



**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”**

**FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

Trabajo de Diploma

En opción al título de Ingeniero Mecánico

**Diagnóstico energético de los generadores de vapor
de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”**

Autora: Nora Nelvis Labañino Jiménez.

**Tutores: Dr. C. Yoalbys Retirado Mediaceja.
Dr. C. Reineris Montero Laurencio.**

**MOA, 2015
“AÑO 57 DE LA REVOLUCIÓN”**



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: **Nora Nelvis Labañino Jiménez** autora de este Trabajo de Diploma y los tutores Yoalbys Retirado Mediaceja y Reineris Montero Laurencio declaramos la propiedad intelectual del mismo al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa y la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” para que dispongan de su uso cuando estimen conveniente.

Nora Nelvis Labañino Jiménez

Diplomante

Dr. C. Yoalbys Retirado Mediaceja

Tutor

Dr. C. Reineris Montero Laurencio

Tutor



PENSAMIENTOS

*El que ama la instrucción ama la sabiduría;
más el que aborrece la reprensión es ignorante.*

Proverbios 12:1-2

*La blanda respuesta quita la ira;
más la palabra áspera hace subir el furor.*

Proverbios 15:1-2

AGRADECIMIENTOS

Para la realización de este trabajo hemos contado con el valioso apoyo de un colectivo de personas que colaboraron con tenacidad y ahínco en aras de que la investigación tuviera la mejor calidad posible, dejamos constancia de nuestro especial agradecimiento:

A mi Dios Todopoderoso por guiarme y darme la sabiduría que he adquirido.

A mis padres Félix Labañino Acosta y Neuris Jiménez Milet por haberme guiado en la vida y darme una educación basada en valores y principios de nuestra Revolución. Por la ayuda incondicional que me brindaron para que yo realizara mi sueño. Por su dedicación e impulso ofrecidos en el transcurso de mi carrera, por su empeño y nunca dudar de su preciosa hija.

A mi tutor principal: Dr.C. Yoalbys Retirado Mediaceja por la ayuda absoluta que me ofreció y la confianza depositada durante la realización de la tesis.

A mi segundo Tutor: Dr. C. Reineris Montero Laurencio por su dedicación.

A mi esposo Erimel Columbié Montero por brindarme su ayuda incondicional cuando más lo necesité, por apoyarme y estar junto a mí en los momentos más difíciles de la vida con todo su amor y dedicación, por siempre creer en mí.

A mi hermano que más amo Félix Labañino Jiménez por su apoyo, dedicación y confianza que siempre tuvo por mí, por el tiempo que dedicó a mi persona y los consejos que me supo dar en los momentos difíciles, recordándome siempre, que los hombres no se miden por las veces que se cae, sino por las veces que se sabe levantar.

A los Ing. Finlay Bartutis y Ramón Viña por su apoyo y dedicación durante el trabajo.

A mi suegra Idalmis, mis cuñadas Arianna y Marlen que de una forma u otra me supieron alentar para seguir adelante.

A los nombrados hoy y a quienes imperdonablemente no he recordado...

A todos muchas gracias,

La autora



DEDICATORIA

A mi Dios Todopoderoso por darme las fuerzas cuando más las necesité.

A mi papá Félix Labañino Acosta y mi madre Neuris Jiménez Milet, por haber confiado en mí y apoyarme en todo momento.

A mi esposo Erimel Columbié Montero por comprenderme y estar ahí cuando más lo necesité.

A mi hermano Félix Labañino Jiménez por creer en mí y darme su apoyo incondicional.

A mis familiares, quienes siempre demostraron preocupación por este momento.

A los profesores del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa que me formaron profesionalmente.

A la Revolución Cubana por dar igualdad de oportunidades a todos.

A nuestro Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz quien siempre ha velado por el bienestar del ser humano.

A todos les dedico este éxito,

La autora

RESUMEN

En la empresa Productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara” se explotan los generadores de vapor y sistemáticamente se desarrollan investigaciones en estos equipos. Sin embargo, el análisis de los trabajos precedentes evidencia la no existencia de estudios que consideren el diagnóstico energético de las instalaciones, basado en la aplicación integrada de herramientas de la tecnología de gestión total eficiente de la energía y la determinación de sus rendimientos termoexergéticos. Para dar solución a la problemática anterior en el presente trabajo se realiza el diagnóstico energético de las calderas, teniendo en cuenta los aspectos no considerados en las investigaciones anteriores. Los resultados evidencian que el fuel oil y el vapor constituyen los portadores de energía más consumidos en la Termoeléctrica, representando el 25,379 y 52,398 % de los gastos totales de la empresa en el año precedente y, además, demuestran que en los generadores de vapor el grado de aprovechamiento de la energía térmica y la útil máxima disponible es de 91,139 y 46,898 %, respectivamente. Finalmente, se constata que el trabajo de las calderas en el trimestre analizado genera, como promedio, un consumo de 5,19 t/h de combustible, un gasto económico por este concepto que asciende a 4 301 039,99 USD y las emisiones de gases y ruidos nocivos para el medio ambiente laboral y la salud de los seres vivos.

ABSTRACT

In the nickel and cobalt producer company "Major Ernesto Che Guevara" steam generators are operated and systematically develop research on these equipment. However, the analysis of previous work evidence the nonexistence of studies that consider the energy diagnostic of the boilers, based on the integrated application of technology tools total efficient management of energy and determination of his termoexergetic yields. To solve the above problems in this paper the energy assessment of the boilers is made, taking into account aspects not considered in previous research. The results show that fuel oil and steam are the most consumed energy carriers in the thermoelectric, representing the 25,379 and 52,398 % of the total expenses of the company in the previous year. Also, show that the steam generators degree of utilization of thermal energy and the maximum available is helpful 91,139 and 46,898 %, respectively. Finally, we note that the work of boilers in the quarter under review generated on average consumption of 5,19 t/h of fuel an economic cost for this item amounting to 4 301 039,99 USD and the emissions noise and harmful gases to the working environment and the health of living beings.

ÍNDICE

Contenido	Pág.
Introducción.	-1-
Capítulo 1. Marco teórico-contextual para el diagnóstico energético de los generadores de vapor objeto de estudio.	-5-
1.1- Introducción.	-5-
1.2- Breve estado del arte sobre los generadores de vapor acuosotubulares.	-5-
1.3- Trabajos precedentes.	-6-
1.3.1- Trabajos desarrollados en la empresa “Comandante René Ramos Latour”.	-7-
1.3.2- Trabajos desarrollados en la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”.	-8-
1.3.3- Trabajos desarrollados en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.	-9-
1.4- Descripción del flujo tecnológico de la UEB Termoeléctrica.	-10-
1.4.1- Tratamiento químico del agua.	-11-
1.4.2- Calderas.	-11-
1.4.3- Turbinas.	-13-
1.5- Descripción de los generadores de vapor insertados en el proceso.	-14-
1.5.1- Parámetros generales de las calderas.	-14-
1.5.2- Descripción técnica de los generadores de vapor.	-14-
1.5.3- Requisitos técnicos del combustible y el agua de alimentación.	-16-
1.6- Breve introducción a la gestión total eficiente de la energía.	-18-
1.7- Conclusiones del capítulo 1.	-21-
Capítulo 2. Procedimiento para el diagnóstico energético de las calderas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.	-22-
2.1- Introducción.	-22-
2.2- Tecnología de gestión total eficiente de la energía.	-22-
2.2.1- Herramientas que se utilizan para establecer esta tecnología.	-23-
2.2.2- Breve descripción de las herramientas seleccionadas.	-23-
<i>Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico – Autora: Nora N. Labañino Jiménez</i>	-VII-

2.2.2.1- Diagrama de Pareto.	-23-
2.2.2.2- Estratificación.	-24-
2.2.2.3- Gráfico de consumo y producción en el tiempo.	-24-
2.2.2.4- Diagrama índice de consumo – producción.	-25-
2.3- Procedimiento de cálculo para evaluar energéticamente a las calderas.	-26-
2.3.1- Procedimiento para el balance térmico.	-26-
2.3.1.1- Poder calórico inferior del combustible.	-26-
2.3.1.2- Cálculo de los volúmenes de la combustión.	-26-
2.3.1.3- Cálculo del coeficiente de exceso de aire.	-27-
2.3.1.4- Cálculo de las entalpías de los gases y el aire.	-28-
2.3.1.5- Balance térmico por el método Directo.	-29-
2.3.1.6- Balance térmico por el método Indirecto.	-31-
2.3.2- Procedimiento para el balance exergético.	-34-
2.3.2.1- Exergía de un flujo.	-35-
2.3.2.2- Exergía de una fuente de calor.	-35-
2.3.2.3- Rendimiento exergético de la instalación.	-36-
2.4- Método empleado en la medición de los parámetros.	-37-
2.4.1- Principales parámetros medidos en las calderas.	-37-
2.5- Conclusiones del capítulo 2.	-41-

Capítulo 3. Resultados del diagnóstico energético e impactos económicos y ambientales asociados al trabajo de las calderas. -42-

3.1- Introducción.	-42-
3.2- Análisis de los resultados de la aplicación de herramientas de la tecnología de gestión total eficiente de la energía.	-42-
3.2.1- Diagrama de Pareto de los principales portadores energéticos.	-42-
3.2.2- Estratificación de los portadores energéticos.	-44-
3.2.3- Consumo y producción en el tiempo.	-45-
3.2.4- Índice de consumo y producción de vapor.	-46-
3.3- Análisis de los resultados del balance térmico y exergético.	-47-
3.4- Comportamiento de parámetros principales del proceso.	-52-
3.4.1- Coeficiente de exceso de aire.	-52-

3.4.2- Flujos de aire y gases.	-53-
3.4.3- Pérdidas de calor.	-55-
3.4.4- Rendimientos térmicos y exergéticos.	-57-
3.5- Valoración económica asociada al funcionamiento de las calderas.	-58-
3.6- Impacto ambiental relacionado con los generadores de vapor que emplean combustibles fósiles.	-60-
3.6.1- Contaminación ambiental en la generación de vapor.	-60-
3.6.2- Principales fuentes de contaminación	-61-
3.6.2.1- Óxidos de azufre	-61-
3.6.2.2- Monóxido de carbono	-61-
3.6.2.3- Óxidos nitrosos	-61-
3.6.2.4- Particulados	-62-
3.6.2.5- Compuestos orgánicos volátiles	-62-
3.6.3- Regulaciones sobre emisiones contaminantes	-63-
3.6.4- Situación de la UEB Termoeléctrica de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” con referencia a los gases producto de la combustión.	-64-
3.6.4.1- Situación de la UEB con referencia a los vertimientos líquidos productos del tratamiento químico del agua y al lavado de las calderas.	-64-
3.6.4.2- Perspectivas futuras de la UEB respecto a los gases de la combustión y su evacuación por la chimenea.	-64-
3.7- Conclusiones del capítulo 3.	-65-
CONCLUSIONES GENERALES	-66-
RECOMENDACIONES	-67-
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	-68-
ANEXOS	-X-

INTRODUCCIÓN

La Unidad Empresarial de Base (UEB) Termoeléctrica, perteneciente a la empresa Productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara”, de la empresa fue diseñada para garantizar la energía calorífica, agua suavizada, CO₂ y parte de la energía eléctrica que necesita el proceso para la obtención del producto final. Con el proceso inversionista que se realiza en la referida empresa, los niveles productivos deben incrementarse hasta alrededor de las 36 200 toneladas de Ni+Co en una primera etapa, conjuntamente con el incremento productivo se debe lograr la disminución de los costos de operación y el incremento de las eficiencias energética y metalúrgica (Manual de operaciones de la UEB Termoeléctrica, 2005).

La referida UEB es fundamental dentro de la entidad porque además de generar una porción de la energía eléctrica que se consume en el proceso productivo, produce el vapor necesario para la destilación del licor, la cola y la recuperación de amoníaco en la planta de igual nombre y para usos generales en el resto de las plantas (calentamiento de combustible, atomización, banco de quemadores, además de otros servicios como la cocción y el posterior calentamiento de los alimentos en el área de cocina comedor), teniendo así múltiples funciones de gran importancia para la producción de níquel.

Una forma eficaz de obtener grandes ahorros de combustibles y una disminución sustancial del costo de la libra de Ni+Co es potenciar la cogeneración aprovechando las posibilidades de esta industria. Para esto es necesario la ejecución de inversiones en la UEB Termoeléctrica que garanticen el aumento de la eficiencia en la generación de vapor, el incremento de la disponibilidad y fiabilidad de las calderas, la utilización confiable del petróleo crudo nacional mejorado en las instalaciones y la cogeneración de energía eléctrica en correspondencia con la demanda máxima de la fábrica.

En el año 2004 las autoridades de la empresa decidieron modernizar la UEB Termoeléctrica a partir de la inserción de un nuevo turbogenerador de 25 MW a condensación con extracciones reguladas y dos generadores de vapor de 150 t/h de vapor, de horno presurizado y paredes de membranas. Esta inversión por su magnitud e importancia consideraba la realización de rigurosos y sistemáticos análisis termoexergéticos de los equipos instalados (las calderas) que permitan evaluar de forma eficaz las mejoras introducidas al proceso.

A pesar de lo anterior, los análisis térmicos realizados a las calderas son puntuales y no reflejan la situación actual de las mismas (Fadel, 2008; Plana, 2011; Vega, 2013). Esto implica la adecuación del procedimiento de cálculo existente en la literatura especializada que garantice la evaluación termoexergética de las calderas para las actuales condiciones de explotación.

Los generadores de vapor debido a su principio de funcionamiento son altos consumidores de portadores energéticos, por lo que se hace necesario disminuir el consumo de combustible y los costos de producción por cada tonelada de vapor producida. Un elemento importante en la explotación eficiente de estos equipos es el agua de alimentación, su temperatura y calidad, así como otros parámetros que resultan muy importante, entre ellos se destacan: la composición química del combustible y los gases producto de la combustión, la calidad del vapor, las eficiencias de los equipos auxiliares, por solo mencionar algunos.

Relacionado con estas instalaciones, en los últimos años se han desarrollado investigaciones. En este sentido, Góngora (2009) desarrolló el diagnóstico energético a los generadores de vapor, los deareadores y los calentadores de agua de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba” y basó su estudio, fundamentalmente, en la influencia que tienen estos dos últimos equipos en la eficiencia termoexergética de las calderas.

Por su parte, Fuentes (2010) realizó la evaluación térmica y exergética de los generadores de vapor de la mencionada empresa para diferente calidad del agua de alimentación y valoró la influencia de este aspecto en el funcionamiento energético de los equipos. También, en las fuentes bibliográficas consultadas se estudian otros elementos teórico-prácticos relacionados con estos generadores (Rodríguez, 2008) y con el proceso de producción de vapor desarrollado en la empresa niquelífera “Comandante Ernesto Che Guevara” (Fonseca, 2009; Plana, 2011; Vega, 2013).

Como se aprecia, existe variedad de trabajos dedicados al diagnóstico térmico y exergético de los generadores de vapor en el sector industrial, pero solo se reportan algunos estudios realizados a las calderas nuevas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” de Moa, uno para los datos nominales de los generadores (Hernández, 2006) y los restantes para las condiciones de explotación presentes en el momento del estudio (Caballero y González, 2007; Fonseca, 2009; Plana, 2011; Vega, 2013).

Estas investigaciones, aunque en su momento mostraron la realidad del proceso, en la actualidad no pueden ser consideradas como referencia para la toma de decisiones, por cuanto las condiciones de explotación en la Termoeléctrica de la empresa han cambiado, de ahí la importancia de reevaluar las calderas desde el punto de vista energético considerando la aplicación de herramientas de la Tecnología de Gestión Total Eficiente de la Energía (TGTEE), aspecto no abordado en los trabajos precedentes consultados.

A partir de los aspectos antes mencionados se declara como **problema**:

La inexistencia de un diagnóstico energético de los generadores de vapor de la empresa Productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara”, que considere la aplicación de herramientas de la tecnología de gestión total eficiente de la energía y la determinación de los rendimientos térmicos y exergéticos de las calderas para diversas condiciones de operación.

Como **objeto de estudio de la investigación** se plantea:

Los generadores de vapor de la empresa Productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Y su **campo de acción** lo constituye:

El diagnóstico energético de las calderas objeto de estudio.

En correspondencia con el problema planteado, se define como **objetivo del trabajo**:

Realizar el diagnóstico energético de los generadores de vapor a través de la aplicación de herramientas de la tecnología de gestión total eficiente de la energía y la determinación de sus rendimientos térmicos y exergéticos para diversas condiciones de operación.

Y como **objetivos específicos** se establecen los siguientes:

- ✓ Establecer el marco teórico-contextual de la investigación, mediante la actualización del estado del arte relacionado con la producción de vapor en termoeléctricas y otros aspectos de interés para el trabajo.

- ✓ Exponer herramientas y procedimientos específicos para la aplicación de la tecnología de gestión total eficiente de la energía y el cálculo de los rendimientos térmicos y exergéticos en las calderas.
- ✓ Valorar los resultados obtenidos en el diagnóstico energético de los generadores de vapor desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

A partir de los objetivos declarados se establece la siguiente **hipótesis**:

La aplicación de herramientas de la tecnología de gestión total eficiente de la energía y el procedimiento establecido para el balance termoexergético de las calderas, conjugada con el análisis del comportamiento del coeficiente de exceso de aire, los flujos de aire y gases, las pérdidas de calor, los rendimientos térmicos y exergéticos, y otros parámetros de funcionamiento en las instalaciones, posibilitará el diagnóstico energético de generadores de vapor para diversas condiciones de trabajo.

Para cumplir con el objetivo general se desarrollan las siguientes **tareas**:

- ✓ Búsqueda bibliográfica sobre el proceso de generación de vapor y sus principales características en la empresa Productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara”.
- ✓ Adecuación, a las calderas investigadas, de las herramientas y procedimientos establecidos para la aplicación de la tecnología de gestión total eficiente de la energía y el cálculo de los rendimientos termoexergéticos en las instalaciones.
- ✓ Aplicación de herramientas de la tecnología de gestión total eficiente de la energía en la UEB Termoeléctrica de la referida empresa.
- ✓ Desarrollo del balance térmico y exergético de los generadores de vapor para diversas condiciones de explotación.
- ✓ Obtención de comportamientos de los principales parámetros de funcionamiento de los generadores de vapor.
- ✓ Determinación de los impactos económicos y ambientales asociados a la explotación de las calderas en las diversas condiciones de operación de la UEB Termoeléctrica.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO-CONTEXTUAL PARA EL DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO DE LOS GENERADORES DE VAPOR OBJETO DE ESTUDIO

1.1- Introducción

El estudio y sistematización de las teorías precedentes que pueden ayudar en el análisis del problema a investigar constituyen el marco teórico de la investigación. La elaboración del mismo se realiza mediante conceptos, leyes y teorías que existen en la ciencia; y que se sistematizan con el objetivo de determinar en qué medida estas contribuyen o no a la solución del problema investigado. El **objetivo** del capítulo es:

Establecer, mediante el marco teórico-contextual, los fundamentos necesarios para el diagnóstico energético de los generadores de vapor de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

1.2- Breve estado del arte sobre los generadores de vapor acuotubulares

A mediados del siglo XVIII, los primeros tipos de calderas usadas para la producción de vapor eran un recipiente grande, hermetizado, con tuberías para entrada de agua y salida de vapor, al mismo se le daba calor por su parte exterior, y en su parte superior interna se acumulaba el vapor generado. Al cabo de un determinado tiempo se comprendió que si se incrementaba la superficie de transferencia y la eficiencia en la transferencia de calor se debían crear otros tipos de calderas.

En este sentido, se trabajó en dos direcciones que resultaron ser las más perspectivas y determinaron el desarrollo de las calderas de vapor por más de 150 años (Pérez, 1972): las calderas pirotubulares y las acuotubulares, siendo estas últimas las de interés para la presente investigación.

Las calderas de tubos de fuego (las pirotubulares) dejaron de ser usadas en las instalaciones potentes a fines del siglo pasado. Entonces comenzó a trabajarse en una segunda dirección, ensayándose un tipo de caldera en la cual el agua y el vapor circulaban por dentro de bancos de tubos, pasando los gases de combustión sobre la superficie exterior. Tales calderas se denominaron “de tubos de agua”.

La crisis del combustible posterior a la Primera Guerra Mundial no solo provocó la pulverización del carbón sino que impulsó la utilización de parámetros elevados para el vapor con vista a obtener mayores eficiencias.

En el periodo de 1935 a 1948 las principales centrales de Estados Unidos y Alemania se construyeron de alta presión (80 a 120 atm) con temperaturas de 480 °C a 500 °C en Estados Unidos, no así en Alemania, las centrales no utilizaban recalentamiento para presiones de 120 atm mientras tanto en la Unión Soviética, Inglaterra, Francia y otros países se construyeron centrales de alta presión muy limitadamente hasta fines de la Segunda Guerra Mundial.

En la actualidad la generación de vapor en las calderas de tubos de agua, no se ve limitada como las de tubos de fuego por la superficie de transferencia de calor, pues colocando mayor cantidad de tubos esta puede incrementarse cuanto se desee, dentro de límites lógicos de diseño, ello permite que estas calderas logren grandes generaciones de vapor.

Las calderas de tubos de agua se utilizan ampliamente en las empresas industriales, centrales azucareros, refinerías, fábricas de papel, de fertilizantes y muchas otras, las mismas se clasifican en: de tubos rectos, de tubos curvos, así como generadores de grandes potencia. Estos últimos, se emplean en aquellas industrias donde se requiere vapor para el proceso y contribuyen a mayores eficiencias en las centrales termoeléctricas debido a los altos parámetros de presión y temperatura con que operan.

1.3- Trabajos precedentes

Durante el desarrollo de la investigación se consultaron diferentes bibliografías especializadas en la temática relacionada con el diagnóstico energético a equipos e instalaciones productoras de vapor. Algunos de ellos se relacionan a continuación:

Rivera y Regüeyeros (2007), realizaron balances energéticos para las calderas de las empresas presupuestadas del municipio de Moa, siendo objeto de estudio los generadores de vapor de los hospitales Guillermo Luis Hernández y Pedro Sotto Alba, el ISMMM, la lavandería y el combinado lácteo. Las autoras determinaron las causas fundamentales que provocan bajas eficiencias termoexergéticas en las instalaciones.

A la evaluación de la incidencia que tiene el cambio del combustible en las eficiencias térmicas y exergéticas de los generadores de vapor de la Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez” de Felton dedicó su trabajo Maxi (2008), para ello determinó las referidas eficiencias cuando en las instalaciones se utilizó el petróleo regular y el crudo cubano mejorado 650. De los resultados obtenidos infirió que una variación de las propiedades físicas y químicas del combustible genera alteraciones en los valores obtenidos para el rendimiento térmico y exergético.

Reyes (2010), realiza los cálculos térmicos y exergéticos del generador de vapor de la Planta de Asfalto ubicada en el municipio Sagua de Tánamo, con los resultados obtenidos, la investigadora recomienda un conjunto de acciones que le permitirán a los directivos de la entidad mejorar los índices económicos de la instalación, a partir de elevar la eficiencia térmica del generador.

1.3.1- Trabajos desarrollados en la empresa “Comandante René Ramos Latour”

Del Valle (2002), realizó una evaluación verificativa de la eficiencia en la planta termoeléctrica de esta empresa, a partir de la instalación de dos generadores de vapor, en este trabajo se establecen comparaciones con parámetros anteriores del mismo proceso lo que demostró que hubo un aumento considerable de la eficiencia en la producción de níquel.

Abreu (2003), evaluó la eficiencia del generador de vapor 10 de la CTE y realiza un cálculo verificativo de la eficiencia de la instalación teniendo en cuenta la utilización de crudo nacional mejorado y la aplicación de la tecnología aditivación-emulsión del combustible, permitiéndole llegar a la conclusión de que la tecnología de aditivación incrementa la eficiencia del generador de vapor en 1,1 % y disminuye el ensuciamiento del calentador de aire regenerativo, porque se reducen las emisiones de gases contaminantes al ambiente.

Suárez (2005), realizó un diagnóstico del sistema de generación de la central termoeléctrica de la empresa, en este trabajo la autora muestra un profundo análisis del proceso de generación de vapor existente en la instalación y expone resultados importantes basados en el estudio detallado de los generadores de vapor presente en el

proceso, este trabajo muestra además varias recomendaciones que constituyen un punto de partida para el correcto análisis térmico de las instalaciones productoras de vapor.

Además, se han reportado investigaciones recientes que abordan aspectos similares a los ya descritos en este epígrafe (Duque, 2011; Peña, 2013; Quevedo, 2014). Todas ellas igualmente se desarrollaron en las calderas de la empresa antes mencionada, pero se realizaron para las condiciones de operación existentes en cada periodo.

1.3.2- Trabajos desarrollados en la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”

En esta empresa constan pocas investigaciones destinadas al estudio del proceso de generación de vapor, lo anterior pudiera atribuirse a las limitaciones de acceso que existen en la entidad, pero en los últimos años se han analizado los generadores de vapor con la finalidad de evaluarlos térmica y exergéticamente (Rodríguez, 2008; Frómeta, 2012).

Los trabajos más interesantes consideran el análisis de la influencia que tienen los deareadores, los calentadores de agua y la calidad del agua de alimentación en las eficiencias térmicas y exergéticas de los generadores de vapor (Góngora, 2009; Fuentes, 2010). En estas investigaciones también se tienen en cuentas otros criterios teóricos que permiten perfeccionar y racionalizar la explotación de estas instalaciones productoras de vapor.

Además de los trabajos antes mencionados, resulta interesante la investigación desarrollada por Rey (2014). En la misma se estableció el procedimiento para la realización del diagnóstico energético de las calderas basado en la aplicación de la tecnología de gestión total eficiente de la energía; y la evaluación térmica y exergética de las instalaciones. Los resultados evidenciaron que el consumo de fuel oil representó aproximadamente el 80 y 93 % de los principales portadores energéticos empleados en la empresa y la Central Termoeléctrica, respectivamente. Se comprobó que las calderas, de manera conjunta, trabajan con rendimientos térmicos y exergéticos iguales a 91 y 54 %. También, se verificó que la explotación de los equipos generó un gasto por concepto de consumo de combustible equivalente a 22 558 529,28 USD

1.3.3- Trabajos desarrollados en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”

Suárez (1999), desarrolló el cálculo térmico del ciclo de generación de la CTE, para ello realizó el balance energético de la instalación, demostrando que es posible disminuir el consumo de electricidad de la red nacional a partir de una explotación racional de la capacidad instalada. Al estudiar la posibilidad del autoabastecimiento de electricidad por parte de la propia empresa y en correspondencia con la propuesta estudiada, el autor plantea que la eficiencia de la cogeneración es de un 72 % y el tiempo de recuperación de la inversión es menor de 5 años.

Muhica (2001), efectuó la evaluación termoeconómica del ciclo de la CTE para facilitar la toma de decisiones en la modernización y expansión de la planta, para ello determinó los principales indicadores del ciclo térmico modernizado. También, expone el cálculo de las pérdidas de energía que ocurren en los equipos tecnológicos principales de la CTE y el impacto económico-ambiental de la propuesta estudiada.

Rodríguez (2001), realizó el análisis del petróleo crudo nacional empleado en la empresa a partir de los elementos químicos que lo componen, haciendo referencia a los efectos que producen cada uno de ellos durante su almacenamiento, transportación y quema en las instalaciones productoras de vapor de la empresa. El trabajo muestra algunas recomendaciones prácticas para la manipulación y quema del combustible, basado en la experiencia aplicada en la planta de secadero de la entidad.

Tuzón (2005), realizó el diagnóstico térmico del generador de vapor 1, los resultados demuestran una baja eficiencia térmica y exergética de los generadores instalados, estando la primera en el orden del 86 %. Esta situación sugiere la sustitución de estas calderas con el propósito de elevar la eficiencia del proceso.

Hernández (2006), realizó el diagnóstico térmico de los generadores de vapor insertados por la compañía eslovaca en la empresa, la autora obtuvo los resultados para los valores teóricos y nominales reportados por el fabricante con el objetivo de compararlos, en ese sentido llegó a la conclusión de que existía un alto grado de confiabilidad en los valores ofrecidos por la compañía extranjera. También en su trabajo ofrece el procedimiento de cálculo adecuado a las condiciones de diseño de las calderas.

Caballero y González (2007), realizaron el diagnóstico térmico de los generadores de vapor insertados en las industrias del níquel en Moa, calculando el rendimiento térmico, determinaron los consumos de combustibles asociados a los generadores de vapor y la incidencia que tenían en sus respectivas empresas, en el sector industrial y en el municipio, cuando se realizó este trabajo solo estaba en explotación una de las dos calderas instaladas (de 150 t/h) en el proceso de modernización y para suplir el consumo de vapor se operaban dos calderas de las viejas de 75 t/h de vapor, en la actualidad la situación es diferente ya que se explotan las dos calderas nuevas.

Otro grupo de investigadores calcularon los rendimientos térmicos y exergéticos de los generadores de vapor 6 y 7 de la empresa y establecieron gráficos de comportamientos que permiten inferir la dependencia existente entre estos rendimientos y los restantes parámetros de funcionamiento de los equipos (Fadel, 2008; Fonseca, 2009; Plana, 2011; Vega, 2013). Estos resultados, aunque no son extrapolables a las calderas estudiadas, constituyen referencia para el análisis de las mismas.

Como se aprecia, los trabajos precedentes consultados se han dedicados, fundamentalmente, al análisis termoexergético de los generadores de vapor. Sin embargo, se recomienda la evaluación periódica de los mismos para determinar sus rendimientos bajo diversas condiciones de explotación.

Por otra parte, la última investigación desarrollada en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” data del año 2013 y ninguno de los trabajos realizados en la misma considera la aplicación de la tecnología de gestión total eficiente de la energía, durante el diagnóstico energético del proceso de generación de vapor. Solo se reporta un trabajo que aborda los aspectos anteriores y se desarrolló en la Termoeléctrica de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba” (Rey, 2014). Los criterios antes mencionados demuestran la importancia y pertinencia de la presente investigación.

1.4- Descripción del flujo tecnológico de la UEB Termoeléctrica

La UEB Termoeléctrica es la encargada de producir y distribuir los portadores energéticos necesarios para el proceso tecnológico, tiene como equipos fundamentales 2 generadores de vapor de 150 t/h (en funcionamiento) y 5 de 75 t/h (de reserva) todas

producen vapor a 39 atm y 440 °C. Además, consta con 2 turbogeneradores de 12 MW de potencia. Las áreas fundamentales que la integran son: base de petróleo, tratamiento químico de agua, calderas, turbinas y torres de enfriamiento.

Las áreas de mayor influencia en el proceso de producción de vapor se describen a continuación; las restantes se detallan en la bibliografía consultada (Manual de operaciones de la CTE, 2005).

1.4.1- Tratamiento químico del agua

Está formada por tres instalaciones tecnológicas que son Suavizamiento, Desmineralización y Neutralización.

En calidad de agua inicial se recibe agua potable proveniente de la planta Potabilizadora, la cual llega por dos tuberías de diámetro de 300 mm, que se puede alimentar por cada tubería separadamente. El agua inicial se somete a un proceso en la referida planta para eliminar las impurezas en suspensión y coloides, evitando la contaminación de las resinas en la planta, la formación de incrustaciones y las causas de la mala calidad del vapor en la central termoeléctrica.

1.4.2- Calderas

Deben garantizar el flujo de vapor estable al proceso productivo, con los parámetros adecuados de presión y temperatura, así como el flujo de gases producto de la combustión para la carbonatación en la planta de Recuperación de Amoniaco.

El agua de alimentación a las calderas procedente de los deareadores es bombeada mediante las bombas y luego de pasar por los calentadores de alta presión, va al colector principal de alimentación. Posteriormente se incorpora a las calderas, entrando en los economizadores de dos etapas, continuando su recorrido hasta el domo y alimentando los colectores inferiores, para dar lugar a la circulación natural por las pantallas ubicadas en el horno.

En el domo ocurre la separación agua – vapor, este vapor es sobrecalentado, mejorando su calidad, para después incorporarse al proceso, una vez que haya realizado trabajo en las turbinas. Para la combustión se utiliza el petróleo regular o el

crudo mejorado. Los gases producto de la combustión son enviados, mediante dos ventiladores y líneas de 530 mm hacia las torres lavadoras, para una vez limpios ser transportados hacia la planta de Recuperación de Amoniaco.

A las calderas llega agua procedente de la Planta de Tratamiento Químico de Agua, donde se le realiza un proceso de desmineralización, esta agua es previamente calentada al pasar por los calentadores de baja presión, los deareadores y los calentadores de alta presión hasta alcanzar una temperatura de 145 °C (Figura 1.1).

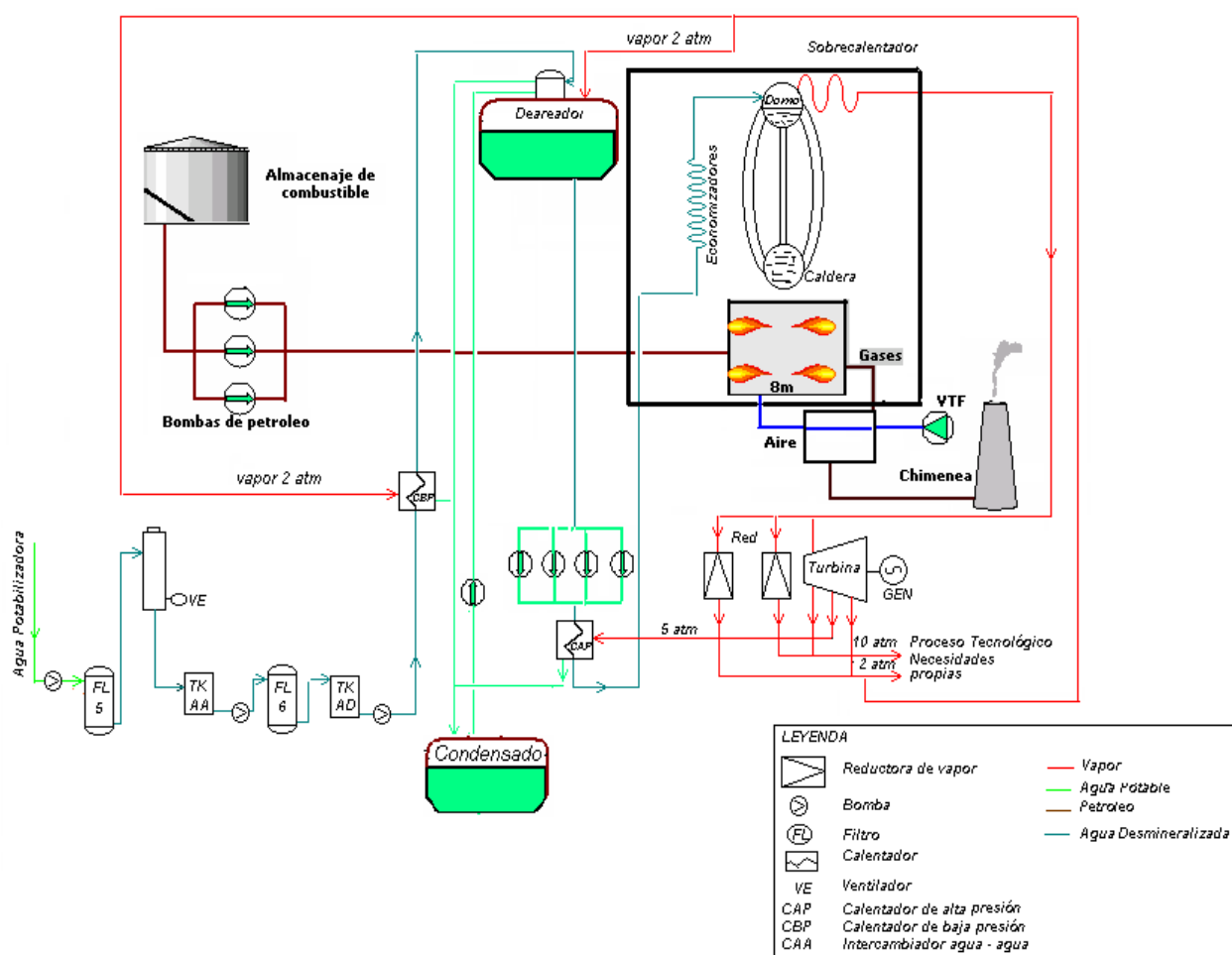


Figura1.1. Esquema del flujo tecnológico del área de calderas.

Fuente: Manual de operaciones de la UEB Termoeléctrica, 2005.

El petróleo es suministrado a través de bombas desde la base de petróleo para alimentar los quemadores de las calderas. En la Figura 1.2 ilustra el diagrama de flujo energético de los principales elementos que intervienen en el trabajo de las calderas.

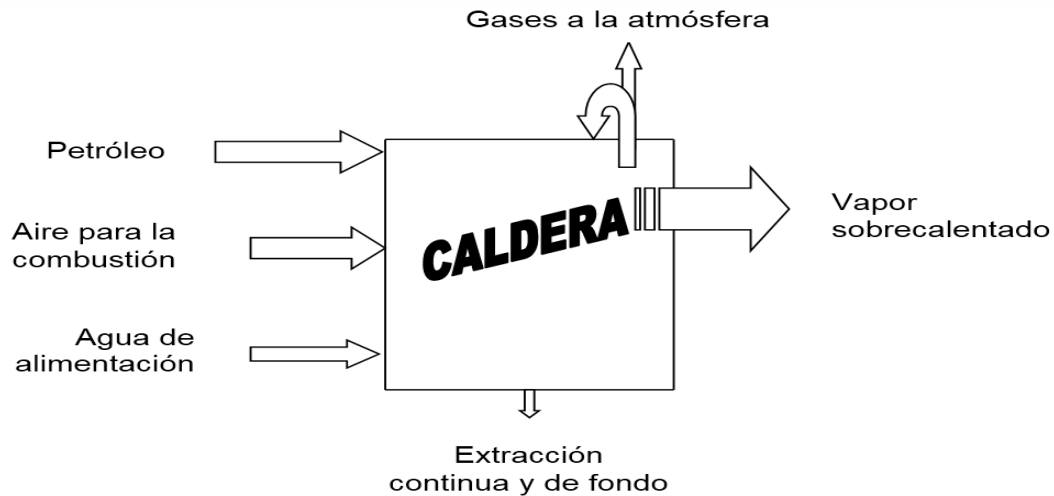


Figura 1.2. Diagrama de flujo energético en las calderas.

El vapor sobrecalentado que sale de las calderas se distribuye a las turbinas donde llega con presión de 35 atm y 435 °C, y a las estaciones reductoras de 40/10 atm y de 40/2 atm. El vapor de 10 atm que sale de la RED 40/10 con temperatura 250 °C se une al vapor de la toma regulada de la turbina. El vapor de 2 atm que sale de la RED 40/2 con temperatura 150 °C se une al vapor de la contrapresión de la turbina, esta tiene una toma no regulada de presión de 5 atm que se utiliza en el calentador de alta presión.

El vapor de 10 atm se utiliza en el proceso tecnológico en las siguientes plantas:

- Preparación de mineral.
- Hornos de reducción.
- Lixiviación y lavado.
- Calcinación.
- Puerto.
- Laboratorio central.
- Centro de investigaciones.
- Comedor central.

El vapor de 2 atm se utiliza en la UEB de Recuperación de Amoniaco y el comedor interno de la empresa.

1.4.3- Turbinas

La turbina de vapor de tipo 12/12–3,5/1/0,2 de potencia nominal de 12 MW/h y contrapresión nominal de 1 kgf/cm², está destinada para mover el generador de corriente alterna de tipo 6h y 56267012. El vapor pasa a la turbina por los lados a través de las válvulas de arranque, las cuales, cuando la turbina está en servicio, están

abiertas completamente; luego el vapor pasa al tren de válvulas formado por cuatro válvulas reguladoras de alta presión, las cuales se abren una tras otra. Después el vapor pasa por los escalones de regulación de alta presión y posteriormente va a la parte de baja presión, aunque puede suceder que una porción del vapor se extraiga voluntariamente por la toma regulada.

En la parte de baja presión están instaladas cuatro válvulas reguladoras, un escalón de regulación y nueve escalones de presión. Después del tercer escalón de la acción de baja presión, se hace la extracción de vapor para el calentador de alta presión con el objetivo de calentar el agua de alimentar. El vapor restante pasa a la contrapresión de la turbina.

1.5- Descripción de los generadores de vapor insertados en el proceso

1.5.1- Parámetros generales de las calderas

Proveedor: Slovenské Energetické Strojárne S. A. Tlmače (República Eslovaca)

- | | |
|--|----------------|
| - Cantidad de calderas | 2 |
| - Producción de vapor nominal de caldera | 150 t/ h |
| - Presión nominal del vapor sobrecalentado | 39 atm |
| - Temperatura nominal del vapor sobrecalentado | 440°C ± 8°C |
| - Temperatura de agua de alimentación | 145°C |
| - Eficiencia de caldera a la temperatura del ambiente 30 °C relacionada con la potencia calorífica inferior del combustible ligero | 92-93 % |

1.5.2- Descripción técnica de los generadores de vapor

La caldera es de versión exterior con techo en la parte superior al pozo de ascensor, la escalera principal entre las calderas y sobre las plataformas de servicio de los equipos equipados de una técnica de medición sensible.

Las mismas constan de tres tiros:

1. Cámara de combustión.
2. Dos zonas de sobrecalentadores y dos unidades de economizador 2 (ECO2).
3. Tres unidades de economizador 1 (ECO1).

La tubería de alimentación pasa desde la sala de máquinas por la pared frontal de la caldera, debajo del revestimiento de la pared del evaporador y sigue a través de la pared lateral exterior de la caldera debajo de su revestimiento hasta el cabezal de alimentación.

El cabezal de alimentación está situado a 12,8 m encima del ECO1 de la caldera junto a las agregadas cámaras de entrada del economizador.

La alimentación de las cámaras de entrada está solucionada de tal manera que a través del ECO 1 sea posible cortar por entero la alimentación de la caldera y seguir al mismo tiempo con el servicio alimentando a la caldera a través de la cámara de entrada del ECO 2. Esta solución facilita reparar los fallos del sistema de presión del ECO 1 durante el servicio de la caldera con los modificados parámetros del vapor producido.

En el ECO 1 y 2 entra el agua calentada desde la cámara colectora por los tubos suspensionales a la cámara de distribución de la estructura interior del domo.

Todas las paredes de membrana de la cámara de combustión y las dos zonas de sobrecalentadores y ECO 2 se alimentan con agua desde el domo a través de la pared trasera de inyección.

La mezcla de vapor y agua se lleva mediante los tubos de interconexión desde las cámaras superiores de las paredes de membrana a los separadores de vapor de la estructura interior del cuerpo de caldera. El vapor seco de la parte superior del cuerpo de caldera fluye por los tubos de interconexión a la cámara de entrada del sobrecalentador 1. Entre la cámara de salida del sobrecalentador 1 y la cámara de entrada del sobrecalentador 2 está colocada la tubería de interconexión con el eyector de inyección que regula la temperatura de vapor en la salida de caldera.

El vapor de caldera se lleva de la cámara de salida del sobrecalentador 2 al distribuidor en la sala de máquinas a través de la tubería. Las válvulas de seguridad protegen el sistema de presión de la caldera contra el deterioro por alta sobre presión.

El vapor para la línea de arranque se toma de la tubería de salida de vapor. Para el amortiguamiento del ruido del vapor de las válvulas de seguridad y de la línea de arranque se emplean los amortiguadores de ruido.

El suministro de aire de combustión está asegurado por un ventilador radial. El aire desde el ventilador a los quemadores se lleva a través de dos líneas de tubería, cada línea para un par de quemadores. La medición de la cantidad de aire en cada línea es común para dos quemadores. La presión de aire detrás del ventilador se regula a través de la corona de regulación del ventilador y su cantidad a través de las compuertas de regulación en frente de cada quemador.

La evacuación de los gases en la caldera es posible de dos formas: primero, desde la salida del ECO 1 a través de la interconexión a la tubería circular y, segundo, por medio del canal de desvío del ECO 1 con la toma de gases detrás del ECO 2. El canal está designado para el arranque de la caldera y para los eventuales reparos del sistema de la presión en el ECO 1 durante el servicio de caldera. La pared de membrana de los sobrecalentadores y el ECO 2 evitan la formación del condensado corrosivo de los gases que salen por causa de falta de estanqueidad de la compuerta de cierre en el término del canal.

La compuerta doble está entre los sobrecalentadores y economizadores 1 y 2, tiene una de sus partes controlada por el servomotor y sirve en el arranque de la caldera. La otra parte de la compuerta tiene mando manual. Su común empleo con el aire de sellaje conducido a la zona entre ellas protege al personal de servicio durante los reparos en el ECO 1. La protección de la parte de chimenea está garantizada con la compuerta de la misma construcción.

1.5.3- Requisitos técnicos del combustible y el agua de alimentación

Combustible Crudo 1400 (para el que fueron diseñadas las calderas)

- Potencia calorífica inferior	9200 - 9208 kcal/ kg
- Peso específico en 60°F (15,5°C)	0,9881 - 0,9994 kg/ dm ³
- Azufre	6,33 - 8,0 % hm
- Hidrógeno	9,64 - 10,27 % hm.
- Carbono	79,70 - 80,95 % hm.
- Ceniza	0,044 - 0,076 % hm.

- Agua 1,6 - 2,0 % hm.
- Vanadio 64 - 86 ppm
- Níquel 30 - 48 ppm
- Conradson 10,55 - 13,34 % hm.
- Sales 310 - 462 ppm
- Asfaltenos 17,3 - 19,75 % hm.
- Viscosidad en 50°C 859 - 1484 cSt
- Viscosidad en 80°C 133 - 213 cSt
- Punto de inflamación en el recipiente abierto 40°C
- La temperatura del petróleo crudo o regular bombeado tiene que estar en el rango de (50- 75) °C.

Agua de alimentación (para el que fueron diseñadas las calderas)

- Temperatura 145°C
- Contenido de SiO₂ 0,02 mg/ l
- Dureza 5 µmol/ l máx.
- pH 9
- Conductividad eléctrica específica 0,2 µS/ cm máx.
- Contenido de O₂ 0,02 mg/ l máx.
- Oxidabilidad como KMnO₄ 3 mg/ l
- Contenido del aceite 0,5 mg/ l

Debe garantizarse la calidad del agua de alimentación, de lo contrario no será posible emplearla para el enfriamiento de vapor en el atemperador de la caldera.

Los aspectos técnicos descritos en el epígrafe 1.5 fueron extraídos de los documentos del proyecto de modernización de la UEB Termoeléctrica (Ficha técnica de los generadores de vapor, 2004).

1.6- Breve introducción a la gestión total eficiente de la energía

Hasta el momento el problema de explotar el recurso eficiencia energética se ha abordado en las empresas de una forma muy limitada, fundamentalmente mediante la realización de diagnósticos energéticos para detectar las fuentes y niveles de pérdidas, y posteriormente definir medidas o proyectos de ahorro o conservación energética. Esta vía, además de obviar parte de las causas que provocan baja eficiencia energética en las empresas, generalmente tiene baja efectividad por realizarse muchas veces sin la integralidad, los procedimientos y el equipamiento requerido, por limitaciones financieras para aplicar los proyectos; pero sobre todo, por no contar la empresa con la cultura ni las capacidades técnico administrativas necesarias para realizar el seguimiento y control requerido y lograr un adecuado nivel de consolidación de las medidas aplicadas (Borroto y Monteagudo, 2006).

La entidad que no comprenda esto verá en breve limitadas sus posibilidades de crecimiento y desarrollo con una afectación sensible de su nivel de competencia y de la calidad de los servicios que presta; quedará rezagada respecto a aquellas que preparen sus recursos humanos y creen las capacidades permanentes necesarias para explotar este recurso, de magnitud no despreciable, en sus propias instalaciones.

Estudios realizados por el Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente de la Universidad de Cienfuegos en más de 100 empresas cubanas para caracterizar la situación actual de su capacidad técnico-organizativa para la administración eficiente de la energía existente arrojan los siguientes resultados:

- ✓ Existe interés y preocupación por la eficiencia energética, pero la gestión empresarial para lograrla ocupa un lugar secundario en las prioridades de las empresas industriales y de servicios y se limita generalmente a lo que le exigen sus organismos nacionales y provinciales.
- ✓ Las eventuales necesidades prácticas de aumento de la eficiencia energética determinadas por la propia empresa, aparecen generalmente por motivos diversos como: ampliar la producción, la reducción del gasto de combustible o la electricidad asignado, modernizar la tecnología, mantener la disponibilidad o el funcionamiento de la industria, etc.

- ✓ Existe un alto potencial de incremento de la eficiencia energética a partir de la capacitación del personal en prácticas eficientes del consumo y técnicas de administración eficiente de la energía, la implantación de sistemas técnico - organizativos de gestión, el uso de programas de concientización, motivación (estimulación) y capacitación del personal involucrado en los índices de consumo y de eficiencia, el desarrollo de auditorías energéticas sistemáticas de diferentes grados y otras, que requieren de pequeñas inversiones y responden a cortos períodos de recuperación de la inversión.

Algunas de las principales insuficiencias encontradas son:

1. Existen indicadores de consumo al nivel de empresa, pero no en todos los casos estos caracterizan adecuadamente la eficiencia energética y su evolución.
2. No se han identificado las áreas y equipos mayores consumidores, los “Puestos Claves”, ni se han establecido índices de consumo en los mismos.
3. No se maneja adecuadamente el impacto de los costos energéticos en los costos de producción y su evolución y tendencias. Se conoce el costo de la energía primaria, pero no siempre el de los portadores energéticos secundarios.
4. La instrumentación necesaria para evaluar la eficiencia energética es insuficiente o no se encuentra totalmente en condiciones de ser utilizada.
5. No se ha identificado al personal que decide en la eficiencia energética ni capacitado de forma especializada a la dirección y el personal involucrado en la producción, transformación o uso de la energía.
6. Se realizan algunas inspecciones de tipo preliminar, mediante las que se descubren desperdicios y fugas de energía, así como otros tipos de potenciales de ahorro que se enfrentan, en dependencia de las prioridades y disponibilidad de recursos de la empresa.
7. Se llevan a cabo algunas acciones para ahorrar electricidad o combustibles, basadas en el récord histórico de la empresa, pero en forma aislada, con seguimiento parcial, y sus resultados no son los esperados.

8. El banco de problemas energéticos no responde a los resultados de la realización de diagnósticos o auditorías energéticas con metodologías y equipos de medición adecuados, y no cuentan con un banco de proyectos de mejoramiento de la eficiencia energética apropiados al escenario energético y financiero de la misma.
9. Son insuficientes los mecanismos para motivar al personal que decide en la eficiencia al ahorro de energía y existe una incipiente divulgación y un bajo nivel de concientización sobre la necesidad del ahorro de energía en la empresa.

En resumen, los estudios realizados han puesto de manifiesto el bajo nivel en gestión energética que como promedio existe en las empresas, así como las importantes áreas de oportunidad que existen para reducir los costos energéticos mediante la creación en las empresas de las capacidades técnico organizativas para administrar eficientemente la energía. En la Figura 1.3 se presentan los aspectos principales que caracterizan las insuficiencias en materia de gestión energética en la mayoría de las empresas cubanas. Tales deficiencias son recurrentes en la Termoeléctrica donde se encuentran las calderas objeto de investigación.

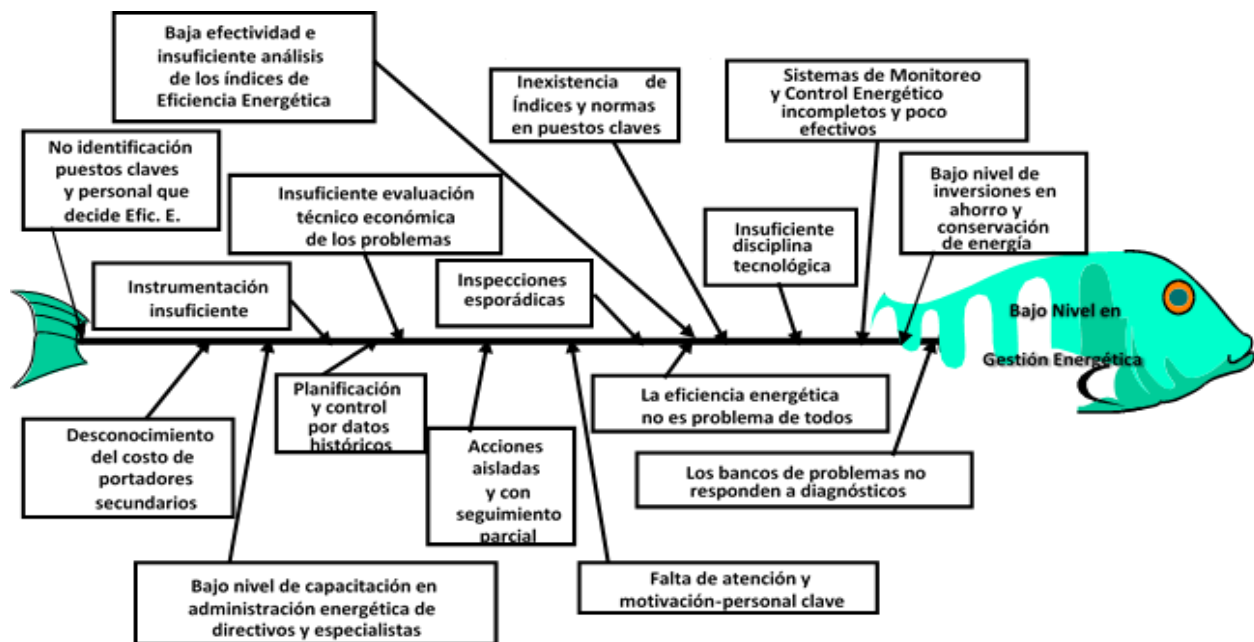


Figura 1.3. Aspectos principales que caracterizan las insuficiencias en materia de gestión energética en las empresas.

Fuente: Borroto y Monteagudo, 2006.

Para lograr la eficiencia energética de forma sistemática es necesario la aplicación apropiada de un conjunto de conocimientos y métodos que garanticen esta práctica. Ellos deben ser aplicados a los medios de trabajo, los recursos humanos, los procesos, la organización del trabajo, los métodos de dirección, control y planificación.

A tal efecto, se ha desarrollado una tecnología para la gestión energética en las empresas, que sintetiza la experiencia, procedimientos y herramientas obtenidas en la labor por elevar la eficiencia y reducir los costos energéticos en la industria y los servicios. La misma se conoce como “Tecnología de gestión total eficiente de la energía”, su definición y las herramientas que se utilizan para establecerla se exponen en el Capítulo 2 del presente trabajo.

1.7- Conclusiones del capítulo 1

- ✓ En las investigaciones precedentes se reportan varios trabajos destinados a la evaluación termoexergética de los generadores de vapor de las industrias niquelíferas y las empresas presupuestadas del municipio Moa. Sin embargo, ninguno de los estudios considera el diagnóstico energético de las calderas objeto de estudio, basado en la aplicación integrada de herramientas de la tecnología de gestión total eficiente de la energía y la determinación de los rendimientos térmicos y exergéticos de las instalaciones.
- ✓ El marco teórico-contextual desarrollado posibilitó el establecimiento de los fundamentos necesarios para el diagnóstico energético de los generadores de vapor de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. El mismo considera el análisis y la sistematización de los aspectos más importantes relacionados con las investigaciones precedentes, el funcionamiento de la UEB Termoeléctrica y las calderas investigadas, así como la gestión total eficiente de la energía en las empresas cubanas.

CAPÍTULO 2

PROCEDIMIENTO PARA EL DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO DE LAS CALDERAS DE LA EMPRESA “COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA”

2.1- Introducción

Entre los parámetros de funcionamiento más importantes en el trabajo de un generador de vapor se destacan los rendimientos térmico y exergético. Estos permiten determinar el grado de aprovechamiento de la energía térmica y útil máxima en la instalación, respectivamente. Sin embargo, se requieren de estudios que consideren, además, los aspectos relacionados con la gestión energética en estas instalaciones.

En este sentido, se declara como **objetivo** del presente capítulo: exponer el procedimiento para la realización del diagnóstico energético, basado en la aplicación de herramientas de la tecnología de gestión total eficiente de la energía y la determinación de los rendimientos térmicos y exergéticos de las calderas objeto de estudio.

2.2- Tecnología de gestión total eficiente de la energía

Esta tecnología consiste en un conjunto de procedimientos, herramientas técnico-organizativas y software especializados, que aplicando de forma continua y con la filosofía de la gestión total de la calidad, permite establecer nuevas formas de dirección, control, diagnóstico y uso de la energía, dirigidos al aprovechamiento de todas las oportunidades de ahorro, conservación y reducción de los costos energéticos de una empresa. Su objetivo no sólo es diagnosticar y dejar un plan de medidas, sino esencialmente elevar las capacidades técnico-organizativas de la empresa, de forma tal que esta sea capaz de desarrollar un proceso de mejora continua de la eficiencia energética (Borroto y Monteagudo, 2006; Rey, 2014).

Las vías fundamentales para la elevación de la eficiencia energética son las siguientes:

- ✓ Mejor gestión energética y buenas prácticas de consumo.
- ✓ Tecnologías y equipos eficientes.

Lo más importante para lograr la eficiencia energética en una empresa, no es solo que exista un plan de energía, sino contar además con un sistema de gestión energética que: garantice que ese plan sea renovado cada vez que sea necesario, involucre a todos, eleve cada vez más la capacidad de trabajadores y directivos para generar y alcanzar nuevas metas en este campo, desarrolle nuevos hábitos de producción y consumo en función de la eficiencia, consolide las hábitos de control y autocontrol, y en general, integre las acciones al proceso productivo o de servicios que se realiza.

Cualquiera de las dos vías reduce el consumo específico, pero la combinación de ambas es la que posibilita alcanzar el punto óptimo, porque estas no son excluyentes entre sí. **La primera** tiene un menor costo y el potencial de ahorro. Los resultados son más difíciles de conseguir y mantener, puesto que entrañan cambios en hábitos de consumo y en métodos de gestión empresarial. **La segunda** requiere de inversiones, pero el potencial de ahorro es más alto y asegura mayor permanencia en los mismos.

2.2.1- Herramientas que se utilizan para establecer esta tecnología

Se emplean varias herramientas en las empresas cubanas. Sin embargo, para la presente investigación son de interés las que se exponen a continuación:

- Diagrama de Pareto.
- Estratificación.
- Gráfico de consumo y producción en el tiempo.
- Diagrama índice de consumo - producción.

2.2.2- Breve descripción de las herramientas seleccionadas

2.2.2.1- Diagrama de Pareto

Los diagramas de Pareto son gráficos especializados de barras que presentan la información en orden descendente, desde la categoría mayor a la más pequeña en unidades y en por ciento. Los porcentajes agregados de cada barra se conectan por una línea para mostrar la suma incremental de cada categoría respecto al total. El diagrama de Pareto es muy útil para aplicar la Ley de Pareto o Ley 80 – 20, que identifica el 20 % de las causas que provoca el 80 % de los efectos de cualquier fenómeno estudiado.

Utilidad del diagrama de Pareto

- Identificar y concentrar los esfuerzos en los puntos clave de un problema o fenómeno como puede ser: los mayores consumidores de energía de la fábrica, las mayores pérdidas energéticas o los mayores costos energéticos.
- Predecir la efectividad de una mejora al conocer la influencia de la disminución de un efecto al reducir la barra de la causa principal que lo produce.
- Determinar la efectividad de una mejora comparando los diagramas de Pareto anterior y posterior a la mejora.

2.2.2.2- Estratificación

La estatificación es el método de agrupar datos asociados por puntos o características comunes pasando de lo general a lo particular. Pueden ser estatificados los gráficos de control, los diagramas de Pareto y de dispersión, los histogramas, y otras herramientas de descripción de efectos. El propósito de la estatificación es similar al histograma, pero ahora clasificando los datos en función de una característica común que permite profundizar en la búsqueda y verificación de las causas a encontrar, resolver o eliminar.

Utilidad de la estratificación

- Discriminar las causas que están provocando el efecto estudiado.
- Conocer el árbol de causas de un problema o efecto.
- Determinar la influencia cuantitativa de las causas particulares sobre las generales y sobre el efecto estudiado.

2.2.2.3- Gráfico de consumo y producción en el tiempo

Este gráfico puede realizarse por tipo de portador energético, y por áreas, considerando en cada caso la producción asociada al portador en cuestión. Por ejemplo: una fábrica de helados graficará el consumo de combustible o electricidad *versus* las toneladas de helados producidas, mientras que en un hotel turístico se puede graficar el consumo de electricidad o de gas *versus* los cuartos-noches ocupados.

Utilidad del gráfico

- Determinar en qué medida la variación de los consumos energéticos se deben a variaciones de la producción.

- Mostrar si los componentes de un indicador de consumo de energía están correlacionados entre sí, y por tanto, si el indicador es válido o no.
- Establecer nuevos indicadores de consumos o costos energéticos.
- Determinar la influencia de factores productivos de la empresa sobre los consumos energéticos y establecer variables de control.
- Identificar el modelo de variación promedio de los consumos respecto a la producción.
- Determinar cuantitativamente el valor de la energía no asociada a la producción.

Variaciones anormales en el gráfico

Un incremento de la producción debe producir, generalmente, un incremento del consumo energético asociado al proceso y viceversa. Comportamientos anómalos son:

- Incrementa la producción y decrece el consumo de energía.
- Decrece la producción y se incrementa el consumo de energía.
- La razón de variación de la producción y el consumo, ambos creciendo o decreciendo, son significativos en el período analizado.

2.2.2.4- Diagrama índice de consumo - producción

Este gráfico es muy útil para establecer sistemas de gestión energética, y estandarizar procesos productivos a niveles de eficiencia energética superiores. También, se pueden establecer sobre este gráfico las metas de reducción del índice proyectadas para el nuevo periodo e ir controlando su cumplimiento.

Utilidad del diagrama

- Establecer metas de índices de consumos en función de una producción planificada por las condiciones de mercado.
- Evaluar el comportamiento de la eficiencia energética de la empresa en un período.
- Determinar el punto crítico de producción de la empresa o de productividad de un equipo y planificar estos indicadores en las zonas de alta eficiencia energética.
- Determinar factores que influyen en las variaciones del índice de consumo a nivel de empresa, área o equipo.

2.3- Procedimiento de cálculo para evaluar energéticamente a las calderas

El diagnóstico energético de los generadores de vapor tendrá en cuenta el balance térmico y exergético. La metodología utilizada ha sido recomendada por varios autores (Pérez, 1972; Pankratov, 1987; Tanquero 1997; Borroto y Rubio, 2007). Sin embargo, en este trabajo se particularizaron los procedimientos a las calderas estudiadas.

2.3.1- Procedimiento para el balance térmico

2.3.1.1- Poder calórico inferior del combustible

Para la determinación del valor calórico bajo del combustible se utiliza esta ecuación, teniendo en cuenta el tipo de combustible que se usa:

$$Qb^t = 339 \cdot C^t + 1030 \cdot H^t - 109 \cdot (O^t - S^t) - 24 \cdot W^t \quad (2.1)$$

Donde:

Qb^t : poder calórico inferior del combustible; kJ/kg

C^t : cantidad de carbono en el combustible; %

H^t : cantidad de hidrógeno en el combustible; %

O^t : cantidad de oxígeno en el combustible; %.

S^t : cantidad de azufre en el combustible; %.

W^t : cantidad de humedad en el combustible; %.

Nota: todos los porcentajes de los elementos químicos están en masa de trabajo.

Según Pérez (1972) y Pankratov (1987) la determinación del volumen de los gases producto de la combustión es necesaria en el cálculo del generador de vapor, pues son estos los que transfieren el calor al agua y al aire a través de las superficies metálicas.

2.3.1.2- Cálculo de los volúmenes de la combustión

- Volumen de aire teórico

$$V^0a = 0,0889 \cdot (C^t + 0,375 \cdot S^t) + 0,265 \cdot H^t - 0,0333 \cdot O^t \quad (2.2)$$

- Volumen total real de gases triatómicos

$$V_{RO_2} = 0,01866 \cdot (C^t + 0,375 \cdot S^t) \quad (2.3)$$

- Volumen teórico de nitrógeno

$$V^0_{N_2} = 0,79 \cdot V^0_a + 0,008 \cdot N^t \quad (2.4)$$

- Volumen teórico de los gases secos

$$V^0_{gs} = V_{RO_2} + V^0_{N_2} \quad (2.5)$$

- Volumen teórico de los vapores de agua

$$V^0_{H_2O} = 0,111 \cdot H^t + 0,0124 \cdot W^t + 0,0161 \cdot V^0_a \quad (2.6)$$

- Volumen teórico total de gases

$$V^0_g = V^0_{gs} + V^0_{H_2O} \quad (2.7)$$

- Volumen real de gases

$$Vg = V^0_g + (\alpha - 1) \cdot Va \quad (2.8)$$

- Volumen real de aire

$$Va = V^0_a \cdot \alpha \quad (2.9)$$

Nota: todos los volúmenes antes relacionados se expresan en m³/kg.

2.3.1.3- Cálculo del coeficiente de exceso de aire

Para combustión incompleta

$$\alpha = \frac{N_2}{N_2 - 3,76 \cdot (O_2 - 0,5 \cdot CO - 0,5 \cdot H_2 - 2 \cdot CH_4)} \quad (2.10)$$

$$N_2 = 100 - (CO + CO_2 + O_2) \quad (2.11)$$

Donde:

α : coeficiente de exceso de aire; adimensional

N₂: cantidad de dinitrógeno presente en los gases de escape; %

O₂: cantidad de dióxígeno presente en los gases de escape; %

CO: cantidad de monóxido de carbono presente en los gases de escape; %

CO₂: cantidad de dióxido de carbono presente en los gases de escape; %

H₂: cantidad de dihidrógeno presente en los gases de escape; %

CH₄: cantidad de metano presente en los gases de escape; %

2.3.1.4- Cálculo de las entalpías de los gases y el aire

- Entalpía teórica de los gases

$$I^0_g = V_{R0_2} \cdot I_{CO_2} + V^0_{N_2} \cdot I_{N_2} + V^0_{H_2O} \cdot I_{H_2O} + 0,01 \cdot A^t \cdot A_{arr} \cdot I_{cen} \quad (2.12)$$

Donde:

I^0_g : entalpía teórica de los gases; kJ/kg

I_{CO_2} : entalpía de los gases triatómicos (en este caso el CO₂); kJ/m³

I_{N_2} : entalpía del dinitrógeno; kJ/m³

I_{H_2O} : entalpía de los vapores de agua; kJ/m³

I_{aire} : entalpía del aire; kJ/m³

I_{ceniza} : entalpía de la ceniza; kJ/kg

A_{arr} : fracción de ceniza arrastrada por los gases; %

A^t : cantidad de ceniza arrastrada por los gases; %

Tabla 2.1. Valores de entalpía para diferentes temperaturas.

T	I_{CO_2}	I_{N_2}	I_{H_2O}	I_{aire}	I_{ceniza}
(°C)	(kJ/m ³)				(kJ/kg)
100	169	130	132	151	132
200	357	260	267	304	266
300	559	392	407	463	403
400	772	527	552	626	542

Fuente: Rey, 2014.

Entalpía real de los gases

$$I_g = I^0_g + I^0_{aire} \cdot (\alpha - 1) \quad (2.13)$$

$$I^0_{aire} = V^0_a \cdot i_{aire} \quad (2.14)$$

Donde:

I_g : entalpía real de los gases producto de la combustión; kJ/kg.

I^0_{aire} : entalpía teórica del aire; kJ/kg

i_{aire} : entalpía del aire; kJ/kg

2.3.1.5- Balance térmico por el método Directo

$$\eta_{tGVMD} = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_d \cdot B} \cdot 100 \quad (2.15)$$

Donde:

η_{tGVMD} : eficiencia bruta del generador de vapor, obtenida por el Método Directo; %.

B : consumo de combustible; kg/s

$Q_{\text{útil}}$: calor útil; kJ/s

Q_d : calor disponible; kJ/kg

- Determinación del calor disponible

$$Q_d = Q_b^t + Q_{fc} + Q_{fa} + Q_{atm} \quad (2.16)$$

Donde:

Q_{fc} : calor físico del combustible; kJ/kg

Q_{fa} : calor físico del aire; kJ/kg

Q_{atm} : calor para la atomización; kJ/kg

Siendo:

$$Q_{fc} = Cc \cdot t \quad (2.17)$$

Donde:

C_c : calor específico del combustible a la temperatura t ; $\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

t : temperatura del combustible; $^\circ\text{C}$

$$C_c = 1.783 + 0.025 \cdot t \quad (2.17a)$$

$$Q_{fa} = \alpha \cdot V^0_a \cdot (i_{sp} - i_{af}) \quad (2.18)$$

Donde:

i_{sp} : entalpía a la salida del precalentador de aire; kJ/m^3

i_{af} : entalpía del aire frío; kJ/m^3

$$Q_{atm} = D_{atm} \cdot (i_v - I_{vge}) \quad (2.19)$$

Donde:

i_v : entalpía del vapor de atomización, se busca a la temperatura y presión del vapor que entra al generador; kJ/kg

i_{vge} : entalpía del vapor en los gases de escape, se busca a la temperatura de los gases de escape y a la presión atmosférica; kJ/kg

- Determinación del calor útil

$$Q_{\text{útil}} = D_{vsc} \cdot (i_{vsc} - I_{aa}) + D_p \cdot (i_{lsa} - i_{aa}) \quad (2.20)$$

Donde:

D_{vsc} : producción de vapor sobrecalentado; kg/s

i_{vsc} : entalpía del vapor sobrecalentado; kJ/kg

i_{aa} : entalpía del agua de alimentación; kJ/kg

D_p : flujo de extracciones de purga; kg/s

i_{lsa} : entalpía del líquido saturado; kJ/kg

Cálculo de los flujos de aire y gases producto de la combustión

Flujo de aire necesario para la combustión Q_a (m^3/s)

$$Q_a = V_a \cdot B \quad (2.21)$$

Flujo de gases producto de la combustión Q_g (m^3/s)

$$Q_g = V_g \cdot B \quad (2.22)$$

2.3.1.6- Balance térmico por el método Indirecto

$$\eta_{tGV_{MI}} = 100 - \sum_{n=2}^6 q_n \quad (2.23)$$

Siendo:

$$\sum q_n = q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 \quad (\text{Sumatoria de todas las pérdidas de calor}); \% \quad (2.23a)$$

Donde:

$\eta_{tGV_{MI}}$: eficiencia bruta del generador de vapor, obtenida por el Método Indirecto; %

q_2 : pérdida a través de los gases de escape; %

q_3 : pérdida de calor por incombustión química; %

q_4 : pérdida de calor por incombustión mecánica; %

q_5 : pérdida por transferencia de calor al medio ambiente; %

q_6 : pérdida de calor con los residuos extraídos del horno; %

Determinación de las pérdidas

Pérdida a través de los gases de escape

La misma se produce con los gases que salen de la caldera a alta temperatura. Estos arrastran una cantidad de calor hacia la atmósfera, a través de la chimenea. La referida pérdida de calor está caracterizada por dos factores fundamentales:

- El coeficiente de exceso de aire.
- La temperatura de los gases de escape.

Además esta pérdida depende de:

- 1- El ΔT mínima para lograr la transferencia de calor.
- 2- La temperatura adecuada para evitar la corrosión.

$$q_2 = \frac{(I_{ge} - \alpha \cdot I_{af}) \cdot (100 - q_4)}{Q_d} \quad (2.24)$$

Pérdida de calor por incombustión química

Estas pérdidas se originan porque no todos los carbonos y otras sustancias hallan oxígeno suficiente para sufrir una oxidación completa, lo que causa que la reacción sea incompleta y se desprenda cierta cantidad de calor, la misma depende de:

- a) El coeficiente de exceso de aire.
- b) La mala selección de los equipos auxiliares (calentador, ventiladores y quemadores)

$$q_3 = \frac{(30,2 \cdot CO + 25,8 \cdot H_2 + 85,5 \cdot CH_4) \cdot V_{gs} \cdot (100 - q_4)}{Q_d} \quad (2.25)$$

Pérdida de calor por incombustión mecánica

La magnitud de esta pérdida depende del combustible, del tipo de horno y de su temperatura. La determina el combustible que no reacciona en el proceso de combustión.

Los rangos de su magnitud son (Pérez, 1972; Pankratov, 1987):

- | | |
|-------------------|--|
| $q_4 = 0,5 - 5\%$ | en la quema de combustibles sólidos en cámara |
| $q_4 = 2 - 15\%$ | en la quema de combustibles sólidos en capa y pila |
| $q_4 = 0\%$ | en la quema de combustibles líquidos y gaseosos |

$$q_4 = \left[a_{esc} \cdot \frac{C_{esc}}{100 - C_{esc}} + a_{cen} \cdot \frac{C_{cen}}{100 - C_{cen}} + a_{arr} \cdot \frac{C_{arr}}{100 - C_{arr}} \right] \cdot \frac{327,8 \cdot A^t}{Q_d} \quad (2.26)$$

Siendo:

$$a_{esc} = \frac{B_{esc} \cdot A_{esc}}{B \cdot A^t} \quad (2.26a)$$

$$a_{cen} = \frac{B_{cen} \cdot A_{cen}}{B \cdot A^t} \quad (2.26b)$$

$$a_{arr} = 1 - a_{esc} - a_{cen} \quad (2.26c)$$

$$B = \frac{D}{d} \quad (2.26d)$$

Donde:

A_{esc} , A_{cen} , a_{arr} : fracción del contenido total de cenizas del combustible en la escoria, residuos en las tolvas de la zona convectiva, residuos en los gases de arrastre; %.

C_{esc} , C_{cen} , C_{arr} : contenido de elemento en la ceniza, escoria y los gases de arrastre; %.

B_{esc} , B_{cen} : flujo de escorias y cenizas; kg/h.

d : índice de generación; kg_v/kg_c.

Pérdida por transferencia de calor al medio ambiente

Esta abarca todo el calor que por diferentes vías se transfiere al medio ambiente, ya sea por radiación directa a través de los registros abiertos, por conducción a través de las paredes y por convección al aire. Según Pérez (1972) y Pankratov (1987) los rangos de estas pérdidas son:

Calderas de	D < 10 t/h	$q_5 = 2 - 2,5 \%$
	D = 10 - 100 t/h	$q_5 = 0,5 - 2 \%$
	D = 100 - 300 t/h	$q_5 = 0,4 - 0,5 \%$

$$q_5 = q_{5N} \cdot \frac{D_N}{D_R} \quad (2.27)$$

Donde:

q_{5N} : pérdida de calor nominal; %

D_N : producción de vapor nominal; kg/s

D : producción de vapor real; kg/s

Pérdida de calor con los residuos extraídos del horno

Es la que se produce al evacuar las cenizas a altas temperaturas, depende del tipo de combustible y la temperatura de extracción.

$$q_6 = \frac{(a_{esc} - I_{esc} \cdot A^t)}{Q_d} \quad (2.28)$$

$$I_{esc} = C_{esc} \cdot t_{esc} \quad (2.28a)$$

Donde:

I_{esc} : entalpía de la escoria; kJ/kg

C_{esc} : calor específico de las escorias; kJ/kg·K

t_{esc} : temperatura de la escoria; K

Para combustibles líquidos y gaseosos $q_6 = 0$ (Pérez, 1972; Pankratov, 1987)

2.3.2- Procedimiento para el balance exergético

La exergía es la capacidad de trabajo útil máxima que puede obtenerse de un sistema en un determinado estado. El valor de la exergía se determina suponiendo que el sistema realiza un proceso totalmente reversible en el cual al final alcanza un estado de equilibrio con el medio ambiente y solo intercambiando calor con este (Faires, 1991; Fernández, 1994).

La exergía puede ser calculada para tres casos diferentes, ellos son: para un sistema cerrado en reposo, para un flujo y para una fuente de calor, el procedimiento para los dos últimos (presentes en un generador de vapor) se muestran a continuación:

2.3.2.1- Exergía de un flujo

En un flujo cualquiera si las energías cinética y potencial no tienen influencia apreciable, entonces la capacidad de trabajo útil máxima coincidirá con la exergía. En esas condiciones la exergía de un flujo m (kg/s) en el estado “1” se expresará:

$$e_x = (h_1 - h_0) - T_0 \cdot (s_1 - s_0) \quad (2.29)$$

$$E_x = m \cdot [(h_1 - h_0) - T_0 \cdot (s_1 - s_0)] \quad (2.30)$$

Donde:

e_x : exergía de un flujo; kJ/kg

E_x : exergía de un flujo; kJ/s

h : entalpía del flujo; kJ/kg

s : entropía del flujo; kJ/kg·K

T_0 : temperatura del medio ambiente; K

Nota:

Los subíndices 1 y 0 corresponden a las propiedades termodinámicas medidas a las condiciones del sistema y del medio ambiente, respectivamente.

2.3.2.2- Exergía de una fuente de calor

Para determinar la exergía del calor que se desprende de una fuente, se sigue el mismo principio empleado anteriormente. La capacidad de trabajo útil máxima que es posible obtener de ese calor sería por medio del empleo de una máquina de Carnot, o sea:

$$E_Q = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (2.31)$$

Donde:

E_Q : exergía de la fuente de calor; kJ/s.

Q : calor entregado por la fuente a la temperatura T ; kJ/kg.

Si el calor Q entregado por la fuente se realiza a una temperatura T variable, la exergía se determina de la forma siguiente:

$$E_Q = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_M} \right) \quad (2.32)$$

Donde:

T_M : temperatura media calculada; K

2.3.2.3- Rendimiento exergético de la instalación

Es una evaluación cuantitativa del grado de perfección o de irreversibilidad de un proceso, equipo o instalación. Su definición más generalizada es la siguiente:

$$\eta_{eGV} = \frac{E_R}{E_E} \cdot 100 \quad (2.33)$$

Donde:

η_{eGV} : rendimiento exergético; %

E_R : exergía recuperada; kJ/s

E_E : exergía empleada; kJ/s

Los conceptos de exergía recuperada y empleada varían conforme al sistema objeto de análisis, en este caso particular se consideran como exergía recuperada las exergías que se aprovechan en el sistema y como exergía empleada todas las exergías que entran al sistema de generación de vapor.

La pérdida de exergía puede también expresarse por medio de la definición de grado de pérdida, verificándose que:

$$\gamma = 1 - \eta_E \quad (2.34)$$

Donde.

γ : pérdida de exergía; %

Para los generadores de vapor de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” se consideran como exergía recuperada, empleada y perdida las que corresponden al vapor sobrecalentado; el combustible y el agua de alimentación; y los gases de escape, respectivamente.

2.4- Método empleado en la medición de los parámetros

La medición de los parámetros de funcionamiento de los generadores de vapor se realizó mediante la observación en el panel de control de la PC ubicada en la sala de mando. El mismo refleja las mediciones, cada una hora, de las variables del proceso de generación de vapor. En el Anexo 1 se exponen la descripción y características técnicas de los principales instrumentos utilizados para la medición de las variables.

2.4.1- Principales parámetros medidos en las calderas

La composición química del combustible, expresada en masa de trabajo y en por ciento, se muestra en la Tabla 2.1. Los valores relacionados corresponden a las seis variantes analizadas durante el primer trimestre del año 2015.

Tabla 2.1. Composición química del combustible.

	Elementos químicos en el combustible (%)					
Variantes analizadas ↓	C ^t	H ^t	O ^t	S ^t	N ^t	W ^t
Variante 1 (V-1)	84,10	7,73	0,6	6,52	0,2	0,8
Variante 2 (V-2)	83,91	7,71	0,6	6,48	0,2	0,8
Variante 3 (V-3)	83,51	7,69	0,7	6,47	0,2	0,8
Variante 4 (V-4)	83,67	7,68	0,6	6,51	0,2	0,8
Variante 5 (V-5)	83,95	7,59	0,7	6,49	0,2	0,8
Variante 6 (V-6)	83,66	7,61	0,6	6,43	0,2	0,8

Observación importante: los generadores de vapor emplean el mismo combustible en cada variante, ya que la tubería de suministro es común para todos.

Para la evaluación térmica y exergética de los generadores de vapor también se requiere de la composición química de los gases producto de la combustión. En la Tabla 2.2 se exponen valores obtenidos en las instalaciones.

Tabla 2.2. Composición química de los gases producto de la combustión.

	Generador de vapor 2 (valores promedios para las variantes 1-6)				
Variantes ↓	CO ₂	O ₂	CO	H ₂	CH ₄
V-1	15,6	2,5	0,10	0,00	0,00
V-2	15,9	2,4	0,11	0,00	0,00
V-3	15,2	2,5	0,14	0,00	0,00
V-4	15,1	1,8	0,10	0,00	0,00
V-5	15,9	2,3	0,15	0,00	0,00
V-6	15,2	2,7	0,13	0,00	0,00
Variantes ↓	Generador de vapor 4 (valores promedios para las variantes 1-6)				
V-1	15,8	2,6	0,11	0,00	0,00
V-2	15,1	2,2	0,14	0,00	0,00
V-3	15,7	2,9	0,15	0,00	0,00
V-4	15,8	2,4	0,16	0,00	0,00
V-5	15,7	2,6	0,17	0,00	0,00
V-6	15,5	2,9	0,19	0,00	0,00
Variantes ↓	Generador de vapor 5 (valores promedios para las variantes 1-6)				
V-1	15,9	2,8	0,17	0,00	0,00
V-2	15,1	2,6	0,17	0,00	0,00
V-3	15,8	2,9	0,19	0,00	0,00
V-4	15,7	2,4	0,14	0,00	0,00
V-5	15,1	2,5	0,11	0,00	0,00
V-6	15,4	2,6	0,16	0,00	0,00
Variantes ↓	Generador de vapor 6 (valores promedios para las variantes 1-6)				
V-1	14,4	2,6	0,010	0,00	0,00
V-2	14,3	2,8	0,015	0,00	0,00
V-3	14,3	2,8	0,010	0,00	0,00
V-4	14,02	2,7	0,010	0,00	0,00
V-5	13,98	3,2	0,015	0,00	0,00
V-6	14,40	2,4	0,010	0,00	0,00

Por otra parte, en los generadores de vapor además de las variables relacionadas en las Tablas 2.1 y 2.2 (composición química del combustible y de los gases producto de la combustión, respectivamente), se midieron los principales parámetros que caracterizan el funcionamiento de los mismos, en el periodo analizado (Tabla 2.3).

Tabla 2.3. Mediciones de los parámetros para los cuatro generadores de vapor.

Parámetros de funcionamiento (valores promedios para las variantes 1-6)	Generador de vapor 2					
	V-1	V-2	V-3	V-4	V-5	V-6
Producción de vapor sobrecalentado; t/h.	56,9	54,6	50,2	51,6	55,1	54,9
Presión del vapor sobrecalentado; atm.	36	38	36	36	36	36
Temperatura del vapor sobrecalentado; °C.	432,9	422,9	431,1	425,8	419,3	418,4
Temperatura del agua de alimentación; °C.	142,6	140,0	137,5	142,5	144,2	142,9
Temperatura del combustible; °C.	138,1	137,7	140,8	141,4	130,0	131,7
Temperatura de los gases de escape; °C.	248,3	244,2	227,4	230,9	228,3	233,0
Temperatura del medio ambiente; °C.	31	33	30	32	31	30
Consumo de combustible; t/h	4,6	4,4	4,0	4,1	4,3	4,3
Parámetros de funcionamiento (valores promedios para las variantes 1-6)	Generador de vapor 4					
	V-1	V-2	V-3	V-4	V-5	V-6
Producción de vapor sobrecalentado; t/h.	50,1	49,4	51,6	49,8	55,4	56,2
Presión del vapor sobrecalentado; atm.	36	36	36	36	35	36
Temperatura del vapor sobrecalentado; °C.	426,3	422,5	418,2	421,4	431,6	435,1
Temperatura del agua de alimentación; °C.	143,3	144,2	143,8	142,2	131,6	142,9
Temperatura del combustible; °C.	144,0	141,1	134,9	136,9	137,2	137,3
Temperatura de los gases de escape; °C.	193,3	183,8	184,8	195,8	203,3	206,8
Temperatura del medio ambiente; °C.	33	31	32	30	30	32
Consumo de combustible; t/h	3,9	3,8	4,0	3,9	4,5	4,5

Parámetros de funcionamiento (valores promedios para las variantes 1-6)	Generador de vapor 5					
	V-1	V-2	V-3	V-4	V-5	V-6
Producción de vapor sobrecalentado; t/h.	46,0	41,1	38,7	39,7	43,3	40,0
Presión del vapor sobrecalentado; atm.	38,0	37,2	36,8	36,5	36,5	36,6
Temperatura del vapor sobrecalentado; °C.	431,4	312,3	428,8	440,0	440,0	437,2
Temperatura del agua de alimentación; °C.	138,7	142,4	142,7	131,5	143,0	142,3
Temperatura del combustible; °C.	134,6	136,2	139,6	138,3	142,0	142,0
Temperatura de los gases de escape; °C.	176,6	180,3	181,9	211,0	179,3	198,5
Temperatura del medio ambiente; °C.	30	32	32	33	30	31
Consumo de combustible; t/h	3,6	3,2	3,0	3,2	3,4	3,2
Parámetros de funcionamiento (valores promedios para las variantes 1-6)	Generador de vapor 6					
	V-1	V-2	V-3	V-4	V-5	V-6
Producción de vapor sobrecalentado; t/h.	115,5	118,8	117,7	106,5	107,2	111,6
Presión del vapor sobrecalentado; atm.	35	36	35	35	35	36
Temperatura del vapor sobrecalentado; °C.	439,5	439,3	439,8	439,5	439,5	439,5
Temperatura del agua de alimentación; °C.	142,3	140,8	143,1	143,4	143,2	136,8
Temperatura del combustible; °C.	139,5	141,9	144,2	140,4	135,9	137,5
Temperatura de los gases de escape; °C.	296,4	297,2	293,8	286,2	280,4	289,8
Temperatura del medio ambiente; °C.	31	33	30	32	32	30
Consumo de combustible; t/h	9,3	9,6	9,5	8,6	8,6	9,1

Durante el primer trimestre del presente año se tomaron 24 mediciones diarias de cada parámetro de las calderas (cada una hora). Esto se realizó utilizando el software especializado disponible en la UEB Termoeléctrica (el SITECT).

Los valores de los parámetros de funcionamiento expuestos en las Tablas 2.2 y 2.3 constituyen los resultados promedios de las mediciones realizadas en el periodo. La composición química de combustible se obtuvo en experimentos realizados en el mismo periodo (Tabla 2.1).

2.5- Conclusiones del capítulo 2

- ✓ Se establecieron los fundamentos teóricos y las herramientas fundamentales que caracterizan a la tecnología de gestión total eficiente de la energía. Además, se particularizaron, a los generadores de vapor investigados, los métodos de cálculo empleados para el balance térmico y exergético. Estos aspectos, vistos de manera integrada, constituyen el procedimiento para diagnóstico energético de las calderas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.
- ✓ El sistema de medición empleado en la determinación de los principales parámetros de funcionamiento de las calderas es satisfactorio para el desarrollo del diagnóstico energético de las instalaciones. Lo anterior está determinado por el adecuado grado de automatización y control que posee la UEB Termoeléctrica y, en particular, el área de generación de vapor.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS DEL DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO E IMPACTOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES ASOCIADOS AL TRABAJO DE LAS CALDERAS

3.1- Introducción

En el presente capítulo se exponen y analizan los resultados fundamentales del diagnóstico energético de los generadores de vapor de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, obtenidos a partir de la aplicación de herramientas de la tecnología de gestión total eficiente de la energía en la Termoeléctrica y el balance termoexergético de las calderas. Además, se establecen los impactos económicos y ambientales asociados al trabajo de las instalaciones.

El **objetivo** del capítulo es valorar los resultados obtenidos en la investigación y los impactos económico-ambientales asociados al objeto de estudio.

3.2- Análisis de los resultados de la aplicación de herramientas de la tecnología de gestión total eficiente de la energía

3.2.1- Diagrama de Pareto de los principales portadores energéticos

Para llegar al reconocimiento específico del comportamiento energético o del uso de un portador energético en particular, se requiere del conocimiento de la matriz energética de la entidad. Luego, a través de la estratificación es posible determinar el grado de incidencia que tiene determinados equipamientos principales en el consumo energético y poder entonces mediante estudios específicos sugerir medidas que tributen a la racionalización de los recursos energéticos (Borroto y Monteagudo, 2006; Rey, 2014).

En el caso en particular de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” para garantizar el proceso productivo se requiere de un conjunto de portadores energéticos. Sin embargo, se conoce de trabajos precedentes (Plana, 2011; Vega, 2013) que entre los más empleados se encuentran el fuel oil, el crudo, el vapor, la electricidad, el diésel, los aceites lubricantes y la gasolina.

Por otra parte, a través de las visitas técnicas realizadas, el análisis de las investigaciones antes mencionadas y de los reportes técnicos de circulación interna se

evidenció que en la UEB Termoeléctrica de la referida empresa los portadores energéticos más consumidos son el combustible fuel oil y el vapor que se produce en la planta. Por tal razón, se procedió a analizar el comportamiento de los mismos a nivel de empresa en el año 2014 (Figuras 3.1 y 3.2). Se seleccionó este año por ser el que precede al periodo en que se desarrolló la presente investigación.

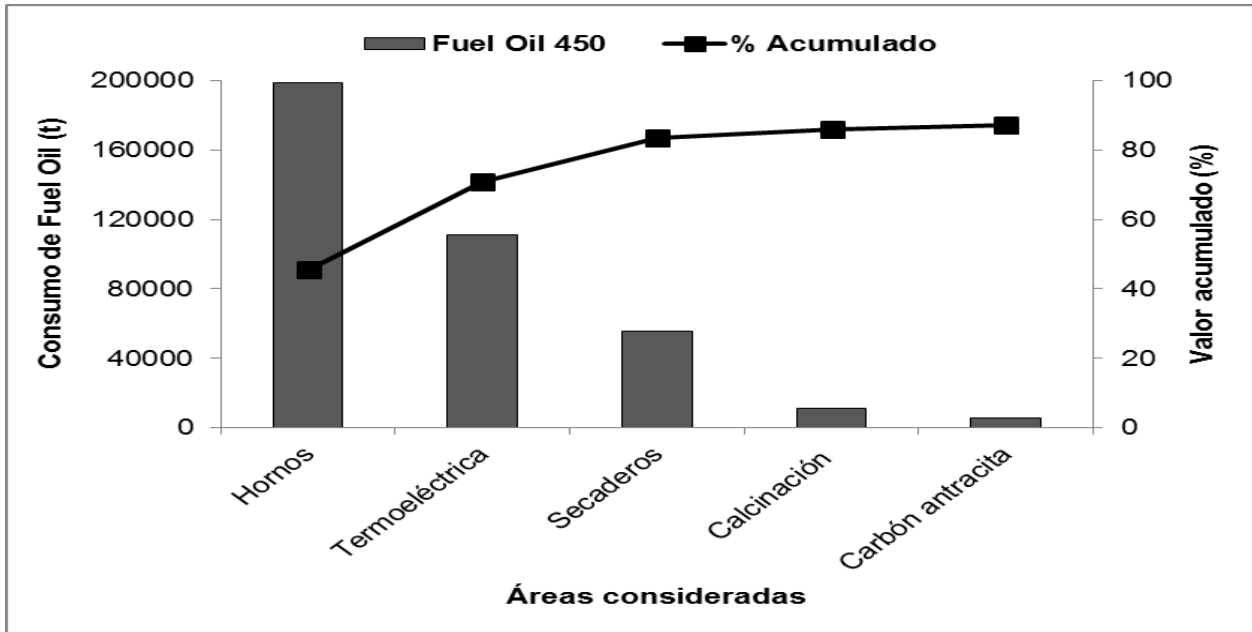


Figura 3.1. Diagrama de Pareto para el Fuel Oil en el año 2014.

Como se aprecia en la Figura 3.1, existe cinco áreas en la empresa donde se consume este portador energético (el fuel oil), y de ellas la Termoeléctrica ocupa el segundo lugar con un 25,379 % del total, solo por detrás de Hornos. Lo anterior se debe a que en la planta termoenergética se explotan cuatro calderas que emplean el fuel oil para la generación de vapor y lo hacen en un régimen continuo de trabajo.

Al valorar la incidencia que tiene para la empresa el consumo de fuel oil en la UEB Termoeléctrica se infiere que el mismo constituye uno de los portadores de mayor incidencia en los gastos económicos de la fábrica y la UEB. Eso significa que los mayores esfuerzos en la gestión energética se deben dedicar a este portador en particular y, por consiguiente, al equipamiento que lo consume en una mayor cuantía. Lo anterior posibilitará mitigar las afectaciones económicas y ambientales que provoca el excesivo consumo de este combustible fósil.

En el caso del vapor producido en la propia UEB Termoeléctrica se debe destacar la vital importancia que este portador tiene para el funcionamiento de la empresa. De ahí que la función principal de la planta termoenergética es garantizar el vapor que se requiere en todas las etapas del proceso productivo de la fábrica. Al analizar los consumos de las diferentes área analizadas se infiere que en la referida UEB se gasta el 15,917 % del total, sin considerar la sección de turbinas y el 52,398 % teniendo en cuenta esta última.

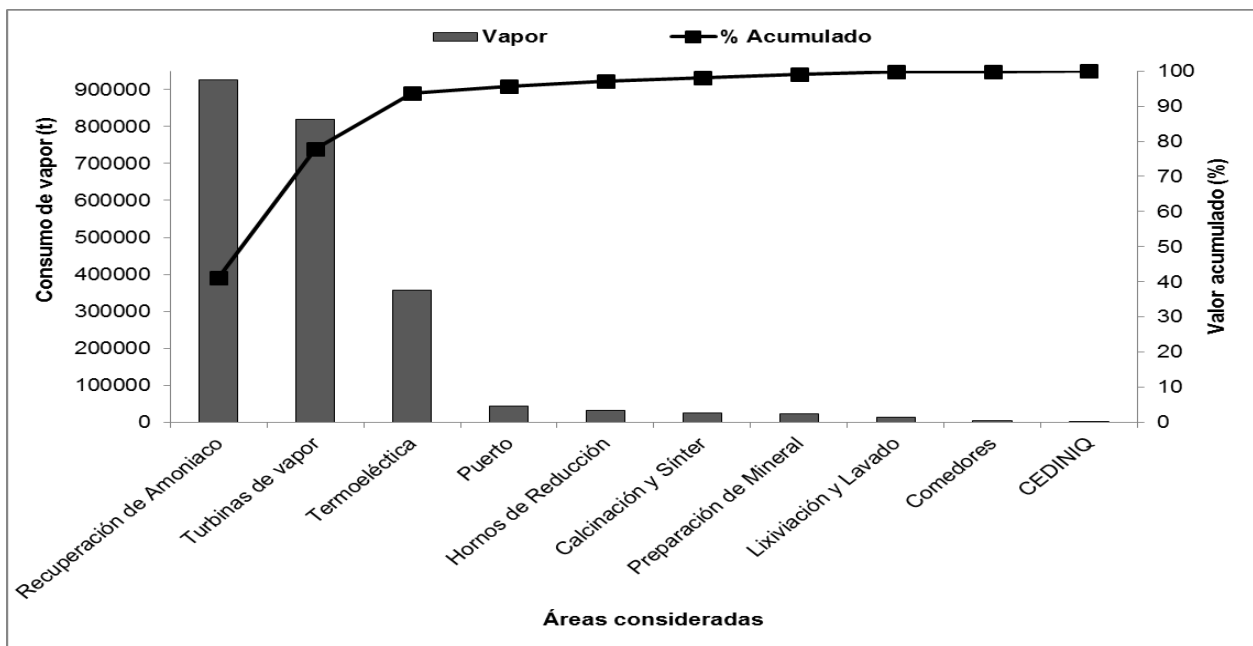


Figura 3.2. Diagrama de Pareto para el vapor en el año 2014.

Estos comportamientos sugieren que, si se quiere lograr una adecuada y eficiente gestión energética en la entidad, además del gasto de combustible también se debe prestar especial atención al consumo de vapor en la Termoeléctrica (incluyendo la sección de turbinas) y a la producción de este portador de energía. Esto está determinado por el alto costo que implica el proceso de obtención de vapor mediante esta tecnología.

3.2.2- Estratificación de los portadores energéticos

En el caso particular de los dos portadores energéticos analizados (fuel oil y vapor) no se requiere la estratificación de los mismos porque en el caso del primero solo se

emplea en las calderas de la UEB Termoeléctrica, por tanto es evidente inferir que la incidencia de los generadores de vapor en el consumo de este portador de energía es total (100 %). Por su parte, el vapor es consumido en la sección de turbinas y en las restantes áreas de la UEB, a razón de un 69,623 y 30,377 %, respectivamente. A pesar de lo anterior, es bueno destacar que de las otras áreas consideradas, las calderas gastan una cantidad significativa de vapor durante su funcionamiento (en el proceso de atomización en los quemadores).

3.2.3- Consumo y producción en el tiempo

El consumo de fuel oil en la UEB se mantuvo estable entre las 8 y 10 mil toneladas. Sin embargo, la producción de vapor y de electricidad mostraron oscilaciones que no son directamente proporcionales a las variaciones en el gasto de combustible (Figura 3.3). Esto sugiere que existen otras variables (la eficiencia de la combustión, la calidad del combustible y el vapor, entre otras) que determinan la dinámica del comportamiento y la interdependencia entre los parámetros analizados (consumo de fuel oil, productividad de vapor y electricidad), siendo las más significativas los rendimientos térmicos de las calderas y las turbinas de vapor, respectivamente.

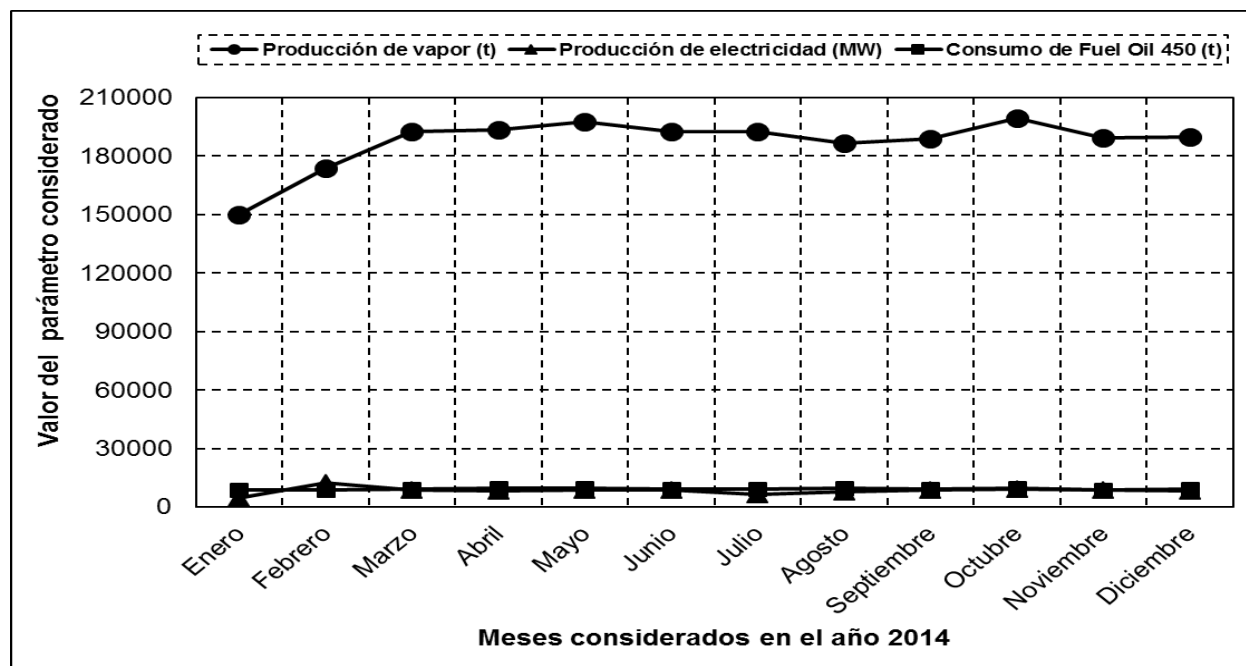


Figura 3.3. Comportamiento del consumo y la producción en el tiempo.

En este sentido, resulta importante lograr la explotación de los generadores y las turbinas de vapor de manera estable y prolongada en niveles de rendimientos térmicos cercanos a los nominales. Esto posibilita una gestión eficiente de los indicadores energéticos de estas instalaciones.

3.2.4- Índice de consumo y producción de vapor

El índice de consumo refleja en qué medida se aprovecha, en la producción de vapor, el combustible que se quema en las calderas. De acuerdo con Hernández (2006), en los generadores de vapor modernos se considera un valor satisfactorio 75 kg/t (kilogramos de combustible consumido por tonelada de vapor producido), cuando estos trabajan con rendimientos térmicos que oscilan entre el 92 y 93 %

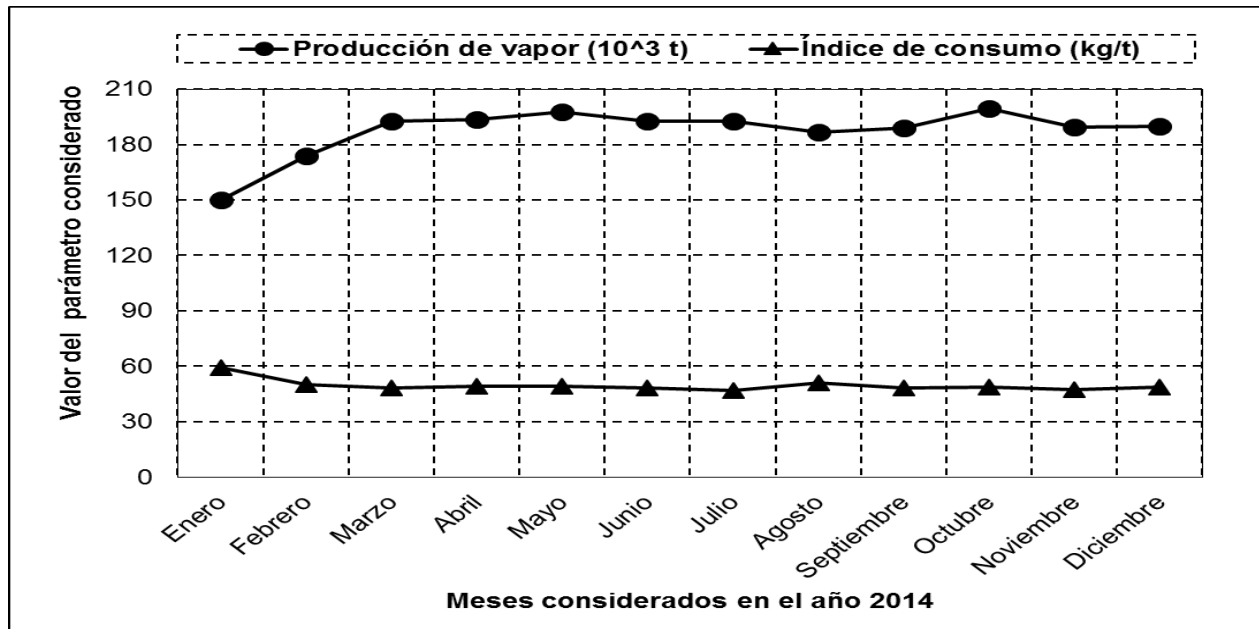


Figura 3.4. Comportamiento del índice de consumo y la producción de vapor.

Como se aprecia en la Figura 3.4, el índice de consumo osciló entre 46 y 60 kg/t. Esto indica que las calderas, de manera conjunta, aprovechan adecuadamente la energía que desprende el combustible durante la combustión. Sin embargo, se requiere de un balance térmico y exergético detallado de las instalaciones que revele las complejas dinámicas que involucran a los principales parámetros de funcionamiento. A este aspecto se dedicará el epígrafe siguiente.

3.3- Análisis de los resultados del balance térmico y exergético

En las Tablas 3.1-3.4 se resumen los resultados obtenidos en el cálculo de los principales parámetros de funcionamiento de los generadores de vapor, para las seis variantes consideradas. En el Anexo 2 se relaciona, de manera íntegra, el procedimiento de cálculo aplicado a los datos correspondientes a la variante 1 para la generador de vapor 2, no se exponen las restantes variantes porque se emplea el mismo procedimiento, las calderas son semejantes y solo cambian los datos iniciales.

En el balance termoexergético de las calderas se emplearon los softwares Mathcad15 y VAPOR. Además, se empleó la tabla de propiedades termodinámicas del agua y el vapor (Vukalovitch, 1978).

Tabla 3.1. Valores de los parámetros fundamentales obtenidos en el balance térmico y exergético realizado al generador de vapor 2.

	Generador de vapor 2						Unidad
	V-1	V-2	V-3	V-4	V-5	V-6	
Q_b^t	$3,71 \times 10^7$	$3,701 \times 10^7$	$3,684 \times 10^7$	$3,69 \times 10^7$	$3,689 \times 10^7$	$3,682 \times 10^7$	J/kg
V^0a	9,722	9,699	9,654	9,671	9,668	9,648	m ³ /kg
V^{R02}	1,615	1,611	1,604	1,607	1,612	1,606	m ³ /kg
V^0N_2	7,682	7,664	7,628	7,641	7,639	7,624	m ³ /kg
V^0gs	9,297	9,275	9,232	9,248	9,251	9,23	m ³ /kg
V^0H_2O	1,024	1,022	1,019	1,018	1,008	1,01	m ³ /kg
V^0g	10,322	10,297	10,251	10,266	10,259	10,24	m ³ /kg
Vg	11,712	11,614	11,61	11,171	11,489	11,749	m ³ /kg
Va	10,956	10,874	10,862	10,503	10,771	10,975	m ³ /kg
α	1,127	1,121	1,125	1,086	1,114	1,137	adim.
Qd	$3,739 \times 10^7$	$3,73 \times 10^7$	$3,713 \times 10^7$	$3,72 \times 10^7$	$3,716 \times 10^7$	$3,709 \times 10^7$	J/kg
$Q_{\text{útil}}$	$1,534 \times 10^{11}$	$1,464 \times 10^{11}$	$1,363 \times 10^{11}$	$1,383 \times 10^{11}$	$1,465 \times 10^{11}$	$1,462 \times 10^{11}$	J/h
η_{C-MD}	89,219	89,23	91,735	90,705	91,69	91,647	%

$\eta_{C-MD} (P)$	90,704						%
Q_a	5,039x10 ⁴	4,7845x10 ⁴	4,344x10 ⁴	4,306x10 ⁴	4,631x10 ⁴	4,719x10 ⁴	m ³ /h
Q_g	5,387x10 ⁴	5,110x10 ⁴	4,644x10 ⁴	4,579x10 ⁴	4,940x10 ⁴	5,052x10 ⁴	m ³ /h
q_2	8,334	8,101	7,544	7,648	7,556	7,756	%
q_3	0,082	0,088	0,117	0,084	0,12	0,109	%
q_4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	%
q_5	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	%
q_6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	%
η_{C-MI}	89,584	89,811	90,338	91,885	90,324	90,134	%
$\eta_{C-MI} (P)$	90,346						%
$\eta_{ex C}$	46,02	46,038	47,006	46,498	47,149	47,054	%
$\eta_{ex C} (P)$	46,627						%
γ	53,98	53,962	52,994	53,502	52,851	52,946	%

Como se aprecia en las Tablas 3.1-3.3, los resultados promedios obtenidos para las calderas 2; 4 y 5 son semejantes. Lo anterior se evidencia en los valores de los rendimientos térmicos (90,525 %; 91,861 % y 92,186 %) y exergéticos (46,627 %; 47,136 % y 47,511 %), los cuales mostraron una oscilación inferior al 1,7 y 0,9 %, respectivamente. Otro aspecto a destacar es el nivel de exceso de aire con que trabajan estas instalaciones, que para las condiciones analizadas varió entre 11,8 y 13,3 %. Por su parte, las pérdidas de calor a través de los gases de escape (q_2) y por incombustión química (q_3) fueron inferiores a 7,9 y 0,13 %, por ese orden.

Tabla 3.2. Valores de los parámetros fundamentales obtenidos en el balance térmico y exergético realizado al generador de vapor 4.

	Generador de vapor 4						Unidad
	V-1	V-2	V-3	V-4	V-5	V-6	
Q_b^t	3,71x10 ⁷	3,701x10 ⁷	3,684x10 ⁷	3,69x10 ⁷	3,689x10 ⁷	3,682x10 ⁷	J/kg
V^a	9,722	9,699	9,654	9,671	9,668	9,648	m ³ /kg

VR_{O_2}	1,615	1,611	1,604	1,607	1,612	1,606	m ³ /kg
V^0N_2	7,682	7,664	7,628	7,641	7,639	7,624	m ³ /kg
V^0gs	9,297	9,275	9,232	9,248	9,251	9,23	m ³ /kg
V^0H_2O	1,024	1,022	1,019	1,018	1,008	1,01	m ³ /kg
V^0g	10,322	10,297	10,251	10,266	10,259	10,24	m ³ /kg
Vg	11,787	11,45	11,921	11,562	11,694	11,89	m ³ /kg
Va	11,016	10,741	11,106	10,827	10,936	11,084	m ³ /kg
α	1,133	1,107	1,15	1,12	1,131	1,149	adim.
Qd	3,74x10 ⁷	3,73x10 ⁷	3,712x10 ⁷	3,718x10 ⁷	3,717x10 ⁷	3,71x10 ⁷	J/kg
$Q_{\text{útil}}$	1,342x10 ¹¹	1,317x10 ¹¹	1,371x10 ¹¹	1,331x10 ¹¹	1,519x10 ¹¹	1,518x10 ¹¹	J/h
η_{C-MD}	92,001	92,91	92,367	91,756	90,811	90,897	%
$\eta_{C-MD} (P)$	91,790						%
Q_a	4,296x10 ⁴	4,081x10 ⁴	4,442x10 ⁴	4,222x10 ⁴	4,921x10 ⁴	4,988x10 ⁴	m ³ /h
Q_g	4,597x10 ⁴	4,351x10 ⁴	4,768x10 ⁴	4,509x10 ⁴	5,262x10 ⁴	5,350x10 ⁴	m ³ /h
q_2	6,073	5,813	5,769	6,302	6,581	6,623	%
q_3	0,089	0,118	0,121	0,129	0,138	0,156	%
q_4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	%
q_5	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	%
q_6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	%
η_{C-MI}	91,839	92,069	92,109	91,569	91,281	92,721	%
$\eta_{C-MI} (P)$	91,931						%
$\eta_{ex C}$	47,386	47,833	47,469	47,124	46,098	46,907	%
$\eta_{ex C} (P)$	47,136						%
γ	52,614	52,167	52,531	52,876	53,902	53,093	%

Los resultados relacionados anteriormente, analizados de forma integrada, permiten aseverar que las calderas 2; 4 y 5 tienen parámetros de funcionamiento adecuados, a pesar de trabajar en determinados periodos (que dependen de las exigencias del proceso productivo de la empresa) y llevar más de 25 años de explotación.

Tabla 3.3. Valores de los parámetros fundamentales obtenidos en el balance térmico y exergético realizado al generador de vapor 5.

	Generador de vapor 5						Unidad
	V-1	V-2	V-3	V-4	V-5	V-6	
Q_b^t	$3,71 \times 10^7$	$3,701 \times 10^7$	$3,684 \times 10^7$	$3,69 \times 10^7$	$3,689 \times 10^7$	$3,682 \times 10^7$	J/kg
V^0a	9,722	9,699	9,654	9,671	9,668	9,648	m ³ /kg
VR_{O_2}	1,615	1,611	1,604	1,607	1,612	1,606	m ³ /kg
V^0N_2	7,682	7,664	7,628	7,641	7,639	7,624	m ³ /kg
V^0gs	9,297	9,275	9,232	9,248	9,251	9,23	m ³ /kg
V^0H_2O	1,024	1,022	1,019	1,018	1,008	1,01	m ³ /kg
V^0g	10,322	10,297	10,251	10,266	10,259	10,24	m ³ /kg
Vg	11,922	11,723	11,91	11,566	11,628	11,669	m ³ /kg
Va	11,122	10,961	11,097	10,831	10,883	10,912	m ³ /kg
α	1,144	1,13	1,149	1,12	1,126	1,131	adim.
Q_d	$3,738 \times 10^7$	$3,729 \times 10^7$	$3,713 \times 10^7$	$3,719 \times 10^7$	$3,719 \times 10^7$	$3,711 \times 10^7$	J/kg
$Q_{\text{útil}}$	$1,245 \times 10^{11}$	$1,088 \times 10^{11}$	$1,039 \times 10^{11}$	$1,096 \times 10^{11}$	$1,174 \times 10^{11}$	$1,083 \times 10^{11}$	J/h
η_{C-MD}	92,535	91,213	93,303	92,064	92,816	91,173	%
$\eta_{C-MD} (P)$	92,184						%
Q_a	$4,003 \times 10^4$	$3,5075 \times 10^4$	$3,3292 \times 10^4$	$3,465 \times 10^4$	$3,7004 \times 10^4$	$3,491 \times 10^4$	m ³ /h
Q_g	$4,292 \times 10^4$	$3,7513 \times 10^4$	$3,5729 \times 10^4$	$3,701 \times 10^4$	$3,9534 \times 10^4$	$3,734 \times 10^4$	m ³ /h
q_2	5,538	5,617	5,657	6,784	5,657	6,352	%
q_3	0,136	0,143	0,152	0,113	0,093	0,132	%
q_4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	%
q_5	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	%
q_6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	%
η_{C-MI}	92,326	92,24	92,191	91,102	92,25	93,015	%
$\eta_{C-MI} (P)$	92,187						%

$\eta_{ex\ C}$	47,73	46,918	48,14	47,044	48,099	47,136	%
$\eta_{ex\ C\ (P)}$	47,511						%
γ	52,27	53,082	51,86	52,956	51,901	52,864	%

En el caso de la caldera 6, los resultados demuestran que existe un deterioro de los parámetros de funcionamiento, respecto a los ofrecidos por el fabricante. En este sentido, se destacan los valores promedios de presión y temperatura del vapor sobrecalentado que son inferiores en 3,867 atm. y 0,483 °C, respectivamente. Lo anterior, unido a la influencia de otras variables del proceso, limita la calidad del vapor entregado a las turbinas e influye en el rendimiento térmico, el cual como promedio ascendió a 89,988 % lo que difiere en un 3,012 % del valor preestablecido para este tipo de instalaciones que es 92-93 %, según las fuentes consultadas (Ficha técnica de los generadores de vapor 6 y 7 de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara, 2004; Hernández, 2006).

Tabla 3.4. Valores de los parámetros fundamentales obtenidos en el balance térmico y exergético realizado al generador de vapor 6.

	Generador de vapor 6						Unidad
	V-1	V-2	V-3	V-4	V-5	V-6	
Q_b^t	3,71x10 ⁷	3,701x10 ⁷	3,684x10 ⁷	3,69x10 ⁷	3,689x10 ⁷	3,682x10 ⁷	J/kg
V^0a	9,722	9,699	9,654	9,671	9,668	9,648	m ³ /kg
VR_{O_2}	1,615	1,611	1,604	1,607	1,612	1,606	m ³ /kg
V^0N_2	7,683	7,664	7,628	7,641	7,639	7,624	m ³ /kg
V^0gs	9,298	9,275	9,232	9,248	9,251	9,23	m ³ /kg
V^0H_2O	1,024	1,022	1,019	1,018	1,008	1,01	m ³ /kg
V^0g	10,322	10,297	10,251	10,266	10,259	10,24	m ³ /kg
Vg	11,79	11,908	11,856	11,792	12,176	11,553	m ³ /kg
Va	11,018	11,106	11,056	11,01	11,307	10,82	m ³ /kg
α	1,133	1,145	1,145	1,139	1,17	1,121	adim.

Q_d	3,739x10 ⁷	3,731x10 ⁷	3,714x10 ⁷	3,719x10 ⁷	3,717x10 ⁷	3,71x10 ⁷	J/kg
Q_{útil}	3,135x10 ¹¹	3,247x10 ¹¹	3,191x10 ¹¹	2,886x10 ¹¹	2,906x10 ¹¹	3,054x10 ¹¹	J/h
η_{C-MD}	90,164	90,654	90,439	90,215	90,892	90,45	%
η_{C-MD (P)}	90,469						%
Q_a	10,24x10 ⁴	10,661x10 ⁴	10,503x10 ⁴	9,468x10 ⁴	9,723x10 ⁴	9,845x10 ⁴	m ³ /h
Q_g	10,96x10 ⁴	11,431x10 ⁴	11,263x10 ⁴	10,14x10 ⁴	10,471x10 ⁴	10,51x10 ⁴	m ³ /h
q₂	10,236	10,174	10,157	9,785	9,521	10,024	%
q₃	0,0089	0,013	0,0089	0,0091	0,014	0,0089	%
q₄	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	%
q₅	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	%
q₆	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	%
η_{C-MI}	89,255	89,313	89,334	89,706	89,965	89,467	%
η_{C-MI (P)}	89,506						%
η_{ex C}	46,423	45,09	46,625	46,512	46,828	46,427	%
η_{ex C (P)}	46,317						%
γ	53,577	54,91	53,375	53,488	53,172	53,573	%

Al analizar de manera conjunta los resultados obtenidos (Tablas 3.1-3.4) se infiere que el sistema de generación de vapor (las cuatro calderas) trabaja con rendimientos térmicos y exergéticos iguales a 91,139 y 46,898 %. Estos valores se consideran satisfactorios para estas instalaciones debido a que las mismas trabajan en condiciones de explotación que difieren significativamente de las nominales.

3.4- Comportamiento de parámetros principales del proceso

3.4.1- Coeficiente de exceso de aire

Es un parámetro que influye en prácticamente todos los indicadores de funcionamiento de los generadores de vapor, porque determina en buena medida la eficiencia del proceso de combustión. El mismo osciló entre el 8 y 17 % en sus valores extremos, sin embargo por lo general la variación mostró una estabilidad entre 10 y 15 % (Figura 3.5). En las calderas 2; 4 y 5 en todo momento el proceso de combustión se desarrolló con el

exceso de aire apropiado (hasta el 15 %). Esto puede estar asociado a la experiencia que tienen los operarios en el trabajo con estos equipos y a la media productividad de vapor que en ellas se obtiene (75 t/h, valor nominal), lo cual no demanda excesivas cantidades de aire para la combustión por cuanto el consumo de combustible promedio es de 3,88 t/h. En el caso de la caldera 6 demandó un exceso de aire entre 12 y 17 %. Lo anterior puede ser atribuido a que en esta instalación se producen 150 t/h y para ello consume 9,12 t/h de crudo cubano. Además, la misma presenta diferencias significativas en el sistema de suministro de aire y evacuación de los gases, respecto a las calderas antes mencionadas (2; 4 y 5).

En general se puede afirmar que el comportamiento del coeficiente de exceso de aire es adecuado para estos tipos de calderas, porque en la combustión de combustibles líquidos la literatura especializada recomienda un exceso de aire entre el 2 y 15 % (Pérez, 1972; Borroto y Rubio, 2007), aspecto que se cumple en las instalaciones.

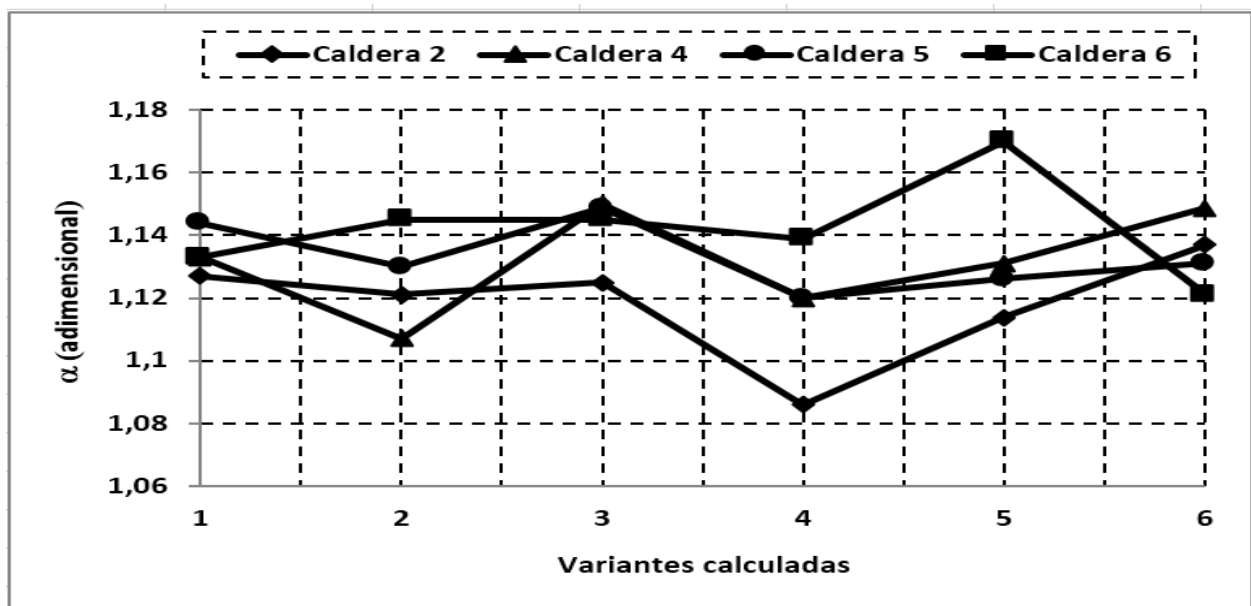


Figura 3.5. Comportamiento del coeficiente de exceso de aire en la combustión.

3.4.2- Flujos de aire y gases

Estos parámetros caracterizan la operación y determinan la selección de los ventiladores de tiro forzado (VTF), e inducido (VTI) para el suministro de aire y la evacuación de los gases en las instalaciones productoras de vapor. Los flujos de aire y gases a trasegar tienen una gran influencia en la combustión y en la eficiencia térmica

bruta y neta de las calderas porque influyen en el consumo de energía de los ventiladores.

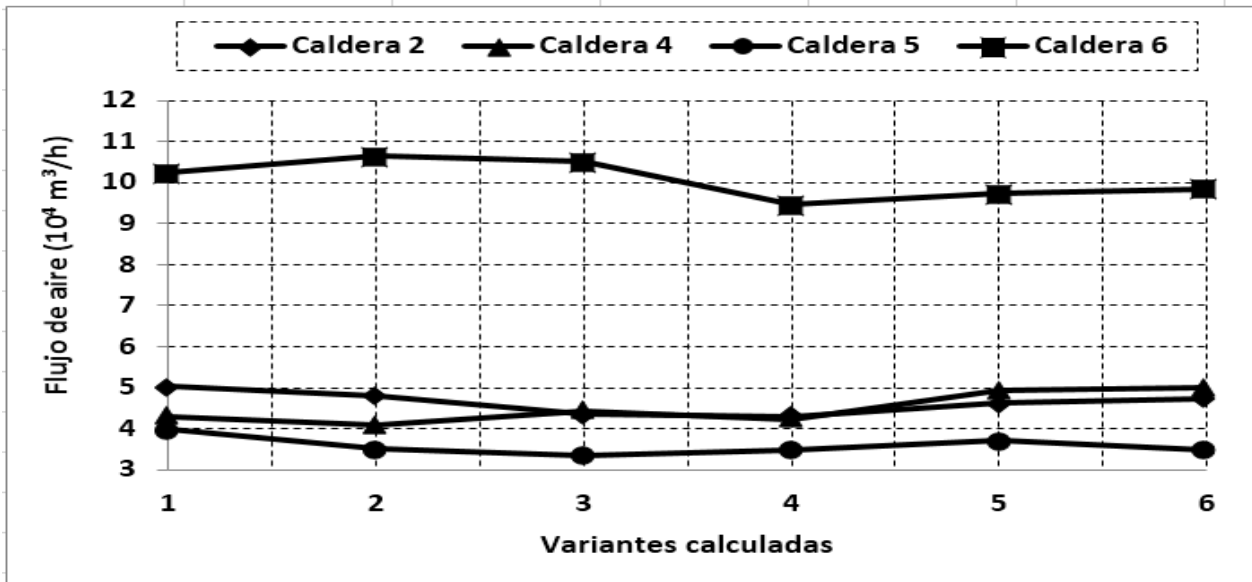


Figura 3.6. Comportamiento del flujo de aire necesario para la combustión.

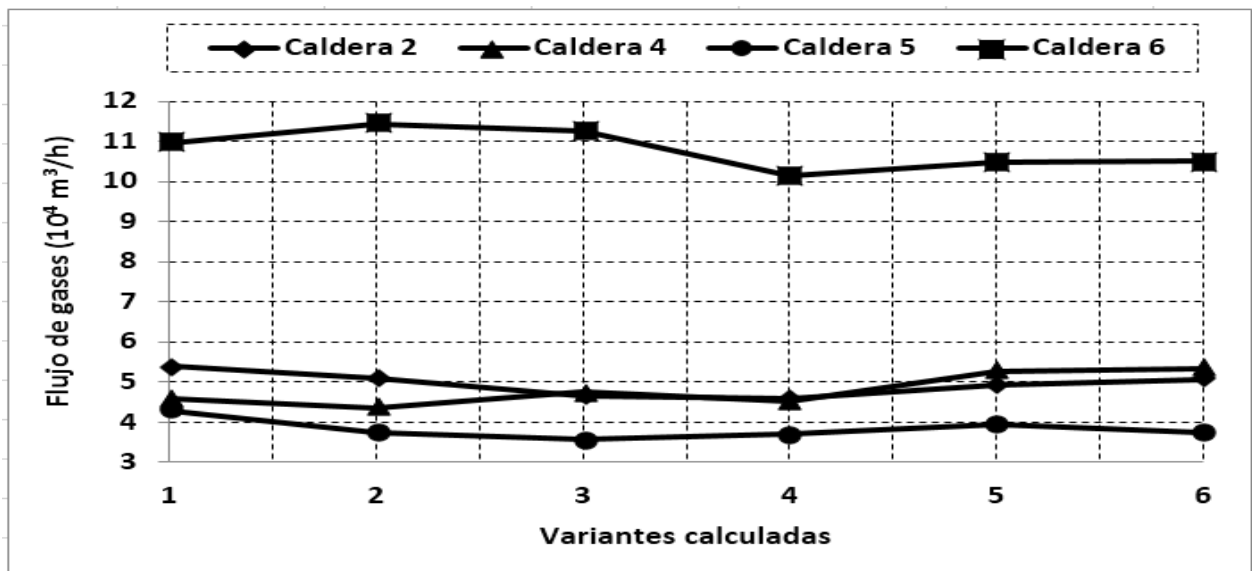


Figura 3.7. Comportamiento del flujo de gases producto de la combustión.

En las Figuras 3.6 y 3.7 se exponen los comportamientos de los flujos de aire y gases, como se aprecia, las calderas 2; 4 y 5 no exceden los 5 y 5,5 m³/h de aire y gases, respectivamente. En el caso de la caldera 6 las demandas de aire para la combustión y gases fueron ligeramente inferiores a 11 y 12 m³/h. Esto sugiere que los ventiladores de

tiro forzado e inducido suplen apropiadamente las demandas de los generadores de vapor durante su explotación debido a que el valor promedio de eficiencia térmica bruta del sistema de generación de vapor es de 91,139 %. Sin embargo, el rendimiento térmico neto difiere en los generadores de vapor 2; 4 y 5, respecto al 6 porque los primeros emplean dos ventiladores (VTF y VTI) y el segundo solo un (VTF).

3.4.3- Pérdidas de calor

Estas pérdidas determinan de manera directa la eficiencia térmica bruta de las calderas, obtenidas por el método indirecto (ver ecuaciones 2.23 y 2.23a). Para las instalaciones objeto de estudio se analizaron las pérdidas de calor que se producen a través de los gases de escape (Figura 3.8), por incombustión química y por transferencia de calor al medio ambiente. En este epígrafe solo se grafica el comportamiento de la primera de ellas (q_2) por constituir esta la más importante y la de mayor valor en los generadores de vapor (Pérez, 1972; Borroto y Rubio, 2007).

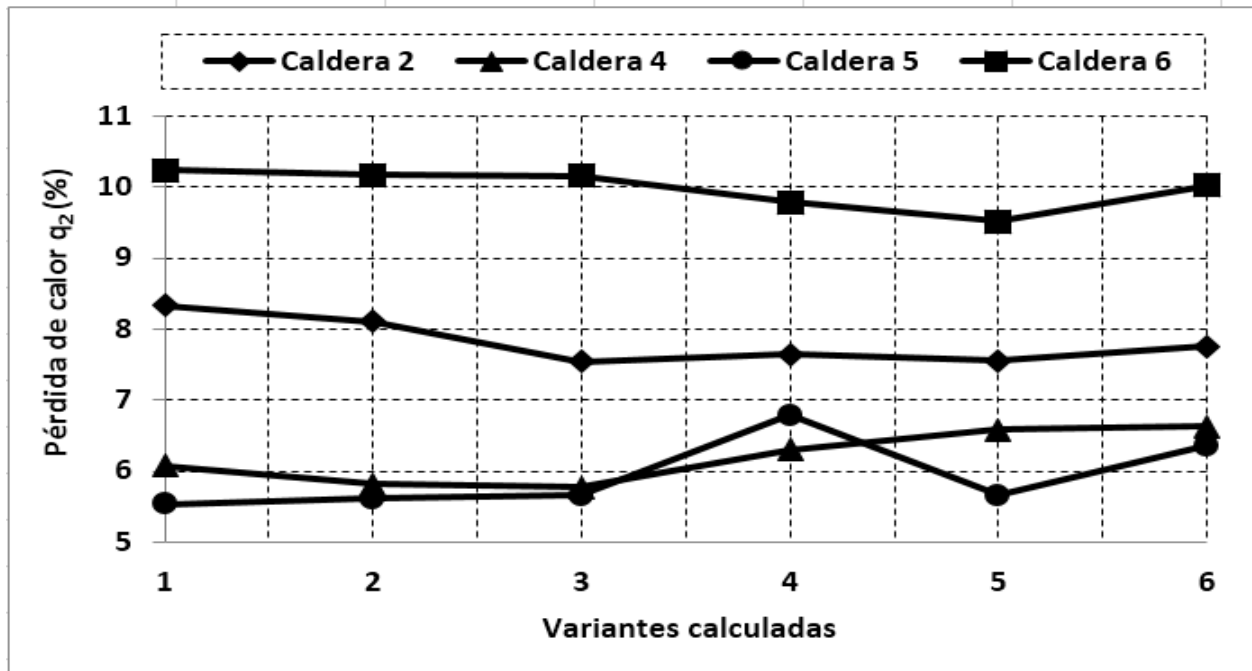


Figura 3.8. Comportamiento de la pérdida de calor a través de los gases de escape.

Al valorar los resultados obtenidos, se infiere que las calderas 2; 4 y 5 tuvieron pérdidas a través de los gases que no superaron el 8,5 %, lo que constituye un comportamiento satisfactorio de acuerdo con las inapropiadas condiciones de operación a las que están

sometidas (combustible de mala calidad, equipos auxiliares deteriorados, falta o insuficiente mantenimiento, entre otras).

Por su parte, en el generador de vapor 6 osciló entre 9,5 y 10,2 %. Estos valores son altos si se tienen en cuenta que en condiciones nominales estos equipos deben trabajar con rendimientos térmicos del 92-93 % (Ficha técnica de los generadores de vapor 6 y 7 de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara, 2004; Hernández, 2006).

Al valorar los resultados obtenidos para la pérdida de calor por incombustión química (q_3) se infiere que la misma no influye significativamente en el rendimiento térmico, por cuanto su valor promedio para el sistema de generación de vapor fue de 0,09 % (Tablas 3.1-3.4). Este comportamiento puede ser atribuido a que conceptualmente esta pérdida la constituye la cantidad de calor que se deja de producir durante el proceso de combustión porque el combustible reacciona de manera incompleta (Pérez, 1972) y durante la quema de combustibles líquidos, que es el caso que se investiga, no tiene mucha significación.

En el caso de la pérdida por transferencia de calor al medio ambiente (q_5), no se pudo calcular porque en la empresa no se dispone de la información necesaria para este propósito (nomogramas para el cálculo de la pérdida de calor nominal q_{5N} , la que depende del tipo de instalación, sus dimensiones, tipo de geometría y aislamiento térmico, productividad y otras condiciones de explotación).

Para el cálculo térmico se consideraron los valores recomendados por Pérez (1972) y Pankratov (1987). En todas las variantes se asumió el valor superior del intervalo recomendado, en este caso 2,0 % para las calderas 2; 3 y 5, así como 0,5 % para el generador de vapor 6 (ver página 32 de este trabajo y Tablas 3.1-3.4) porque en las visitas técnicas realizadas a la Termoeléctrica se comprobó el mal estado técnico que posee el aislamiento térmico empleado y esto tiene una incidencia significativa en esta pérdida de calor.

Además de lo anteriormente explicado para la pérdida q_5 , para el cálculo térmico también se asumen valores nulos para las pérdidas de calor por incombustión mecánica (q_4) y la que se produce con los residuos extraídos del horno (q_6) según las recomendaciones de la literatura especializada (Pérez, 1972; Pankratov, 1987). Ambas no tienen incidencia desde el punto de vista práctico porque la primera se refiere al

calor que se deja de aportar a la combustión por la no quema del combustible, aspecto que no ocurre en la combustión del crudo utilizado por ser líquido y la segunda considera el calor que se evacúa con los residuos producidos durante la combustión y esto en combustible líquidos (caso de estudio) y gaseosos son prácticamente inexistentes.

3.4.4- Rendimientos térmicos y exergéticos

Los comportamientos analizados para las variables que se relacionan en las Figuras 3.5-3.8 (exceso de aire, flujo de aire y gases y pérdidas de calor) demuestran que, en general, el sistema de generación trabaja con adecuados parámetros de funcionamiento. Lo anterior se resume en el rendimiento térmico, el cual mantiene comportamientos estables y oscila entre el 89,5 y 93 % para todas las instalaciones (Figura 3.9), siendo su valor promedio para las calderas 2; 4 y 5 de 91,523 %, mientras que el generador de vapor 6 alcanzó el 89,987 %.

Asimismo se destaca que el sistema de generación, a pesar de tener varios años de explotación y trabajar en condiciones que difieren de las establecidas por diseño, actualmente posee un rendimiento térmico promedio del 91,139 %, lo que indica que en el mismo existe un adecuado grado de aprovechamiento de la energía térmica.

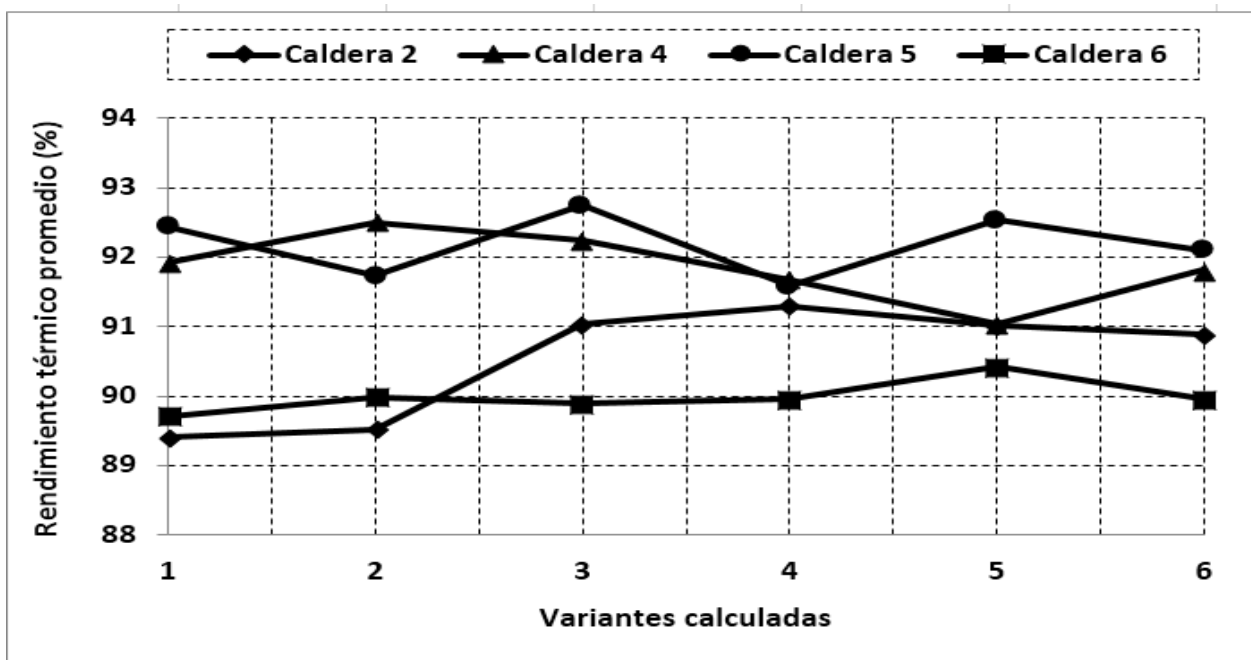


Figura 3.9. Comportamiento del rendimiento térmico.

El rendimiento exergético en el sistema de generación tiene un comportamiento igualmente estable, pero con oscilaciones entre el 45 y 48 %, aproximadamente (Figura 3.10). En relación con este parámetro se aprecia que las calderas 2; 4 y 5 son más eficientes que la 6, desde el punto de vista exergético, debido a que el rendimiento promedio de las primeras excede en 0,774 % al de la segunda. En general, se puede afirmar que el sistema tiene un bajo grado de aprovechamiento de la energía útil máxima, que en su valor promedio asciende al 46,898 %. Finalmente, se debe destacar el hecho de que la caldera 6, a pesar de ser más nueva que las restantes, tiene un rendimiento inferior. Esto puede estar asociado a los problemas que ha presentado en la cámara de combustión (ensuciamiento de las superficies de transferencia de calor y derretimiento de los tubos de agua, entre otros), que han limitado el aprovechamiento del calor en el hogar del generador de vapor.

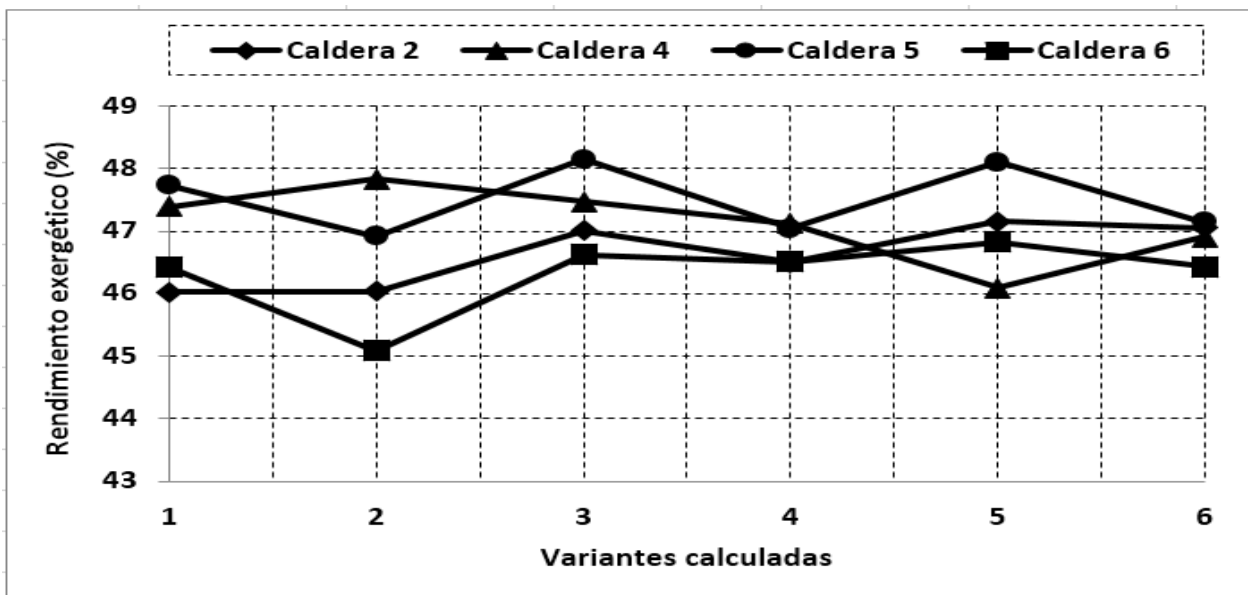


Figura 3.10. Comportamiento del rendimiento exergético.

3.5- Valoración económica asociada al funcionamiento de las calderas

En las Tablas 3.5 y 3.6 se exponen los resultados de la valoración económica asociada al trabajo de las calderas (entre los meses de enero-marzo del año 2015). Se utilizó el valor promedio del precio del combustible para el periodo considerado (383,542 USD/t). El mismo fue reportado por el departamento de economía energética de la empresa Productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Tabla 3.5. Gasto económico asociado al consumo de combustible en la caldera 2.

Variantes analizadas ↓	Rendimiento térmico promedio (%)	Consumo de combustible (t/h)	Consumo de combustible (t/90días)	Precio del combustible (USD/t)	Importe asociado (USD)
GV-2: V-1	89,402	4,60	9 936,00	383,54	3 810 873,31
GV-2: V-2	89,521	4,40	9 504,00	383,54	3 645 183,17
GV-2: V-3	91,037	4,00	8 640,00	383,54	3 313 802,88
GV-2: V-4	91,295	4,10	8 856,00	383,54	3 396 647,95
GV-2: V-5	91,007	4,30	9 288,00	383,54	3 562 338,10
GV-2: V-6	90,891	4,30	9 288,00	383,54	3 562 338,10
Promedio	90,525	4,28	9 252,00	383,54	3 548 530,58

El gasto horario promedio por consumo de combustible en los generadores de vapor 2; 4; 5 y 6 asciende a 1 642,84; 1 572,52; 1 252,90 y 3 496,62 USD, respectivamente. De igual manera, se calculó el gasto por el mismo concepto para los meses en que se desarrolló la investigación (enero-marzo/2015) y para la caldera 2 fue de 3 548 530,58 USD (Tabla 3.5). Para las restantes calderas se realizaron cálculos análogos y los resultados se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Gasto económico asociado al consumo de combustible en las calderas 4-6.

Generador de vapor 4					
Variantes analizadas ↓	Rendimiento térmico promedio (%)	Consumo de combustible (t/h)	Consumo de combustible (t/90días)	Precio del combustible (USD/t)	Importe asociado (USD)
GV-4: V-1	91,920	3,90	8 424,00	383,54	3 230 957,81
GV-4: V-2	92,490	3,80	8 208,00	383,54	3 148 112,74
GV-4: V-3	92,238	4,00	8 640,00	383,54	3 313 802,88
GV-4: V-4	91,663	3,90	8 424,00	383,54	3 230 957,81
GV-4: V-5	91,046	4,50	9 720,00	383,54	3 728 028,24
GV-4: V-6	91,809	4,50	9 720,00	383,54	3 728 028,24
Promedio	91,861	4,10	8 856,00	383,54	3 396 647,95
Generador de vapor 5					
GV-5: V-1	92,431	3,60	7 776,00	383,54	2 982 422,59

GV-5: V-2	91,727	3,20	6 912,00	383,54	2 651 042,30
GV-5: V-3	92,747	3,00	6 480,00	383,54	2 485 352,16
GV-5: V-4	91,583	3,20	6 912,00	383,54	2 651 042,30
GV-5: V-5	92,533	3,40	7 344,00	383,54	2 816 732,45
GV-5: V-6	92,094	3,20	6 912,00	383,54	2 651 042,30
Promedio	92,186	3,27	7 056,00	383,54	2 706 272,35
Generador de vapor 6					
GV-6: V-1	89,710	9,30	20 088,00	383,54	7 704 591,70
GV-6: V-2	89,984	9,60	20 736,00	383,54	7 953 126,91
GV-6: V-3	89,887	9,50	20 520,00	383,54	7 870 281,84
GV-6: V-4	89,961	8,60	18 576,00	383,54	7 124 676,19
GV-6: V-5	90,429	8,60	18 576,00	383,54	7 124 676,19
GV-6: V-6	89,959	9,10	19 656,00	383,54	7 538 901,55
Promedio	89,988	9,12	19 692,00	383,54	7 552 709,06

Al valorar los resultados económicos asociados al consumo de combustible se aprecia que las calderas 2; 4; 5 y 6 generan gastos a la empresa en el orden de los 3,5; 3,3; 2,7 y 7,5 millones de dólares, respectivamente. Estas erogaciones son significativas y determinan los costos de producción de vapor y energía eléctrica en la Termoeléctrica, de ahí la importancia que reviste el control de los parámetros del proceso que inciden directamente en el rendimiento térmico de estas instalaciones.

3.6- Impacto ambiental relacionado con los generadores de vapor que emplean combustibles fósiles

3.6.1- Contaminación ambiental en la generación de vapor

En las calderas constituyen efluentes contaminantes: los gases producto de la combustión, las cenizas de parrilla y las aguas de las extracciones de fondo. Además, son contaminantes del medio ambiente el ruido y el calor. Las cenizas pueden utilizarse como materia prima de diferentes procesos, dándoles así un empleo útil. Las sales de las aguas de las extracciones de fondo, siempre que se manipulen adecuadamente, no constituyen un elemento contaminante; en cambio los gases de combustión sí constituyen elementos contaminantes y por esta razón este estudio se centrará en ellos.

3.6.2- Principales fuentes de contaminación

Los principales elementos nocivos que circulan con los gases de la combustión son: los óxidos de azufre, el monóxido de carbono, los óxidos nitrosos, los particulados y los compuestos orgánicos volátiles. A continuación se describen sus particularidades y los efectos nocivos más importantes que estos provocan (Vega, 2013).

3.6.2.1- Óxidos de azufre

Los óxidos de azufre que se forman durante el proceso de quemado de un combustible son el SO_2 y, en menor medida, el SO_3 . Sus cantidades dependen del contenido de azufre en el combustible. Los carbones, en términos generales, son los más contaminantes y en orden descendente, le siguen el aceite combustible pesado (fuel-oil), el aceite combustible ligero (gas oil) y el gas. Los efectos nocivos más importantes de estos óxidos son: las afectaciones en las vías respiratorias de los seres humanos y animales, así como la formación de lluvias ácidas de graves consecuencias ecológicas.

3.6.2.2- Monóxido de carbono

El monóxido de carbono (CO) es el resultado de una combustión incompleta de los reactantes de los combustibles orgánicos, por ello la magnitud que se emite a la atmósfera, depende esencialmente de la calidad con que se efectúe el proceso de combustión. Los efectos nocivos más importantes del CO son: las afectaciones a la capacidad respiratoria de personas y animales, y la reacción de stress psicológico y alteración de las habilidades motoras.

3.6.2.3- Óxidos nitrosos

Los óxidos nitrosos (NO_x) son el resultado de la combustión del nitrógeno del combustible y del aire. Este término incluye un alto número de especies gaseosas, pero las más significativas, según las cantidades emitidas son: el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el óxido nitroso (NO). De acuerdo al nivel de nocividad el más peligroso de los dos resulta el NO_2 . La cantidad de NO_x formada, depende de la cantidad de oxígeno y nitrógeno disponibles durante la combustión, la temperatura, el nivel de mezclado que se alcance y el tiempo de la reacción química. Los efectos perjudiciales más relevantes de los NO_x son:

- ✓ Creación de desórdenes respiratorios en seres humanos y animales.
- ✓ Reducción de la visibilidad por adsorción del espectro visible para los humanos.
- ✓ Afectaciones a las plantas por lluvias ácidas.
- ✓ Aceleración de la corrosión y la degradación material.
- ✓ Contribución a la formación del smog sobre las ciudades.
- ✓ Se le asocia con la formación de ozono en las zonas bajas de la atmósfera, el cual resulta un tóxico para las personas y se le atribuyen propiedades cancerígenas.

Los NO_x formados por la oxidación, a altas temperaturas, del nitrógeno del aire, reciben el nombre de NO_x térmicos: La temperatura a partir de la cual se intensifica la oxidación del nitrógeno es de 1 200 °C. Los NO_x formados a través de reacciones químicas del nitrógeno presente en el combustible, durante el proceso de quemado de este, reciben el nombre de NO_x del combustible. En general, la formación de NO_x se ve favorecida por las medidas adoptadas para favorecer la combustión, por ello, su control conlleva un compromiso entre los factores que incrementan la eficiencia de la combustión y los que reducen la formación de NO_x .

3.6.2.4- Particulados

El término particulado incluye un conjunto de materias orgánicas e inorgánicas que, en forma sólida o líquida, acompañan a los gases formando una suspensión. El tamaño de estas partículas está en el rango de 1 a 100 μ aunque pueden encontrarse también partículas menores. La magnitud de la emisión de particulados depende del modo de combustión, de la aerodinámica de la instalación y de la existencia o no de sistemas de limpieza de gases. Las principales afectaciones que causan son:

- ✓ Alteraciones de la capacidad respiratoria y la visibilidad en las personas.
- ✓ Alteración de las propiedades de los suelos cultivables.
- ✓ Intensificación de los efectos negativos del SO_2 .
- ✓ Contribución a la formación del smog.

3.6.2.5- Compuestos orgánicos volátiles

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) están formados por sustancias gaseosas a base de carbono e hidrógeno y son principalmente hidrocarburos aromáticos olefínicos

y parafínicos. Además, incluyen aldehidos, cetonas e hidrocarburos halogenados. Sus principales efectos perjudiciales son: la contribución a la formación del smog fotoquímico, la creación de problemas respiratorios e irritación en los ojos y causan daños a las plantas y reducción de la visibilidad.

3.6.3- Regulaciones sobre emisiones contaminantes

Las regulaciones sobre las emisiones contaminantes son distintas en cada país y en ocasiones dentro de un mismo país hay diferentes por regiones. Existen países que tienen regulaciones mínimas y en algunos aún no existen. El grado de restricción que se imponga mediante las regulaciones toma en cuenta varios factores, entre los que pueden mencionar: el deterioro ambiental existente, las condiciones poblacionales, el hecho de que se trate de una instalación ya existente o que sea nueva, el tipo de combustible, el modo de combustión y los compromisos internacionales del país.

Las regulaciones se pueden establecer para ciertas condiciones, como son:

- ✓ Concentración máxima instantánea.
- ✓ Concentración máxima promedio para un cierto tiempo.
- ✓ Concentración a nivel de chimenea.
- ✓ Concentración a nivel de respiración del hombre.
- ✓ Cantidades totales máximas en un período de tiempo.

En el caso de Cuba la regulación de las emisiones está establecida en la NC 93-02-202: 87, en la que se dan los límites, abajo apuntados, para Concentración Máxima Admisible (CMA), como promedio diario, a la altura de la chimenea.

Sustancias contaminantes	CMA, promedio diario (mg/m ³)
Sulfuro de carbono	0,030
Monóxido de carbono	3,000
Óxidos de nitrógeno	0,040
Ozono	0,030
Sulfuro de hidrógeno	0,008
Dióxido de azufre	0,050
Hollín	0,050

3.6.4- Situación de la UEB Termoeléctrica de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” con referencia a los gases producto de la combustión

La UEB Termoeléctrica cuenta con cuatro calderas para la producción de vapor de proceso y para la generación de energía eléctrica, como elemento fundamental para reducir la contaminación de la atmósfera con los productos de la combustión y su efecto en la población circundante está la chimenea de la planta con una altura de 160 m para lograr una dispersión de estos productos evitando su concentración en las inmediaciones, utilizando chimeneas altas, los gases con hollín expulsados en las capas altas de la atmósfera, se propagan en ellas, lo cual reduce considerablemente la concentración de las impurezas nocivas. Los elementos contaminantes del proceso de la combustión del petróleo en lo fundamental son los siguientes: Monóxido y dióxido de carbono (CO y CO₂), Hollín, Pentóxido de vanadio (V₂O₅) y Dióxido de azufre (SO₂).

3.6.4.1- Situación de la UEB con referencia a los vertimientos líquidos productos del tratamiento químico del agua y al lavado de las calderas

El tratamiento de desmineralización del agua en la planta de tratamiento químico, de acuerdo a lo planteado por Goffe (2005), tiene residuales ácidos y básicos producto del lavado y la regeneración de los filtros que son tratados en la planta de neutralización. Esta planta cuenta con un sistema de tanques, bombas y sistema de dosificación de ácido y sosa para la neutralización. El proyecto en su concepción presenta deficiencias que no permiten la correcta neutralización en el tiempo que necesita el proceso, por lo que se ha modificado. Las mejoras introducidas son las siguientes:

- ✓ Levantamiento del sistema de mezclado con aire para mejorar la neutralización de las aguas agresivas.
- ✓ Montaje de una bomba adicional en el sistema.
- ✓ Reparación de los drenajes del tanque.
- ✓ Montaje de un nuevo instrumento para medir el PH.

3.6.4.2- Perspectivas futuras de la UEB respecto a los gases de la combustión y su evacuación por la chimenea

La UEB está inmersa en las negociaciones para la modernización de sus equipos fundamentales (Turbogeneradores, Calderas y Sistema de Combustible) lo cual

redundará en una mejoría de los elementos contaminantes que expulsa al medio ambiente, situando de esta forma las concentraciones de los principales gases contaminantes dentro de las normas permisibles a nivel mundial. Las nuevas calderas garantizan normas de emisión comparables con las de países europeos.

Además, se incrementarán los consumos de Dióxido de carbono en el proceso, por lo que disminuirán los volúmenes que se vierten por la chimenea, causando una mejora de las condiciones medioambientales en la comunidad.

Todo lo antes expuesto, junto con la altura de la chimenea de la Termoeléctrica permitirá disminuir el impacto ambiental de la planta. También, el proyecto de modernización incluye una mejora sustancial en cuanto a los vertimientos líquidos, por cuanto está prevista la construcción de una piscina de neutralización con sus equipos auxiliares donde verterán todos los drenajes contaminantes para su tratamiento.

3.7- Conclusiones del capítulo 3

- ✓ La aplicación de herramientas de la tecnología de gestión total eficiente de la energía demostró que los principales portadores energéticos empleados en la UEB Termoeléctrica (incluyendo la sección de turbinas) lo constituyen el fuel oil y el vapor. Los consumos de estos representan el 25,379 y 52,398 % de los gastos totales incurridos por la empresa en el año anterior.
- ✓ Los generadores de vapor 2; 4; 5 y 6 alcanzaron, para las condiciones de explotación investigadas, eficiencias térmicas promedios que oscilaron en el intervalo de 89,988 - 92,186 %. Los rendimientos exergéticos variaron entre 46,318 y 47,511 %. Estos resultados evidencian que es elevada la capacidad que tienen las instalaciones para aprovechar la energía térmica y deficiente el empleo de la energía útil máxima disponible en el sistema.
- ✓ Los consumos de combustible asociados al trabajo de las calderas en el periodo enero-marzo de 2015 generaron gastos económicos horarios que, como promedio, ascienden a 1 642,84; 1 572,52; 1 252,90 y 3 496,62 USD, para los generadores de vapor 2; 4, 5 y 6, respectivamente. Estos consumos provocan emisiones de óxidos de azufre y de nitrógeno, pentóxido de vanadio y monóxido de carbono, los cuales constituyen gases nocivos para el medio ambiente y la salud de los seres vivos.

CONCLUSIONES GENERALES

- ✓ El marco teórico-contextual posibilitó el establecimiento de los fundamentos necesarios para el diagnóstico energético de las calderas objeto de estudio y la sistematización de los aspectos principales de las investigaciones precedentes. El mismo evidenció la no existencia de estudios que consideren el diagnóstico energético de las instalaciones, basado en la aplicación integrada de herramientas de la tecnología de gestión total eficiente de la energía y la determinación de sus rendimientos térmicos y exergéticos.
- ✓ Las herramientas y procedimientos establecidos para la aplicación de la tecnología de gestión total eficiente de la energía y el cálculo de los rendimientos termoexergéticos en las calderas permitieron la realización del diagnóstico energético de las instalaciones. El fuel oil y el vapor constituyeron los portadores de energía más consumidos en la UEB Termoeléctrica, representando el 25,379 y 52,398 % de los gastos totales ejecutados por la empresa en el año precedente. Por su parte, los rendimientos térmicos y exergéticos promedios del sistema de generación ascendieron a 91,139 y 46,898 %, respectivamente.
- ✓ Los resultados obtenidos en el diagnóstico energético demostraron, desde el punto de vista técnico, que la capacidad de aprovechamiento de la energía térmica en los generadores de vapor es satisfactoria y que, por el contrario, es deficiente la utilización de la energía útil máxima disponible en el sistema. Además, se verificó que el trabajo de las calderas generó, como promedio, un consumo de 5,19 t/h de combustible y un gasto económico de 4 301 039,99 USD, con las correspondientes emisiones de gases y ruidos nocivos para el medio ambiente laboral y la salud de los seres vivos.

RECOMENDACIONES

- ✓ Perfeccionar el presente trabajo teniendo en cuenta los aspectos específicos que a continuación se relacionan:
 - La aplicación de otras herramientas de la tecnología de gestión total eficiente de la energía.
 - El desarrollo del balance energético de los generadores de vapor mediante la determinación del rendimiento térmico neto.
 - La determinación de las emisiones de gases contaminantes y ruido provocadas por las calderas durante su funcionamiento.
- ✓ Considerar el presente informe como material de consulta en futuros diagnósticos energéticos de las calderas, y en la docencia de pre y postgrado en asignaturas afines a la temática en cuestión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abreu, J. *Evaluación de la eficiencia actual del generador de vapor 10 de la Central Termoeléctrica de la empresa René Ramos Latour*. Ramón. Trabajo de Diploma. ISMMM. Moa. 2003. 65 h.
2. Borroto, A.; Monteagudo, J. *Gestión Energética en el Sector Productivo y los Servicios*. Maestría en eficiencia energética. Universidad de Cienfuegos. 2006. 95 p.
3. Borroto, A.; Rubio, Á. *Combustión y Generación de vapor*. Maestría en eficiencia energética. Universidad de Cienfuegos. 2007. 248 p.
4. Caballero, A; Y. González. *Diagnóstico energético de los Generadores de Vapor de las empresas productoras de níquel*. Trabajo de Diploma. ISMMM. Moa. 2007. 43 h.
5. Del Valle, R. *Balance energético verificativo de la planta eléctrica de la empresa René Ramos Latour*. Trabajo de Diploma. ISMMM. Moa. 2002. 64 h.
6. Duque. E. *Evaluación térmica de los generadores de vapor y las tuberías de distribución de vapor de la Termoeléctrica perteneciente a la empresa René Ramos Latour*. Trabajo de Diploma. ISMMM. Moa. 2011. 64 h.
7. Fadel, A. *Diagnóstico térmico y exergético de los generadores de vapor de la empresa Ernesto Che Guevara*. Trabajo de Diploma. ISMMM. Moa. 2008. 51 h.
8. Faíres, V. *Termodinámica*. La Habana: Edición Revolucionaria, 1991. 807 p.
9. Fernández, E. *Termodinámica Técnica*. La Habana: Editorial "Félix Varela, 1994. Tomo I. 290 p.
10. Ficha Técnica de los Generadores de Vapor 6 y 7. Proyecto de Modernización de la Central Termoeléctrica. Moa. 2004. 25 p.
11. Fonseca, A. *Análisis termoexergético de los generadores de vapor de la empresa Ernesto Che Guevara*. Trabajo de Diploma. ISMMM. Moa. 2009. 55 h.
12. Frómeta, K. *Evaluación energética de los generadores de vapor de la empresa "Comandante Pedro Sotto Alba*. Trabajo de Diploma. ISMMM. Moa. 2012. 78 h.
13. Fuentes, A. *Evaluación térmica y exergética de los generadores de vapor de la empresa Pedro Sotto Alba para diferentes calidades del agua de alimentación*. Trabajo de Diploma. ISMMM. Moa. 2010. 51 h.
14. Goffe, F. *Informe sobre la situación ambiental de la Central Termoeléctrica de la empresa Ernesto Ché Guevara*. Moa, 2005. 15 p.

15. Góngora, E. Evaluación de los generadores de vapor, deareadores y calentadores de agua de la empresa Pedro Sotto Alba. Trabajo de Diploma. ISMMM. Moa. 2009. 60 h.
16. Hernández, N. Diagnóstico térmico verificativo de los generadores de vapor insertados en la empresa “Ernesto Che Guevara”. Trabajo de Diploma. ISMMM. Moa. 2006. 48 h.
17. Manual de operaciones de la UEB Termoeléctrica de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Moa, 2005. 93 h.
18. Maxi, E. Diagnóstico termoexergético del proceso de generación de vapor en la Central Termoeléctrica de Felton. Trabajo de Diploma. ISMMM. Moa. 2008. 56 h.
19. Muhica, J. Evaluación termoeconómica del ciclo de la central termoeléctrica de la empresa Ernesto Guevara. Trabajo de Diploma. ISMMM. Moa. 2001. 62 h.
20. Pankratov, G. Problemas de Termotecnia. Editorial MIR Moscú. URSS, 1987. 235 p.
21. Peña, R. Evaluación energética del generador de vapor 7 de la empresa “Comandante René Ramos Latourt”. Trabajo de Diploma. ISMMM. Moa. 2013. 74 h.
22. Pérez, L. Generadores de Vapor. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana. 1972. 447 p.
23. Plana, Y. Evaluación termoexergética de los generadores de vapor de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Trabajo de Diploma. ISMMM. Moa. 2011. 63 h.
24. Quevedo, W. Diagnóstico termoexergético de los generadores de vapor 9; 10 y 11 de la empresa “Comandante René Ramos Latourt”. Trabajo de Diploma. ISMMM. Moa. 2014. 79 h.
25. Rey, E. Diagnóstico energético del proceso de generación de vapor de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”. Tesis de Ingeniería. ISMMM. Moa. 2014.
26. Reyes, L. Análisis termoexergético del generador de vapor de la Planta de Asfalto de Sagua de Tánamo. Trabajo de Diploma. ISMMM. Moa 2010. 51 h.
27. Rivera, Y.; Y. Regueiferos. Diagnóstico térmico de los Generadores de Vapor de las empresas presupuestadas de Moa. Trabajo de Diploma. ISMMM. Moa. 2007. 50 h.
28. Rodríguez, Y. Análisis del petróleo crudo nacional empleado en la empresa Ernesto Che Guevara. Trabajo de Diploma. ISMMM. Moa. 2001. 80 h.
29. Rodríguez, L. Evaluación térmica y exergética de los generadores de vapor de la empresa Pedro Sotto Alba. Trabajo de Diploma. ISMMM. Moa. 2008. 53 h.

30. Suárez, L.; E. Rodríguez. Propuesta de selección del esquema térmico principal para la modernización de la planta termoeléctrica de la empresa Ernesto Che Guevara. Trabajo de Diploma. ISMMM. Moa. 1999. 71 h.
31. Suárez, V. Diagnóstico del sistema de generación de la CTE de la empresa René Ramos Latourt. Trabajo de Diploma. ISMMM. Moa. 2005. 62 h.
32. Tanquero, N. Guía metodológica para proyectos del curso de generadores de vapor. Editorial ISPJAE. La Habana. Cuba. 1997. 120 p.
33. Tuzón, E. Diagnóstico energético del generador de vapor 1 de la empresa Ernesto Che Guevara. Proyecto de Ingeniería Mecánica IV. ISMMM. Moa. 2005. 30 h.
34. Vega, M. Evaluación energética de los generadores de vapor de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Trabajo de Diploma. ISMMM. Moa. 2013. 85 h.
35. Vukalovitch, M. *Propiedades termodinámicas del agua y el vapor*. Editorial. Revolucionaria. La Habana. 1978. 245 p.

ANEXO 1

DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS PRINCIPALES INSTRUMENTOS UTILIZADOS PARA LA MEDICIÓN DE LAS VARIABLES EN LAS CALDERAS

Descripción y características técnicas	Parámetro medido
Convertidor térmico con termopar 1x NiCr-Ni “K” EL = 2200 mm, D = 6mm, transmisor programable, salida 4-20 mA, rango 0-400 °C, modelo dTANS T01. Código: 16HAC30CT001-D	Temperatura agua a la salida del Economizador 2 (ECO 2)
Transmisor diferencial de presión, conexión ¼” NPT <i>Female</i> , salida 4-20 mA, rango 1548-7182 Pa, modelo EJA110A-EMS5A-64NC, Tag. 6HAD10L1. Código: 16HAD10CL001-D	Nivel del Domo
Transmisor de presión relativa, conexión ¼” NPT <i>Female</i> , salida 4-20 mA, rango 0-10 MPa, modelo EJA430A-EBS5A-64NC. 6HAD10P1. Código: 16HAD10CP001-D	Presión del Domo
Transmisor diferencial de presión, conexión ¼” NPT <i>Female</i> , salida 4-20 mA, rango 0-5 kPa, modelo EJA110A-ELS5A-74NC. Tag. 6HBK01P1. Código: 16HBK01CP001-D	Presión en el Horno
Convertidor térmico PT100 simple en barra EL = 2000 mm, D = 15mm, transmisor programable, salida 4-20 mA, rango 0-600 °C, Modelo dTANS T01. Código: 16HBK10CT003-D	Temperatura gases de salida del ECO 2
Sensor de peso flujómetro ROTAMASS, DN 80 mm PN 40 D = 88.9x3.2 d = 82.5 mm T _{máx} = 200 °C P _{máx} = 4.1 MPa, rango 0-15000 kg/h Tag 6HJF10F1. Código: 16HJF10CF001-D	Flujo de petróleo antes los quemadores
Transmisor diferencial de presión, conexión ¼” NPT <i>Female</i> ,	Flujo del aire salida

salida 4-20 mA, rango 0-1969 Pa, modelo EJA110A-ELS5A-74NC Tag. 6HLA10F1. Código: 16HLA10CF001-D-4	Ventiladores de Tiro Forzado, rango 72360 m ³ /h
Transmisor diferencial de presión, conexión ¼" NPT <i>Female</i> , salida 4-20 mA, rango 0-40 kPa, modelo EJA110A-EMS5A-64NC Tag. 6LAB01F1. Código: 16LAB01CF001-D-5	Flujo de agua alimentar en caldera rango 0-180 t/h
Termómetro 1xPt100, inmersión 400 mm, con extensión D = 6 mm, transmisor programable, salida 4-20 mA, rango 0-250 ° C, modelo dTANS T01. Código: 16LAB01CT001-D-2	Temperatura agua alimentación en caldera
Transmisor diferencial de presión, conexión ¼" NPT <i>Female</i> , salida 4-20 mA, rango 0-100 kPa, modelo EJA110A-EHS5A-64NC Tag. 6LBA01F1. Código: 16LBA01CF001-D-5	Flujo de vapor a la salida de la caldera rango 0-180 t/h
Transmisor de presión relativa, conexión ¼" NPT <i>Female</i> , salida 4-20 mA, rango 0-6 MPa, modelo EJA430A-EBS5A-64NC. Tag- 6LBA01P1. Código: 16LBA01CP001-D-3	Presión del vapor a la salida de la caldera
Convertidor térmico con termopar 1x NiCr-Ni "K" EL= 2400 mm, D = 6 mm, transmisor programable, salida 4-20 mA, rango 0-600 ° C, modelo dTANS T01, número 956550/999-888-888. Código: 16LBA01CT001-D-2	Temperatura del vapor a la salida de la caldera

ANEXO 2.

Metodología resuelta en MathCad 15.0

BALANCE TÉRMICO Y EXERGÉTICO DEL GENERADOR DE VAPOR 2 (VARIANTE 1). EMPRESA "COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA".

Poder calórico bajo del combustible Q_b (J/kg)

Todos los elementos en masa de trabajo

$$\underline{C} := 84.10 \quad \underline{H} := 7.73 \quad \underline{O} := 0.6 \quad \underline{S} := 6.52 \quad \underline{W} := 0.8$$

$$Q_b := [339 \cdot C + 1030 \cdot H - 109 \cdot (O - S) - 24 \cdot W] \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$Q_b = 3.71 \times 10^7 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

Determinación de los volúmenes de los gases producto de la combustión (m^3/kg)

Volumen de aire teórico V_a

$$V_a := [0.0889 \cdot (C + 0.375 \cdot S) + 0.265 \cdot H - 0.0333 \cdot O] \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$V_a = 9.722 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen total real de gases triatómicos V_{RO2}

$$V_{RO2} := [0.01866 \cdot (C + 0.375 \cdot S)] \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$V_{RO2} = 1.615 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen teórico de Nitrógeno V_{N2} ($\alpha=1$)

$$\underline{N} := 0.2 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$V_{N2} := (0.79 \cdot V_a + 0.008 \cdot N)$$

$$V_{N2} = 7.682 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen teórico de los gases secos V_{gs}

$$V_{gs} := V_{RO2} + V_{N2}$$

$$V_{gs} = 9.297 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen teórico de los vapores de agua V_{H_2O}

$$V_{H_2O} := (0.111 \cdot H + 0.0124 \cdot W) \cdot \frac{m^3}{kg} + 0.0161 \cdot V_a$$

$$V_{H_2O} = 1.024 \cdot \frac{m^3}{kg}$$

Volumen teórico total de gases V_{og}

$$V_{og} := V_{gs} + V_{H_2O}$$

$$V_{og} = 10.322 \cdot \frac{m^3}{kg}$$

Cálculo del coeficiente de exceso de aire para combustión incompleta (α)

$$CO_2 := 15.6 \quad O_2 := 2.5 \quad CO := 0.100 \quad H_2 := 0 \quad CH_4 := 0$$

$$N_2 := 100 - (CO_2 + O_2 + CO)$$

$$N_2 = 81.8$$

$$\alpha := \frac{N_2}{N_2 - 3.76 \cdot (O_2 - 0.5 \cdot CO - 0.5 \cdot H_2 - 2 \cdot CH_4)}$$

$$\alpha = 1.127$$

Volumen real de aire

$$V_{a_{real}} := V_a \cdot \alpha$$

$$V_{a_{real}} = 10.956 \cdot \frac{m^3}{kg}$$

Volumen real de gases

$$V_g := V_{og} + (\alpha - 1) \cdot V_{a_{real}}$$

$$V_g = 11.712 \cdot \frac{m^3}{kg}$$

Determinación de las entalpías de los gases, (J/kg)

Entalpía teórica de los gases I_{go} Calculado para $T_{ge} = 248.3 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$I_{RO_2} := 454.56 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{m^3} \quad I_{N_2} := 323.75 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{m^3} \quad I_{H_2O} := 334.62 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{m^3}$$

$$I_{cen} := 332.17 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{kg} \quad A_{\text{www}} := 0.02 \quad A_{arr} := 0.6$$

$$I_{go} := V_{RO_2} \cdot I_{RO_2} + V_{N_2} \cdot I_{N_2} + V_{H_2O} \cdot I_{H_2O} + 0.01 \cdot A \cdot A_{arr} \cdot I_{cen}$$

$$I_{go} = 3.564 \times 10^6 \cdot \frac{\text{joule}}{kg}$$

Entalpía real de los gases para Ig (J/kg)

El calor específico del aire Caf se expresa en kJ/m³ °C

La temperatura del aire se expresa en °C

$$C_{af} := 1.3196 \quad t_{aire} := 31 \quad f_{conversión1} := 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3}$$

$$I_{oaire} := C_{af} \cdot t_{aire} \cdot V_{a_{real}} \cdot f_{conversión1}$$

$$I_{ge} := I_{go} + I_{oaire} \cdot (\alpha - 1)$$

$$I_{ge} = 3.621 \times 10^6 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

BALANCE TÉRMICO DEL GENERADOR DE VAPOR POR EL MÉTODO DIRECTO

Cálculo del calor útil Q_{útil} (J/hr)

$$D_{vsc} := 56.9 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \quad I_{vsc} := 787.51 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad I_{aa} := 143.37 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$Q_{útil} := D_{vsc} \cdot (I_{vsc} - I_{aa})$$

No se emplea la extracción de purga porque en la UEB Termoeléctrica no se controla con precisión su flujo.

$$Q_{útil} = 1.534 \times 10^{11} \cdot \frac{\text{joule}}{\text{hr}}$$

Consumo de combustible B (kg/hr)

$$B := 4.6 \times 10^3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

Determinación del calor disponible Q_d (J/kg)

Calor físico del Combustible (J/kg)

La temperatura de combustible tc expresada en (°C)

$$t_c := 138.1 \quad f_{conversión} := 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$C_c := 1.74 + 0.0025 \cdot t_c \quad C_c = 2.085$$

$$Q_{fc} := C_c \cdot t_c \cdot f_{conversión}$$

$$Q_{fc} = 2.88 \times 10^5 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

Cálculo del calor disponible Q_d (J/kg)

$$Q_d := Q_b + Q_{fc}$$

$$Q_d = 3.739 \times 10^7 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

Cálculo del rendimiento del generador de vapor η_{gvMD} (%)

$$\eta_{gvMD} := \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_d \cdot B} \cdot 100$$

$$\eta_{gvMD} = 89.219$$

Cálculo de los flujos de aire y gases que demanda el generador de vapor

Aire necesario para la combustión

Gases producto de la combustión

$$Q_a := V_{a_{\text{real}}} \cdot B$$

$$Q_g := V_g \cdot B$$

$$Q_a = 14 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_g = 14.965 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_a = 5.0398 \times 10^4 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

$$Q_g = 5.3876 \times 10^4 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

BALANCE TÉRMICO DEL GENERADOR DE VAPOR POR EL MÉTODO INDIRECTO

Cálculo de las pérdidas

Pérdida por los gases de escape (q_2)

$$q_4 := 0 \quad q_6 := 0 \quad \text{Para combustibles líquidos}$$

La temperatura del aire T_{aire} expresada en (°C)

El calor específico del aire se expresa en (kJ/m³ °C)

$$t_{af} := 31 \quad c_{paf} := 1.3196 \quad \text{f}_{\text{conversión1}} := 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3}$$

$$I_{af} := t_{af} \cdot c_{paf} \cdot V_{a_{\text{real}}} \cdot \text{f}_{\text{conversión1}}$$

$$I_{af} = 4.482 \times 10^5 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$q_2 := \frac{(I_{ge} - \alpha \cdot I_{af}) \cdot (100 - q_4)}{Q_d}$$

$$q_2 = 8.334$$

Pérdida de calor por incombustión química (q_3)

$$V_{gsecos} := \frac{1.86 \cdot C + 0.375 \cdot S}{CO_2 + CO + CH_4} \cdot \frac{100 - q_4}{100} \cdot \frac{m^3}{kg}$$

$$V_{gsecos} = 10.119 \cdot \frac{m^3}{kg}$$

$$f_{conversión} := 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{joule}{m^3}$$

$$q_3 := \frac{(30.2 \cdot CO + 25.8 \cdot H_2 + 85.5 \cdot CH_4) \cdot V_{gsecos} \cdot (100 - q_4)}{Q_d} \cdot f_{conversión}$$

$$q_3 = 0.082$$

Pérdida de calor al exterior a través del generador de vapor (q_5)

$$q_5 := 2.0 \quad \text{Para generadores de vapor de D mayor de 100 t/h (Pérez, 1972)}$$

Cálculo del rendimiento térmico del generador de vapor η_{gvMI}

$$q_{n.total} := q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6$$

$$\eta_{gvMI} := 100 - q_{n.total}$$

$$\eta_{gvMI} = 89.584$$

Diferencia entre los rendimientos térmicos determinados por ambos métodos (%)

$$\Delta\eta_{Térmico} := |\eta_{gvMI} - \eta_{gvMD}|$$

$$\Delta\eta_{Térmico} = 0.365$$

Promedio entre los rendimientos térmicos calculados por los métodos Directo e Indirecto (%)

$$\eta_{gvPromedio} := \frac{(\eta_{gvMD} + \eta_{gvMI})}{2}$$

$$\eta_{gvPromedio} = 89.401$$

BALANCE EXERGÉTICO DEL GENERADOR DE VAPOR

Determinación de las exergías empleadas (agua, aire y combustible)

Exergía del agua (J/s)

$$h_{\text{agua}} := I_{\text{aa}} \quad m_{\text{agua}} := D_{\text{vsc}}$$

$$h_{\text{agua}} = 6.002 \times 10^5 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad h_{0a} := 32.02 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$T_0 := (32 + 273) \cdot \text{K}$$

$$S_{\text{agua}} := 0.421778 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad S_{0a} := 0.1108 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$Ex_{\text{agua}} := m_{\text{agua}} \cdot \left[(h_{\text{agua}} - h_{0a}) - T_0 \cdot (S_{\text{agua}} - S_{0a}) \right]$$

$$Ex_{\text{agua}} = 1.09 \times 10^6 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

Exergía del combustible (fuente de calor); J/s

$$Q := Q_b \quad T_1 := (1500 + 273) \cdot \text{K} \quad T_2 := (1600 + 273) \cdot \text{K} \quad T_m := \frac{T_1 + T_2}{2}$$

$$Ex_{\text{combustible}} := B \cdot \left[Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_m} \right) \right]$$

$$Ex_{\text{combustible}} = 3.947 \times 10^7 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

Determinación de la exergía recuperada (vapor), kJ/s

Exergía del vapor

$$h_{\text{vapor}} := I_{\text{vsc}} \quad m_{\text{vapor}} := D_{\text{vsc}}$$

$$h_{\text{vapor}} = 3.297 \times 10^6 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad h_{0v} := 32 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$S_{\text{vapor}} := 1.655658 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad S_{0v} := 0.1050 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$Ex_{\text{vapor}} := m_{\text{vapor}} \cdot \left[(h_{\text{vapor}} - h_{0v}) - T_0 \cdot (S_{\text{vapor}} - S_{0v}) \right]$$

$$Ex_{\text{vapor}} = 1.867 \times 10^7 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

Determinación de la rendimiento exergético (%)

Exergía empleada (J/s)

Exergía recuperada (kJ/s)

$$Ex_{\text{empleada}} := Ex_{\text{agua}} + Ex_{\text{combustible}}$$

$$Ex_{\text{recuperada}} := Ex_{\text{vapor}}$$

$$Ex_{\text{empleada}} = 4.056 \times 10^7 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

$$Ex_{\text{recuperada}} = 1.867 \times 10^7 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

$$\eta_{\text{Exergético}} := \frac{Ex_{\text{recuperada}}}{Ex_{\text{empleada}}} \cdot 100$$

$$\eta_{\text{Exergético}} = 46.02$$

El grado de pérdida de exergía (%) se determina por:

$$\gamma := 100 - \eta_{\text{Exergético}}$$

$$\gamma = 53.98$$