

*REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS
FACULTAD DE INGENIERÍA*



TRABAJO DE DIPLOMA

En opción al título de Ingeniero Mecánico

Título: Pérdidas por radiación, termografía infrarroja y costo exergético de la producción del vapor en la caldera CMS-C/660 de la Universidad de Cienfuegos, Sede Carlos Rafael Rodríguez.

Autor: Alejandro Vera Ceballos.

Tutores: Ing. Reinier Jiménez Borges

Ing. José Alejandro Madrigal Monzón

Curso 2015-2016



Sistema de Documentación y Proyecto.

Hago constar que el presente trabajo constituye la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Cienfuegos, autorizando a que el mismo sea utilizado por el Centro de Estudio Superior para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de dicha institución.

Firma del autor.

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido según acuerdo de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura, referido a la temática señalada.

Información Científico Técnico

Nombre y Apellidos. Firma.

Vice Decano.

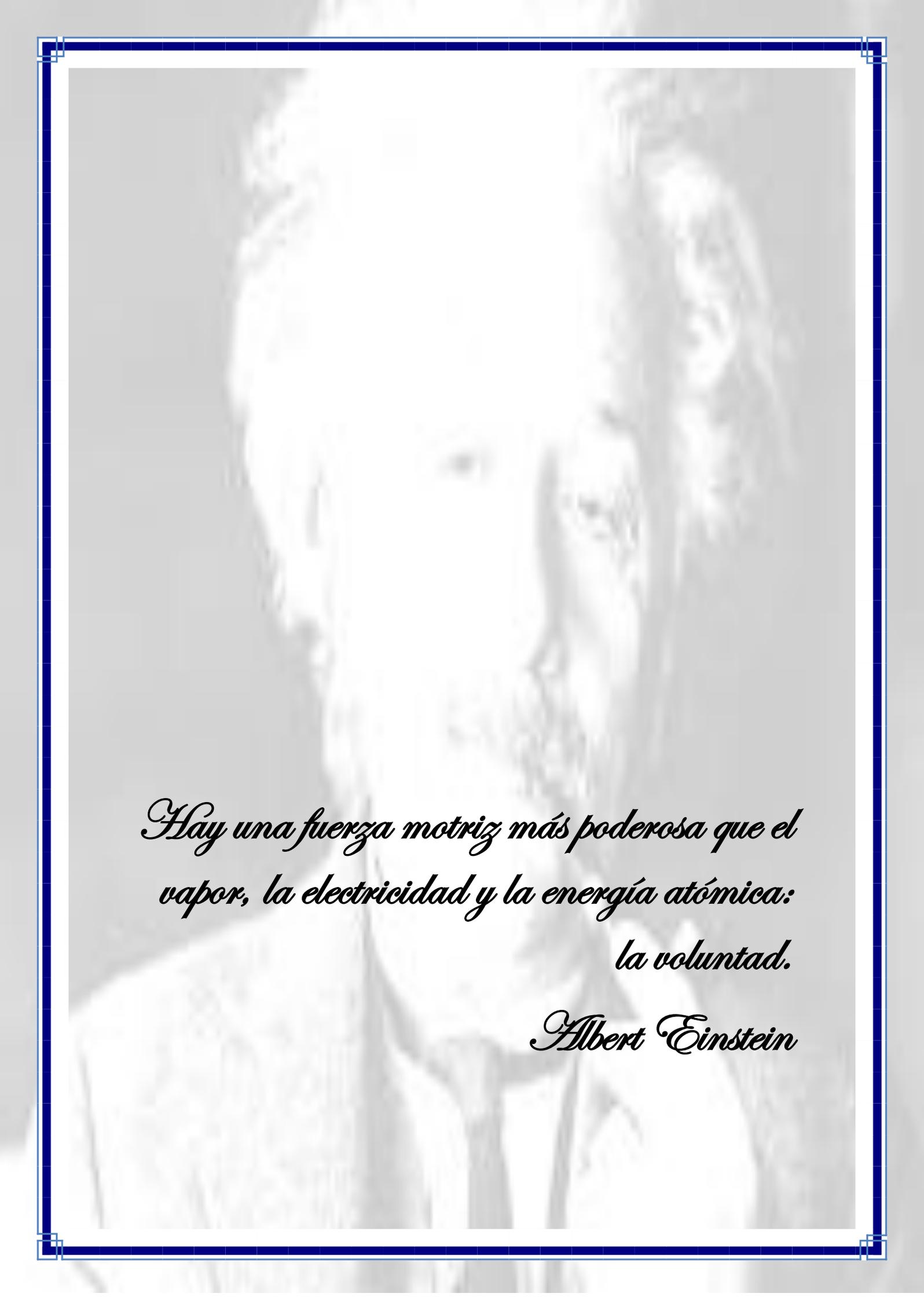
Nombre y Apellidos. Firma.

Firma del Tutor.

Sistema de Documentación y Proyecto.

Nombre y Apellido. Firma.

Pensamiento



*Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica:
la voluntad.*

Albert Einstein

Dedicatoria

A las personas más importantes de mi vida, de las cuales siempre recibí apoyo: mi mamá, mi papá, mi hermano, a mi novia que ha sido mi fuerza motriz y a todos mis amigos.

Agradecimientos

Agradezco a toda mi familia, de forma especial a mis padres, a mi hermano, a mis suegros y abuelasuegra por motivarme siempre a salir adelante.

A Orestes y Magali (los padrinos) porque en el momento más duro y más difícil me dieron el impulso que necesitaba para terminar.

A mi novia Yasmína que ha estado tan involucrada en esta tesis como yo y su compañía en estos momentos ha sido fundamental.

A mis tutores Reinier y José Alejandro (Pepe) que me han ayudado y asesorado de la mejor manera

No puedo dejar de agradecerles a todos los profesores que me brindaron sus conocimientos durante toda la carrera.

A mis compañeros de aula, desde los primeros hasta mi grupo actual por mantenernos tan unidos durante toda la etapa de estudio.

Al profesor Frank Hernández por su apoyo y preocupación constante.

A todas estas personas tengo mucho que retribuirles, no me alcanzarían estas líneas para mostrarles lo gratificado que me

*siento con su ayuda, gracias por su apoyo, preocupación y
paciencia para ayudarme a lograr esta meta.*

Resumen

Las calderas son dispositivos de ingeniería diseñados para generar vapor saturado proveniente de la transformación de la energía química del combustible mediante la combustión, en energía utilizable, y transferirla al fluido de trabajo, el cual la absorbe y cambia de fase. En esta investigación se realiza un análisis de las pérdidas por radiación, termografía infrarroja y costo exergético de la producción del vapor en la caldera CMS-C/660 de la Universidad de Cienfuegos, Sede Carlos Rafael Rodríguez. En el marco teórico referencial de la investigación se abordan aspectos relacionados con las tendencias actuales en el uso de los generadores de vapor y sus principales características. También se establece un acercamiento a la termo economía y los costos exergéticos, así como las principales pérdidas energéticas en estos equipos. Además se determina la metodología por la cual se regirá la presente investigación para arribar a resultados, se expone como se desarrollan las mediciones a los generadores de vapor, se declaran los principales instrumentos que se utilizan para realizar dichas mediciones así como los pasos a seguir para realizar el análisis, y los métodos utilizados para determinar la eficiencia y los procedimientos para determinar la eficiencia exergética. Se aplica la metodología explicada con anterioridad y a partir de los resultados arrojados se muestra la cuantificación de las pérdidas en las zonas críticas, se realiza un análisis energético y exergético del sistema. Igualmente se presentan los resultados de los costos exergéticos y las pérdidas por radiación. **Palabras claves:** Costo exergético, caldera, generadores de vapor, termografía infrarroja

Boilers are devices designed to generate engineering saturated steam from the transformation of chemical energy by burning fuel, into usable energy, and transfer to the working fluid, which absorbs and changes phase. In this research, an analysis of losses by radiation, infrared thermography and exergetic cost of steam production in the CMS-C / 660 boiler at the University of Cienfuegos, Carlos Rafael Rodriguez Headquarters is performed. In the theoretical framework of the research aspects related to current trends in the use of the steam generators and their main characteristics are addressed. An approach to thermoeconomics and exergetic costs, as well as major energy losses in these devices is also established. In addition, the methodology by which this investigation is governed to arrive at results is determined, is exposed as the measurements are carried to the steam generators of state the main instruments used to perform such measurements as well as steps to the analysis and the methods used to determine the efficiency and the procedures for determining the exergetic efficiency. The methodology explained above is applied and from the results thrown quantification of losses in critical areas shown, an energetic and exergetic analysis of the system is performed. Also the results of exergy costs and radiation losses occur. **Keys words:** boilers, thermography, exergetic cost, steam generators, infrared thermography

Índice

PORTADA

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

PENSAMIENTO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN/ ABSTRACT

<u>INTRODUCCIÓN.....</u>	<u>1</u>
<u>CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE.....</u>	<u>4</u>
<u>I.1 Revisión bibliográfica sobre el estado actual y tendencias en el uso de los generadores de vapor a nivel mundial y nacional.</u>	<u>4</u>
<u>I.1.1 Características y tipos de generadores de vapor o calderas.....</u>	<u>4</u>
<u>I.1.2 Breve acercamiento a las calderas de vapor pirotubulares.....</u>	<u>6</u>
<u>I.1.3 Generadores de vapor pirotubulares. Generalidades.....</u>	<u>7</u>
<u>I.2 Principales indicadores de eficiencia y parámetros operacionales en las calderas de vapor.....</u>	<u>9</u>
<u>I.2.1 Eficiencia energética.....</u>	<u>9</u>
<u>I.2.2 Indicadores termodinámicos.....</u>	<u>9</u>
<u>I.2.3 Rendimiento térmico.....</u>	<u>9</u>
<u>I.2.4 Rendimiento instantáneo y útil.....</u>	<u>10</u>
<u>I.2.5 Rendimiento exergetico.....</u>	<u>10</u>
<u>I.2.6 Indicadores económico-termodinámicos.....</u>	<u>11</u>
<u>I.3 Pérdidas fundamentales que ocurren en los generadores de vapor.....</u>	<u>11</u>
<u>I.3.1 Pérdida por calor sensible q_2.....</u>	<u>11</u>
<u>I.3.2 Pérdida por convección y radiación q_5.....</u>	<u>13</u>
<u>I.4 Utilización de generadores de vapor o calderas.....</u>	<u>15</u>
<u>I.4.1 Estado de la generación de vapor en Cuba y en Cienfuegos.....</u>	<u>16</u>
<u>I.5 Termoeconomía y costos exergeticos en los procesos de uso del vapor.....</u>	<u>18</u>
<u>I.5.1 La teoría del coste exergetico.....</u>	<u>18</u>
<u>I.6 Termografía. Análisis de Casos.....</u>	<u>20</u>
<u>Conclusiones parciales.....</u>	<u>21</u>

<u>CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS.....</u>	<u>23</u>
<u>II.1 Mediciones en los generadores de vapor.....</u>	<u>23</u>
<u>II.1.1 Instrumentos utilizados para la medición de los principales parámetros operacionales de las calderas.....</u>	<u>25</u>
<u>II.2 Descripción de la metodología a utilizar para el cálculo exergético de la caldera CMS-C/660 de la Universidad de Cienfuegos, Sede Carlos Rafael Rodríguez.....</u>	<u>26</u>
<u>II.2.1 Métodos para determinar la eficiencia en generadores de vapor.....</u>	<u>28</u>
<u>II.2.1.1 Método directo.....</u>	<u>28</u>
<u>II.2.1.2 Método indirecto.....</u>	<u>29</u>
<u>II.2.2 Eficiencia exergética.....</u>	<u>32</u>
<u>II.3 Modelos de Costos Exergéticos.....</u>	<u>34</u>
<u>II.3.1 Determinación de los costos exergéticos.....</u>	<u>37</u>
<u>Conclusiones Parciales.....</u>	<u>37</u>
<u>CAPÍTULO III. CASO DE ESTUDIO.....</u>	<u>38</u>
<u>III.1 Descripción del objeto de estudio.....</u>	<u>38</u>
<u>III.1.1 Breve descripción de la sala de calderas de la Universidad de Cienfuegos, Sede Carlos Rafael Rodríguez.....</u>	<u>38</u>
<u>III.2 Aplicación de la metodología para el cálculo exergético.....</u>	<u>40</u>
<u>III.2.1 Análisis termográfico.....</u>	<u>41</u>
<u>III.2.2 Cuantificación de las pérdidas en las zonas críticas.....</u>	<u>44</u>
<u>III.3 Análisis energético y exergético del sistema.....</u>	<u>45</u>
<u>III.3.1 Datos de la instalación y Matriz de incidencia.....</u>	<u>47</u>
<u>III.3.2 Costos exergéticos.....</u>	<u>49</u>
<u>III.3.3 Costos exergéticos y la pérdidas por radiación.....</u>	<u>51</u>
<u>Conclusiones Parciales.....</u>	<u>52</u>
<u>CONCLUSIONES GENERALES.....</u>	<u>54</u>
<u>RECOMENDACIONES.....</u>	<u>56</u>
<u>BIBLIOGRAFÍA.....</u>	<u>57</u>
<u>ANEXOS</u>	

Introducción

Introducción

Es evidente la necesidad de la humanidad por contar desde tiempos inmemoriales con máquinas capaces de generar vapor y por tanto capaces de realizar un trabajo que tributara a la necesaria respuesta de cada vez más creciente necesidades de la sociedad de crear bienes y servicios para su consumo.

Los antecedentes de su uso se remontan a épocas antes de nuestra era, el desarrollo de este tipo de sistemas desempeñó un papel fundamental dentro de la naciente Revolución Industrial de los países europeos, momento a partir del cual se produce el desarrollo acelerado de la industria moderna de procesos hacia el resto del mundo.

Estos primeros intentos fueron seguidos por radicales transformaciones que mantuvieron principios básicos pero modificaron la tecnología cual proceso evolutivo hasta llegar a nuestros días donde se cuenta con un alto desarrollo tecnológico, con una capacidad de generar vapor con alto grado de eficiencia y un estricto control de su proceso.

Las calderas son dispositivos de ingeniería diseñados para generar vapor saturado proveniente de la transformación de la energía química del combustible mediante la combustión, en energía utilizable, y transferirla al fluido de trabajo, el cual la absorbe y cambia de fase.

Los sistemas de vapor tienen hoy día un uso muy extenso, con un alto nivel de aplicabilidad en diversas esferas de la vida actual, tales como generación de energía mecánica y eléctrica, como agente calefactor en servicios comerciales e industriales, y como materia prima en determinados procesos industriales, entre otros.

Estos se pueden encontrar de diversos tipos, destacándose las calderas pirotubulares y acuotubulares con una importancia destacable debido a su utilización en procesos industriales indispensables de la era moderna.

En la actualidad las empresas industriales utilizan diversas fuentes de energías pero a pesar de esto la mayor parte se obtiene de la energía química liberada

en forma de calor mediante la quema de combustibles en los hogares de los generadores de vapor, de ahí la importancia del correcto diseño y elección del equipo, su óptima construcción y eficiente operación para evitar el despilfarro de los recursos combustibles que son limitados a nivel mundial.

Las tendencias actuales de la construcción de estos equipos están enfocadas a conseguir altos niveles de rendimientos, por lo cual es preciso que los productos de la combustión estén en contacto con una superficie de tubos de valor apropiado. Además, la necesidad de la utilización de otros tipos de combustibles no fósiles, que aunados a un eficaz diseño de dichas estructuras permitan una eficiencia en la productividad de estos elementos.

El sistema de generación de vapor en la Universidad de Cienfuegos, Sede: Carlos Rafael Rodríguez cuenta con dos calderas pirotubulares, el trabajo de estas se realiza de forma intercalada mensualmente. Cada unidad tiene una capacidad nominal de producción de vapor de 660 kg/hr son de fabricación cubana-española.

El vapor producido se transporta hacia el comedor para la elaboración de alimentos y para el fregado, mediante tuberías de acero con aislamiento térmico, el sistema cuenta con distintos accesorios tales como válvulas de globo, de cuña, reguladores de presión, y retorno de condensados del comedor.

A partir de un reconocimiento realizado a la sala de calderas de dicha sede se detectaron una serie de problemas en el aislamiento térmico motivo por el cual su eficiencia se ve afectada siendo formulado entonces el siguiente problema científico:

Problema científico: Actualmente se carece en la cuantificación energética para las pérdidas por radiación (termografía infrarroja) en la generación de vapor y de su influencia en la eficiencia térmica.

Hipótesis: A partir de la termografía será posible evaluar la generación de vapor mediante la cuantificación de energía.

Objetivo general

Utilizar la termografía para cuantificar la cantidad de energía que se pierde en zonas con problemas de aislamiento y la influencia que tienen estas dentro de los costos exergéticos unitarios del vapor utilizado en el proceso.

Objetivos específicos

1. Estado del arte acerca de los generadores de vapor y el uso a nivel mundial y nacional. Aplicación de la termoeconomía y análisis de costos exergéticos en los procesos de uso del vapor.
2. Aplicación de la termografía infrarroja en la cuantificación de las pérdidas por radiación. Costos exergéticos
3. Estudio de la propuesta aplicado al caso de estudio de la caldera pirotubular modelo CMS-C/660 ubicada en la Universidad.

Capítulo 1

CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se desarrolla el marco teórico referencial de la investigación, se abordan aspectos relacionados con las tendencias actuales en el uso de los generadores de vapor y sus principales características. También se realiza un acercamiento a la termoeconomía y los costos exergéticos así como las principales pérdidas energéticas en estos equipos.

I.1 Revisión bibliográfica sobre el estado actual y tendencias en el uso de los generadores de vapor a nivel mundial y nacional.

Las calderas son dispositivos de ingeniería diseñados para generar vapor saturado (vapor a punto de condensarse) debido a una transferencia de calor, proveniente de la transformación de la energía química del combustible mediante la combustión, en energía utilizable (calor), y transferirla al fluido de trabajo (agua en estado líquido), el cual la absorbe y cambia de fase (se convierte en vapor).

El término de caldera ha sido el más utilizado y ambas terminologías se emplean indistintamente. Es común la confusión entre los términos de caldera y generador de vapor, pero la diferencia es que el segundo genera vapor sobrecalentado (vapor seco) y el otro genera vapor saturado (vapor húmedo).

La definición anteriormente expuesta es bien completa ya que establece de forma simple las características generales de los generadores de vapor o caldera, definiendo además algunas similitudes y diferencias entre los tipos de diseños y recoge lo aportado por los principales clásicos de la literatura.

El calor es producido al quemarse combustible, el cual puede ser algún derivado del petróleo, fibra, bagazo de caña, madera, etc. El diseño de las calderas permite que por lo general el combustible se queme por completo ya que una gran parte del calor producido se aprovecha para calentar agua y producir el vapor.

I.1.1 Características y tipos de generadores de vapor o calderas

Cuando se realiza un análisis más detallado de lo que comprenden las características y los tipos de generadores de vapor (Cala Cala, Jazmin Julieth

& Ayala Cárdenas, Fernando, 2005) explica que la instalación comprende no sólo la caldera propiamente dicha, sino que además se emplean componentes principales y accesorios tales como: desareadores, economizadores y chimeneas; sobrecalentadores y recalentadores; quemadores y alimentadores de aire, condensadores, bombas y tanques de alimentación, así como domos, todos ellos forman parte de la estructura de dicho generador y por lo tanto lo caracterizan.

En la caldera propiamente dicha se produce el calentamiento, la evaporación y posiblemente el recalentamiento y sobrecalentamiento del vapor. La caldera puede incluir en su estructura alguna de los componentes citados.

Las tendencias actuales de la construcción de estos equipos están enfocadas a conseguir altos niveles de rendimientos, en tal sentido (Agui, Sara. Prezi, 2015) plantea para un buen rendimiento es preciso que los productos de la combustión estén en contacto con una superficie de tubos de valor apropiado.

Usando tubos de diámetro más pequeño se puede obtener una superficie más grande. Las calderas cuya superficie de caldeo es más grande de 93 m² suelen descansar sobre estructuras construidas con perfiles de hierro debido al peso y al mismo tiempo contribuye a solucionar los problemas que presenten las dilataciones y contracciones.

Cuando abordamos además, la necesidad de la utilización de otros tipos de combustibles no fósiles, que aunados a un eficaz diseño de dichas estructuras permitan una eficiencia en la productividad de estos elementos. Recientemente una investigación realizada en la Universidad de México (Pereira, 2014) por el doctor Juan Carlos Burbano Jaramillo expuso lo siguiente: el combustible proveniente de la molienda (Bagazo), es utilizado en la caldera para generar vapor y satisfacer las necesidades energéticas de la planta mediante un sistema de cogeneración, que entrega energía eléctrica y vapor de diferentes calidades, al proceso de azúcar y alcohol.

Para este paso, el paquete tecnológico que se tiene implementado juega un papel fundamental, ya que su eficiencia térmica da un panorama inicial de eficiencia de todo el ciclo de cogeneración. Usualmente se utilizan calderas

bagaceras de parrillas viajeras o basculantes, las cuales generan vapor sobrecalentado a presiones de entre 2068 – 4481 KPa y temperaturas entre 573,15 – 673,15°K, dicho vapor es conducido en su gran mayoría a turbogeneradores de contrapresión (donde se genera la energía eléctrica), con presiones de escape de 137 KPa para ser suministrado al proceso fabril.

Además se establecen dos tipos de calderas atendiendo a su diseño como:

- Acuotubulares: son aquellas calderas en las que el fluido de trabajo se desplaza por tubos durante su calentamiento. Son las más utilizadas en las centrales termoeléctricas, ya que permiten altas presiones a su salida y tienen gran capacidad de generación.
- Piro-tubulares: en este tipo, el fluido en estado líquido se encuentra en un recipiente atravesado por tubos, por los cuales circulan gases a alta temperatura, producto de un proceso de combustión. El agua se evapora al contacto con los tubos calientes producto a la circulación de los gases de escape.

Debido al objeto de estudio de la presente investigación, se realizará énfasis en el trabajo con calderas piro-tubulares.

I.1.2 Breve acercamiento a las calderas de vapor piro-tubulares.

Las calderas de vapor piro-tubulares se utilizan en la industria hace más de cien años y su desarrollo ha estado directamente relacionado al desarrollo técnico, a medida que se ha ido perfeccionado este último, también lo ha hecho el primero. Las primeras calderas consistían en simples recipientes cilíndricos remachados y hermetizados a los cuales se insertaban las tuberías de suministro de agua y extracción de vapor, el calentamiento se efectuaba externamente mediante la quema de carbón o leña situados debajo de estos.

Con los requerimientos industriales de mayores parámetros de presión y temperatura condicionados por el desarrollo técnico surgió la necesidad de incrementar el área de transferencia y utilizar materiales de construcción más resistentes. (Herrera Bravo, 2015)

El aumento de la superficie de transferencia se logró introduciendo tubos de pequeño diámetro inmersos en la masa de agua, a través de los cuales circulan los gases calientes provenientes de la combustión, transfiriendo a su paso el calor, lo que aumentó la eficiencia del equipo. A medida que aumenta el número de tubos de humo, aumenta el intercambio de calor, lo cual disminuye la temperatura de los humos a la salida y por consiguiente se incrementa el rendimiento. No obstante, tiene la desventaja de que aumenta la caída de presión por ella dos de los gases encareciéndose por esta razón los quemadores y la instalación en general. (Borroto Nordelo & Rubio González, 2010)

I.1.3 Generadores de vapor pirotubulares. Generalidades.

Las calderas son la parte más importante del circuito de vapor, después de todo, es donde se crea el vapor. En el caso de vapor saturado, la caldera proporciona también energía calorífica para producir un cambio de fase de líquido a vapor. Históricamente las salas de calderas de vapor siempre han exigido un alto nivel de vigilancia manual para proporcionar la seguridad necesaria en la planta. La manera actual de pensar exige que estas plantas trabajen eficazmente, y se puede hacer igualando lo más posible el suministro a la demanda.

En algunos casos, esto puede significar que las calderas trabajen continuamente, o en otros, paradas durante intervalos cortos o largos. De cualquier modo la tecnología moderna permite al ingeniero de la planta escoger el régimen de la caldera confiadamente para ajustarse más a su aplicación, consiste más de control capaz de proporcionar el grado requerido de eficacia, integridad y seguridad. (Rubio González, 2010)

Los generadores de vapor pirotubulares en la mayoría de los casos tienen su aplicación en instalaciones de pequeña capacidad y presión. Según (Orlando Herrera Bravo, 2015) estos se diferencian unos de otros, entre otros aspectos, por el número de pases de los gases en el sentido longitudinal, en este caso se clasifican como de dos pasos (el hogar y un pase por los tubos de humos), de

tres pasos (el hogar y dos pases por los tubos de humos), y de cuatro pasos (el hogar y tres pases por los tubos de humos). (Figura I.1)

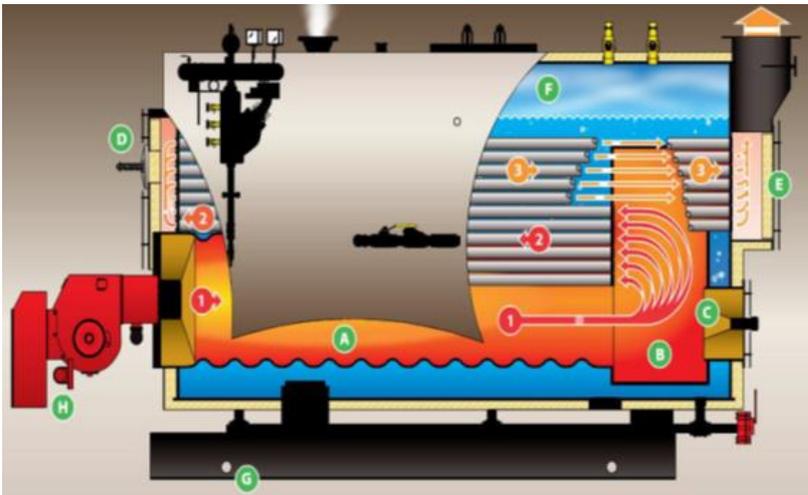


Figura I.1. Componentes de un generador de vapor pirotubular. Fuente: Herrera Bravo (2015)

Donde A: Hogar, B: Caja de Humos posterior, C: Visor, D: Puerta de Explosión, E: Cámara de Humos posterior, F: Cámara de Humos posterior, G: Base, H: Quemador, (1-2-3): Numero de pases

En las calderas de vapor pirotubulares los gases, producto de la combustión, circulan por el interior de los tubos, y en la mayoría de los casos la propia combustión se produce dentro de un tubo de mayor diámetro, de ahí su nombre (tubos de fuego), los cuales se encuentran sumergidos en la masa de agua.

Todo el conjunto se encuentra rodeado por una envoltura o casco exterior rígido. El volumen que ocupa el vapor oscila entre 12 y 14% del volumen total, criterio que siguen las empresas constructoras para el diseño y fabricación.

En la actualidad se fabrican calderas que alcanzan capacidades de hasta 30 t/h de producción de vapor, con presiones de hasta 3 MPa, y poseen una amplia difusión en este intervalo de trabajo dada una serie de ventajas que presentan.

I.2 Principales indicadores de eficiencia y parámetros operacionales en las calderas de vapor

I.2.1 Eficiencia energética

Este parámetro está estrechamente relacionado con ahorro energético y por consiguiente ahorro económico, con la competitividad, seguridad y el cuidado del medio ambiente, por lo que se puede inferir que es un indicador que presenta gran importancia, aún más en este momento cuando el mundo se debate en una gran crisis económica y ambiental. (“Eficiencia energética en la generación y distribución del vapor,” n.d.)(Jinmin, S, 2012)

Eficiencia energética = Energía útil de salida/ Energía de entrada al proceso.

Para monitorear las variaciones de la eficiencia energética se emplean diversos indicadores:

I.2.2 Indicadores termodinámicos

Emplean los elementos de la termodinámica y pueden llegar a ser tan sofisticadas que relacionan la energía actual con la energía empleada en un proceso ideal. Se calculan en términos de funciones de estado y están en un contexto particular del medio, no vinculadas a parámetros del consumidor o con el producto de salida (Waheed, M, 2013)

I.2.3 Rendimiento térmico

Valora el aprovechamiento de la energía de entrada o calor disponible en función del calor útil entregado al agua, es utilizado como parámetro de comparación en calderas y no tiene en cuenta la calidad de la energía, ni la influencia de factores económicos.

Mediante el balance térmico, empleándose el método Directo o Indirecto se pueden obtener los valores de eficiencia de una caldera en porcentaje o por término de evaporación. Los principales factores que limitan el rendimiento de la caldera son:

- La combustión incompleta producto de un pobre coeficiente de exceso de aire, o sea no se suministra el oxígeno suficiente para lograr la oxidación máxima posible.
- Las altas temperaturas de salida de los gases de escape producto de la presencia de incrustaciones y suciedades en las superficies de transferencia que impiden aportarle al agua todo el calor posible.
- Las incrustaciones y corrosión en las superficies de transferencia de calor, producto de un inadecuado tratamiento del agua de alimentar.

I.2.4 Rendimiento instantáneo y útil

Representa el aprovechamiento de la energía de entrada para un intervalo de tiempo dado para el cual se hizo la prueba de balance. Es aquel que se obtiene del conjunto caldera-quemador en un instante determinado y en condiciones de marchas estabilizadas, pero no refleja las variaciones de los parámetros de la caldera en el tiempo, mientras que el rendimiento útil es la relación entre el calor transmitido al fluido calor-portador y el poder calórico inferior en unidad de tiempo. (Energía)

I.2.5 Rendimiento exergético

Este rendimiento permite distinguir los métodos de utilización de los recursos energéticos que son termodinámicamente efectivos de aquellos que no lo son, o lo son en menor grado; se puede emplear para determinar la efectividad de posibles proyectos técnicos destinados a mejorar las prestaciones de sistemas térmicos, comparando los valores de la eficiencia antes y después de que la modificación propuesta se lleve a cabo para ver el grado de mejora obtenido.

El objetivo de un análisis exergético es localizar e identificar las causas de la destrucción o la pérdida de exergía así como cuantificar su magnitud. Esto permitirá centrar la atención en aquellos aspectos de la operación del sistema analizado que ofrecen mayores oportunidades de mejoras. (“Eficiencia energética en la generación y distribución del vapor,” n.d.)(Waheed, M, 2013)

I.2.6 Indicadores económico-termodinámicos

Es un híbrido donde la energía de entrada es medida en unidades termodinámicas o indicadores físico-termodinámicos y la energía de salida en valores monetarios.

Algunos de los indicadores que representan la eficiencia de la caldera en términos económicos son:

- *Costo de producción del vapor.*

CPV = Costo de producción (\$) / Producción de vapor (ton)

Permite evaluar la influencia que tiene la eficiencia de la caldera en la producción del vapor, tomando en cuenta los costos asociados a su obtención. Es sensible a las variaciones en el factor de carga.

- *Costo de producción de energía.*

CPE = Costo de producción (\$) / energía del vapor (kW-h)

Considera parámetros termodinámicos y no unidades físicas, además no evalúa los cambios de calidad.

- *Costo de la exergía.*

CPEx = Costo de producción (\$) / exergía del vapor (kW-h)

Tiene la posibilidad de evaluar las variaciones en la calidad de la energía.

I.3 Pérdidas fundamentales que ocurren en los generadores de vapor.

Debido a la amplia aplicabilidad, utilización y necesidad de los generadores de vapor en el mundo moderno, la explotación de los mismos es muy alta. De allí que dependiendo de la calidad en su fabricación, la sistematicidad en el mantenimiento y el tiempo de vida útil de estos sistemas, existen factores externos que pueden influir en la eficiencia en el funcionamiento de los mismos, produciendo pérdidas dentro de los generadores de vapor, estas pérdidas se pueden clasificar en:

I.3.1 Pérdida por calor sensible q_2

La eficiencia de las calderas pirotubulares oscilan entre un 75 a 85 % siendo afectada fundamentalmente por las pérdidas de calor sensible por los gases, debido a la elevada temperatura de estos y a las pérdidas por radiación. En las calderas de dos pases la temperatura de los gases puede alcanzar valores

superiores a los 300°C debido a la limitada superficie de transferencia de calor disponible y a la no utilización de superficies recuperativas en general.

Si se analizan las pérdidas en calderas pirotubulares en condición de cargas parciales su comportamiento, según resultados de evaluaciones realizadas en unidades de este tipo, se observa que el peso relevante está en la pérdida de calor sensible con los gases que toma valores entre 8 a 30 % y la pérdida por radiación, que a cargas parciales supera el 5 %. Con un aumento de la temperatura de los gases de salida de 12 a 16°C, la pérdida de calor sensible (q_2) aumenta aproximadamente en 1 %.

Es por ello que resulta deseable tener la más baja temperatura posible para los gases de salida. (Jinmin, S, 2012) Existe una diferencia significativa con respecto al comportamiento de las calderas acuotubulares donde las pérdidas por radiación presentan valores menores del 2% y las pérdidas por calor sensible que oscilan entre 8 a 10%.

En las calderas las pérdidas de calor con los gases varían durante los periodos de arranque y estabilización, debido a la variación de la temperatura. Por otra parte, durante la parada se mantiene una pérdida de calor por la chimenea debido a la circulación de aire por convección natural. Sin embargo, un profundo enfriamiento de los gases exige una mayor superficie de transferencia, lo que a su vez provoca una mayor resistencia hidráulica al flujo de gases y por consiguiente un mayor consumo de energía del tiro inducido.

La calidad de un proceso de combustión se mide principalmente por la cifra que reporta su eficiencia. Un parámetro indirecto operacional que de manera rápida brinda e induce cómo marcha la eficiencia de la combustión, es la temperatura que pueden alcanzar los productos de la combustión y la llama en el seno de ese proceso.

Este valor de temperatura y su diferencia respecto al ambiente, marcan el potencial del proceso de transferencia de calor y en la medida que se alcancen valores más altos, más rápido será el calentamiento y más energía se podrá convertir en trabajo. De ahí que medir la temperatura de la combustión es una práctica utilizada, para lo cual existen instrumentos de medición y procedimientos de cálculo teórico.

Partiendo de un mismo combustible podemos aumentar la temperatura de los humos generados, de la llama y con ello la eficiencia energética, bajo las siguientes situaciones:

- a) Si se realiza una combustión completa y no hay presencia de combustible no quemado. Eso quiere decir que se trate de transformar en calor, la mayor cantidad de energía química contenida en el combustible.
- b) En la medida que el exceso de aire que asegura una combustión completa sea menor.
- c) Si se enriquece con oxígeno el aire para la combustión. Esto quiere decir que se reduce el aire en exceso y disminuye proporcionalmente el volumen de nitrógeno (inerte) que se incorpora.
- d) Precalentando el combustible que se quemará, para incorporar más energía y pulverizar mejor las partículas de combustible.
- e) Precalentando el aire primario para la combustión.

I.3.2 Pérdida por convección y radiación q_5

Durante el funcionamiento de la caldera, las superficies exteriores alcanzan unas temperaturas superiores al ambiente, esta diferencia de temperatura genera una transferencia de calor desde las superficies de la misma al ambiente. Esta transferencia de calor es una pérdida que afecta la eficiencia de la caldera. A este tipo de pérdidas generalmente se les denomina como “pérdidas por radiación o q_5 ”. La magnitud de las pérdidas por radiación (q_5), depende fundamentalmente de muchos factores como:

- Las dimensiones de la unidad.
- Capacidad nominal.
- Carga.
- Aislamiento.
- Temperatura de las superficies.
- Temperatura ambiente.
- Velocidad del aire exterior.
- Calor disponible.

Hay métodos para medir la cantidad de calor que se transfiere y se pierde por este concepto a través de cada superficie expuesta:

- a) Las superficies metálicas que componen el recinto donde se desarrolla el proceso de combustión y que una de sus caras da al ambiente exterior, recubiertas o no interna y exteriormente con aislamiento.
- b) Los conductos o canalizaciones metálicas que conducen los gases productos de la combustión hasta la base de la chimenea.
- c) Las paredes exteriores del cuerpo del horno o caldera
- d) Las paredes exteriores del cuerpo del horno o caldera
- e) Conductos principales de salida del fluido energético colocados antes de las válvulas de descarga.

Desde el punto de vista energético lo primero a tener en cuenta es que se favorece la pérdida de calor por radiación, la cual está presente en todo momento durante el trabajo de la caldera, o sea, se pierde calor por esta causa tanto cuando se encuentra parada pero prestando servicio, como cuando esta encendido el quemador. De forma cuantitativa, por su valor, esta es una de las pérdidas que define la eficiencia del generador de vapor.

Por tanto es recomendable mantener un régimen de trabajo continuo y estable, para contribuir a minimizar su efecto y esto se logra acercando la producción de vapor a las necesidades en cada momento de la instalación consumidora. Es inevitable que una parte del calor de la combustión escape a través de las paredes de la caldera sin que sea absorbido por el agua.

Sin embargo, estas pérdidas de calor por radiación pueden ser controladas, por lo que se recomienda: aislar adecuadamente las paredes de la caldera y dar un adecuado mantenimiento a las capas del aislamiento y mantener en buen estado el refractario. La Fig.1.2 muestra una caldera en presencia de buen aislamiento térmico.

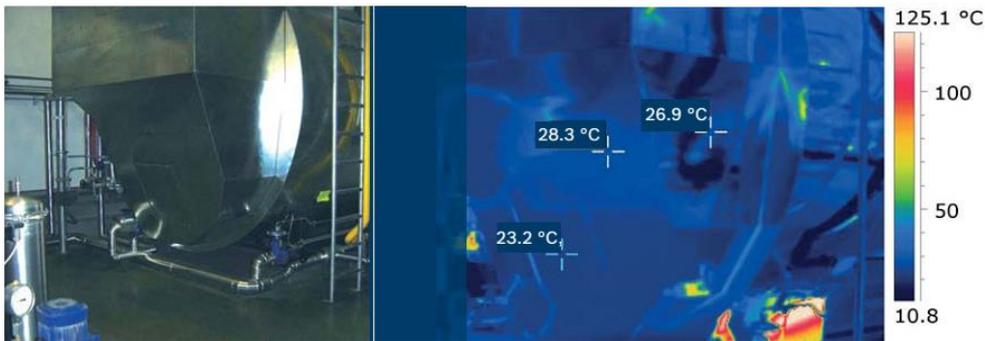


Figura 1.2 Generador de vapor en presencia de buen aislamiento térmico.

I.4 Utilización de generadores de vapor o calderas.

En el presente desarrollado, el auge de estos equipos en el mercado comercial mundial ha llevado a las grandes empresas productoras de calderas a extender sus horas laborales debido al gran auge que estos equipos tienen en la actualidad, el mercado mundial de las calderas domésticas ha alcanzado los 6,1 mil millones de dólares sólo en los Estados Unidos, vendiendo casi 9 millones de unidades durante el 2008. Corea del Sur representa el mercado más importante en volumen pero Alemania es más relevante cuando tomamos en cuenta el valor según (Reyes Chávez, Eugenio, UHO, 2009)

Aunque los fabricantes de calderas estén esparcidos por todas partes del mundo, son sólo algunas naciones las cuales dedican su tiempo en demasía invirtiendo millones de euros al año para fabricar los mejores climatizadores. Japón, Gran Bretaña, Estados Unidos, Francia, Alemania, China, Holanda y Corea del Sur son los participantes más activos de este mercado; la primera nación nombrada se dedica a fabricar calderas que combinen diversas funciones, calefacción y provisión de agua caliente sanitaria; los productos son de muy alta calidad es por eso que la competencia se torna ardua con Japón.

En cuanto a calderas domésticas se refiere las empresas que brindan servicios a estas los realizan de una manera muy especializada, o sea, solo ofrecen una reducida variedad de servicios y se limitan a trabajar con calderas de determinadas marcas, realizando su trabajo enmarcados en pequeñas áreas geográficas; por otra parte existen empresas de gran magnitud que ofrecen una amplia y completa gama de servicios para las calderas industriales de vapor y

de agua caliente, para todas las marcas o tipos de calderas, brindan servicios de reparaciones, mantenimiento, repuestos, reacondicionamiento completo, rediseño, modificación de calderas existentes, peritajes de obra, puesta en funcionamiento, instalación en obra y otros que les demanden.

I.4.1 Estado de la generación de vapor en Cuba y en Cienfuegos.

En 1978 en nuestro país se comienza la fabricación nacional de calderas como una producción estable y con un diseño cubano que era competitivo en aquella etapa, aplicando la estandarización de equipos, componentes y agregados. En 1982 además de la fabricación de calderas de diseño cubano se inició la fabricación de calderas en colaboración con Bulgaria, con lo que en 1984 se alcanzó el record histórico de producción con la cifra de 120 calderas.

Ya en 1986 se decide el paso del Ministerio de la Industria Ligera al Ministerio de la Industria SideroMecánica (SIME), creándose el Grupo Industria I de Refrigeración y Calderas. La renovación de ALASTOR como resultado del enfrentamiento al periodo especial creando una red de talleres municipales y el paso de la estructura de empresa nacional a la estructura de Asociación con 19 empresas, una en cada Provincia y en el Municipio Especial Isla de la Juventud, en el 1999 y la apertura de tareas fuera de la frontera tradicional de la sala de calderas, asumiendo reparaciones y montajes de redes exteriores, de cocinas, lavanderías y otras instalaciones termoenergéticas y la modernización total de los diseños de las calderas que se producen hasta niveles actualizados mundialmente.

En la ciudad de Cienfuegos existen en funcionamiento controladas por la Empresa de Calderas ALASTOR, 18 salas de calderas con equipos de diferentes capacidades de producción de vapor según los consumidores instalados en el momento de su puesta en funcionamiento.

A partir de datos extraídos del autor (David Armando Vidal Moya,2010) en su investigación la provincia de Cienfuegos cuenta con dichas salas de calderas perteneciente a los organismos MINSAP con un total de 5 en los Centros: Hospital Provincial Gustavo Aldereguía Lima, Hospital Pediátrico, la Universidad de Ciencias Médicas; en el caso de estas 3 instituciones se utiliza

en cocina y lavandería; también se integran el Hogar de Ancianos, y el Hospital Mártires de Girón donde se utiliza en cocina, en el caso de todos los centros del MINSAP con excepción de la Universidad de Ciencias Médicas se utilizan además para la esterilización y para aguas calientes sanitarias(ACS).

En el caso de educación se encuentran el MINED y el MES. En ambos caso son utilizadas en el área de la cocina-comedor, en el MINED se emplea en el Tecnológico 5 de Septiembre y en el Comedor Escolar, y en el MES en el Instituto Superior Pedagógico y en la Universidad Carlos Rafael Rodríguez, actualmente integrados y constituidos en la Universidad de Cienfuegos.

Otros organismos que utilizan calderas son el MICONS en el área de cocina en el Comedor de los 500, el MINAL en la Fábrica de Conservas El Faro también en el área de cocina, en Perla del Sur y Amistad Cubano-Húngara, estas dos últimas en funciones de esterilización. El INDER posee una en el Estadio 5 de septiembre en el área de cocina. En otras instituciones utilizadas destacan la Lavandería UNICORNIO, perteneciente al MINTUR; Glucosa y el Combinado Pesquero perteneciente al MINAZ y al MINAL respectivamente y por último la Fábrica de Piensos pertenecientes al MINAGRI.

En el caso de la Universidad de Cienfuegos, cuenta con dos calderas CMS-660, con una producción nominal de 660 kg de vapor por hora, con quemadores BT-50 DSNM, de presión tipo pistola para combustible diesel.

El vapor producido es consumido en la cocina en la que existen funcionando 2 tachos de 300 litros y 1 tacho de 100 litros, con un consumo nominal total de 245 kg de vapor por hora, que al ser afectados por el coeficiente de simultaneidad equivalen a 196 kg/h. Como se aprecia se encuentran sobredimensionadas, lo cual se debe a que se encuentran fuera de servicio varios tachos, la fregadora de bandejas y las mesas calientes. Esta caldera se encuentra sobredimensionada para las condiciones de trabajo actuales razón por la cual la presente investigación enfatiza en el estudio del costo

I.5 Termoeconomía y costos exergéticos en los procesos de uso del vapor.

La ley de conservación de la energía sostiene que la energía nunca desaparece, mientras que la segunda ley de termodinámica sostiene que la energía calórica no puede ser completamente aprovechada mientras interactúe con nuestro sistema atmosférico. Es por ello, que recientemente se ha introducido una nueva magnitud energética, llamada exergía para cuantificar cuanto trabajo se puede aprovechar de una determinada sustancia o flujo de energía con respecto al ambiente natural. La energía es conservada en cualquier tipo de proceso; mientras que la exergía es disipada en procesos espontáneos.

Para hacerle frente a la crisis energética y el calentamiento global a consecuencia de los gases de efecto invernadero, ha surgido desde hace pocas décadas el estudio y aplicación de la termoeconomía, la cual en general trata de identificar el origen de las pérdidas de energía y cuantificarlas mediante la asignación de costos (Coca Gago México, Claudia M, D.F, dic., 2010)

A partir de dicha investigación se puede definir como Termoeconomía a la parte de la termodinámica que une la economía con el segundo principio de la termodinámica, en un sentido amplio y sirve como herramienta para la contabilidad, diagnóstico, mejora, y diseño y optimización de sistemas térmicos. Esta herramienta evalúa los costos, ya sean monetarios (\$/kJ) o puramente energéticos (kJ de recurso/ kJ de producto) para evaluar la eficiencia de los procesos y el costo de sus productos en sistemas con un consumo intensivo de energía.

I.5.1 La teoría del coste exergético.

Según la teoría económica, la contabilidad de costes tiene la función de recoger, medir y organizar la información sobre lo que cuestan las cosas. Los costes implican pérdidas de recursos y por tanto las personas y empresas intentan optimizar los costes de sus productos o servicios. Los gestores de las empresas utilizan los datos de la contabilidad de costes para la toma de decisiones, control y evaluación de las empresas y utilizan los costes

diferenciales para estimar los costes de las diferentes alternativas. Pero, los principales problemas en la contabilidad de costes aparecen cuando por la complejidad o desconocimiento del proceso no sabemos asignar costes indirectos o estructurales a los objetivos de nuestra producción.

En el caso de la contabilidad de costes energéticos la problemática es similar. Debe proporcionar un método racional para la asignación de costes de los productos en términos de recursos naturales y su impacto en el medio ambiente. Debe ser algo más que una técnica para el ahorro de energía y ayudar al diagnóstico, optimización y la síntesis de sistemas energéticos complejos.

El problema fundamental de la asignación de costes energéticos/exergéticos puede ser formulado de la siguiente manera: Dado un sistema para el que hemos definido sus límites y su nivel de agregación, indicando los equipos que lo componen. ¿Cómo obtener el coste todos los flujos que los interrelacionan?

Para construir una teoría de costes es necesario definir tres condiciones básicas:

- La definición de los límites del sistema y de los costes de los recursos de entrada al sistema son siempre relativos al sistema bajo estudio. Por ello la información sobre los costes/precios de los recursos energéticos y económicos puestos a disposición del sistema, y dentro de los límites del análisis, deben ser conocidos.
- El nivel de agregación proporciona un desglose de la irreversibilidad total de un proceso entre sus componentes. La elección del nivel de agregación afecta a las conclusiones del análisis. De hecho, si no disponemos de más información sobre el sistema que la definida por sus niveles de agregación, no podemos pedir al conjunto de los costes obtenidos más información de la que hemos introducido.
- La eficiencia es el indicador de la calidad de los componentes del sistema, donde se localizan las irreversibilidades. Eficiencia e irreversibilidad deben estar relacionadas entre sí y con el resto de variables técnicas y económicas que les afectan.

I.6 Termografía. Análisis de Casos

La termografía es un método de medición pasivo que se basa en el estudio de temperaturas de equipos sin necesidad de interrumpir el proceso productivo. Es una técnica relativamente moderna (su introducción comercial se inició a principios de los años 60), que se fundamenta en la Ley de Stefan Boltzmann, es decir, utiliza la radiación emitida por los cuerpos por estar a temperaturas mayores al cero absoluto, como variable relacionada con la temperatura. (Newpor t,). Diversas han sido las aplicaciones de esta técnica, la cual por ser no invasiva ha encontrado aplicaciones en los campos de la medicina, (Jones, B), en el análisis de circuitos (Dong-Ho, L), como herramienta para el control predictivo (WILLIAM OLARTE C) y para diagnosticar paredes en generadores de vapor. (Pérez-Pérez, Michael).

La identificación de fallas en las paredes de los generadores de vapor resulta una tarea fundamental en la planificación de las labores de mantenimiento de dichos equipos, tanto en paradas de plantas programadas como en no programadas (Pérez & Reyes, 2012). Con la identificación de las fallas previo a las paradas se evitan pérdidas de tiempo en los mantenimientos, ya que con antelación se conoce una serie de información como ubicación y tamaño de deterioros en el material refractario de las paredes.

Existe evidencias del uso de la termografía Infrarroja con fines de inspección en el aislamiento térmico de turbinas a vapor (Basit, 2011), así como en la estimación de las pérdidas por transferencia de calor en las paredes de generadores de vapor (Hurtado & González, 2011). En los estudios revisados se carece de una cuantificación energética de estas pérdidas y la influencia de estas en el rendimiento de la caldera. La Termografía Infrarroja se presenta hoy como una de las tecnologías más utilizadas en la inspección, el diagnóstico y en el monitoreo de condición en general de las máquinas en la industria (Hurtado & González, 2011), capaz de brindar información muy útil de la distribución de los campos de temperaturas de las superficies analizadas (Muñoz & Pencue, 2011; Olarte & Botero, 2011).

Es capaz de entregar resultados que pueden describir un proceso cualitativa y cuantitativamente. En los generadores de vapor los resultados cualitativos pueden ser interpretados como zonas con imperfecciones en el aislamiento

térmico de la superficie. Los cuantitativos ofrecen una escala de temperaturas superficial que pueden ser utilizados para determinar las pérdidas por radiación de cada zona en particular.

Los resultados obtenidos con la termografía se pueden utilizar para a partir de determinar cada uno de los costes exergéticos de los flujos en el proceso.

Conclusiones parciales

A partir de lo anteriormente abordado se llegaron a las siguientes conclusiones parciales:

1. Al realizar un acercamiento al objeto de estudio de la presente investigación a través de la revisión bibliográfica sobre el estado actual y las tendencias en el uso de los generadores de vapor, desde lo general a lo particular iniciando desde presupuestos mundiales hasta llegar a características nacionales se logró definir y vincular las tendencias y estado actual del mundo y las que se utilizan en nuestro país, además de abordar aspectos teóricos sobre la utilización y aplicación de los generadores de vapor.
2. La determinación de las características de los generadores de vapor, realizando énfasis en los pirotubulares permite efectuar un acercamiento más exacto a las peculiaridades de estos sistemas con un conocimiento más pleno de sus especificidades para el posterior estudio del mismo y destacando las ventajas de la utilización de los mismos que evidencian su notable aplicabilidad en el mundo industrial.
3. El determinar los principales indicadores de eficiencia y parámetros operacionales en las calderas de vapor elementos permitió conocerlos parámetros correctos dentro del funcionamiento, así como las formas de rendimiento y los indicadores.
4. El acercamiento a las pérdidas fundamentales que ocurren en los generadores de vapor permite realizar una concepción generalizadora desde el punto de vista teórico sobre cuales son fundamentalmente las que posee la caldera de la Sede Carlos Rafael Rodríguez.
5. El análisis de las características de la termoeconomía y los costos exergéticos, así como la definición de la teoría del coste exergético y el

estudio de la termografía como método permite puntualizar conceptos que estarán integrados desde el punto de vista teórico en el cuerpo de la presente investigación.

Capítulo 2

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente capítulo se determina la metodología por la cual se registrará la presente investigación para arribar a resultados, en él se expone como se desarrollan las mediciones a los generadores de vapor, se declaran los principales instrumentos que se utilizan para realizar dichas mediciones así como los pasos a seguir para realizar el análisis y los métodos utilizados para determinar la eficiencia y los procedimientos para determinar la eficiencia exergética.

II.1 Mediciones en los generadores de vapor

La medición en un diagnóstico energético, es una etapa que, mediante la instrumentación adecuada, experiencia, buen criterio, programación, análisis, coordinación y planeación apropiadas, permite dar seguimiento al flujo y distribución de energía en sus procesos de transformación y establecer un balance en cada etapa y en cualquier tiempo. Aun cuando las aplicaciones, usos finales, fuentes de pérdida y formas de la energía son numerosas, conceptualmente los procesos siguen patrones bien establecidos y sencillos en sus transformaciones de energía química – térmica – mecánica – eléctrica. Para la medición, se parte del conocimiento de los parámetros que intervienen en cada etapa de transformación, de los efectos que el cambio produce en ellos y de los patrones que siguen esos cambios.

La calidad del diagnóstico energético, y por lo tanto la efectividad de las medidas que se recomiendan, dependerá de la precisión, exactitud, forma y condiciones en que las mediciones sean tomadas, por lo que habrá que cuidar la variación entre lecturas y para una serie de lecturas del mismo parámetro y bajo las mismas condiciones, se esperarían valores similares, en caso contrario se deberán analizar buscando el origen de la variación; mediciones de la misma variable y bajo las mismas condiciones deberán mostrar valores con poca variación, en caso contrario las lecturas deberán desecharse y se tendrán que repetir las mediciones hasta obtener la precisión adecuada. Otro aspecto importante es el punto donde se tomen las mediciones. (Aníbal Borroto Nordelo y Ángel Rubio González, 2010)

El equipo de trabajo dará indicaciones al personal que participará en las mediciones y en la prueba. Con el propósito de que todos los datos necesarios para el cálculo sean obtenidos (n.d.) Las pruebas se realizarán de ser posible, al 50% (carga baja), 75% (carga media) y al 100 % (carga máxima de trabajo), de acuerdo al proceso productivo. Cada prueba se realizará durante una hora y se tomarán mediciones cada 15 minutos, las que se registrarán en los formatos correspondientes.

Los valores medidos no deben tener discrepancias mayores del 5% entre sí en cada prueba, pues de lo contrario ésta tendrá que repetirse.

A continuación se resumen una lista de mediciones y los lugares donde se van a efectuar en la tabla 2.1.

Tabla II.1. Lista de mediciones y lugares donde se efectúan

MEDICIÓN	LUGAR
MEDIO AMBIENTE	
1 Temperatura ambiente de bulbo seco	Área donde se localice el sistema de generación y distribución de vapor
2. Temperatura ambiente de bulbo húmedo.	
3. Humedad relativa	
4. Presión barométrica.	
GENERADOR DE VAPOR	
1.Chimenea (Análisis de Gases) Temperatura de Gases de escape	En algún lugar de la tubería, lo más cercano posible al cuerpo de la caldera, para evitar que la medición se vea afectada por posibles infiltraciones de aire.
2. Agua de Alimentación Flujo Temperatura Presión Conductividad	En la instrumentación localizada a la descarga de la bomba de agua de alimentación y en el tanque de agua de alimentación.
3 Vapor Flujo Temperatura Presión	En la instrumentación localizada en el generador de vapor, o en el cabezal de distribución del vapor.
4 Combustible Flujo Temperatura	En el tanque de día, a la descarga de la bomba del combustible o en la caseta de suministro de combustible.
5 Aire Temperatura del aire a quemadores	En cuarto de máquinas. En el ducto de aire o a la salida del

	calentador de aire
TUBERIAS, TANQUES Y DEPOSITOS	
6 Temperatura de superficie Dimensiones del equipo o tubería	Superficie o pared del equipo que se trate, en el cuerpo del equipo que se trate.

Fuente: Elaboración Propia

II.1.1 Instrumentos utilizados para la medición de los principales parámetros operacionales de las calderas.

Los principios básicos que la medición emplea son sencillos y sólidos, su conocimiento es fundamental para interpretar con buen criterio los resultados que se obtengan y el levantamiento en las plantas de industria media; puede requerir algunos días de esfuerzo de buena ingeniería. La selección del equipo apropiado para mediciones y el uso efectivo que se haga de él, son muy importantes en el programa de conservación de energía y deben considerarse en las etapas iniciales de éste. Para la medición de la temperatura ambiente se tomarán en la sala de calderas junto al generador de vapor y se utilizará el medidor digital Testo empleado para medir temperatura ambiente (Herrera Bravo, Orlando; 2015)

Para la medición del flujo de vapor, se empleará el medidor de flujo SITRANS-FU1010 de la compañía SIEMENS, para ello se mide el flujo de agua de alimentar a la caldera y determinándose con ello el flujo de vapor que se produce en la caldera. Para la temperatura del vapor se empleó el pirómetro láser modelo Testo 845 (Figura II.1 a), este instrumento ofrece una alta garantía en los valores de mediciones tomados en un rango de temperaturas de -35 a +950 °C, además el termómetro ofrece un rango de emisividad ajustable de 0,1 a 1.

Por medio del analizador de gases de combustión Testo se deberán tomar muestras en el ducto de escape de gases, para ello se es posible utilizar el analizador de gases marca Testo modelo t340 (Figura II.1b). En el caso de tuberías o tanques, se tomará la medición de temperatura en la superficie del aislamiento. Para obtener los valores de temperatura que existen en la

superficie de la caldera u otros lugares se emplea la cámara termográfica que se muestra en la figura II.1c.



Fig. II.1 De izquierda a derecha a) Pirómetro láser, b) Analizador de gases de la combustión, c) Cámara termográfica testo

II.2 Descripción de la metodología a utilizar para el cálculo exergético de la caldera CMS-C/660 de la Universidad de Cienfuegos, Sede Carlos Rafael Rodríguez.

La primera etapa de la metodología tiene el objetivo de la recolección de datos técnicos necesario para la aplicación del trabajo incluyendo datos propios de la caldera como de otros elementos que conforman el proceso de forma integral de generación de vapor. A continuación, relacionábamos los datos necesarios para la aplicación del estudio técnico incluyendo una breve explicación de cómo seleccionarlos

1. Consumo diesel ($C_{12}H_{26}$) en 1 hora

Es necesario verificar que el proceso de generación de vapor establezca los parámetros de diseños establecidos para evitar falsas mediciones y el consumo de diésel en una hora debe ser verificado en varias sesiones de trabajo de la caldera

2. Poder calorífico del combustible

Para obtener una valoración objetiva de este valor debe ser consultado los suministradores de combustible y recoger datos de varios lotes de entrega del producto corroborando que la media de valor calorífico sea real.

3. Densidad

La densidad de combustible también debe ser tenida en cuenta, para esto se puede muestrear en el lugar de almacenamiento utilizando un densímetro perfectamente certificado, se puede consultar la ficha de entrega del producto este último dato puede ser verificado con los suministradores, otra posibilidad puede ser extraer una muestra y llevarla a laboratorios certificados esta última variante es más efectiva porque disminuye la posibilidad de error de la medición por personas no especializada o el cambio de composición química del producto almacenado.

4. Composición gases a la salida.

En este punto se debe comprobar la composición de los gases a la salida específicamente (CO_2 , O_2 y N_2) también es necesario medir la cantidad de partículas de agua.

5. Tiempo de trabajo del quemador

Es imprescindible hacer varias observaciones para registrar la cantidad de tiempo que necesita el quemador trabajar en una hora para mantener los parámetros adecuados de operación de la caldera, esta medida se toma en una hora de trabajo del proceso observando que su desempeño sea adecuado y el tiempo de trabajo del quemador se registra en minutos.

6. Tiempo de trabajo de la bomba de combustible.

Al igual que el quemador también se toma el tiempo de trabajo en minutos en la bomba de combustible en una hora para mantener los parámetros adecuados de funcionamiento de la caldera.

7. Caudal promedio.

El caudal promedio es medido con un flujómetro ultrasónico, este dato nos permite conocer el volumen de agua con que se alimenta la caldera en una hora

8. Tiempo de trabajo de la bomba de agua de alimentación.

Para una eficiencia adecuada de la caldera es necesario la coordinación y el buen funcionamiento de los equipos que componen el proceso de generación de vapor, por esta razón se analiza el trabajo de la bomba de alimentación de agua, controlando su tiempo de trabajo.

Para poder determinar la eficiencia exergética es necesario hacer el balance energético. Según (Ángel Rubio González, 2010), existen dos métodos para determinar la eficiencia de un generador de vapor a partir de la ecuación de balance térmico: métodos directo e indirecto

II.2.1 Métodos para determinar la eficiencia en generadores de vapor

Partiendo de lo apuntado anteriormente y ya determinados los instrumentos de trabajo, así como la enumeración del procedimiento a seguir para llegar al resultado final de trabajo se determinan los siguientes métodos a utilizar:

II.2.1.1 Método directo

Se basa en relacionar directamente la producción del generador de vapor con el consumo, y determinar la eficiencia como el porcentaje que representa el calor útil (producción) del calor disponible (consumo).

$$\eta = \left[\frac{Q_1}{Q_d * B} \right] * 100 ; \quad \% \tag{2.1}$$

Donde:

Q_1 – Calor útil

Q_d – Calor disponible

B – Consumo de combustible

❖ **Calor Útil**

$$Q_1 = D_v(h_{vs} - h_{aa}) + D_p(h_p - h_{aa}) ; \left(\frac{kJ}{h} \right) \tag{2.2}$$

Donde:

D_v – Producción de vapor real (kg/h).

h_{vs} – Entalpía del vapor saturado.

h_{aa} – Entalpía del agua de alimentar.

D_p – Flujo de la purga.

II.2.1.2 Método indirecto

Este método parte de determinar la suma de las pérdidas térmicas expresadas en porcentaje del calor disponible y luego determinar, indirectamente, la eficiencia como el porcentaje restante.

$$\eta = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6 - q_7, \% \quad (2.3)$$

Donde:

q_2 – Pérdidas de calor sensible en gases de combustión.

q_3 – Pérdidas por combustible no quemado.

q_4 – Pérdida por combustión mecánica.

q_5 – Pérdidas por radiación y convección.

q_6 – Pérdidas por calor físico en el horno

q_7 – Pérdidas por purgas.

Calor disponible:

$$Q_d = Q_i + Q_c + Q_{pc} + Q_{atm} \quad , \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \quad (2.4)$$

Donde:

Q_i – Poder calórico del combustible $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$

Q_c – Calor físico del combustible

Q_{pc} – Calor suministrado por el pre calentador de aire

Q_{atm} – Presencia de atomización mecánica

Pérdida de calor sensible con los gases de salida

$$q_2 = \frac{(I_g - \alpha * I_{af}) \left(1 - \frac{q_4}{100}\right)}{Q_d} * 100 \quad (2.5)$$

Donde:

q_2 - Pérdida de calor sensible con los gases de salida expresada en % de calor disponible.

I_g - Entalpía de los gases de salida, kJ/kg (kJ/m³N).

α_{sal} - Coeficiente de exceso de aire a la salida del generador de vapor.

I_{af} - Entalpía del aire a la temperatura ambiente, kJ/kg (kJ/m³N).

q_4 - Pérdida por combustible no quemado, %.

Q_d -Calor disponible, kJ/kg.

Pérdida de calor por combustión incompleta

Es la pérdida asociada a la presencia de productos de combustión incompleta (CO, H₂, CH₄) en los gases de combustión, y que está provocada por la no entrega del poder calorífico de los mismos durante la reacción de combustión.

$$q_3 = \frac{V_{gs}(126.4 * CO + 108 * H_2 + 358.2 * CH_4)(100 - q_4)}{Q_d} ; \% \quad (2.5)$$

Donde:

q_3 – Pérdida por combustión incompleta expresada en % del calor disponible.

V_{gs} – Volumen de gases secos, $\frac{m^3 N}{kg} \left(\frac{m^3 N}{m^3 N} \right)$.

Q_d – Calor disponible, $\frac{kJ}{kg} \left(\frac{kJ}{m^3 N} \right)$.

CO, H_2, CH_4 – % en volumen de monóxido de Carbono, Hidrógeno y Metano contenido en los gases de escape.

q_4 – Pérdida por combustión mecánica. Para el caso en estudio esta pérdida no está presente

Pérdida de calor por radiación (q_5)

Las pérdidas por radiación en las calderas denominadas q_5 , están directa o indirectamente relacionadas con los niveles de temperaturas, como puede comprobar en las ecuaciones que para su cálculo aparecen en la literatura.

En la bibliografía existen diferentes autores que han planteado diversas expresiones de cálculo para cuantificar la cantidad de calor que pasa al medio según los diferentes procesos de transferencia de calor. En todas existen diferentes variables para caracterizar los procesos de convección y radiación, sin embargo, existe un consenso común en la dependencia directa que existe entre el área, la temperatura superficial, y el valor de estas pérdidas.

Según Nelson Tanquero las pérdidas por radiación y convección al exterior se determinan por:

$$q_5 = \frac{F_{gv}}{B} \left\{ \alpha_c (t_p - t_{af}) + C_o \left[\left(\frac{T_p}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4 \right] \right\} \quad (2.6)$$

Donde:

F_{gv} - Superficie exterior total del generador de vapor, m^2 .

$t_p(T_p)$ - Temperaturas de las paredes exteriores del generador de vapor, °C (K).

$T_a(t_{af})$ - Temperatura del medio circundante, °C (K).

α_c Coeficiente pelicular de transferencia de calor convectivo (kW/m².K).

Co- Coeficiente del cuerpo negro absoluto, (kW/m².K⁴)

B- Flujo de combustible; (kg/s).

Tp- Temperatura de las paredes exteriores; (K).

Ta- Temperatura del medio ambiente; (K).

En la investigación consultada de Anibal Borroto se utiliza la siguiente expresión para calcular las pérdidas por radiación (q₅)

$$q_5 = \frac{1000 \cdot A}{B \cdot Q_d} (\alpha_{conv} + \alpha_{rad}) (T_p - T_a) \quad (2.7)$$

Donde:

Qd- Calor Disponible;(kJ/kg)

B- Flujo de combustible; (kg/s).

A- Área superficial;(m²).

α_{CONV} -Coeficiente de traspaso de calor por convección; (W/m²K).

α_{RAD} - Coeficiente de traspaso de calor por radiación(W/m²K).

Tp -Temperatura de las paredes exteriores; (K).

Ta -Temperatura del medio ambiente; (K).

II.2.2 Eficiencia exergética

La exergía es una propiedad extensiva que caracteriza el máximo trabajo teórico que puede obtenerse de la interacción de dos sistemas que se encuentran en diferentes estados hasta llegar al equilibrio. Se destruye a causa de las irreversibilidades, una vez alcanzado el equilibrio térmico y mecánico entre el sistema y el medio ambiente la exergía será cero.

Para poder determinar la eficiencia exergética es necesario hacer el balance energético que se acaba de describir. Este método tiene una ventaja con respecto al anterior por el hecho de que incluye la irreversibilidad del sistema al tener en cuenta la propiedad entropía, que valora el cambio de las condiciones del sistema en función de las variaciones del proceso termoenergético y la influencia de la temperatura de referencia, es decir la temperatura del medio ambiente que se considera para los cálculos exergéticos.

Con la aplicación de este método se valoran las irreversibilidades internas que tienen lugar en las calderas tanto en el proceso de combustión como en los procesos de transmisión de calor para la formación del vapor.

El cálculo de la exergía de un flujo tiene en cuenta como ya se ha descrito los parámetros de entalpía y entropía del mismo en su estado actual con relación a los que tendría en las condiciones de referencia y la expresión general para calcularla es:

$$e = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (2.8)$$

Donde:

$(h$ y $h_0)$ –Entalpías de la sustancias en el estado considerado y en el ambiente de referencia, respectivamente; $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$.

$(s$ y $s_0)$ –Entropías de la sustancia en el estado considerado y en el ambiente de referencia, respectivamente.; $\left(\frac{kJ}{kg^{\circ}C}\right)$.

T_0 –Temperatura del ambiente de referencia; $^{\circ}C$.

El cálculo del flujo exergético es:

$$E = e * m \quad (2.9)$$

Donde:

e – Exergía; $\frac{kJ}{kg}$

m –Flujo másico de la sustancia; $\frac{kg}{h}$

II.3 Modelos de Costos Exergéticos

En primer lugar, en la literatura y en los ejemplos presentados siempre se parte del supuesto de que se conoce la topología del sistema y la exergía de cada flujo. Esta parte previa es en realidad la que requiere mayor esfuerzo y/o inversión. Porque muchos de estos sistemas se construyen bajo la modalidad

de llave en mano y los detalles técnicos de la construcción del sistema solo son conocidos por el fabricante y además, la información requerida respecto a las variables del sistema requiere de instrumentación y sistemas de control que pueden no estar disponibles o implementados.

En segundo lugar, a partir del conocimiento de la topología se construye la matriz de incidencia y la matriz de costos. La matriz de costos incluye la matriz de incidencia. Con respecto a esto se debe hacer tres comentarios: 1) La matriz de incidencia es estática, mientras que la matriz de costos no es estática, es dinámica puesto que sus valores cambian de acuerdo al punto de operación del sistema y por lo tanto debe recalcularse en igual forma, en forma dinámica. Sabemos que el primer Principio solo discierne como pérdidas, la materia y energía que atraviesa los límites del proceso. Una fricción sin pérdida de energía, una disminución espontánea de temperatura o un proceso de mezcla no son diagnosticados como pérdidas. Para descubrir las pérdidas de calidad de la energía es necesario usar el segundo Principio, y la combinación de ambos permitirá cuantificar y localizar las pérdidas de un proceso.

El coste de producción no tiene por qué formarse allí donde aparecen las irreversibilidades. Aunque, como veremos, el balance de exergía permite localizar las pérdidas, es necesario un profundo análisis adicional del proceso, cuando queramos cuantificar e identificar el origen de las pérdidas en el proceso de producción, lo importante no es la exergía, B , que puede contener un producto funcional, si no su coste, que denotaremos por B^* , y que es igual a su exergía más las irreversibilidades acumuladas a lo largo del proceso para obtener el producto:

$$B^* = B + \sum_{\text{proceso}} I \quad (2.11)$$

Dado que B^* es una magnitud expresada en términos de exergía la llamaremos coste exergético de un producto funcional, y que equivale a la cantidad de exergía necesaria para obtenerlo.

Para construir una teoría de costes es necesario definir tres condiciones básicas:

La definición de los límites del sistema y de los costes de los recursos de entrada al sistema es siempre relativa al sistema bajo estudio. Por ello la información sobre los costes/precios de los recursos energéticos y económicos

puestos a disposición del sistema, y dentro de los límites del análisis, deben ser conocidos.

El nivel de agregación proporciona un desglose de la irreversibilidad total de un proceso entre sus componentes. La elección del nivel de agregación afecta a las conclusiones del análisis. De hecho, si no disponemos de más información sobre el sistema que la definida por su nivel de agregación, no podemos pedir al conjunto de los costes obtenidos más información de la que hemos introducido.

La eficiencia es el indicador de la calidad de los componentes del sistema, donde se localizan las irreversibilidades. Eficiencia e irreversibilidad deben estar relacionadas entre sí y con el resto de variables técnicas y económicas que les afectan.

A partir de las anteriores consideraciones podemos representar un sistema térmico, mediante un grafo dirigido $Q = (V, E)$ que se compone de dos conjuntos finitos:

$V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ el conjunto de los nodos del grafo, que representan a los componentes del sistema, siendo n el número de componentes, y v_0 representa el entorno del sistema.

$E = \{e_1, \dots, e_n\}$ el conjunto de las líneas del grafo, donde cada elemento $e=(u, v)$ es un par ordenado de nodos distintos del grafo Q y que representa a los flujos del sistema que interconectan los componentes del sistema.

A cada flujo del grafo se le puede asociar un peso o magnitud w . La asignación de pesos a un grafo $Q = (V, E)$ vendrá dado por una aplicación $w = w(u, v)$.

Para resolver problemas relacionados con grafos utilizando una computadora, necesitamos considerar la representación de un grafo como estructura de datos. La forma más común de hacer esto consiste en utilizar una matriz de adyacencia A ($n \times n$), definida por:

$$A[u][v] = \begin{cases} w(u,v) & \text{si } u,v \text{ pertenece a } E \\ 0 & \text{si } u,v \text{ no pertenece a } E \end{cases} \quad (2.12)$$

En el caso del análisis termoeconómico de sistemas, asignamos a cada flujo su exergía, de forma que $w(u,v) = B_i$, representa la exergía del flujo i , que sale del componente u , y entra en el componente v .

El coste exergético de un flujo es una propiedad emergente, es decir, no existe como una propiedad termodinámica de un flujo aislado, sino que debe ir asociado a un proceso de producción. Se tiene entonces que determinar el coste no del flujo aislado, sino del conjunto de flujos internos y externos. Además, la consideración de un flujo no depende del equipo físico sino de los límites y nivel de agregación que hemos definido para el sistema.

Dado un sistema cuyos límites, nivel de agregación y propósito han sido definidos, llamaremos coste exergético de un flujo (B^*), fuel (F^*) o producto (P^*) a una magnitud medida en términos de energía, que cumple las condiciones P1-P3, enunciadas a continuación. Llamaremos coste exergético unitario de un flujo, que denotamos k^* , al coste exergético por unidad de exergía requerida, esto es:

$$B^* = k^* * B \quad (2.13)$$

Proposición P1: El costo exergético es una propiedad conservativa.

Proposición P2: Para las componentes múltiples del recurso total de un subsistema, el costo exergético unitario de los flujos de salida debe ser igual al de los flujos de entrada.

Proposición P3a: Si un subsistema tiene un producto total formado por varias componentes, entonces todas ellas tendrán el mismo costo energético unitario.

Proposición P3b: Si una componente del producto tiene varios flujos de salida, se les asignará a todos ellos el mismo costo exergético unitario.

Proposición P4: En ausencia de valoración externa a los flujos de pérdidas, debe asignárseles un costo exergético nulo ya que no tienen utilidad posterior.

Proposición P5: En ausencia de valoración externa, el costo exergético de los flujos de entrada al sistema es igual a su exergía.

Este conjunto de reglas de asignación de costes se conoce como *Proposiciones FP*.

II.3.1 Determinación de los costos exergéticos

De acuerdo con las proposiciones que definen el coste exergético de para cada componente del sistema, el coste de los flujos que constituyen su producto pueden ser obtenidos a partir de las proposiciones P2 - P3, conocidos los costes de los flujos que constituyen el fuel. Dado que los costes de entrada al sistema deben ser conocidos, por la proposición P1, es posible determinar el coste exergético de cada uno de los m flujos, relevantes en el nivel de agregación y estructura productiva consideradas en el análisis.

Para ello será necesario definir m ecuaciones lineales, construidas a partir de las reglas de asignación de costes. La proposición P1 define tantas ecuaciones como flujos de entrada al sistema s_0 . Por otra parte, las proposiciones P2 y P3 definen, para cada componente genérica $-i-$, tantas ecuaciones como número flujos si formen el producto de dicha componente. Dado que cada flujo sale una y solo una vez de cada equipo, o se trata de una entrada al sistema, se tiene que:

$$m = s_0 + \sum_{i=1}^n s_i \quad (2.14)$$

La aplicación de las proposiciones FP a cada una de las componentes del sistema, incluyendo el entorno, permitirá determinar el coste exergético de todos los flujos, mediante la resolución simultánea del conjunto de las m ecuaciones lineales.

Conclusiones Parciales

- 1- Es posible utilizar la termografía como método para evaluar cuantitativa y cualitativamente las pérdidas por radiación en un generador de vapor.
- 2- Utilizando la termografía para determinar las zonas críticas con altas temperaturas y con falta de insulación en la caldera de estudio se determinó por dos métodos distintos de cálculo que las pérdidas por radiación superan el valor recomendado y lo superan hasta en cuatro veces.

Capítulo 3

CAPÍTULO III. CASO DE ESTUDIO

En el capítulo que a continuación se desarrolla, se exponen los resultados finales de este trabajo desarrollando primeramente una caracterización general desde la Universidad, hasta llegar al objeto de estudio de la presente investigación la caldera CMS-C/660 de la Universidad de Cienfuegos, Sede Carlos Rafael Rodríguez. Se aplica la metodología explicada con anterioridad y a partir de los resultados arrojados se muestra la cuantificación de las pérdidas en las zonas críticas, se realiza un análisis energético y exergético del sistema. Además se presentan los resultados de los costos exergéticos y las pérdidas por radiación.

III.1 Descripción del objeto de estudio

La Universidad de Cienfuegos (UCF), surge en 1994, como resultado de la integración desde 1991 de las carreras de Cultura Física y las Pedagógicas. En el año 1998 adopta el nombre de Carlos Rafael Rodríguez y recientemente es sometida a un proceso de reunificación con la Sede Pedagógica adoptando el nombre de universidad de Cienfuegos formada por la sede Conrado Benítez y otra Carlos Rafael Rodríguez el trabajo de diploma se realiza en esta última específicamente en la instalación de generación de vapor que le da servicio a la cocina comedor , esta cocina comedor está diseñada para una capacidad de 1500 comensales y la caldera objeto de estudio tiene el objetivo de suministrar el vapor necesario para el proceso de cocción de alimentos específicamente en marmitas de vapor y fregadora de platos.

III.1.1 Breve descripción de la sala de calderas de la Universidad de Cienfuegos, Sede Carlos Rafael Rodríguez.

El sistema de combustible es el encargado de la preparación, control y suministro del diesel a las calderas, para garantizar la generación de vapor. Desde el área de almacenamiento de diesel, se envía el combustible por una tubería de DN40 ($\text{Ø } 2 \frac{1}{2}$ ") al tanque de almacenamiento diario. De este tanque a través de una tubería de ($\text{Ø } 2 \frac{1}{2}$ "), la cual tiene una válvula y un filtro, llega al cabezal de succión ($\text{Ø } 3$ "), de las bombas de trasiego que levantarán la presión aproximadamente a $1,5 \text{ kgf/cm}^2$. La bomba del quemador, tiene que recibir el

combustible de un circuito de alimentación adecuado, con una bomba de baja presión con una presión regulable entre 0,5 y 2 kg/cm².

El sistema de alimentación de agua se iniciará desde la entrada de agua dura de (Ø 1”), al suavizador a una presión entre 1,7-8 kg/cm². Del suavizador saldrá el agua suave de reposición que se conduce al tanque de agua de alimentar con tubería de 1” y una altura de 3m (3000 mm), al mismo se conduce además el retorno de condensado proveniente de la cocina a una altura de 3700 mm con tubería (Ø 1”). El tanque tendrá un nivel visual, un termómetro, reboso, venteo, drenaje y una toma de salida de agua hacia el banco de bombas para agua de alimentar con una tubería de (Ø 2”) que estará insertada 100 mm dentro del tanque por su parte inferior. Se emplea un banco de tres bombas de forma tal que puedan trabajar indistintamente con cualquiera de las dos calderas que esté trabajando, con solo manipular las válvulas instaladas para tal efecto.

El vapor generado en ambas calderas va hacia el distribuidor de vapor, y tendrá una válvula y un cheque a la salida de ambas calderas. El vapor será distribuido por las válvulas destinadas a ese fin desde el distribuidor de vapor a los diferentes consumidores, es decir en este caso la cocina-comedor con Ø 1 ¼”. El condensado que se recupera en la cocina, se conducirá mediante una tubería principal de Ø 1” al tanque para agua de alimentar a las calderas para aprovechar el calor latente en el calentamiento de esta agua. El generador de vapor objeto de estudio tiene una producción nominal de 660 kg/h y trabaja en un rango de presión de 4 a 6 kg/cm², las características técnicas de diseño de la caldera se relacionan en la Tabla III.1

Tabla III.1 Características técnicas de los generadores de vapor CMS/C-660.

Características	Parámetros
Fabricante	ALASTOR
Modelo	CMS-660
Producción de vapor nominal	660 Kg/h
Volumen de agua	1,90 m ³
Superficie de Calefacción	19,6 m ²
Presión de Diseño	10 kgf/cm ²

Peso de la caldera seca	3,66 T
Peso de la caldera en operación	5,56 T

Fuente: Tomado de Orlando Herrera Bravo (2015)

En la **Figura III.1** se representa un esquema simplificado de la sala de calderas de la Sede Carlos Rafael Rodríguez, Universidad de Cienfuegos

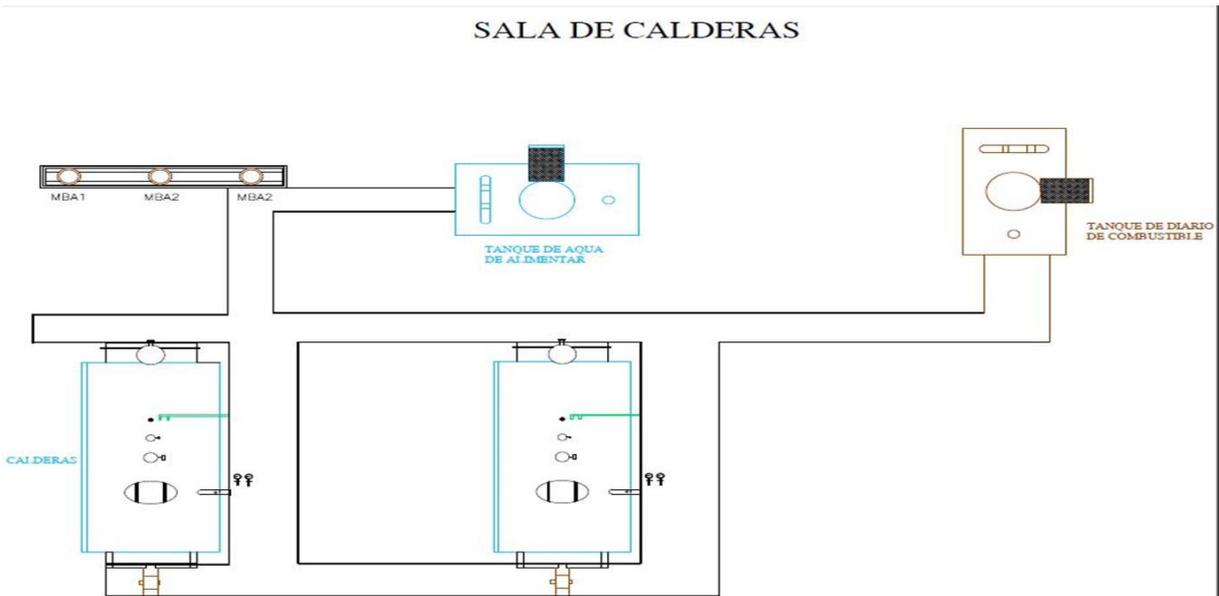


Figura II.1 Esquema simplificado de la Sala de Calderas de Sede Carlos Rafael Rodríguez, Universidad de Cienfuegos

III.2 Aplicación de la metodología para el cálculo exergetico.

Una parte importante de este estudio es la aplicación de la técnica de análisis termográfico en la cuantificación de las pérdidas, en este caso las pérdidas presentes por convección y radiación. Este se aplicó a la caldera pirotubular CMS/C-600 (Figura II.2) que produce vapor para la cocina comedor de una instalación educativa como se precisó anteriormente. Su producción nominal es de 660 kg/h y trabaja en un rango de presión de 4 a 6 kg/cm².



Figura II.2. Caldera pirotubular y sala de caldera

III.2.1 Análisis termográfico.

El análisis termográfico se realizó a la caldera después de esta haber estabilizado su régimen de trabajo en la jornada matutina. Para el estudio se realizaron tres tomas termográficas, una de la parte frontal donde se encuentra el quemador, una lateral y la otra en la parte posterior (Figura III.3). En cada una de las imágenes se señala una zona crítica (ZC).

El criterio utilizado para seleccionar las ZC fue que en las mismas la temperatura fuese 20°C superior al valor esperado de temperatura para una zona bien aislada.

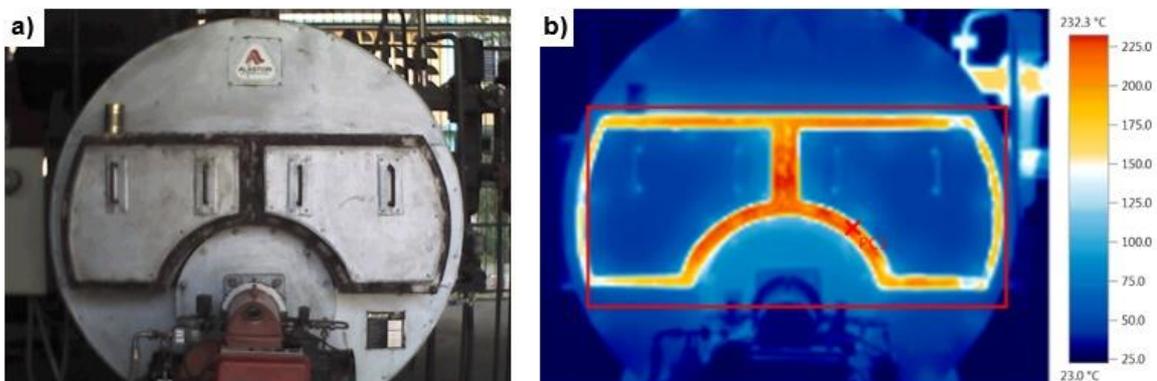


Figura III.3. Vista frontal del generador de vapor. a) imagen real. b) imagen termográfica.

En la figura III.3 se señala la ZC_{frontal} sin aislamiento térmico donde se alcanzan valores de temperatura de hasta 220°C . La misma posee un área de 0.15 m^2 y representa un 8% de la superficie total frontal. Existe falta de uniformidad en la distribución superficial de temperatura con diferencias notables de hasta 135°C .

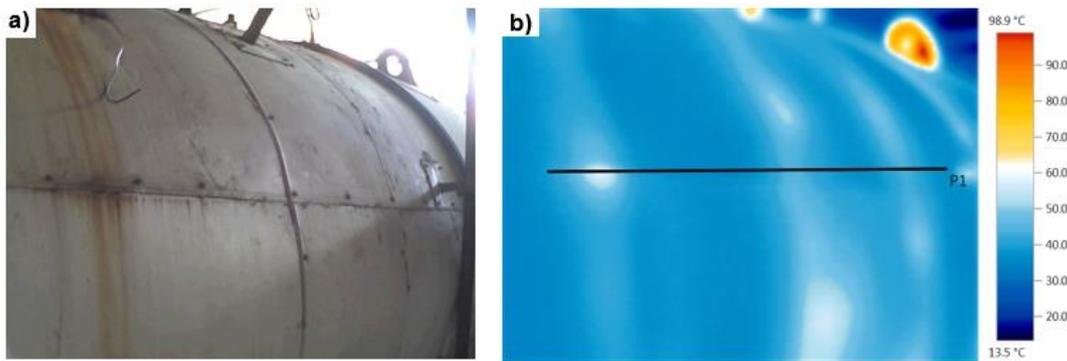


Figura III.4. Vista lateral del generador de vapor. a) imagen real. b) imagen termográfica.

La imagen tomada al lateral de la caldera pone al descubierto dos grandes imperfecciones. Una de ellas es causada por la falta de aislamiento interior en una zona circular como se puede ver en la zona señalada de la figura anterior. El segundo problema se observa en cuatro zonas longitudinales de 5 cm de espesor alrededor de toda la superficie de la caldera.

Una distribución no homogénea de la temperatura en una gran área superficial con diferencias de hasta 25⁰C es la característica fundamental obtenida con la termografía en este plano.

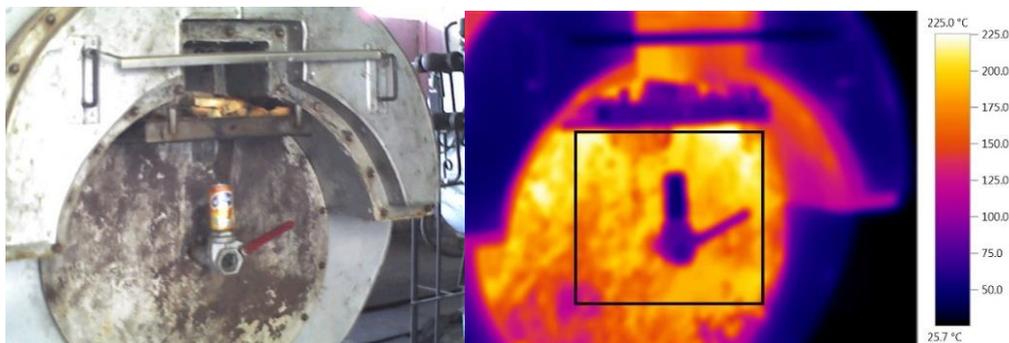


Figura III.5. Vista posterior del generador de vapor. a) imagen real. b) imagen termográfica.

La imagen termográfica de la parte posterior pone al descubierto las mayores pérdidas de calor por radiación y convección de la caldera en estudio. Con un área crítica que llega a alcanzar el 45% de la superficie trasera total y un valor promedio en dicha zona alrededor de los 175⁰C existe un valor tan alto de energía calorífica que hace prácticamente imposible superponer la mano en la

superficie o hasta pasar muy cerca de ella. En la Tabla III.2 se muestra un resumen de las diferentes regiones estudiadas con los valores obtenidos a partir de la termografía.

Tabla III.2.Resumen de valores obtenidos con la termografía en las zonas críticas.

Regiones	Área total(m ²)	Área crítica(m ²)	Temperatura promedio	Temperatura promedio crítica
Cara frontal	1.85	0.15	35	175
Lateral	16.4	0.99	40	62
Cara posterior	1.85	0.83	50	175

Durante la inspección se evidenció la falta de homogeneidad en la distribución de temperatura superficial dada por una posible insuficiente o incorrecta insulación en las paredes del generador. A partir de la inspección termográfica se comprobó entonces con que eficiencia trabajaba este equipo en las condiciones actuales de explotación

Eficiencia del GV. Método indirecto

Aplicando la Ec.2.4 el calor disponible es:

$$Q_d = Q_i + Q_c + Q_{pc} + Q_{atm}$$

Donde

$$Q_c = 74,64 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{pc} = 0 - \text{No hay precalentador de aire con vapor}$$

$$Q_{atm} = 0 - \text{No existen quemadores de atomización mecánica}$$

$$Q_d = Q_i + Q_c ; \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$$

$$Q_d = 43000,01 + 74,64$$

$$Q_d = 43074,65 \text{ kJ/kg}$$

❖ Pérdida por incombustión mecánica

$q_4 = 0\%$; para combustibles líquidos.

Pérdida de calor sensible con los gases de salida

Aplicando la Ec.2.5 donde

$$I_g = 5631,59 \text{ kJ/kg}$$

$$\alpha = 2,044$$

$$I_{af} = 740,91 \text{ kJ/kg}$$

$$q_2 = \frac{(I_g - \alpha * I_{af}) \left(1 - \frac{q_4}{100}\right)}{Q_d} * 100 = 9,56\%$$

Pérdida de calor por combustión incompleta

Aplicando la Ec.2.6 donde

$$V_{gs} = 1,61 + 8,4 + (2,044 - 1)10,622 = 21,099 \frac{\text{m}^3\text{N}}{\text{kg}}$$

$$q_3 = 0,035 \%$$

III.2.2 Cuantificación de las pérdidas en las zonas críticas.

Según las expresiones 2.6 y 2.7 se calcularon inicialmente las pérdidas de calor que se producen por cada una de las zonas señaladas como críticas. El desarrollo de las expresiones para la parte posterior de la caldera se muestra a continuación.

Según la expresión propuesta por tanquero el cálculo de la pérdida por radiación a partir de la Ec 2.6 queda:

$$q_5 = \frac{0,81\text{m}^2}{0,00673 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} \left\{ 12 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} + 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} \left[\left(\frac{448 \text{ K}}{100} \right)^4 - \left(\frac{300,5 \text{ K}}{100} \right)^4 \right] \right\}$$

$$q_5 = 10,13 \%$$

Según la expresión 2.7 propuesta por Borroto y a partir de la determinación del coeficiente de radiación α el cálculo de la pérdida por radiación queda:

$$\alpha_{\text{rad}} = E\sigma(T_s + T_a)(T_s^2 + T_a^2)$$

$$\alpha_{\text{rad}} = 0,91 * 5,67. 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} (448 \text{ K} + 300,5)(448 \text{ K})^2 + (300,5\text{K})^2$$

$$q_5 = \frac{1000 * 0,81\text{m}^2}{0,00673 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 43\ 074,65 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \left(12 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} + 11,23 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right) (448 \text{ K} - 300,5 \text{ K})$$

$$q_5 = 9,81 \%$$

En la Tabla III.3 se resumen los principales valores obtenidos con la termografía en las zonas con deficiencias en el aislamiento.

Tabla III.3 Pérdidas que se producen por las zonas críticas

Método de cálculo	Zona	% de pérdida por radiación	Total
Nelson tanquero (Ec 2.6)	1	1,70	q₅=14.7 %
	2	2,90	
	3	10.1	
Aníbal Borroto (Ec 2.7)	1	1,65	q₅=13.7 %
	2	2,25	
	3	9.84	

III.3 Análisis energético y exergético del sistema.

Para llevar a cabo una evaluación energética y exergética a un sistema industrial es necesario definir el modelo que se va a analizar, en la Figura III.6se muestra el modelo de la instalación de estudio.

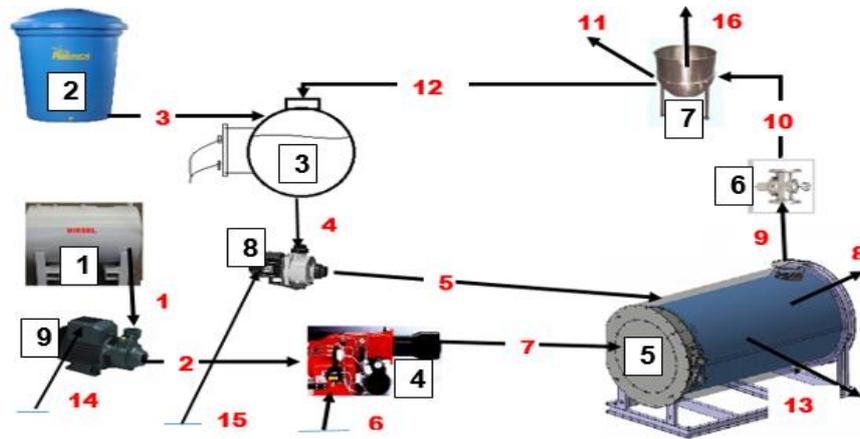


Figura III.6: Modelo de la instalación a evaluar.

En la Tabla III.4 aparecen representados los equipos y flujos de la instalación, donde en algunos de los casos se conocen las funciones de estado (Entalpía y Entropía), pero en otros es necesario la determinación a partir de los balances de masa y energía

Tabla III.4. Equipos y Flujos de la instalación a evaluar

Equipos		Flujos	
1	Tanque de combustible	1	Flujo combustible salida del tanque
2	Tanque reposición de agua	2	Flujo de combustible entrada al quemador
3	Tanque de agua alimentador	3	Flujo de agua a la salida de la fuente
4	Quemador	4	Flujo de agua entrada a la bomba
5	Generador de vapor	5	Flujo de agua entrada al generador
6	Reductora presión	6	Flujo de aire entrada al hogar
7	Marmitas	7	Gases combustión
8	Bomba agua alimentador	8	Gases de escape chimenea
9	Bomba combustible	9	Vapor saturado salida
		10	Vapor consumo tachos
		11	Escape vapor
		12	Retorno de condensado
		13	Flujo de calor por radiación y convección
		14	Trabajo de la bomba combustible
		15	Trabajo de la bomba de agua alimentador
		16	Calor transferido a la marmita

III.3.1 Datos de la instalación y Matriz de incidencia.

Para determinar todos los parámetros de energía y masa de cada uno de los estados en el sistema se realizaron balances de masa y de energía según las expresiones declaradas en el Anexo 2, donde se determinaron algunas de las propiedades de estados termodinámicos. La Tabla III.5 muestra para los 12 estados los valores de flujo másico, presión, temperatura, las funciones de estado entalpía y entropía así como los resultados del cálculo de la exergía

Tabla III.5. Estado termodinámico de todos los flujos presentes en el sistema.

Estados		Flujosmasa (kg/s)	Presión (kPa)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kgK)	Exergía (kJ/kg)
1	Flujo combustible salida del tanque	0.21	101.30	30.00	42958.91	0.00	42963.97
2	Flujo de combustible entrada al hogar	0.21	196.00	30.00	42959.43	0.00	42964.49
3	Flujo de agua a la salida de la fuente	0.47	101.30	31.00	129.91	0.44	3.86
4	Flujo de agua entrada a la bomba	4.70	61.20	86.50	388.33	1.15	50.69
5	Flujo de agua entrada al generador	4.70	588.00	85.00	388.44	1.15	50.81
6	Flujo de aire entrada al hogar	3.67	101.30	32.00	86.30	0.02	84.11
7	Gases combustión	3.88		1842.50	2406.27	1.14	2072.40
8	Gases de escape chimenea	3.88	101.30	181.50	171.53	0.38	64.17
9	Vapor saturado salida	4.70	426.00	153.80	2214.84	6.80	193.50
10	Vapor consumo tachos	4.70	294.00	132.80	2214.84	6.82	187.54
11	Escape vapor	0.47	294.00	132.80	2214.84	6.71	220.32
12	Retorno de condensado	4.23	101.30	99.00	417.04	1.20	64.51

Fuente: Elaboración Propia

La confección de la Matriz de incidencia se basa en el sentido de los flujos dentro del sistema de análisis, es decir la consideración se basa en tomar cada flujo que entra a un equipo como positivo (1) y todo aquel que sale negativo (-1). La Tabla III.5 representa la confección de la Matriz de incidencia **A** en función del esquema de la Instalación presentado en el capítulo II Figura II.2

Tabla III.6 Matriz de incidencia del sistema.

Matriz incidencia A																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
4	0	1	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	1	-1	-1	0	0	0	-1	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	-1
8	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
9	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
EAR	0	0	0	0	0	-1	0	1	0	0	1	0	1	-1	-1	1

A partir de la elaboración de la Matriz de incidencia es necesaria la confección de la matriz que incluye el vector masa o flujo másico, así como los vectores energía y exergía los cuales se obtuvieron a partir del producto del flujo másico por la entalpía y la exergía calculada. Esta matriz está representada en el Anexo 3. La multiplicación de las dos matrices fue a partir del Software Mathcad 14 representada en la **Tabla III.6**

Tabla III.7 Matriz incidencia x Flujo másico, Energía y Exergía.

A*Masa	AxEnergía	Bd (AxExergía)	%Bd
-0.21022	-9030.92	-9031.981	
-0.46987	-61.04	-1.814	
0	0.00	36.406	0,4
0	0.00	1290.065	14,34
0	0.00	7131.311	79,32
0	0.00	28.004	0,31
0	0.00	504.908	5,61
0	0.00	0.000	2,04E-16
0	0.00	0.000	1,16E-14
Total		8 990,7	

La caldera se presenta como el equipo al cual más atención prestar ya que es el que más exergía destruye con un 80% aproximadamente, seguido del quemador con un 14%.

Como se puede observar en la multiplicación de la matriz de incidencia por los vectores de masa y energía no se obtienen las dos primeras filas con valor cero como debería ser. Tal situación responde a que de las fuentes de agua y combustible se está proporcionando masa y energía para desarrollar el proceso, por lo que los balance de energía y masa nunca darán cero a menos que el límite de nuestro sistema se amplíe e incluya las fuentes anteriores a esta.

III.3.2 Costos exergéticos.

El costo exergético es un concepto relativo y propio del sistema analizado, pero de gran importancia práctica ya que la exergía de un sistema no puede disminuirse, pero sí es el caso del costo exergético. A partir de la consulta de (Valero, A; 1989) se hace evidente dentro de esta investigación como ha desarrollado un procedimiento racional de asignación de costos basado únicamente en la termodinámica. Las proposiciones son las siguientes:

Proposición 1: El costo exergético es una propiedad conservativa.

Proposición 2: Para las componentes múltiples del recurso total de un subsistema, el costo exergético unitario de los flujos de salida debe ser igual al de los flujos de entrada.

Proposición 3a: Si un subsistema tiene un producto total formado por varias componentes, entonces todas ellas tendrán el mismo costo energético unitario.

Proposición 3b: Si una componente del producto tiene varios flujos de salida, se le asignará a todos ellos el mismo costo exergético unitario.

Proposición 4: En ausencia de valoración externa a los flujos de pérdidas, debe asignárseles un costo exergético nulo ya que no tienen utilidad posterior.

Proposición 5: En ausencia de valoración externa, el costo exergético de los flujos de entrada al sistema es igual a su exergía.

Para nuestro caso de estudio se utilizaron las siguientes proposiciones mostrada en la Tabla III.7;

Tabla III.7 Proposiciones para la asignación de costos

Ecuación 1	$B_{13}^* =$	0	Proposición 4
Ecuación 2	$B_8^* =$	0	
Ecuación 3	$B_{11}^* =$	0	
Ecuación 4	B_6^*	309.0700509	Proposición 3a
Ecuación 5	B_4^*	238.1948408	Proposición 5
Ecuación 6	B_{15}^*	0.532013735	Proposición 5
Ecuación 7	B_{14}^*	0.110116279	Proposición 5

Como resultado de desarrollar la metodología planteada por (Valero, A; 1989) se obtuvieron los siguientes resultados del costo exergético unitario k presentados en la Tabla III.8

Tabla III.8 Costos exergéticos unitarios k

Flujos	Vector(B^*)	K
1	9031.981459	1
2	9032.091575	1
3	0	0
4	238.1948408	1
5	238.7268545	1
6	0	0
7	9032.091575	1.1218462
8	0	0
9	9270.81843	10.196408
10	9270.81843	10.520442
11	9034.437301	87.268673
12	236.3811292	0.8665413
13	0	0
14	0.110116279	1

15	0.532013735	1
16	0	0

III.3.3 Costos exergéticos y la pérdidas por radiación.

Como es de suponer existe una vinculación directa entre los costos exergéticos de producción de vapor y las pérdidas que tienen lugar en el sistema. Tal situación está dada en que a los flujos de calor que se pierden se les asigna un costo exergético nulo, y si mayor es la pérdida mayor será el costo unitario del producto deseado. En la Tabla III.9 se muestra el valor de costo unitario de producción de vapor para diferentes porcentajes de pérdidas por radiación. Para el caso de la caldera de estudio vemos que las pérdidas por radiación son tan altas que el coste unitario excede en 200 veces el costo del diésel procesado.

Tabla III.9 Valores del costo unitario de producción de vapor para diferentes porcentajes de pérdidas por radiación

Flujos	k	3%	5%	8%	10%
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1
3	0	0	0	0	0
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1
6	0	0	0	0	0
7	1.12	1.12	1.13	1.13	1.14
8	0	0	0	0	0
9	10.20	12.72	17.11	35.47	124.59
101	10.52	13.23	18.04	39.73	199.78
11	87.27	105.69	135.28	233.21	450.76
12	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
13	0	0	0	0	0
14	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1
16	0	0	0	0	0

En el gráfico siguiente se muestra más claramente el comportamiento indicado anteriormente.

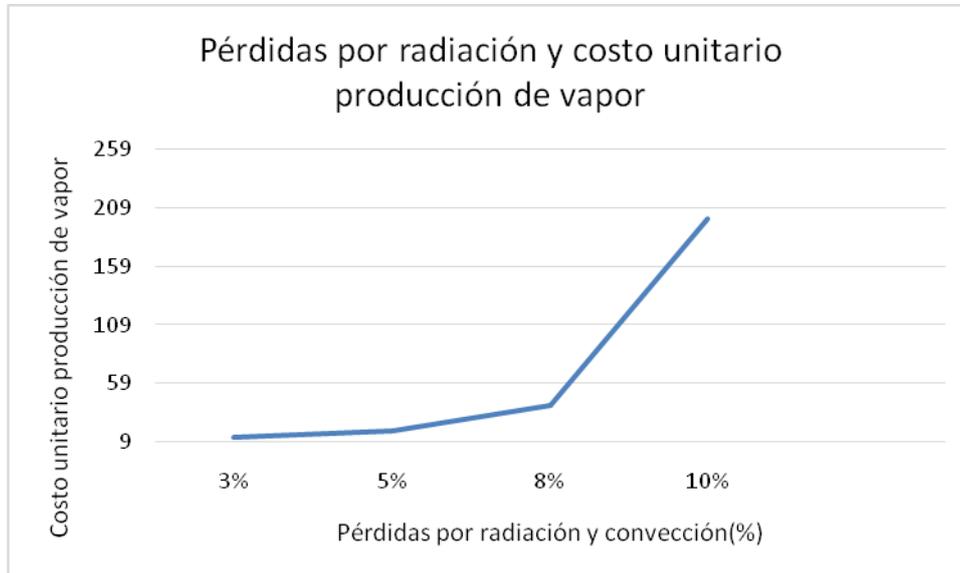


Figura 6. Pérdidas por radiación y costo unitario producción de vapor

Conclusiones parciales

- 1- Como resultado del análisis exergético se puede observar cómo se destruye la exergía en el proceso y cuáles son los equipos a los cuales hay que prestar mayor atención por la cantidad que destruyen. En el proceso se destruye un total de 8990kW, del cual un 79% lo destruye la caldera, seguido de un 14 % que lo destruye el quemador. Se recomienda hacer énfasis en el sistema caldera- quemador y dejar los demás equipos dado que entre todos solo destruyen cerca del 7% del total.
- 2- El análisis del costo exergético se obtuvo que el flujo más relevante es el producto mismo del proceso, o sea, el vapor para las marmitas. Para el caso en que las pérdidas por radiación se encuentra en valores aceptables el costo unitario del vapor es de 10, esto significa que para obtener una unidad de exergía útil de ese fluido, tengo que gastar 10 unidades de exergía, lo cual representa un 9% de eficiencia exergética. Sin embargo, las pérdidas actuales por radiación se encuentran por

encima del 10%, lo cual se traduce en un costo unitario de producción del vapor alrededor de 200.

- 3- A medida que se incrementa el valor de las pérdidas por radiación se puede observar un crecimiento vertiginoso del costo exergético unitario de la producción de vapor.

Conclusiones

Conclusiones Generales

1. Se profundizó en las principales características y principio de funcionamiento de las calderas pirotubulares y en particular de la caldera perteneciente a la Universidad, así como la importancia de las mayores pérdidas en los generadores, como son la pérdida por calor sensible con los gases de escape (q_2) y la pérdida por radiación (q_5).
2. El análisis de las características de la termoeconomía y los costos exergéticos, así como la definición de la teoría del coste exergético y el estudio de la termografía como método permite puntualizar conceptos que estarán integrados desde el punto de vista teórico en el cuerpo de la presente investigación.
3. La aplicación de la termografía a los generadores de vapor permitió el diagnóstico de las zonas donde existen mayores problemas de aislamiento térmico presentando pérdidas por radiación. Estas pérdidas tienen el mayor peso en el resultado de la baja eficiencia de la caldera y esto se debe a las zonas críticas que se encuentran con falta de aislamiento en la superficie de la misma.
4. Utilizando la termografía para determinar las zonas críticas con altas temperaturas y con falta de insulación en la caldera de estudio se determinó por dos métodos distintos de cálculo que las pérdidas por radiación superan el valor recomendado.
5. Como resultado del análisis exergético se puede observar cómo se destruye la exergía en el proceso y cuáles son los equipos a los cuales hay que prestar mayor atención por la cantidad que destruyen. En el proceso se destruye un total de 8990kW, del cual un 79% lo destruye la caldera, seguido de un 14 % que lo destruye el quemador. Se recomienda hacer énfasis en el sistema caldera- quemador y dejar los demás equipos dado que entre todos solo destruyen cerca del 7% del total.
6. El análisis del costo exergético se obtuvo que el flujo más relevante es el producto mismo del proceso, o sea, el vapor para las marmitas. Para el caso en que las pérdidas por radiación se encuentra en valores

aceptables el costo unitario del vapor es de 10, esto significa que para obtener una unidad de exergía útil de ese fluido, tengo que gastar 10 unidades de exergía, lo cual representa un 9% de eficiencia exergética. Sin embargo, las pérdidas actuales por radiación se encuentran por encima del 10%, lo cual se traduce en un costo unitario de producción del vapor alrededor de 200.

7. A medida que se incrementa el valor de las pérdidas por radiación se puede observar un crecimiento vertiginoso del costo exergético unitario de la producción de vapor.

Recomendaciones

Recomendaciones

- 1- Purgar la caldera diariamente antes de su primer arranque para evitar el acumulamiento de incrustaciones y así aumentar la razón de evaporación y evitar mantenimientos a corto plazo
- 2- Reparar las zonas de aislamiento térmico de la caldera que se encuentran en mal estado, las cuales fueron observadas en el análisis termográfico realizado
- 3- Proponer en futuras evaluaciones el análisis los costos ejerjoeconómicos de la instalación.

Bibliografia

Bibliografía

- Barriga, A (s.f.). Auditoria Energetica de un Sistema de Vapor.
- Basit, A. *Implementation of Infrared Thermography in Power Utilities Sudan*
Recuperado a partir de: <http://www.ndt.net/article/afndt2008/papers/tahir.pdf>
- Basit, A. (s.f.). Implementation of Infrared Thermography in Power Utilities Sudan.
Retrieved from www.ndt.net/article/afndt2008
- Botero A, O., W. (2011). Aplicación de la termografía en el mantenimiento predictivo. Retrieved from <http://www.google.com.cu/url?url=http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4725625.pdf&rct=j&frm=1&q=&esrc=s&sa=U&ei=6qFQVaHTKaqsATjrYHqDQ&ved=0CBUQFiAA&usq=AFQjCNETY6iFyJOiNmFKJ1Z6mMCXgHLqWw>
- Campos Avella, J. C. (s.f.). Eficiencia Energética en la Distribución y Generación de Vapor.
- Cengel, Y. & Boles, M. (2009). *Termodinámica* (6ta ed.). México: Mc. Graw Hill.
- Cengel. (2011). *Termodinámica* (7th ed.). McGraw-Hill.
- Eficiencia Energética en la Generación y Distribución del Vapor. (s.f.). Retrieved from <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/vapor.pdf>
- González, J & Hurtado, M. (2011). Análisis Termográfico de pérdidas de calor en aislamiento de calderas. Retrieved from objetos.univalle.edu.co/files/Analisis_termografico_de_perdidas_de_calor_en_aislamiento_de_calderas.pdf
- Hurtado, M. & González, J.: *Análisis Termográfico de pérdidas de calor en aislamiento de calderas*. Colombia: [en línea], Retrieved from: http://objetos.univalle.edu.co/files/Analisis_termografico_de_perdidas_de_calor_en_aislamiento_de_calderas.pdf
- Incropera, F.P. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (Vol. 1).
- Incropera, F. & Witt, D (1999.): *Fundamentals of heat and mass transfer*. México DF: Prentice Hall.
- International Standard Organization. (2003): *Condition monitoring and diagnostics of machines - General guidelines on data interpretation and diagnostics techniques*. ISO 13 379:2003 (E).
- International Standard Organization (2008): *Condition monitoring and diagnostics of machines-Thermography. Part 1: General procedures*. ISO 18434-1:2008 (E).

- Jinmin, S, L., Tai & Linghao, Y. (2012). A Research of Simplified Method in Boiler Efficiency Test. *Elsevier*, 17, 1007–1013.
- Lopez, S. (2007). *Implantación de un Programa de Inspección de Termografía en Centrales de Ciclo Combinado*. (Tesis de Grado). Universidad Pontificia Comillas Madrid Recuperado a partir de: <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/466e379adde8a.pdf>
- M, K., & Gvozdenac, D. (n.d.). Use of Neural Networks for modeling and predicting boiler's operating performance. *Elsevier*, 45, 304–311.
- Marmita a Vapor. (s.f.). Retrieved from www.citalsa.com
- Muñoz-Potosí, A. & Pencue-Fierro, L. (2009): Análisis Termográficos para la Determinación de Puntos Críticos en Equipos Mecánicos y Eléctricos. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas.*, 7, (1), 1-5. Recuperado a partir de : <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=90312171013>
- Olarte, W. & Botero, M. (2010). “Técnicas de Mantenimiento Predictivo Utilizadas en la Industria”. *Scientia Et Technica*, XVI(45), 223-226.
- Pencue-Fierro, A. M.-P. (2011). Análisis Termográficos para la Determinación de Puntos Críticos en Equipos Mecánicos y Eléctricos. Retrieved from redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=90312171013
- Pérez, M. & Hernández, J. (2012). La Termografía como herramienta para reducir los tiempos de reparación de las paredes de los generadores de vapor. En: XXXIII Convención Panamericana de Ingenierías. (UPADI). La Habana.
- Pérez, M. & Reyez, H. (2012) Experiencias en el diagnóstico termográfico de paredes de generadores de vapor BKZ-340-140-29/M. En: 16 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, La Habana, Cuba.
- Pérez. (2013). Experiencias en el diagnóstico termográfico de paredes de generadores de vapor BKZ-340-140-29/M, 23(4), 69–75.
- Pérez-Zapico, E. & Duffus-Scott, A.: “Observación y cuantificación de defectos en soldaduras a través del procesamiento digital de imágenes termográficas”. *Ingeniería Mecánica*, 16(3): 246-256, 2013.
- Portales Reyes, O. (2012). Cálculo de los índices de consumo de vapor en la planta de llenado, liofilización y envase y otros servicios del Centro Nacional de Biopreparados.

- Ricardo Castillo B., C. V. (s.f.). Estudio de la Correlación entre las Termografías y espesor de los revestimientos refractarios en hornos y convertidores de cobre de la fundición y refinería ENAMI.
- Rubio González, A M. (s.f.). *Generadores de vapor. Funcionamiento y explotación*.
- Rubio González, A M. (2010). *Combustión y generación de vapor*. La Habana: Félix Varela.
- Spirax Sarco. (s.f.-e). Guía de referencia técnica. Retrieved from <http://www.spiraxsarco.com/ar>
- Téllez, M. (2007): *Propuesta para mejorar la Confiabilidad Operacional en la Central Termoelectrica "Máximo Gómez". Mariel*. (Tesis en opción al título de Master en Ingeniería Mecánica) Centro de Estudios en Ingeniería de Mantenimiento. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana. Recuperado a partir de: <http://biblioteca.cujae.edu.cu/Tesis/Maestria/Maestria140.pdf>
- Valero, A., et al. (1989). *Teoría del coste exergetico, conceptos básicos*. España: Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza.
- Vidal Moya, D A, M. J. L. R. (2014). *Funcionamiento y pérdidas en calderas pirotubulares. Estudios de casos*. Cienfuegos.
- Waheed, M, O., I. (2013). Methodology for the physical and chemical exergetic analysis of steam boilers. *Elsevier*, 53(1), 153–164.
- WILCOX. (2005). *Steam, its generation and use* (41st ed.). Ohio,U.S.A.

Anexos

Anexo 1: Mediciones realizadas en el generador de vapor bajo régimen de carga estable.

Parámetros	Resultados	Unidad de medida
Consumo de diésel (C ₁₂ H ₂) en 1 hora	44.00	Litros
Poder calorífico del combustible	10277.25	kcal/kg
Densidad	860.00	kg/m ³
Composición gases salida		
CO ₂	11.00	%
O ₂	2.00	%
N ₂	75.00	%
H ₂ O	12.00	%
Tiempo trabajo quemador medido en minutos	50.00	Minutos
tiempo trabajo bomba combustible	3.00	minutos
Caudal promedio medido con un flujómetro ultrasónico	1.99	m ³ /h
Tiempo de trabajo de las bombas de agua de alimentación	7.00	Minutos
Cp. agua líquida a presión atmosférica	4.17	kJ/kgK
Cp. del aire a la presión atmosférica	1.01	kJ/kgK
Composición del diésel		
C	86.00	%
S	0.80	%
H	11.10	%
volumen específico del agua(v)	0.00	m ³ /kg
densidad del agua a 44 grados Celsius	990.20	kg/m ³
volumen específico del diésel (Vd.)	0.00	m ³ /kg
humedad relativa del aire	0.80	
Temperatura del aire	32.00	°C
Temperatura de referencia	25.00	°C
Cp. aire(25-200 grados Celsius)	1.02	kJ/kgK
Cp. CO ₂ a 181.5 grados Celsius	0.98	kJ/kgK
Cp. H ₂ O a 181.5 grados Celsius	1.94	kJ/kgK
Cp. O ₂ a 181.5 grados Celsius	0.96	kJ/kgK
Cp. N ₂ a 181.5 grados Celsius	1.05	kJ/kgK
Fracción molar CO ₂	484.00	0.17
Fracción molar H ₂ O	225.00	0.08
Fracción molar N ₂	1932.00	0.67
Fracción molar O ₂	240.00	0.08
Total	2881.00	1.00
Diferencia temperatura gases escape y ambiente	156.00	°C
Cp mezcla gases escape	1.10	kJ/kgK
Pérdidas por radiación	100.00	kW

Anexo 2: Expresiones para el balance de energía por equipos.

Equipos	Expresiones
Bomba de combustible	$m_1 h_1 + W_{\text{bomba}} = m_2 h_2$
Tanque de agua de alimentación	$m_3 h_3 + m_{12} h_{12} = m_4 h_4$
Bomba de agua de alimentar	$m_4 h_4 + W_{\text{bomba}} = m_5 h_5$
Quemador	$m_2 h_2 + m_6 h_6 = m_7 h_7$
Caldera	$m_5 h_5 + m_7 h_7 = m_9 h_9 + m_8 h_8 + \text{Pérdidas radiación}$
Reductora de presión	$m_9 h_9 = m_{10} h_{10}$
Marmita de vapor	$m_{10} h_{10} = m_{11} h_{11} + m_{12} h_{12} + Q$

Anexo 3: Operaciones con matrices para el análisis exergético

	Vector masa	Vector energía(kW)	Vector exergía(kW)
1	0.21	9030.92	9031.98
2	0.21	9031.03	9032.09
3	0.47	61.04	1.81
4	4.70	1824.65	238.19
5	4.70	1825.18	238.73
6	3.67	317.13	309.07
7	3.88	9348.15	8051.10
8	3.88	666.40	249.29
9	4.70	10406.94	909.22
10	4.70	10406.94	881.22
11	0.47	1040.69	103.52
12	4.23	1763.60	272.79
13	0.00	100	0
14	0.00	0.11	0.11

15	0.00	0.53	0.53
16	0.00	7602.64	0.00

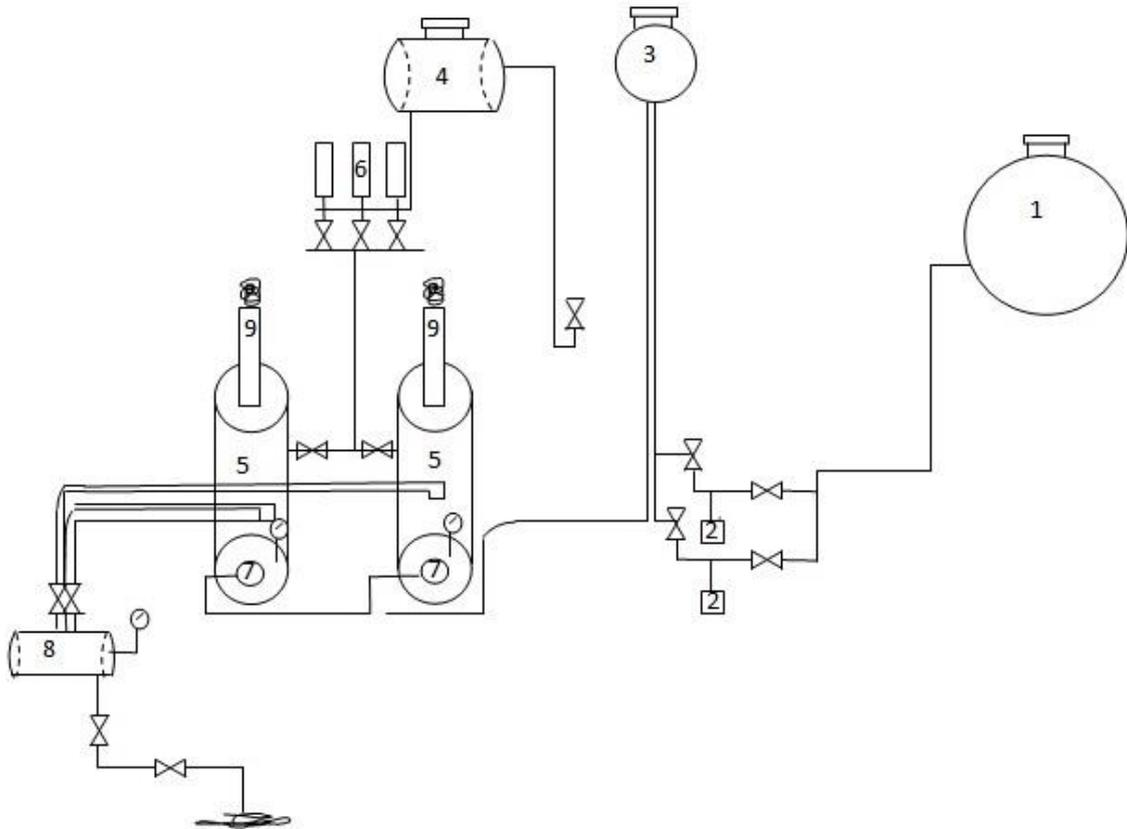
Anexo 4 Vista de la sala de calderas de la UCF.



Anexo 5 Composición y datos técnicos de los quemadores

Características	Parámetros
Fabricante	Baltur
Modelo	BT-50 DSNM-D
Consumo de combustible mínimo	28 kg/hora
Consumo de combustible máximo	50 kg/hora
Viscosidad máxima a 50°C	50 °C
Potencia térmica	312 kW: 558kW
Alimentación eléctrica	220 v 60 Hz
Potencia del motor eléctrico	1,1 kW
Resistencia eléctrica	10,5 kW
Poder calórico inferior del quemador	40,1 MJ/kg

Anexo 6 Componentes principales de la sala de calderas.



1. Tanque de Combustible ubicado en el exterior con una capacidad de 7568 Lts.
2. Sistema de bombeo del tanque exterior al tanque interior.
3. Tanque interior de combustible para abastecer a los generadores con una capacidad de 1040 lts.
4. Tanque de almacenamiento del agua de alimentación a generadores con una capacidad de 1040 lts.
5. Generadores de Vapor.
6. Sistema de bombeo del agua de alimentación a las calderas.
7. Quemadores.
8. Manyfold (Distribuidor de vapor).
9. Chimenea.