto uso de los recursos.

4. OBJETIVOS

Objetivo general

Efectuar una propuesta de diseño para el aumento de la eficiencia energética en la caldera del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad de San Carlos de Guatemala, aprovechando los gases de combustión de la chimenea.

Objetivos específicos

1. Calcular la cantidad de consumo energético en la caldera del laboratorio de operaciones unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
2. Determinar la propuesta de diseño para el aprovechamiento del calor producido por los gases de combustión de chimenea para la inyección de aire caliente a la caldera.
3. Estimar el ahorro en costos de combustible utilizado por la caldera al aprovechar el calor producido por los gases de combustión de chimenea para la inyección de aire caliente.

5. ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Con el estudio se aportará un proceso simplificado de cómo se puede incrementar la eficiencia térmica en calderas de vapor con la inyección de aire caliente, en cualquier entidad que utilice intensivamente la energía calórica producida por calderas de vapor. Se contribuye, de esta manera, a la búsqueda de la eficiencia energética, en especial, en laboratorios de operaciones unitarias.

El uso de calderas de vapor en laboratorio de operaciones unitarias presenta altos costos energéticos y aportes en la contaminación global debido a las emisiones de gases de chimenea, las cuales están directamente relacionadas con el alto consumo de combustible que se atribuye a la baja eficiencia energética del equipo. Dado que la reducción en el consumo de combustible es de suma importancia en la mitigación de impactos ambientales, se pretende implementar la inyección de aire caliente, aprovechando el calor emanado de los gases de combustión, en la válvula de admisión de aire de la caldera para incrementar su eficiencia térmica y disminuir la emisión de gases de chimenea y los costos de operación.

El estudio coadyuva al cumplimiento de normativas internacionales de emisiones y de contaminación calorífica y a la reducción de costos asociados al menor uso de carburantes.

Se aportará un esquema del proceso y un análisis exergético de la inyección de aire caliente, con el aprovechamiento del calor emanado de los gases de combustión de chimenea, en la caldera del laboratorio de operaciones unitarias de la escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Además, se hará una propuesta para la simulación del proceso como técnica alternativa para el incremento en la eficiencia térmica de la caldera.

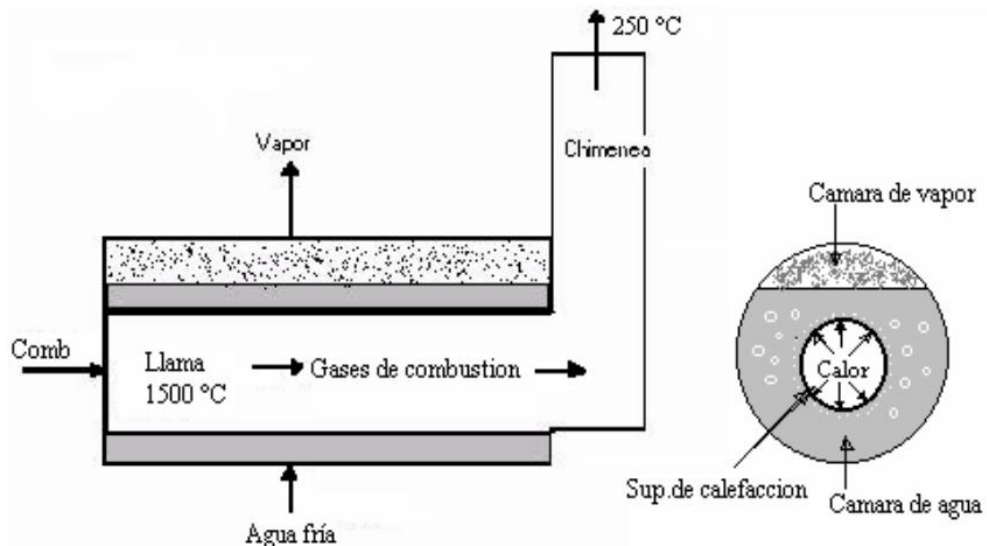
6. MARCO TEÓRICO

Las calderas representan equipos indispensables en la generación de energía de diferentes industrias, laboratorios, comercios, aplicaciones domiciliarias, entre otras. A continuación, se presenta una descripción sobre los componentes de una caldera de vapor, los principios científicos que rigen su funcionamiento y algunos criterios de diseño.

6.1. Calderas de vapor

Dispositivo diseñado para generar vapor a una cierta presión, mediante una fuente de energía que se utiliza para transferir calor a un fluido. En la figura 1 se presenta un esquema de una caldera elemental de vapor.

Figura 1. Esquema de una caldera elemental de vapor



Fuente: Barreto (2005).

El principio básico de funcionamiento consiste en una cámara donde se produce la combustión, mediante la ayuda de aire comburente y, a través de una superficie de intercambio, se realiza la transferencia de calor.

La estructura real de una caldera dependerá del tipo de caldera, sin embargo, se pueden describir sus partes generales.

- Quemador: dispositivo cuya función es preparar la mezcla de combustible y comburente para realizar la combustión.
- Hogar: alberga el quemador en su interior, donde se realiza la combustión del combustible utilizado y la generación de los gases calientes.
- Tubos de intercambio de calor: el flujo de calor desde los gases hasta el agua se efectúa a través de su superficie. En ellos también se generan las burbujas de vapor.
- Separador líquido-vapor: es necesario para separar las gotas de agua líquida con los gases aún calientes, antes de alimentarla a la caldera.
- Chimenea: vía de escape de los humos y gases de combustión después de haber cedido calor al fluido.
- Carcasa: contiene el hogar y el sistema de tubos de intercambio de calor.

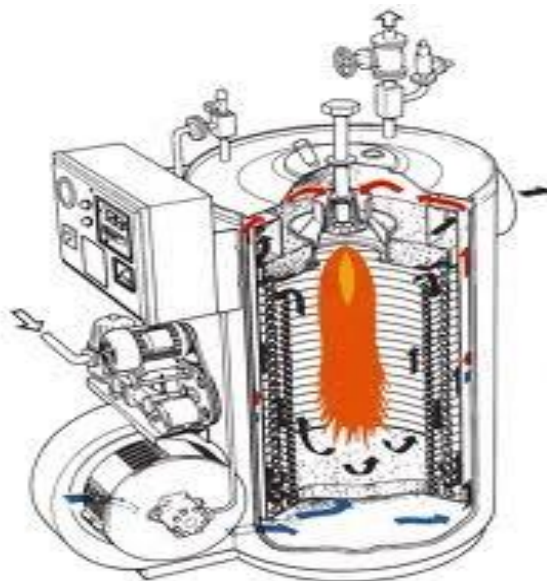
6.1.1. Clasificación de las calderas acorde la disposición de los fluidos

La disposición del fluido representa la clasificación principal de las calderas, pirotubulares y acuotubulares, las cuales se describen a continuación.

6.1.1.1. Calderas acuotubulares

Calderas con tubos múltiples de humo, en ellas, el agua se encuentra en su mayoría o casi toda contenida en haces de tubos de acero rodeados por la llama y los gases calientes de la combustión. De acuerdo con el elevado número de tubos que pueden instalarse, la superficie de calefacción puede ser muy grande para dimensiones relativamente pequeñas. Esto le permite producir vapor a presiones elevadas. (Martínez, 2012)

Figura 2. **Detalle de caldera acuotubular**



Fuente: Martínez (2012).

Las calderas acuotubulares, usualmente, presentan una carga térmica por superficie de calefacción superior. Esto aumenta la sensibilidad a la calidad del agua, por lo cual la normativa vigente exige condiciones más restrictivas para el agua de alimentación de estos equipos. Son de aplicación cuando se requiere una presión de trabajo mayor a 22 bar. En la figura 2 se ilustra el detalle de una caldera acuotubular. (Martínez, 2012)

6.1.1.2. Calderas pirotubulares

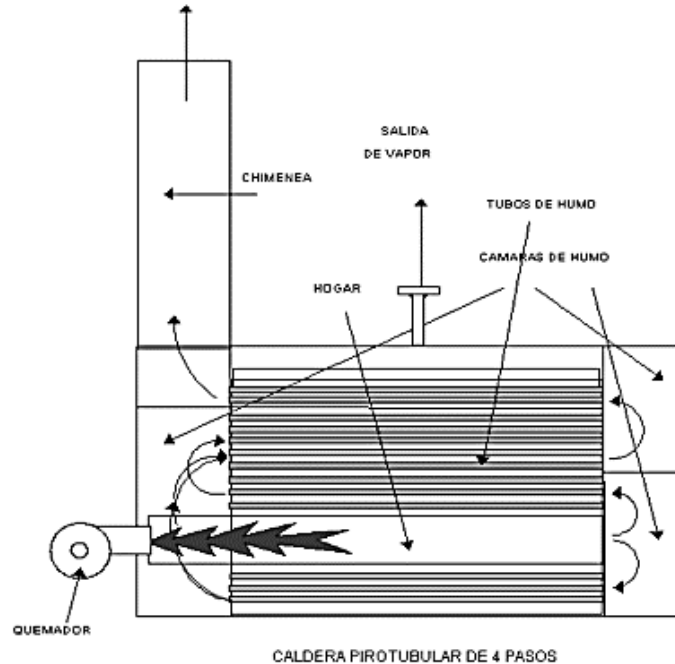
Calderas con tubos múltiples de humo, se representan como un cilindro compacto de agua, el cual es atravesado longitudinalmente por un haz de tubos por los que circulan la llama y los humos.

El volumen de agua de estos equipos actúa como un contenedor de energía proporcionando una respuesta adecuada para demandas puntuales y una mayor calidad del vapor.

6.1.1.2.1. Diseño de calderas pirotubulares

En las calderas pirotubulares los gases de combustión pasan a través del haz de tubos, el cual debe ser resistente a altas temperaturas y con una buena conductividad térmica, se produce vapor mediante la transferencia de calor entre los gases y el agua. En la figura 3 se muestra el esquema de una caldera pirotubular.

Figura 3. **Componentes de una caldera pirotubular de 4 pasos**



Fuente: Colindres (2010).

Usualmente, las calderas pirotubulares trabajan con un tiro forzado, el cual se obtiene mediante la utilización de vapor de escape de la máquina.

En las calderas pirotubulares, el combustible es quemado debajo del casco y los gases se orientan para entrar en los tubos que se encuentran en el interior del tambor de agua, haciendo su recorrido en uno o más pasos. El vapor sale por la parte superior del tambor y la entrada de agua está, generalmente, a 2/3 de la altura de los tubos. El tope práctico de presión es de 250 psig con una producción de hasta 25 000 lb/h, lo cual hace que este tipo de calderas sea recomendable para servicios donde la demanda de vapor es relativamente pequeña y no se requiere la aplicación de turbinas. (Iguarán y Martínez, 2008)

6.1.1.2.2. Diseño térmico

El diseño térmico de calderas pirotubulares se efectúa con base en los requerimientos de vapor que producirá. Mediante análisis termodinámicos se obtienen:

- Masa de combustible y masa de aire para una combustión completa.
- Temperatura de llama adiabática, la cual se requiere para determinar el área de transferencia de calor en función de la longitud de los tubos y el intercambio de calor desde la masa de los gases salientes hasta la masa de vapor de agua evaporada. (Rodorea, 2005)

Requerimientos para el diseño térmico

- Datos operacionales: valores nominales de trabajo en los cuales opera la caldera. Entre estos datos se encuentra la presión de trabajo, masa de vapor requerido, poder calorífico inferior del combustible y la emisividad de la superficie.
- Datos geométricos: dimensiones comerciales de los tubos con los que opera la caldera.
- Datos ambientales: temperatura ambiente del agua y presión atmosférica de la localidad.

6.2. Economizadores

Elementos que son instalados a la salida de los gases de combustión de las calderas para incrementar su eficiencia. Se conforman por tubos lisos o con aletas. Por el interior de los tubos circula agua de alimentación a la caldera y, por fuera de los tubos, los gases de la combustión a contracorriente. Los gases ceden energía al agua, de esa forma incrementan su temperatura y disminuye el consumo de energía para producir un kilogramo de vapor o para producir un kilovatio. (Martínez, 2013)

6.2.1. Recuperación del calor de los gases de combustión

El aumento de la eficiencia del grupo caldera-economizador se deriva de los siguientes factores:

- Reducción de las pérdidas en la chimenea y de la energía sobre el calor latente. La utilización de un intercambiador de gases/agua reduce la temperatura de salida de los gases de combustión, aproximadamente desde 10 K a 25 K respecto a la temperatura de retorno del agua de la calefacción. Por lo que, para una temperatura de retorno entre 30 °C y 70 °C se puede estimar un incremento del rendimiento entre un 5 % y un 5.8 %. (Martínez, 2013)
- Recuperación de energía térmica del calor latente de condensación. La fase de adquisición del calor de los humos es efectiva cuando la temperatura del agua de retorno se encuentra por debajo del punto de condensación de los humos de combustión, aproximadamente 57 °C para los gases de gas natural. Con valores de temperatura de retorno entre 50 °C y 30 °C, se estima un incremento del rendimiento entre un 4 % y un 10 %. (Martínez, 2013)

6.2.1.1. Inyección de aire caliente en la caldera

En la actualidad se inyecta aire secundario, previamente calentado, a la caldera para incrementar su eficiencia. El aire se introduce al hogar a través de toberas tangenciales que son colocadas en las esquinas del horno, lo cual provoca la rotación de la masa gaseosa en combustión. Este tipo de calderas son poco aplicables por su altura reducida, es aplicable a calderas de sección transversal cuadrada. (Golato, Aso, Paz y Cárdenas, 2005)

La inyección de aire secundario frío en el interior del hogar de la caldera, genera un decremento en la eficiencia térmica de la caldera, dado el enfriamiento del horno.

6.3. Termodinámica

Ciencia macroscópica que estudia la relación entre las diferentes propiedades de equilibrio de un sistema y los cambios que experimentan durante los procesos. Representa el estudio del calor, trabajo, energía y los cambios que provocan en los estados de los sistemas. (Levine, 2004)

6.3.1. Primera Ley de la Termodinámica

La energía no se crea ni se destruye durante un proceso, solo se transforma. Se refiere a la conservación de la energía. Un sistema termodinámico puede intercambiar energía con su entorno en forma de calor y trabajo, acumulando energía en forma de energía interna.

La Primera Ley de la Termodinámica representa una generalización de observaciones experimentales, el valor del trabajo neto realizado por o sobre un sistema cerrado durante un proceso adiabático el cual lleva al sistema de un estado inicial a otro final, depende solo de los estados inicial y final del sistema,

y es independiente del tipo de trabajo, de los detalles del proceso y de la naturaleza del sistema. (Rodoreda, 2005)

Durante un ciclo, la trayectoria por la cual pasa el sistema atraviesa múltiples procesos y vuelve, finalmente, a su estado inicial. Debido a que el estado inicial y final del sistema representan la misma posición, los valores de sus propiedades no cambian. El valor del cambio de energía en el sistema es cero. (Levine, 2004)

$$\text{Ecuación 1. } Q_{ciclo} = W_{ciclo}$$

Donde:

Q_{ciclo} = transferencia de energía dada un gradiente de temperatura, durante el ciclo.

W_{ciclo} = trabajo realizado por el ciclo; transferencia de energía dada una fuerza macroscópica que actúa a lo largo de una distancia.

6.3.2. Segunda Ley de la Termodinámica

Representa los siguientes enunciados, (Levine, 2004):

- Todo proceso reversible requiere una compensación de energía, la cual fue perdida por el sistema.
- Ningún equipo puede funcionar de tal modo que su único efecto sea convertir todo el calor absorbido por el sistema en trabajo hecho por el sistema.

- El calor jamás fluye espontáneamente de un objeto frío a un objeto caliente.

Cuando dos sistemas se encuentran en diferentes estados, existe un potencial de generar trabajo al pasar estos de sus estados iniciales a un estado de equilibrio mutuo. La Segunda Ley de la Termodinámica permite determinar el trabajo máximo teóricamente obtenible de dicho proceso y evaluar los factores que reducen este valor. (Rodoreda, 2005)

Una máquina térmica, que opera en ciclos, intercambia energía por transferencia de calor con otros sistemas y genera trabajo. En una máquina térmica no toda la energía que le es transferida por calor puede ser convertida a trabajo: parte de esta energía es transferida fuera del sistema a una temperatura inferior. La eficiencia térmica de una máquina térmica se define como la proporción entre el trabajo neto generado y la energía total transferida hacia el sistema. (Rodoreda, 2005)

Matemáticamente la eficiencia térmica se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 2. } n = \frac{W_{\text{ciclo}}}{Q_e} = 1 - \frac{Q_s}{Q_e}$$

Donde:

Q_e = Calor de entrada en el ciclo.

W_{ciclo} = trabajo realizado por el ciclo.

Q_s = Calor de salida en el ciclo.

La eficiencia térmica de un ciclo termodinámico de potencia irreversible siempre es menor que la de un ciclo termodinámico de potencia reversible operando ambos entre las mismas temperaturas. Todos los ciclos termodinámicos de potencia reversibles operando entre las mismas temperaturas tienen la misma eficiencia térmica (Rodoreda, 2005)

La eficiencia térmica depende únicamente de las temperaturas de las fuentes:

$$\text{Ecuación 3. } \frac{Q_s}{Q_e} = \frac{T_s}{T_e}$$

Donde:

Q_e = Calor de entrada en el ciclo.

Q_s = Calor de salida en el ciclo.

T_e = Temperatura de entrada en el ciclo.

T_s = Temperatura de salida en el ciclo.

La Segunda Ley de la Termodinámica involucra variables de disponibilidad de energía, dentro de las cuales se presentan la entropía y la exergía.

6.3.2.1. Entropía

Variable termodinámica que representa la degradación del potencial energético. Involucra la calidad de la energía. La entropía del universo debe ser mayor o igual que cero. Cuando la entropía es cero se trata de un proceso reversible. (Levine, 2004)

Cuando un sistema cerrado recibe energía por transferencia de calor durante un proceso internamente reversible su entropía aumenta; cuando éste cede energía su entropía disminuye. Se interpreta entonces que una transferencia de entropía acompaña a una transferencia de calor. La generación

de entropía refleja la magnitud de las irreversibilidades presentes durante el proceso. No hay transferencia de entropía asociada a la transferencia de energía por trabajo. (Rodoreda, 2005)

6.3.2.2. Exergía

Propiedad termodinámica que permite determinar el potencial de trabajo útil de una determinada cantidad de energía que se puede alcanzar por la interacción espontánea entre un sistema y su entorno. Representa una variable de disponibilidad de energía, que toma como punto de referencia el ambiente.

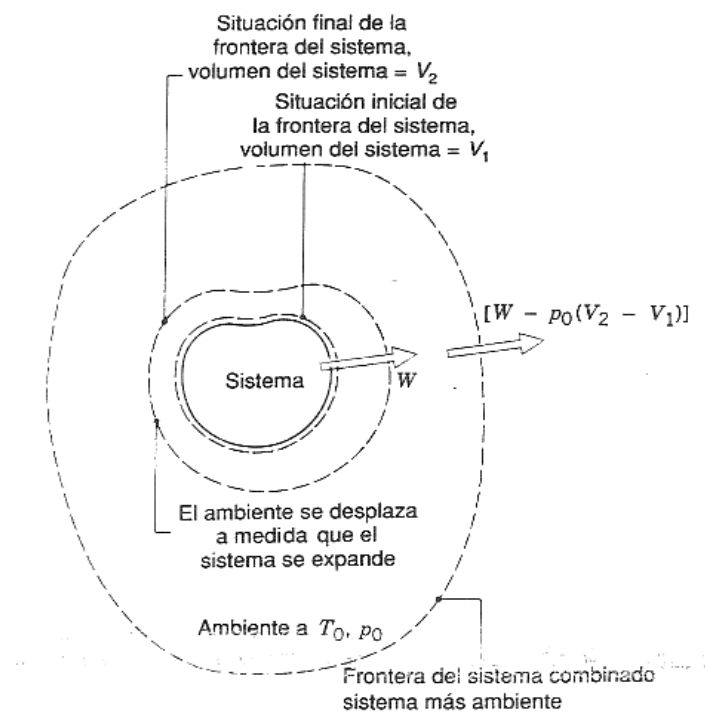
Cuando dos sistemas en diferentes estados entran en contacto, existe una oportunidad de generar trabajo al pasar ambos de sus respectivos estados iniciales a un estado de equilibrio mutuo. Si el proceso ocurre de manera reversible, entonces el trabajo generado tiene el valor máximo. En el caso de una reacción incontrolada en que los sistemas lleguen a un estado de equilibrio sin que se aproveche el proceso para generar trabajo, este potencial sería perdido en su totalidad. (Rodoreda, 2005)

En ausencia de efectos nucleares, magnéticos, eléctricos y de tensión superficial, la exergía total de un sistema puede dividirse en cuatro componentes, exergía física, cinética, potencial y química. (Rodoreda, 2005)

Cuando un sistema se encuentra en equilibrio térmico y mecánico con el ambiente, y por lo tanto se encuentra en el estado ambiental, el valor de su exergía física es nulo. La exergía química del sistema es el potencial de generar trabajo que posee el sistema respecto al ambiente al pasar del estado ambiental a un estado no solo de equilibrio termomecánico sino también químico. (Rodoreda, 2005)

Al fluir materia a través de la frontera de un sistema abierto, cierta cantidad de exergía se transfiere junto con el flujo de materia y cierta cantidad junto con el trabajo asociado a la presión del fluido a las entradas o salidas del volumen de control. (Rodoreda, 2005)

Figura 4. **Transferencia de exergía asociada a una transferencia de trabajo**



Fuente: Rodoreda (2005).

6.3.2.2.1. Eficiencia exergética

Proporción entre el producto y el recurso de un sistema expresados en términos de la exergía. La eficiencia exergética es igualmente útil tanto en procesos cíclicos como en procesos abiertos. El producto corresponde al resultado producido por el sistema y el recurso se atribuye a los recursos

utilizados para generar el producto. La eficiencia térmica y exergética de una planta termoeléctrica con un ciclo de vapor resultan ser ambas similares en magnitud, no mayores a 40%. Esto se atribuye a que tanto el combustible de entrada como el trabajo de salida, ambos poseen un alto contenido de exergía. (Rodoreda, 2005).

6.3.2.2.2. Eficiencia exergética en calderas

La caldera tiene como función principal incrementar la exergía del fluido de trabajo, este aumento en la exergía de la corriente se considera la exergía del producto. Y la suma de las exergías del combustible y del aire precalentado utilizado para la combustión es la exergía del recurso. (Rodoreda, 2005)

Al considerar los procesos de intercambio de calor y de combustión en la caldera, por separado, se tiene para el primero la suma de las exergías del combustible y del aire precalentado como la exergía del recurso y la exergía de los gases de combustión como la exergía del producto, mientras que para el segundo se tienen estos gases como el recurso y el aumento en la exergía del fluido de trabajo como el producto. (Rodoreda, 2005)

La eficiencia exergética representa un parámetro útil para comparar el funcionamiento de componentes similares dentro de un mismo sistema o de sistemas diferentes. En el caso de no ser apropiado utilizar una eficiencia exergética para evaluar el funcionamiento de un proceso, se utilizan los radios de destrucción de exergía.

El radio de destrucción de exergía se define como la proporción entre la destrucción de exergía en el componente j y la exergía suministrada al sistema en su totalidad.

6.3.2.2.3. Método de Análisis Exergético

Técnica que se basa en el concepto de exergía, potencial de generar trabajo que poseen diferentes formas de energía en relación con un ambiente determinado. (Levine, 2004)

La relevancia de este método se atribuye a que, a diferencia de los análisis basados solo en balances de masa y energía, este método permite, por un lado, identificar las pérdidas termodinámicas internas en un sistema y por otro, comparar entre distintas formas de energía. Un balance de exergía proporciona información acerca de cuánto del potencial original para generar trabajo se pierde o se destruye durante un proceso.

El concepto de calidad de la energía térmica se enfoca en la temperatura a la cual ésta se encuentra disponible. A mayor temperatura, mayor será la eficiencia para transformar la energía térmica a trabajo. El análisis exergético permite evaluar un proceso de varios niveles de temperatura.

El concepto de exergía se utiliza principalmente dentro del área de generación de potencia, donde se trata con energía en diferentes formas y a diferentes temperaturas y por lo tanto de diversos niveles de calidad. (Rodoreda, 2005)

Metodología de análisis

- Descripción tanto del sistema en estudio.
- Definir el ambiente del sistema.
- Realizar las idealizaciones necesarias para desarrollar un modelo manejable. (Rodoreda, 2005)

- Calcular los flujos de masa y de energía por medio de un análisis termodinámico de la Primera y Segunda Ley. (Levine, 2004)
- Calcular los flujos de exergía y la destrucción de exergía en cada componente.
- Definir y calcular las eficiencias exergéticas y otros parámetros de evaluación de cada componente. (Rodoreda, 2005)
- Elaborar un diagrama de flujo exergético.
- Identificar la locación y magnitud de los principales sumideros de exergía.

Volumen de control

Un sistema debe ser dividido en volúmenes de control para aplicarle el método de análisis exergético. La frontera del volumen de control puede ser real o ficticia. Al existir un intercambio de calor entre el volumen de control y el ambiente, debe especificarse la temperatura de la frontera en las partes donde ocurre el intercambio de calor. (Rodoreda, 2005)

Se especifica si el gradiente de temperaturas se encuentra dentro de la frontera o fuera de ella, ya que, en el primer caso, la destrucción de la exergía debida a una caída de la temperatura del fluido se considera una irreversibilidad interna al componente, mientras que en el segundo caso se considera una pérdida de exergía y por lo tanto una irreversibilidad externa. (Rodoreda, 2005)

Idealizaciones

Los procesos que se presentan en una planta de vapor real son muy complejos, por lo que se requiere de idealizaciones para diseñar modelos termodinámicos útiles.

- El sistema opera en estado estacionario. Se descartan problemas de carácter dinámico. (Levine, 2004)
- Los efectos de la energía cinética y potencial de los flujos másicos de las corrientes que entran o salen del volumen de control se desprecian ya que, en la mayoría de los procesos de conversión de energía, los cambios en estas formas de energía resultan insignificantes comparados con los cambios en la entalpía de los flujos másicos de las mismas corrientes. Los términos de exergía cinética y potencial se desprecian. (Rodoreda, 2005)
- Se considera que todos los componentes del sistema operan adiabáticamente. (Levine, 2004)
- La sustancia de trabajo es agua y no se considera la parte de potencial químico en el cálculo de la exergía.

6.4. Medición de parámetros energéticos

Dentro de los parámetros energéticos necesarios para el monitoreo del funcionamiento de la caldera pirotubular, se encuentran la presión del agua de alimentación, la temperatura del tanque de condensado y presión de vapor.

6.4.1. Instrumentos de medición

A continuación, se detalla la instrumentación que puede emplearse para medir los parámetros energéticos de interés.

6.4.1.1. Manómetros

Permiten tomar lecturas de la presión del agua de alimentación, combustible y vapor en la caldera. El rango de lectura en los manómetros se encuentra en libras por pulgadas cuadradas o en bar. Los manómetros deben estar capacitados para medir como mínimo 75 psi más que la presión de trabajo (Colindres, 2010). Los manómetros deben ser conectados a un sifón, para evitar que se dañe el mecanismo que permite el moviendo de la aguja indicadora, por la acción directa del fluido en donde mide la presión. (Colindres, 2010)

6.4.1.2. Termómetros

Dispositivos utilizados para la toma de lecturas de la temperatura del tanque de condensado, combustible y gases en la chimenea, pueden presentarse en escalas de grados centígrados o Fahrenheit. (Colindres, 2010)

6.4.1.3. Control de presión de vapor

Permite mantener la presión de vapor en sus límites de operación alto y bajo, por medio de un juego de resortes y levas en conjunto con una cápsula de mercurio como interruptor eléctrico. Es necesario que toda caldera tenga un control de presión auxiliar, el que debe estar ajustado a un mínimo de 10% arriba del primero. (Colindres, 2010)

6.5. Dimensionamiento del área de caldera

Las dimensiones mínimas para una sala de calderas son determinadas físicamente de acuerdo con las características de la caldera misma y de los equipos auxiliares que en ella se encuentren (Colindres, 2010).

6.5.1. Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química, USAC

En un área de 400 metros cuadrados que se ubica en el edificio T-5 de la Facultad de Ingeniería, tiene instalados desde el principio de la década de 1960, equipos dedicados al estudio experimental de las Operaciones Unitarias de la Ingeniería Química.

Los equipos fueron diseñados, armados y puestos a funcionar con propósitos exclusivamente didácticos con las dimensiones apropiadas. Cuenta con una caldera pirotubular de 50 bhp que genera vapor para uso en los equipos que lo demandan como fuente de calor. Intercambiadores de calor de diferente tipo, evaporadores, condensadores, secadores y generadores de vacío. (Colindres, 2010)

6.6. Impacto ambiental de los gases de combustión

La emisión de gases de efecto invernadero representa un potente contaminante, el cual ha tenido mayor auge desde la revolución industrial, donde el uso desmesurado de combustibles ha incrementado significativamente la contaminación.

Los focos industriales emiten productos contaminantes a la atmósfera, cuyas características dependen fundamentalmente de las calidades de los combustibles y materias primas empleadas, del tipo de proceso y de la

tecnología que se utiliza. Los principales focos industriales de emisión de contaminantes a la atmósfera son las chimeneas de las instalaciones de combustión para la generación de energía eléctrica y calor industrial (Martín, Melón y Sánchez, 2000).

Los principales contaminantes emitidos a la atmósfera son: óxidos de azufre, nitrógeno y carbono, partículas, metales traza, hidrocarburos y compuestos de cloro y flúor. Estas emisiones incluyen un aumento de la contaminación del aire, agua, suelos, y cambios en el clima global, en gran medida, debido a las emisiones antropogénicas de gases invernadero.

Algunos de estos contaminantes reaccionan en la atmósfera al absorber la radiación solar formando otros productos tóxicos, como el ozono. Las reacciones fotoquímicas atmosféricas son complejas, por ello, se requiere de un gran esfuerzo para limitar la emisión de todos los precursores de la contaminación atmosférica si se ha de reducir su concentración a niveles bajos. (Rodoreda, 2005)

El aumento en la temperatura promedio de la atmósfera terrestre debido a la creciente concentración de los gases invernadero se ha convertido en una preocupación internacional. Los gases invernadero son moléculas que absorben la radiación infrarroja las cuales, al acumularse en la atmósfera, alteran el equilibrio térmico de la Tierra con el Sol y el espacio exterior. (Rodoreda, 2005)

De acuerdo con un estudio realizado por la Agencia Internacional de la Energía, se proyecta que, para el año 2030, las emisiones de CO₂ a nivel mundial llegarán a un 70 % por encima de los niveles actuales. De este incremento en las emisiones de CO₂, casi la mitad será debido a la generación eléctrica. (Rodoreda, 2005)

6.6.1. Acciones correctoras

Martín et al (2000), indica que cuando las medidas preventivas no se pueden realizar dado el enfoque económico, para limitar la descarga de contaminantes a la atmósfera, se recurre a acciones correctivas que pueden ser:

- Concentrar y retener los contaminantes con equipos adecuados de depuración que producen residuos sólidos o líquidos que contaminarán los suelos y el agua si no se planifica un tratamiento adecuado de estos residuos, el inconveniente es que estos equipos depuradores consumen recursos naturales y energía.
- Expulsar los contaminantes por medio de chimeneas suficientemente altas para que la dilución evite concentraciones elevadas a nivel del suelo.
- Operar dispositivos con mayor eficiencia energética, los cuales disminuyen las emisiones de gases de efecto invernadero.

Debido a que las plantas generadoras de potencia se construyen a gran escala, el aumento en su eficiencia representa un ahorro significativo de los recursos, así como una moderación de las emisiones de desechos contaminantes y CO₂. Evidentemente, esta no es una medida decisiva para cambiar el curso de los hechos, pero es una medida importante durante el período de transición hacia el uso a gran escala de fuentes de energía limpias. (Rodoreda, 2005)

7. HIPÓTESIS

Por ser una investigación de tipo cuantitativo descriptivo, no aplica.

8. ÍNDICE PROPUESTO

Índice de ilustraciones

Índice de tablas

Lista de símbolos

Glosario

Resumen

Planteamiento del problema y formulación de preguntas orientadoras

Objetivos

Hipótesis

Resumen de marco metodológico

Introducción

Antecedentes

Definición del problema

Justificación de la investigación

Alcances y límites

1. Marco Teórico y Conceptual

1.1. Calderas de vapor

1.1.1. Clasificación de las calderas acorde la disposición de los fluidos

1.1.1.1. Calderas acuotubulares

1.1.1.2. Calderas pirotubulares

1.1.1.2.1. Diseño de calderas pirotubulares

1.1.1.2.2. Diseño térmico

1.2. Economizadores

1.2.1. Recuperación del calor de los gases de combustión

1.2.1.1. Inyección de aire caliente en la caldera

1.3. Termodinámica

1.3.1. Primera Ley de la Termodinámica

1.3.2. Segunda Ley de la Termodinámica

- 1.3.2.1. Entropía
- 1.3.2.2. Exergía
 - 1.3.2.2.1. Eficiencia Exergética
 - 1.3.2.2.2. Método de Análisis Exegético
- 1.4. Medición de parámetros energéticos
 - 1.4.1. Instrumentos de medición
- 1.5. Dimensionamiento del área de caldera
 - 1.5.1. Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química, USAC
- 1.6. Impacto ambiental de los gases de combustión
 - 1.6.1. Acciones correctoras
- 2. Métodos y técnicas
 - 2.1. Metodología
 - 2.1.1. Tipo de estudio
 - 2.1.2. Variables
 - 2.2. Técnicas
 - 2.2.1. Aparatos y material
 - 2.2.2. Proceso del experimento
- 3. Resultados
 - 3.1.1. Cálculos
 - 3.1.2. Discusión de resultados
- Conclusiones
- Recomendaciones
- Bibliografía
- Anexos

9. METODOLOGÍA

A continuación, se presenta el tipo de estudio y las diferentes fases que abarcará el diseño de investigación para su realización.

9.1. Tipo de estudio

Se considera que este estudio es de tipo cuantitativo descriptivo, se especifican las variables y características para la propuesta de un proceso, mediante un análisis exergético, que concentra el diseño para el aprovechamiento del calor que liberan los gases de combustión de chimenea para la inyección de aire caliente en la caldera.

9.2. Fases del estudio

El estudio estará compuesto por cuatro fases que comprende la exploración bibliográfica, posteriormente se realizará la recolección de datos de campo mediante la evaluación del funcionamiento de actual de la caldera del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala. La información obtenida tendrá un proceso de análisis lo cual dará paso a la última fase que consistirá en la propuesta de métodos y usos aplicables.

9.2.1. Fase 1: Exploración bibliográfica

En esta primera fase se revisará toda la bibliografía pertinente para la explicación del tema de estudio y con todos sus componentes.

Esta información conformará la base sobre la cual se propone el diseño para el aprovechamiento del calor de los gases de combustión de chimenea para la inyección de aire caliente en la caldera, como alternativa para incrementar su eficiencia exergética. Se especificarán sus variables y características principales.

9.2.2. Fase 2: Recolección de datos

Para la recolección de datos de casos se analizarán diferentes estudios que enfoquen incrementar la eficiencia energética en calderas de vapor mediante la inyección de aire caliente, asimismo, se consultarán estudios sobre el análisis exergético en máquinas térmicas, enfocados en calderas. Para dicho análisis se seguirán estos pasos:

9.2.2.1. Definición del ambiente del sistema

Dado que la exergía se considera una función de estado, se debe definir el estado del sistema en el cual se realizará el estudio. En el presente estudio el ambiente del sistema se define a través de valores estándar correspondientes a una temperatura de 25°C y a una presión de 1 bar.

9.2.2.2. Idealizaciones necesarias para la construcción de un modelo manejable

La complejidad que presentan las irreversibilidades de los sistemas reales, propician la consideración de las siguientes idealizaciones para efectuar un análisis termodinámico viable de exergía:

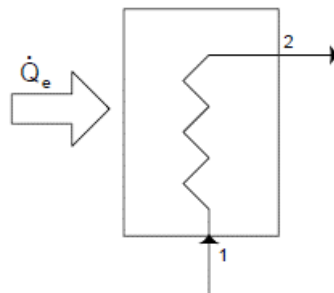
- Se considera que la caldera opera en estado estacionario por lo que se descartan los problemas de carácter dinámico.

- Los efectos de la energía cinética y potencial de los flujos másicos de las corrientes que entran o salen del sistema se consideran despreciables ya que usualmente, en los procesos de conversión de energía, los cambios de este tipo de energías resultan insignificantes comparados con los cambios de entalpía de los flujos másicos las mismas corrientes. Rodoreda (2005).
- Se considera el fluido de trabajo y los gases de combustión de chimenea como sustancias puras.
- Se considera que el único intercambio de calor que ocurre entre la caldera y el ambiente, es por medio de la torre de la chimenea.
- La sustancia de trabajo es agua, para la cual no se considera el potencial químico en el cálculo de la exergía.

9.2.2.3. Análisis de acuerdo con la primera y segunda ley de la termodinámica

A través de un análisis con la primera y segunda ley de la termodinámica, se efectúa un balance de masa y energía para cuantificar el calor suministrado a la caldera y el calor liberado al ambiente por medio de la chimenea.

Figura 5. **Proceso de intercambio de calor en la caldera**



Fuente: Rodoreda (2005)

Balance de masa

$$\text{Ecuación 4.} \quad \dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

Donde:

\dot{m}_1 = flujo másico de entrada del fluido de trabajo [kg/s]

\dot{m}_2 = flujo másico de salida del fluido de trabajo [kg/s]

Los flujos másicos serán determinados experimentalmente estableciendo un volumen correspondiente al fluido en estudio y realizando la medición de tiempo con un cronometro acorde al tiempo que tarda en introducirse en el sistema, en este caso a la caldera. Los flujos másicos se determinarán utilizando este flujo volumétrico y la densidad correspondiente a cada fluido en estudio.

Balance de energía

$$\text{Ecuación 5.} \quad \dot{Q} = \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_1 h_1$$

Donde:

\dot{Q} = flujo de calor [J/°C]

h_2 = entalpia específica del fluido a la salida del sistema [kJ/mol]

h_1 = entalpia específica del fluido a la entrada del sistema [kJ/mol]

Los valores correspondientes a las entalpias del fluido en estudio se determinarán a partir de datos tabulados para diferentes sustancias en el Manual del Ingeniero Químico, Perry 8va. Edición.

Exergía en el proceso de intercambio de calor en la caldera

$$\text{Ecuación 6.} \quad \dot{E} = \dot{m}_2 e_2 - \dot{m}_1 e_1 + \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j$$

$$\text{Ecuación 7.} \quad e = (h - h_0) - T_0(S - S_0)$$

En donde:

\dot{E} = flujo exergético específico total [kJ/mol]

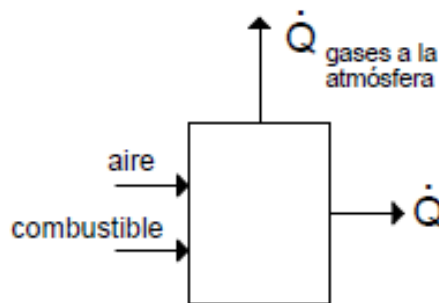
e = exergía de flujo específico [kJ/mol]

T_0 = temperatura a la entrada del sistema [°C]

T_j = temperatura a la salida del sistema [°C]

Las temperaturas se determinarán utilizando un termómetro laser industrial, los valores de entalpías y entropías se determinarán utilizando propiedades termodinámicas y valores tabulados para diferentes sustancias encontrados en el Manual del Ingeniero Químico, Perry 8 va. Edición.

Figura 6. **Proceso de combustión en la caldera**



Fuente: Rodoreda (2005)

Exergía en el proceso de combustión

$$\text{Ecuación 8.} \quad \dot{E}_{pc} = \dot{E}_{comb} + \dot{E}_{aire} - \left(1 - \frac{T_0}{T_c}\right) \dot{Q} - \left(1 - \frac{T_0}{T_{gas\ atm}}\right) \dot{Q}_{gas\ atm}$$

Donde:

\dot{E}_{pc} = flujo exergético específico total en el proceso de combustión
[kJ/mol]

\dot{E}_{comb} = flujo exergético específico del combustible [kJ/mol]

\dot{E}_{aire} = flujo exergético específico del aire [kJ/mol]

T_0 = temperatura a la entrada del sistema [°C]

T_c = temperatura a la salida del sistema [°C]

$T_{gas\ atm}$ = temperatura de los gases de combustión a presión atmosférica [°C]

$\dot{Q}_{gas\ atm}$ = flujo de calor de los gases de combustión a presión atmosférica [J/°C]

Las temperaturas se determinarán utilizando un termómetro laser industrial. Los flujos exergéticos y flujos de calor se determinarán utilizando propiedades, ecuaciones termodinámicas y valores tabulados para diferentes sustancias encontrados en el Manual del Ingeniero Químico, Perry 8va. Edición.

9.2.2.4. Eficiencia Exergética

La eficiencia exergética determina que el potencial de trabajo útil es siempre inferior a la unidad, excepto en el caso de un proceso reversible e ideal, en el que es igual a la unidad. Esta se determina mediante la siguiente expresión.

$$\text{Ecuación 9.} \quad \varepsilon = \frac{E_P}{E_r}$$

Donde:

ε = eficiencia exergética [adimensional]

E_p = Exergía del producto [kJ/mol]

E_r = Exergía del recurso [kJ/mol]

El producto se atribuye al resultado deseado producido por el sistema y el recurso se atribuye a los recursos utilizados para generar el producto.

Eficiencia Exergética en el proceso de combustión

$$\text{Ecuación 10.} \quad \varepsilon = \frac{\dot{E}_Q}{\dot{E}_{comb} + \dot{E}_{aire}}$$

Donde:

ε = eficiencia exergética [adimensional]

\dot{E}_Q = Exergía de los gases de combustión [kJ/mol]

\dot{E}_{comb} = Exergía del combustible [kJ/mol]

\dot{E}_{aire} = Exergía del aire [kJ/mol]

Eficiencia Exergética en el proceso intercambio de calor en la caldera

$$\text{Ecuación 11. } \varepsilon = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_2}{\dot{E}_Q}$$

Donde:

ε = eficiencia exergética [adimensional]

\dot{E}_Q = Exergía de los gases de combustión [kJ/mol]

$\dot{E}_1 - \dot{E}_2$ = Aumento en la exergía del fluido de trabajo [kJ/mol]

Los flujos exergéticos se determinarán utilizando propiedades, ecuaciones termodinámicas y valores tabulados para diferentes sustancias encontrados en el Manual del Ingeniero Químico, Perry 8 va. Edición.

Eficiencia térmica de la caldera

$$\text{Ecuación 12. } n = 100 * \frac{V(H_v - H_A)}{C * PCI + C_{red}}$$

Donde:

V = flujo másico del vapor producido [kg/s]

H_v = entalpía específica del vapor producido [kJ/mol]

H_A = entalpía específica del agua de alimentación [kJ/mol]

C = flujo másico del combustible quemado [kg/s]

PCI = poder calorífico inferior del combustible quemado [kJ/kg]

$Cred$ = créditos de energía (calor sensible del aire de combustión, del agua de alimentación y el combustible)

Los flujos másicos se determinarán experimentalmente. En cambio, los valores de las entalpías, poder calorífico y créditos de energía, se determinarán a partir de datos tabulados en tablas en la literatura. Manual del Ingeniero Químico, Perry 8 va. Edición.

9.2.3. Fase 3: Análisis de datos

Con los datos obtenidos se propone un diseño para el aprovechamiento del calor de los gases de combustión de chimenea para la inyección de aire caliente a la caldera. Para lo cual se requiere:

Especificaciones técnicas de la caldera

Tabla I. **Especificaciones técnicas de la caldera marca HURST, de 30Hp**

| Especificación | Valor |
|---------------------------|------------------|
| Capacidad | 30 BHP |
| Presión de diseño | 150 PSI |
| Presión máxima de trabajo | 135 PSI |
| Capacidad térmica | 1,005,000 BTU/hr |

Continuación tabla I.

| | |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Consumo máximo de diesel | 9 Galones por hora al 100% de utilización |
| Producción | 1,035 LBS/Hr de vapor |
| Diámetro de la válvula de admisión de aire | |
| Área mínima de la válvula de admisión de aire | |

Fuente: elaboración propia.

Toma de temperaturas:

Con un nivel de confianza del 95% que equivale a la proporción de éxito y una proporción de fracaso de 5% con un error máximo del 30%.

$$\text{Ecuación 13. } N = \frac{Z_{\alpha/2}^2 * p * q}{E^2}$$

Donde:

N = Número de corridas

$Z_{\alpha/2}$ = Área bajo la curva con un nivel de confianza del 95%

p = Probabilidad de éxito

q = Probabilidad de fracaso

E = Error máximo

$$\text{Ecuación 14. } N = ((1.96)^2(0.95*0.05)) / (0.3^2) = 3$$

Tabla II. **Temperatura de los gases de combustión de chimenea**

| Corrida | Temperatura [°C] |
|---------|------------------|
| 1 | |
| 2 | |
| 3 | |

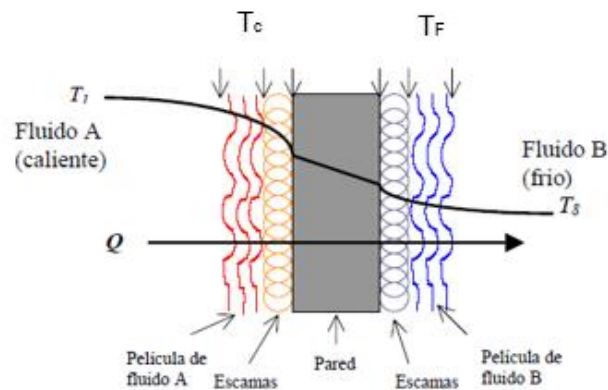
Fuente: elaboración propia.

9.2.4. Fase 4: Propuesta de método y usos

En esta fase, de acuerdo con lo encontrado en las anteriores, se hará una propuesta de cómo aprovechar el calor de los gases de combustión de chimenea para precalentar el aire que entra a la válvula de admisión de aire de la caldera, para incrementar su eficiencia exergética. Este diseño podrá ser de uso en cualquier industria o laboratorio con plantas piloto.

Se propondrá un equipo para la transferencia de calor entre los gases de combustión de chimenea y el aire que entra a la válvula de admisión de aire de la caldera.

Figura 7. **Mecanismo de transferencia de calor entre dos fluidos**

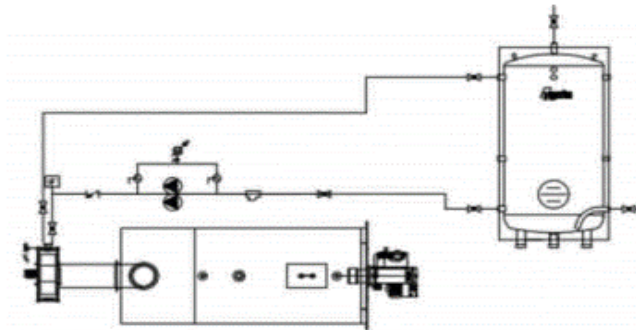


Fuente: Moncada (2005)

En donde T_c hace referencia a la temperatura caliente que genera el calor de los gases de combustión de chimenea y T_F , a la temperatura del aire que entra a la válvula de admisión de aire de la caldera. T_s se atribuye al fluido de interés, en este caso el aire.

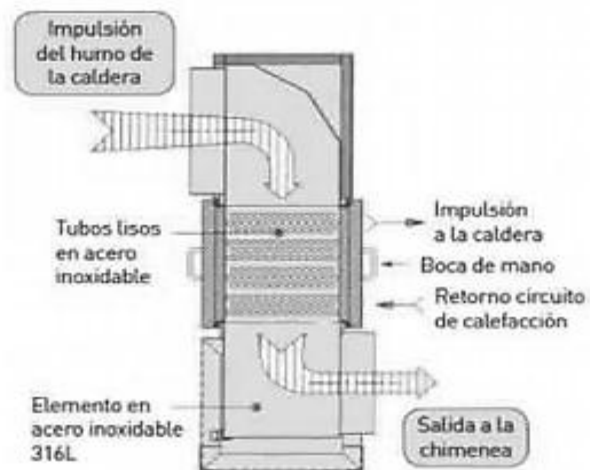
Se propondrá la implementación de un economizador por medio de la adaptación de un intercambiador de tubos lisos sin aletas.

Figura 8. **Economizador en paralelo con la caldera**



Fuente: Cid (2012)

Figura 9. **Propuesta de funcionamiento**



Fuente: Cid (2012)

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

La información de los estudios previos será catalogada de acuerdo con los datos actuales de eficiencia energética de la caldera. Los datos que se podrían obtener mediante la propuesta de un análisis exergético en el diseño para el aprovechamiento del calor de los gases de combustión de chimenea para la inyección de aire caliente en la caldera.

Herramientas:

- Tablas de datos de temperaturas.
- Tablas de datos de presiones.
- Tablas de vapor.
- Tablas de flujos másicos correspondientes al fluido en estudio.
- Tablas de datos de eficiencia energética de la caldera.
- Tablas de datos de eficiencia exergética de la caldera al realizar la propuesta de diseño.
- Tablas de datos de consumo de combustible de la caldera.
- Diagrama de intervalos de temperatura.
- Curva que relaciona la temperatura en función del tiempo.
- Diagrama de equipo de la caldera.
- Datos de costos energéticos del laboratorio donde opera la caldera.

Herramientas estadísticas

- Diagrama de máximos y mínimos: aplicado a temperaturas de los gases de combustión de chimenea.
- Análisis del área bajo la curva $Z\alpha/2$ con un nivel de confianza del 95%, una proporción de fracaso del 5% con un error máximo del

30%, para determinar el número de corridas en la toma de temperaturas de los gases de combustión de chimenea.

- Promedios y desviaciones estándar: en mediciones de temperatura contra tiempo.
- Diagrama de dispersión: para la representación de temperaturas en función del tiempo.

11. CRONOGRAMA

A continuación, se presenta un esquema de la distribución planificada del tiempo de ejecución necesario para realizar las fases propuestas en la metodología.

Figura 10. **Cronograma de ejecución de la investigación**

| Fases de la investigación | Octubre | Noviembre | Diciembre | Enero | Febrero | Marzo |
|--------------------------------------|----------|-----------|-----------|----------|---------|-------|
| | Año 2016 | | | Año 2017 | | |
| Fase 1: Exploración bibliográfica | ■ | | | | | |
| Fase 2: Recolección de datos y casos | | ■ | ■ | ■ | | |
| Fase 3: Análisis de datos | | | | ■ | ■ | |
| Fase 4: Propuesta de método y usos | | | | | | ■ |

Fuente: elaboración propia.

12. RECURSOS Y FACTIBILIDAD

El presente trabajo de investigación se realizará con recursos propios del estudiante de maestría. Dado que la investigación es descriptiva, se tendrán en cuenta los siguientes recursos:

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

| Recurso | Costo |
|------------------------|------------------|
| Materiales consumibles | Q1,500.00 |
| Movilización | Q1,000.00 |
| Asesor | Q2,500.00 |
| TOTAL | Q5,000.00 |

Fuente: elaboración propia.

Se considera que es factible la realización del estudio ya que los recursos aportados son suficientes para la investigación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR) para el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2007). Guía técnica sobre procedimiento de inspección periódica de eficiencia energética para calderas. Recuperado de http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10540_Procedimientos_inspeccion_calderas_GT5_07_f5b208e3.pdf
2. Colindres López. (2010). Estudio técnico para el traslado de dos equipos de generación de vapor que funcionan en el edificio T-5. Implementación y ubicación de una sala de calderas. (Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala). Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1172_Q.pdf
3. Cid. (2012). Economizadores, Calderas industriales eficientes: 153 - 159, Madrid: Consejería de economía y hacienda, Comunidad de Madrid. Recuperado de <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-basica-calderas-industriales-eficientes-fenercom-2013.pdf>
4. Domínguez. (2012). Combustión, Calderas industriales eficientes: 13-24, Madrid: Consejería de economía y hacienda, Comunidad de Madrid. Recuperado de <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-basica-calderas-industriales-eficientes-fenercom-2013.pdf>

5. Fernández & Robles. (2005). Centrales de generación de energía eléctrica. Publicación Universidad de Cantabria: Creative Commons 3.0 BY-NC-SA. Recuperado de <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/centrales-de-generacion-de-energia-electrica/materiales/bloque-energia-IV.pdf>
6. Garrido. (2012). Quemadores, Calderas industriales eficientes:97-115, Madrid: Consejería de economía y hacienda, Comunidad de Madrid. Recuperado de <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-basica-calderas-industriales-eficientes-fenercom-2013.pdf>
7. Gaffert. (1981). Centrales de vapor, estudio de la construcción, características del funcionamiento e integración de toda la maquinaria pesada y ligera de una central. Barcelona: Reverté S.A. Recuperado de https://books.google.com.gt/books?hl=es&lr=&id=EepIO3UCxvkC&oi=fnd&pg=PR1&dq=tipos+de+calderas+de+vapor&ots=mmzf-vkQEY&sig=0tFM8br_8oUPmRMxvUQ0Y3PdbVk#v=onepage&q=tipos%20de%20calderas%20de%20vapor&f=false
8. Golato, Aso, Paz & Cárdenas. (2005). Inyección de aire secundario caliente en calderas de vapor bagaceras y su influencia en el rendimiento térmico. Revista industrial y agrícola de Tucumán 82 (1-2): 17-25. Recuperado de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1851-30182005000100003&script=sci_arttext

9. Golato, Franck, Aso, Correa & Paz. (2008). Metodología de cálculo de la eficiencia térmica de generadores de vapor. Revista industrial y agrícola de Tucumán 1851-3018. Recuperado de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-30182008000200003
10. Green & Perry. (Ed.) (1934). Manual del ingeniero químico Perry. Estados Unidos de América: McGrawHill. doi: 10.1036/0071422943
11. Iguaran & Martínez. (2008). Diseño y construcción de una mini caldera pirotubular para el laboratorio de transferencia de calor. (Publicación Universidad de Santander, Escuela de Ingeniería Mecánica Bucaramanga). Recuperado de <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/5801/2/126201.pdf>
12. Kern. (Ed.). (1999). Procesos de transferencia de calor. México: Compañía editorial continental, S.A. ISB: 968-26-1040-0
13. Kohan. (2000). Manual de calderas. Madrid: McGrawHill. Recuperado de <http://mx.casadellibro.com/libro-manual-de-calderas/9788448125462/719388>
14. Levine. (Ed.). (2004). Físicoquímica. Madrid: McGrawHill. ISBN: 84-481-4005-2
15. Martínez. (2004). Análisis exergético de nuevos ciclos de potencia. (Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid). Recuperado de <http://oa.upm.es/294/1/05200440.pdf>.

16. Martínez. (2012). Calderas, Calderas industriales eficientes: 71-95, Madrid: Consejería de economía y hacienda, Comunidad de Madrid. Recuperado de <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-basica-calderas-industriales-eficientes-fenercom-2013.pdf>

17. Rodoreda. (2005). Análisis exerético de una central termoeléctrica de ciclo de vapor. (Tesis de licenciatura, Universidad de las Américas Puebla). Recuperado de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lfa/rodoreda_r.pdf

18. Smith, Van Ness & Abbott. (Ed.). (1997). México: McGrawHill. ISBN: 968-422-287-4