



**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 del proceso de generación de vapor  
de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”**

**Autor: Enmanuel Rey Martínez.**

**Tutores: Dr. C. Yoalbys Retirado Mediaceja.**

**Dr. C. Ever Góngora Leyva.**

**Ing. Juan Manuel Olivares Bientz.**

**MOA, 2014**

**“AÑO 56 DE LA REVOLUCIÓN”**

## **DECLARACIÓN DE AUTORIDAD**

Yo: **Enmanuel Rey Martínez**, autor de este Trabajo de Diploma y los tutores Yoalbys Retirado Mediaceja, Ever Góngora Leyva y Juan Manuel Olivares Bientz declaramos la propiedad intelectual del mismo al servicio del Departamento de Ingeniería Mecánica, el Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa, pertenecientes al Instituto Superior Minero Metalúrgico y la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”. Estas entidades pueden disponer de su uso cuando estimen conveniente.

---

**Enmanuel Rey Martínez**

Diplomante

---

Dr. C. Yoalbys Retirado Mediaceja

Tutor

---

Dr. C. Ever Góngora Leyva

Tutor

---

Ing. Juan Manuel Olivares Bientz

Tutor

## PENSAMIENTO

“Como mismo la naturaleza le reveló sus secretos a los hombres del pasado; así mismo lo hará con los hombres del presente. Solamente tienen que hacerse las preguntas correctas”.

**Albert Einstein**

## **AGRADECIMIENTOS**

Le agradezco en primer lugar a Dios, por haberme dado la oportunidad de llegar hasta aquí, de desarrollar mis sueños personales y por ser el mejor de los amigos, lo cual me permitió transitar con tranquilidad esta etapa de mi vida.

Agradezco profundamente a mis padres porque siempre me educaron en los valores más importantes que debe poseer todo ser humano y a mi hermano por su constante preocupación para que pudiera concretar este éxito personal.

A mis tutores Yoalbys Retirado Mediaceja y Ever Góngora Leyva por la voluntad de ayudar que mostraron en todo momento a pesar de las obligaciones que actualmente tienen como dirigentes administrativos.

Agradezco en especial a mi amigo y tutor Juan Manuel Olivares Bientz por haberme apoyado incondicionalmente a lo largo de todo este tiempo insertado en la industria y por haber sido un canal de bendición para mí a través de su ejemplo como profesional y cristiano.

A toda mi familia por mostrarse preocupados y dar siempre su apoyo.

A mis compañeros de estudio y a mis amigos (Raúl, Eddy, Luis Ángel, Luis Tonet, y otros que aquí no se mencionan) por los oportunos y sabios consejos que sinceramente me dieron cuando los necesité y además por todas las ayudas ofrecidas.

A todos los profesores que de una forma u otra contribuyeron con mi formación profesional y con la materialización de este sueño.

A los trabajadores de Ingeniería de Mantenimiento, Departamento de Economía y a los de la planta Termoeléctrica por su colaboración en la búsqueda de información.

A los nombrados y a quienes involuntariamente no he mencionado,

**A todos muchas gracias,**

**El autor.**

## **DEDICATORIA**

A mi queridísima y adorada novia Susana quien con su amor, compañerismo y amistad pone el equilibrio necesario en nuestra relación. Además, le dedico esta obra como una muestra del amor infinito que le profeso y como un pequeño ejemplo de persistencia.

A mis padres por todo lo que representan en mi vida y por la combinación de amor y rectitud con la que siempre me criaron.

A mi abuela quien me sostiene con su constante oración y considero mi segunda madre.

A mis compañeros de estudio, por la amistad lograda en todos estos años y compartir gratos momentos de la vida estudiantil.

A mis suegros y a toda mi familia por todo el cariño y apoyo brindado.

**A todos les dedico esta obra,**

**El autor.**

## RESUMEN

En la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba” existe la necesidad de realizar el diagnóstico energético del proceso de generación de vapor. En el presente trabajo se estableció el procedimiento para la realización del referido diagnóstico. El mismo incluye la aplicación de la Tecnología de Gestión Total Eficiente de la Energía; y la evaluación térmica y exergética de los generadores de vapor. Los resultados evidenciaron que el consumo de fuel oil representa 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 %. Se verificó que la explotación de estas instalaciones generó un gasto por concepto de consumo de combustible equivalente a 22 558 529,28 USD y provocó emisiones de ruido y gases contaminantes producto de la combustión de petróleo.

## **ABSTRACT**

An energy diagnosis should be performed on the steam generation process in Moa Nickel S.A. The procedure to perform such diagnosis is established in this study. It includes the application of the Energy Efficient Total Management Technology; and the thermal and exergetic assessment of the steam generators. The study results showed that the fuel oil consumption represents the 80% and 93% of the main energy sources used by the Plant and the Powerhouse, respectively. It was proved that the thermal and exergetic performances of the four boilers are 91% and 54%. It was also proved that the exploitation of these facilities generated an expense of 22 558 529, 28 USD due to fuel consumption and caused noise and pollutant exhaust emission as a result of burning oil.

# ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN.</b>	<b>-1-</b>
<b>CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO Y CONTEXTUAL RELACIONADO CON LAS CALDERAS Y EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE VAPOR.</b>	<b>-4-</b>
<b>1.1-</b> Introducción.	-4-
<b>1.2-</b> Estado del arte relacionado con los generadores de vapor.	-4-
<b>1.3-</b> Trabajos precedentes.	-5-
<b>1.3.1-</b> Trabajos desarrollados en la empresa “Comandante René Ramos Latour”	-6-
<b>1.3.2-</b> Trabajos desarrollados en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.	-6-
<b>1.3.3-</b> Trabajos desarrollados en la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”.	-8-
<b>1.4-</b> Descripción del flujo tecnológico de la central termoeléctrica de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”.	-8-
<b>1.5-</b> Principio de funcionamiento de los generadores de vapor.	-10-
<b>1.6-</b> Descripción de los sistemas y componentes tecnológicos.	-11-
<b>1.6.1-</b> Sistema de automatización.	-11-
<b>1.6.2-</b> Breve descripción de las características técnicas de las calderas.	-12-
<b>1.6.3-</b> Otros parámetros importantes que se controlan.	-13-
<b>1.6.4.</b> Componentes tecnológicos.	-14-
<b>1.7-</b> Conclusiones del capítulo 1.	-17-
<b>CAPÍTULO 2. PROCEDIMIENTO EMPLEADO EN EL DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE VAPOR.</b>	<b>-18-</b>
<b>2.1-</b> Introducción.	-18-
<b>2.2-</b> Sistema de Gestión Total Eficiente de la Energía.	-18-
<b>2.2.1-</b> Procedimientos y herramientas que incorpora la TGTEE.	-19-
<b>2.2.1.1-</b> Diagrama de Pareto.	-20-

<b>2.2.1.2-</b> Estratificación.	-21-
<b>2.2.1.3-</b> Gráfico de consumo y producción en el tiempo.	-21-
<b>2.3-</b> Procedimiento de cálculo para evaluar energéticamente a las calderas.	-22-
<b>2.3.1-</b> Procedimiento para el balance térmico.	-22-
<b>2.3.1.1-</b> Poder calórico inferior del combustible.	-22-
<b>2.3.1.2-</b> Cálculo de los volúmenes de la combustión.	-23-
<b>2.3.1.3-</b> Cálculo del coeficiente de exceso de aire.	-23-
<b>2.3.1.4-</b> Cálculo de las entalpías de los gases y el aire.	-24-
<b>2.3.1.5-</b> Balance térmico por el método Directo.	-25-
<b>2.3.1.6-</b> Balance térmico por el método Indirecto.	-27-
<b>2.3.2-</b> Procedimiento para el análisis exergético.	-30-
<b>2.3.2.1-</b> Exergía de un flujo.	-30-
<b>2.3.2.2-</b> Exergía de una fuente de calor.	-30-
<b>2.3.2.3-</b> Rendimiento exergético de la instalación.	-31-
<b>2.4-</b> Materiales empleados en la medición de los parámetros.	-32-
<b>2.4.1-</b> Principales parámetros medidos en las calderas.	-32-
<b>2.5-</b> Conclusiones del capítulo 2.	-34-
<b>CAPÍTULO 3. RESULTADOS DEL DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO E IMPACTOS ECONÓMICO-AMBIENTALES ASOCIADOS A LAS CALDERAS.</b>	<b>-35-</b>
<b>3.1-</b> Introducción.	-35-
<b>3.2-</b> Comportamiento de los portadores energéticos en el año 2013.	-35-
<b>3.2.1-</b> Estratificación de los portadores energéticos en cuanto a gastos en TEP.	-35-
<b>3.2.2-</b> Análisis de los portadores que representan los mayores consumos.	-36-
<b>3.3-</b> Análisis de los resultados del balance térmico y exergético.	-38-
<b>3.3.1-</b> Comportamiento de los principales parámetros del proceso.	-40-
<b>3.3.1.1-</b> Rendimiento térmico y exergético.	-40-
<b>3.3.1.2-</b> Calor útil.	-42-
<b>3.3.1.3-</b> Coeficiente de exceso de aire.	-42-
<b>3.3.1.4-</b> Flujos de aire y gases.	-43-

<b>3.4-</b>	Valoración económica.	-44-
<b>3.5-</b>	Impacto ambiental asociado a los generadores de vapor.	-45-
	<b>3.5.1-</b> Métodos de reducción de las emisiones contaminantes.	-48-
<b>3.6-</b>	Conclusiones del capítulo 3.	-50-
	<b>CONCLUSIONES GENERALES.</b>	<b>-51-</b>
	<b>RECOMENDACIONES.</b>	<b>-52-</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.</b>	<b>-53-</b>
	<b>ANEXOS.</b>	<b>-X-</b>

## INTRODUCCIÓN

La empresa “Comandante Pedro Sotto Alba” comienza su explotación en octubre de 1959 por la compañía Moa Bay Mini Company. En diciembre de 1994 se firma un convenio con la compañía canadiense Sherritt pasando a ser una empresa mixta. En la actualidad cuenta con una planta de generación de vapor con una caldera de procedencia mexicana y tres originales americanas, modernizadas por una firma canadiense.

Su esquema tecnológico está basado en el proceso de lixiviación ácida a presión del mineral, esta fábrica cuenta con minas a cielo abierto donde se extrae el mineral, seis plantas de proceso: Pulpa, Espesadores, Lixiviación, Lavadero, Neutralización, Sulfuro; y cinco plantas auxiliares: Termoeléctrica, Preparación de pulpa de Coral, Planta de ácido, Planta de Hidrógeno y Planta de Secado de Sulfuro y derretido de azufre. Sin embargo, la Termoeléctrica juega un papel fundamental ya que es la encargada de generar la energía eléctrica y el vapor utilizados en el proceso productivo. Para ello cuenta con cuatro generadores de vapor, tres de 68 t/h de capacidad nominal y uno de 100 t/h. Además, cuenta con dos generadores de corriente eléctrica con una capacidad de generación de 7,5 MW cada uno.

En esta empresa los generadores de vapor usan como combustible el fuel oil que tiene un alto precio en el mercado internacional, por lo que se hace necesario elevar la eficiencia de la combustión de los mismos mediante un régimen estable de explotación.

La planta Termoeléctrica de la empresa es la encargada de garantizar la energía calorífica, el agua tratada y parte de la energía eléctrica que necesita el proceso para la obtención del producto final. Esta planta es cogeneradora ya que una parte del vapor es utilizada para producir electricidad y la otra para transferir calor en el proceso productivo.

Los generadores de vapor son altos consumidores de portadores energéticos debido a su principio de funcionamiento, 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 lo anterior, en los últimos años se han desarrollado algunas investigaciones en las calderas de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”. Góngora (2009) desarrolló el

diagnóstico energético a los generadores de vapor, los deareadores y los calentadores de agua de la empresa anteriormente mencionada y basó su estudio, fundamentalmente, en la influencia que tienen estos dos últimos equipos en la eficiencia térmica del proceso de obtención de vapor. Por su parte, Fuentes (2010) realizó la evaluación térmica y exergética de los generadores de vapor de la 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 la determinación de los principales parámetros de funcionamiento de los generadores de vapor estudiados (Rodríguez, 2008; Frómeta, 2012), con el proceso de producción de vapor desarrollado en otras empresas productoras de níquel y cobalto (Suárez, 2005; Hernández, 2006; Caballero y González, 2007; Fadel, 2008; Fonseca, 2009; Duque, 2011; Peña, 2013; Vega, 2013; Quevedo, 2014) y con las calderas que se explotan en otras entidades productivas y de servicios (Carcallido, 1999; Hurtado, 1999; Jarrosay, 2000; Muñoz, 2001; Maxi, 2008; Cuza, 2011; Leyva, 2013; Villoch, 2013). En los trabajos antes relacionados se obtuvieron resultados satisfactorios de acuerdo con los objetivos trazados en cada uno de ellos.

Los generadores de vapor son muy utilizados en las industrias de procesos, de servicios y en la producción de energía eléctrica. Estos equipos, según Pérez (1972) y Fernández (2001), constituyen el corazón de la industria moderna. Por tales razones, es de mucha importancia la explotación eficiente de las instalaciones productoras de vapor. En este sentido, una de las formas de incidir en la disminución del consumo de combustible y la elevación de la eficiencia térmica de los generadores de vapor lo constituye la evaluación energética (térmica y exergética) de estos equipos. Lo anterior permite conocer los principales parámetros de funcionamiento de estas instalaciones y, por consiguiente, se puede accionar en los aspectos más importantes que determinan las eficiencias térmicas y exergéticas de los generadores de vapor.

Teniendo en cuenta los aspectos anteriores se declara como **problema de la investigación:**

La necesidad de realizar el diagnóstico energético del proceso de generación de vapor de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”, que permita la aplicación de la Tecnología de Gestión Total Eficiente de la Energía (TGTEE) y la determinación de las eficiencias térmicas y exergéticas de las calderas en las actuales condiciones de operación.

Como **objeto de estudio** de la investigación se plantea: el proceso de generación de vapor de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”

Y su **campo de acción** es:

El diagnóstico energético del proceso de generación de vapor, basado en la aplicación de la TGTEE y la determinación de la eficiencia termoexergética de las calderas.

En correspondencia con el problema declarado se define como **objetivo general**:

Realizar el diagnóstico energético del proceso de generación de vapor de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”, mediante la aplicación de la Tecnología de Gestión Total Eficiente de la Energía y la determinación de las eficiencias térmicas y exergéticas de las calderas para las actuales condiciones de operación.

A partir del objetivo general declarado se establece la siguiente **hipótesis**:

La medición de los parámetros fundamentales de operación de las calderas de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”, conjugada con la aplicación de la Tecnología de Gestión Total Eficiente de la Energía y los procedimientos de cálculo establecidos en las investigaciones precedentes, permitirá el diagnóstico energético del proceso de producción de vapor mediante la determinación de las pérdidas de calor, los flujos de aire y gases, así como las eficiencias térmicas y exergéticas de las calderas para las actuales condiciones de operación.

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 “Comandante Pedro Sotto Alba”.
- ✓ Particularización, al objeto de estudio, de los procedimientos de cálculo establecidos para el balance térmico y exergético de calderas acuotubulares.
- ✓ Aplicación de la Tecnología de Gestión Total Eficiente de la Energía en la Central Termoeléctrica de la referida empresa.
- ✓ Desarrollo del balance térmico y exergético de los generadores de vapor investigados para las actuales condiciones de operación.
- ✓ Análisis de los resultados obtenidos en la evaluación energética de los generadores de vapor y establecimiento de gráficos de comportamiento de sus principales parámetros de operación.
- ✓ Valoración de los impactos económicos y ambientales asociados a la explotación de las calderas en el periodo de la investigación.

# CAPITULO 1

## MARCO TEÓRICO Y CONTEXTUAL RELACIONADO CON LAS CALDERAS Y EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE VAPOR

### 1.1. Introducción

Los generadores de vapor constituyen uno de los equipos más importantes dentro de la industria contemporánea, ya sea del sector productivo o de los servicios. Es por ello que el estudio de estas instalaciones debe estar sustentado en una profunda caracterización de los principales procesos que ocurren durante su explotación. Además, se deben considerar las particularidades del proceso tecnológico del cual forman parte. En tal sentido el **objetivo** de este capítulo es: Desarrollar el marco teórico y contextual necesario para el diagnóstico energético de los generadores de vapor de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”.

### 1.2. Estado del arte relacionado con los generadores de vapor

La generación y utilización del vapor en procesos tecnológicos, es una de las tecnologías que más ha aportado al desarrollo de la humanidad. Los antecedentes de su uso se remontan a épocas antes de nuestra era y constituyó la chispa de la Revolución Industrial, momento a partir del cual se produce el desarrollo acelerado de la industria moderna de procesos. Las primeras calderas que fueron diseñadas consistían de un simple recipiente con una entrada de agua y una salida de vapor, montada entre paredes de ladrillos y utilizando la parte vacía entre las paredes y el recipiente como cámara de combustión y el calor desprendido actuaba de forma directa sobre la parte baja del cilindro donde estaba el agua y los gases producto de la combustión salían al exterior por una chimenea.

Muy rápido se notó que estas eran muy ineficientes por la poca superficie de transferencia de calor. Más tarde y como consecuencia de la ineficiencia se fueron buscando mejoras para lograr mayor producción de vapor y aprovechamiento de la energía calórica, se incrementaron las superficies de transferencia para lograr que el agua tuviera mayor tiempo de contacto con el calor y que los gases cubrieran gran cantidad de área antes de abandonar el horno para mejorar la calidad del vapor y disminuir el consumo de combustible.

Así aparecieron dos formas distintas para la producción de vapor: una fue dirigir el calor de combustión a través de los tubos colocándolos alrededor de la carcasa para incrementar la superficie de contacto entre el calor y el agua a la que se le denominó calderas de tubos de fuego y la otra forma que incrementó el área de contacto entre el agua y los gases calientes a través de

los tubos dispuestos en bancos con respecto a la cámara de combustión a la que se le denominó calderas de tubos de agua. A medida que se avanzó en la tecnología se fueron incorporando otros accesorios y equipos necesarios para mejorar la eficiencia y la calidad del vapor obtenido, así se logró disminuir el consumo de combustible para la producción de vapor.

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 pueden operar con cualquier tipo de combustible ya que presentan una gran flexibilidad para el diseño de sus hornos, la generación de vapor sobrecalentado en estas calderas es también fácil y por lo general lo suministran en dicho estado, estas tienen una amplia utilización 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 vapor de grandes potencias. 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**

Se han realizado varios estudios relacionados con el balance térmico y el diagnóstico energético a instalaciones de generación de vapor, algunos de ellos se exponen a continuación:

Rivera y Regüeyferos (2007) realizaron los balances térmicos y exergéticos para las calderas de las empresas presupuestadas del municipio de Moa, siendo objeto de estudio los generadores de vapor del ISMM, la lavandería, el combinado lácteo, los hospitales Guillermo Luis Hernández y Pedro Sotto Alba. En la investigación se detectaron deficiencias que inciden en las bajas eficiencias térmicas y exergéticas de las instalaciones estudiadas.

Maxi (2008) evaluó 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, 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 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, el impacto económico y 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.

### **1.3.3. 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 cuenta otros criterios teóricos que permiten perfeccionar y racionalizar la explotación de estas instalaciones productoras de vapor.

Como se aprecia, los trabajos precedentes consultados se han dedicados, fundamentalmente, al análisis termoexergético de los generadores de vapor investigados. 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 Pedro Sotto Alba” data del año 2012 y ninguno de los trabajos consultados considera la aplicación de la Tecnología de Gestión Total Eficiente de la Energía, durante el diagnóstico energético del proceso de generación de vapor. Estos aspectos determinan la pertinencia e importancia de la presente investigación.

### **1.4. Descripción del flujo tecnológico de la central termoeléctrica de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”**

Según el Manual de operaciones de la CTE (2005), el agua, que proviene en su totalidad del río Moa llega al embalse a través de una conductora por gravedad y en ocasiones es bombeada por dos bombas centrífugas que succionan de un canal en el cauce del río.

En el embalse por su forma de herradura tarda el tiempo suficiente (aproximadamente 35 días) para que las partículas más grandes sedimenten antes de llegar a la succión de las bombas de alimentación que envían el agua a la planta suavizadora para su tratamiento.

Este tratamiento se realiza adicionando productos químicos que reaccionan con las sales disueltas en el agua y eliminan la dureza temporal que trae el agua, usando el método de cal en frío. El objetivo fundamental es el suavizamiento del agua, o sea, la eliminación de los iones de Calcio y Magnesio promotores de dureza y de microorganismos que hay en el agua para su posterior uso en el proceso de desmineralización, enfriamiento y consumo humano en las diferentes áreas de la empresa.

De la planta potabilizadora, el agua es bombeada por tres bombas centrífugas con una capacidad de 182 m<sup>3</sup>/h a la planta desmineralizadora, donde a través del intercambio iónico se le eliminan las sales disueltas en el agua.

El agua con una presión de 3,4 – 3,9 atm pasa a los intercambiadores Catiónicos (catexer) entrando por la parte superior, donde al entrar en contacto con la resina cede los iones positivos como Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na), Hierro (Fe), Aluminio (Al) y absorbe los iones Hidrógenos (H<sub>2</sub>) formando un agua acidulada con PH entre 3,2 y 3,5 la cual sale por la parte inferior del recipiente y pasa al desgasificador o descarbonatador que es el encargado de eliminar el Anhídrido Carbónico (CO<sub>2</sub>) y el Oxígeno (O<sub>2</sub>). Esta agua libre de gases disueltos es succionada por tres bombas centrífugas con capacidad de 160 m<sup>3</sup>/h que la envían a los Anexer donde entra por la parte superior, este agua acidulada intercambia los iones negativos como Sulfatos, Cloratos, Silicatos con el radical Hidróxido (OH) de la resina aumentando el PH a valores entre 8 y 9, luego el agua sale por la parte inferior del recipiente y pasa al tanque de almacenaje, considerándose agua desmineralizada, apta para ser usada en las calderas y por el resto de los consumidores.

El agua es tomada de los tanques de reserva desmineralizada por tres bombas de reemplazo de una capacidad de 68 m<sup>3</sup>/h, la cual es bombeada a los deareadores donde se eliminan los gases disueltos (O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>) y se aumenta la temperatura de la misma a 121 °C.

De los deareadores el agua es succionada por cuatro bombas con una capacidad de 102 m<sup>3</sup>/h, tres accionadas por motores eléctricos y una accionada por una turbina de vapor y bombeada a los calentadores de baja y alta presión.

El agua proveniente de los deareadores es impulsada por las bombas de alimentación, llegando al calentador de baja aproximadamente a 54,4 – 61,2 atm y 121 °C de temperatura, al salir pasa con esa misma presión al calentador de alta incrementando su temperatura en unos 38 °C.

Del calentador de alta presión el agua va al nudo de alimentación de la central termoeléctrica donde es utilizada en las calderas para la producción de vapor. El agua pasa a las calderas a través de una válvula automática, que es la encargada de suministrar el agua necesaria para mantener el nivel del domo de la caldera donde se almacena una reserva de agua para alimentar el domo inferior y paneles de tubos evaporadores, en él se separa el vapor del agua mediante dispositivos especiales instalados al efecto.

El vapor sale del domo y entra al sobrecalentador donde es calentado por encima de la temperatura de saturación. El vapor sobrecalentado de la caldera, a través de dos válvulas

instaladas en serie, llega al colector general de vapor de la central, donde una parte de este vapor es utilizado por el proceso y la otra parte es utilizada por los turbogeneradores para producir corriente eléctrica.

La energía para realizar dicho trabajo, la toman del vapor generado por las cuatro calderas que fluye a un cabezal común donde las turbinas la toman directamente de este, a una presión de 44,2 atm y a una temperatura de 399 °C.

La turbina 1 posee dos extracciones controladas automáticamente que permiten suministrar vapor a una presión constante de 5,8 atm para el calentamiento del agua de alimentación a las calderas (calentador de baja presión) y como materia prima en las diferentes plantas de la empresa (Ácido Sulfhídrico y Planta de Secado en el área portuaria para el calentamiento del Azufre y otras) y de 1,02 atm para el precalentamiento del agua de alimentar las calderas en los deareadores, en la planta de sulfuro y en lixiviación para el precalentamiento del mineral.

Las turbinas 2 y 3 poseen una extracción no controlada (libre) y su energía térmica se emplea para el calentamiento del agua de alimentar las calderas en el calentador de alta presión.

El vapor condensado en los condensadores de los turbogeneradores fluye por medio de bombas verticales centrífugas (dos en cada turbogenerador) a los deareadores incorporándose nuevamente al ciclo. En su recorrido, antes de llegar a los deareadores, tiene la función de condensar los vapores que se escapan junto a los gases incondensables extraídos de los condensadores por medio de dos parejas de eyectores, en cada turbina, incorporándose al condensado en los condensadores.

### **1.5. Principio de funcionamiento de los generadores de vapor**

El agua de alimentación llega a las calderas a través de una tubería de dos colectores generales de la central al nudo de alimentar y de este al Domo, existe una línea de agua automática y otra de emergencia, el cual es un sistema de tubos con válvulas. Para mejorar la calidad del agua de alimentación se tiene una instalación de fosfatación que se compone de dos recipientes de solución de fosfato y dos bombas dosificadoras. El fosfato se carga al tanque de preparación de la solución, se disuelve con agua y un agitador y desde el recipiente es bombeado al Domo. El vapor sobrecalentado de las calderas, a través de dos válvulas instaladas en serie, llega al colector general de vapor de la central. Para mantener los parámetros establecidos del agua de alimentación de caldera se utiliza el barrido continuo que se realiza por medio de válvulas reguladoras automáticas, que toman directamente del domo superior y descargan a un colector y estos a la atmósfera.

Para eliminar las partículas y los sólidos en suspensión de la caldera existe la extracción periódica que se produce desde los puntos inferiores del domo inferior de calderas el cual se realiza cada 24 horas en casos normales y en los casos de desviación de los parámetros se hacen estas extracciones de acuerdo a los resultados de los análisis del laboratorio e instruidas por el personal administrativo.

El petróleo del conducto general de la central alimenta a 4 quemadores instalados en el frente de las calderas. En la línea de petróleo para cada quemador hay instalada una válvula de mando neumático y una válvula de mando manual. Una parte del petróleo regresa al cabezal principal de la central termoeléctrica por medio del conducto de recirculación. Los quemadores son alimentados de vapor desde el colector general de la central de 10,5 kgf/cm<sup>2</sup>. En el conducto de vapor hay una rama de tubo que se une con el conducto de petróleo de alimentación de quemadores y es utilizada para el soplado de vapor (Purga de los quemadores).

El aire para la combustión se suministra a la caldera desde la atmósfera a través de un ventilador de tiro forzado. Este aire es calentado previamente en los calentadores de aire regenerativos para evitar la aparición del rocío en las últimas etapas, según el paso de gases, superficies de caldeo ya que este ácido afecta los cestos o paquetes del calentador de aire y las planchas metálicas de los conductos. Los gases producto de la combustión se succionan por un ventilador de tiro inducido y salen a través de una chimenea metálica a la atmósfera. La limpieza de las superficies de caldeo de la zona convectiva de la caldera, sobrecalentador y calentador de aire se realiza a través de los sopladores por medio de limpieza a vapor.

## **1.6. Descripción de los sistemas y componentes tecnológicos**

Los generadores de vapor son dispositivos de gran utilidad en la industria a nivel mundial; su función principal es producir vapor para generar potencia para diferentes procesos productivos, además mediante la combustión liberan la energía del combustible y se le transfiere al agua convirtiéndola en calor en forma de vapor y puede ser aprovechado para una gran diversidad de usos. Estas instalaciones están diseñadas para transferir el calor de una fuente externa a un fluido contenido dentro de la misma, con las debidas medidas de seguridad y con un mínimo de pérdidas. Esto propicia que la instalación objeto de estudio tenga una gran importancia.

### **1.6.1. Sistema de automatización**

La CTE de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba” es una de las plantas del país que cuenta con un sistema automatizado con una tecnología moderna, en la misma el operador dispone de un sistema de control donde de una manera muy sencilla puede controlar todos los parámetros

del proceso de cada uno de los generadores de vapor desde su PC a través de un programa adaptado a las condiciones de operación de la planta, el cual le permite detectar a tiempo cualquier desviación de los parámetros y poder accionar sobre estos.

A continuación se muestran los instrumentos de medición que registran los valores de algunos de los parámetros de trabajo del generador de vapor:

1. Termo resistencia PT 100, para medir la temperatura de los gases de salida, posee convertidor incorporado, señal de salida, standard de 4 a 20 miliamperes.  
Rango de medición 0 - 500 °C.
2. Transmisor de presión diferencial SITRANS P, modelo 4432 SMAR, se emplea para medir la presión del vapor; posee indicación digital y señal de salida de 4-20 miliamperes. Rango de medición: hasta 60 Mbar.
3. Analizador de oxígeno ABB, con él se mide la cantidad de oxígeno.
4. Termoresistencias, para medir la temperatura del vapor y la temperatura del agua de alimentación.
5. Flujómetro, para medir el flujo de vapor y el flujo de agua que entra al generador.
6. PLC (Control Lógico Programable) por sus siglas en inglés.

#### 1.6.2. Breve descripción de las características técnicas de las calderas

Marca	Bakcock and Wilcox Co. Modernizadas por Combustion Engineer
Código	303 – BO - 1; 2; 3 y 5
Tipo	Caldera de horno integral
Capacidad	1; 2; 3 - 68 ton/h y 5 - 100 ton/h
Presión diseño	50,9 kgf/cm <sup>2</sup>
Temperatura	398,8 °C
Temperatura del agua de alimentación	171 °C
Temperatura de petróleo	93,3 – 104,4 °C.
Presión de vapor atomizado	7,03 – 7,73 kgf/cm <sup>2</sup>
Cantidad de agua a nivel normal	25 718,6 kg
Condiciones de operación del horno	Presión negativa – 0,15 "H <sub>2</sub> O

**Tabla 1.1.** Parámetros fundamentales que se controlan en los generadores de vapor.

No	Parámetros que se miden	Norma	Unidad	Lugar de instalación del equipo
<b>Presión</b>				
1.	En el domo de la caldera	50,9	kgf/cm <sup>2</sup>	En la pizarra y en el lugar
2.	Del agua de alimentación en la línea principal	63,27	kgf/cm <sup>2</sup>	En la pizarra y en el lugar
3.	Del petróleo en la línea principal a los quemadores	12,3	kgf/cm <sup>2</sup>	En la pizarra y en el lugar
4.	Del vapor de atomización en la línea principal a los quemadores	10,54	kgf/cm <sup>2</sup>	En la pizarra y en el lugar
<b>Flujos</b>				
5.	De agua a la caldera	200	ton/h	En la pizarra y en el lugar
6.	De vapor de la caldera	150	ton/h	En la pizarra
7.	De petróleo hacia la caldera	10-12	ton/h	En la pizarra y en el lugar
<b>Temperatura</b>				
8.	Agua de alimentación hacia la caldera	182,2	°C	En el área y en la pizarra
9.	Vapor en el colector de salida	398,8	°C	En la pizarra
10.	Petróleo antes de los quemadores	98,8	°C	En el lugar
11.	Aire después del calentador	260	°C	En la pizarra
12.	Gases después del calentador de aire.	226,6	°C	En la pizarra
<b>Rarificación (vacío)</b>				
13.	En el horno de la caldera.	- 0,15	mm de H <sub>2</sub> O	En la pizarra
<b>Nivel</b>				
14.	En el domo de la caldera	- 2,54	cm	En la pizarra
<b>Concentración</b>				
15.	Oxígeno en los gases de salida después de la caldera	5 - 7	%	En la pizarra

### 1.6.3. Otros parámetros importantes que se controlan

**Presión de petróleo a los quemadores:** debe mantenerse alrededor de 7,03 kgf/cm<sup>2</sup>, que es el punto intermedio donde se pueden aceptar los cambios imprevistos, pues se dispone de un margen de 1,05 – 1,40 kgf/cm<sup>2</sup> en aumento o disminución.

**Nivel de agua:** debe mantenerse en el punto medio del domo superior, en este punto es donde se obtiene mayor superficie de evaporación.

**Flujo de aire:** este debe mantenerse en el punto más bajo posible que permita la combustión. Todos los aspectos que afectan a la combustión deben ser atendidos detalladamente, para evitar por ejemplo, que una pobre atomización obligue a alimentar demasiado aire. El operador está en la obligación de mantener el flujo de aire requerido sistemáticamente.

**Extracción de fondo:** elimina los sólidos en suspensión, no debe hacerse con carga superior a 64 ton/h, ya que a esa capacidad no deben producirse cambios bruscos de nivel que ocasiona dicha extracción.

#### 1.6.4. Componentes tecnológicos

Las calderas por lo general presentan los mismos componentes que difieren de nombre en dependencia del tipo de caldera pero realizan funciones similares, dentro de las partes más importantes en las calderas encontramos:

**Domo inferior:** es un recipiente cilíndrico ubicado en la parte inferior de la caldera cuya función es la de coleccionar las partículas y los sólidos en suspensión que precipitan para su extracción al exterior.

**Domo superior:** es un recipiente cilíndrico ubicado en la parte superior de la caldera, en este se almacena una reserva de agua para alimentar al domo inferior y paneles de tubos evaporadores, en él se separa el vapor del agua mediante dispositivos especiales instalado al efecto, en operación normal debe mantenerse en el nivel medio ya que este es el punto de mayor seguridad de operación.

**Sobrecalentadores:** tienen la función de lograr que el vapor alcance una temperatura superior a la de saturación. Con el sobrecalentamiento se persigue aumentar el rendimiento de los ciclos de producción de potencia a partir del vapor, disminuir la humedad en el escape de las turbinas de vapor y aumentar la cantidad de energía asociada a la unidad de masa, reduciéndose el tamaño de todos los equipos del sistema de vapor. El grado de sobrecalentamiento depende de los requerimientos del proceso. Existen diferentes tipos de sobrecalentadores pero en ellos siempre el vapor irá por el interior de los tubos y los gases por la parte exterior. De acuerdo a su disposición en la caldera pueden ser radiantes, semirradiantes y convectivos.

**Pantallas de tubos evaporadores:** se encuentran en la parte radiante del horno, no son más que tubos que cubren la mayor parte de la superficie interior del horno, por dentro de los

tubos circula el agua y por fuera los gases calientes y las llamas. En estas la transferencia de calor se efectúa principalmente por radiación. En el interior de estos tubos se forma la mezcla agua - vapor, que asciende por diferencia de densidades y se descarga al domo.

**Colectores inferiores:** se encuentran ubicados en la parte inferior de las paredes laterales y del frente de las calderas, su función es similar a la del domo inferior, los cuales se unen al domo inferior, teniendo la función de almacenar todo el fango depositado en la caldera, para su posterior expulsión.

**Ventilador de tiro inducido (VTI):** se encuentra situado en la parte inferior izquierda de la caldera. Es el encargado de extraer los gases producto de la combustión y expulsarlos al exterior a través de la chimenea, manteniendo una presión negativa en el horno.

**Ventilador de tiro forzado (VTF):** se encuentra en la parte inferior derecha de la caldera. Es el encargado de suministrar al horno de la caldera el aire necesario para lograr una combustión completa con exceso. Según su diseño es análogo al aspirador de humo.

**Diafragmas:** se llama así a las paredes de ladrillos refractarios que se encuentra en el eje convectivo de las calderas, cuya función es guiar el recorrido de los gases para lograr un mejor aprovechamiento de su temperatura.

**Precalentador de aire:** este equipo es el encargado de calentar el aire que se suministra al horno de la caldera, lo que permite aumentar su eficiencia disminuyendo el consumo de petróleo, transfiriendo gran parte de la temperatura de los gases a través de las láminas que posee, existiendo los cestos calientes y cestos fríos, se encuentran situado entre los conductos de aire y gases, en operación normal gira a muy bajas revoluciones.

**Válvulas de seguridad:** las válvulas de seguridad son las encargadas de mantener la presión en los valores de diseño para proteger al equipo de una sobrepresión por cualquier causa.

**Economizador:** tiene como función incrementar la temperatura del agua de alimentar hasta una temperatura inferior a la de saturación (existen también economizadores evaporativos).

Otros equipos que influyen en la eficiencia térmica de los generadores de vapor son los

**Deaeradores** que tienen tres funciones principales:

1. Remover y eliminar gases disueltos ( $O_2$  y  $CO_2$ ).

2. Aumentar la temperatura del agua utilizando para ello vapor de 1,02 atm, condensado de los calentadores y condensado de los turbo generadores.
3. Garantizar una reserva de agua para fallos de corta duración.

La función principal de los deareadores es la de eliminar del agua los gases disueltos, los cuales provocarían alta corrosión en las calderas.

De los deareadores se abastecen las bombas de alimentación de agua a las calderas y ellos a su vez se abastecen de las bombas de reemplazo a los deareadores, aunque también reciben agua de los siguientes puntos:

- Retorno de las bombas de alimentación a las calderas.
- Condensado de los calentadores de agua.
- Condensado de los turbo generadores.

Las bombas de reemplazo son las encargadas de suministrarle a los deareadores el flujo de agua necesario para mantenerlos en el nivel de operación, habiendo para esa función un sistema de control automático que garantiza la reposición necesaria a tal efecto. Esta reposición le llega al equipo por la parte superior y a través de unos rociadores, poniéndose en contacto con el vapor que llega por un punto situado a unos 1,52 metros más abajo. El brusco contacto entre el agua y el vapor es el que facilita la eliminación de los gases, los cuales escapan por el respiradero que constantemente está en servicio. No obstante a lo anterior al equipo se le dosifica sulfito de sodio para prevenir y garantizar la no presencia de oxígeno en las calderas. Para garantizar el nivel de operación del equipo y la reposición de agua en caso de fallo del sistema automático, se dispone de un bypass y un sistema para evacuar en caso de sobrante. También hay instaladas alarmas por alto y bajo nivel, así como un indicador electrónico de nivel situado en la pizarra de calderas y tubos empotrados al deareador que permitan ver su nivel. Para prevenir una excesiva presión en el vapor hay instalada una válvula de seguridad que evacua a la atmósfera cuando la presión sobrepasa las 1,5 atm. A la descarga de agua hay instalado un termómetro que registra la temperatura a la salida del deareador. La temperatura del agua efluente normalmente es de 121 °C.

Los **calentadores de agua** tienen la función de calentar el agua que va a ser alimentada a las calderas, empleando para tal objetivo vapores que ya han realizado trabajo. El calentador de baja presión recibe vapor de la extracción automática de 5,78 atm del turbo generador 1 o cuando este no está en operación lo toma de la cascada y el calentador de alta presión lo recibe

de la extracción no controlada del turbo generador No. 2 de 20,41 atm. La presión va a estar en correspondencia de la carga que tenga el turbo generador. El agua proveniente de los deareadores es impulsada por las bombas de alimentación, llega al calentador de baja con aproximadamente 54,4 – 61,2 atm y 121 °C de temperatura, al salir pasa con esa misma presión al calentador de alta incrementando su temperatura en unos 38 °C, estando en dependencia de la carga a que opere el turbo generador de la extracción incontrolable ya que la mayor temperatura se logra cuando este opera a máxima carga. Estos equipos disponen ambos de un sistema automático de control de nivel de condensado, su indicador es directo de nivel visual, posee además un bypass para evacuar exceso en caso de fallo del sistema automático.

<b>CALENTADORES DE AGUA</b>	<b>DE BAJA PRESIÓN</b>	<b>DE ALTA PRESIÓN</b>
Código:	303 - EX - 7	303 -EX – 6
Posición: Flujo volumétrico:	Horizontal: 182 m <sup>3</sup> /h	Horizontal: 204 m <sup>3</sup> /h
Presión (cuerpo):	8,16 atm	20,4 atm
Presión (tubos):	71,4 atm	71,4 atm

### 1.7. Conclusiones del capítulo 1

- ✓ Se establecieron los aspectos fundamentales relacionados con las calderas y el proceso de producción de vapor de la planta Termoeléctrica de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”. Los mismos, vistos de forma integrada, constituyen el marco teórico-contextual que posibilita el diagnóstico energético del objeto de estudio.
- ✓ En la planta Termoeléctrica están creadas las condiciones para el diagnóstico energético del proceso de generación de vapor. Lo anterior es posible debido a la existencia, en la referida planta, de un avanzado sistema de automatización que permite la medición, control y registro confiable de los parámetros fundamentales del proceso.

## CAPÍTULO 2

# PROCEDIMIENTO EMPLEADO EN EL DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE VAPOR

### 2.1. Introducción

La evaluación energética de los generadores de vapor es muy importante porque permite conocer el grado de aprovechamiento de la energía térmica y de la energía útil máxima presente en la instalación. El **objetivo** de este capítulo es: establecer el procedimiento que permita la determinación de las eficiencias térmicas y exergéticas de los generadores de vapor de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”.

### 2.2. Sistema de 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 (Cuza, 2011).

Según Cuza (2011), 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.

**La elevación de la eficiencia energética puede alcanzarse por dos vías fundamentales, no excluyentes entre sí:**

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

Cualquiera de las dos reduce el consumo específico, pero la combinación de ambas es la que posibilita alcanzar el punto óptimo. **La primera vía** tiene un menor costo, pero el potencial de ahorro es menor y 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 vía** requiere de inversiones, pero el potencial de ahorro es más alto y asegura mayor permanencia en los mismos.

El alto nivel competitivo a que están sometidas las empresas desde los años 90 les impone cambios en sus sistemas de administración. No es suficiente dirigir desde un núcleo generador de soluciones a los problemas, a través de medidas que compulsen a los hombres y dediquen los recursos a lo que se ha considerado fundamental; se requiere que exista una estrategia, un sistema entendido por todos y con la capacidad para llevarlo a cabo, que garantice la estabilidad de cada resultado en consonancia con la visión que se ha propuesto la empresa.

Para lograr la eficiencia energética de forma sistemática es necesaria 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 Tecnología de Gestión Total Eficiente de la Energía (TGTEE) consiste en un paquete de procedimientos, herramientas técnico-organizativas y software especializado, que aplicado de forma continua y con la filosofía de la gestión total de la calidad, permite establecer nuevos hábitos 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 en 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.

### **2.2.1. Procedimientos y herramientas que incorpora la TGTEE**

La TGTEE incorpora un conjunto de procedimientos y herramientas innovadoras en el campo de la gestión energética:

- Diagrama Energético – Productivo.
- Diagrama de Pareto.
- Estratificación.
- Gráficos de Control.
- Gráfico de Consumo y Producción en el tiempo (E-P vs. T).
- Diagramas de Dispersión y Correlación.
- Diagramas de Consumo – Producción.
- Diagrama índice de Consumo - Producción (TC vs. P).
- Gráfico de tendencia o de sumas acumulativas (CUSUM).

En la presente investigación se implementaron como herramientas las siguientes: el diagrama de Pareto, la estratificación y el gráfico de consumo y producción en el tiempo. Las restantes no pudieron ser aplicadas porque para ello se requiere de información específica de la producción que, para el caso de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”, es clasificada y por tanto no se tuvo acceso a la misma.

En la fuente bibliográfica consultada se detallan las particularidades de los procedimientos y herramientas que incorpora la TGTEE. Por tales razones, solo se describen brevemente las empleadas en esta investigación.

#### **2.2.1.1. 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.

### **2.2.1.2. Estratificación**

Cuando se investiga la causa de un efecto, una vez identificada la causa general aplicando el diagrama de Pareto, es necesario encontrar la causa particular del efecto, aplicando sucesivamente Pareto a estratos más profundos de la causa general. La estratificación es el método de agrupar datos asociados por puntos o características comunes pasando de lo general a lo particular. Pueden ser estratificados los gráficos de control, los diagramas de Pareto, los diagramas de dispersión, los histogramas y otras herramientas de descripción de efectos.

#### **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.

#### **Uso del método de estratificación para el control y reducción de los consumos y costos energéticos:**

- Identificar el número mínimo de equipos que provocan la mayor parte de los consumos totales equivalentes de energía de la empresa (“Puestos Claves”).
- Identificar el número mínimo de las causas de pérdidas que provocan la mayor parte de los sobreconsumos de energía de la empresa.
- Identificar el número mínimo de áreas o equipos que provocan los mayores costos de energía de la empresa.
- Identificar factores o variables de control que pueden influir sobre los consumos, pérdidas y costos energéticos.
- Identificar causas de comportamientos no esperados de las variaciones de los consumos energéticos.

### **2.2.1.3. Gráfico de consumo y producción en el tiempo**

Consiste en un gráfico que muestra la variación simultánea del consumo energético con la producción realizada en el tiempo. El gráfico se realiza para cada portador energético importante de la empresa y puede establecerse a nivel de empresa, área o equipos.

#### **Utilidad de los gráficos E-P vs. T**

- Muestran períodos en que se producen comportamientos anormales de la variación del consumo energético con respecto a la variación de la producción.

- Permiten identificar causas o factores que producen variaciones significativas de los consumos.

### Variaciones anormales en el gráfico E-P vs. T

Generalmente debe ocurrir que un incremento de la producción produce un incremento del consumo de energía 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.

### 2.3. 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 investigadores (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

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

- 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

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

- Volumen real de aire

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

**Nota:** todos los volúmenes antes relacionados se expresan en m<sup>3</sup>/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:

$\alpha$ : coeficiente de exceso de aire; adimensional

$N_2$ : cantidad de dinitrógeno presente en los gases de escape; %

$O_2$ : cantidad de dióxígeno presente en los gases de escape; %

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

$CO_2$ : cantidad de dióxido de carbono presente en los gases de escape; %

$H_2$ : cantidad de dihidrógeno presente en los gases de escape; %

$CH_4$ : 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

$$I^0_g = V_{R_{O_2}} \cdot I_{CO_2} + V^0_{N_2} \cdot I_{N_2} + V^0_{H_2O} \cdot I_{H_2O} + 0,01 \cdot A^t \cdot A_{arr} \cdot I_{cen} \quad (2.12)$$

Donde:

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

$I_{CO_2}$ : entalpía de los gases triatómicos (en este caso el  $CO_2$ ); kJ/m<sup>3</sup>

$I_{N_2}$ : entalpía del dinitrógeno; kJ/m<sup>3</sup>

$I_{H_2O}$ : entalpía de los vapores de agua; kJ/m<sup>3</sup>

$I_{aire}$ : entalpía del aire; kJ/m<sup>3</sup>

$I_{ceniza}$ : 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.

$T^\circ C$	$I_{CO_2}$	$I_{N_2}$	$I_{H_2O}$	$I_{aire}$	$I_{ceniza}$
100	169,98	129,79	150,72	132,30	80,80
200	357,55	260	304,38	266,28	169,14
300	558,93	311,88	462,64	403,77	263,76
400	772	527	626	542	360

**Fuente:** Quevedo, 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:

$\eta_{tGVMD}$  : 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:

Cc: calor específico del combustible a la temperatura t; kJ/kg · °C

t: temperatura del combustible; °C

$$Cc = 1.783 + 0.025 \cdot t$$

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

Donde:

$i_{sp}$ : entalpía a la salida del precalentador de aire; kJ/m<sup>3</sup>

$i_{af}$ : entalpía del aire frío; kJ/m<sup>3</sup>

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

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<sup>3</sup>/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

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

Siendo:

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

Donde:

$\eta_{tGVMI}$  : 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

Esta pérdida se produce al salir de la caldera los gases a una alta temperatura que arrastran una cantidad de calor hacia la atmósfera, está caracterizada por dos factores fundamentales:

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

Además esta pérdida depende de:

- 1- El  $\Delta T$  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:

- El coeficiente de exceso de aire.
- 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:

$$q_4 = 0,5 - 5\% \quad \text{sólido en cámara}$$

$$q_4 = 2 - 15\% \quad \text{sólido en capa y pila}$$

$$q_4 = 0\% \quad \text{líquidos y gaseosos}$$

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

$$a_{esc} = \frac{B_{esc} \cdot A_{esc}}{B \cdot A^t}; \quad a_{cen} = \frac{B_{cen} \cdot A_{cen}}{B \cdot A^t}; \quad a_{arr} = 1 - a_{esc} - a_{cen} \quad B = \frac{D}{d} \quad (2.27)$$

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<sub>v</sub>/kg<sub>c</sub>.

### **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	$q_5 = 0,4 - 0,5\%$

$$q_5 = q_{5N} \cdot \frac{D_N}{D_R} \quad (2.28)$$

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.

$$q_6 = \frac{(a_{esc} - I_{esc} \cdot A^t)}{Q_d} \quad (2.29)$$

$$I_{esc} = C_{esc} \cdot t_{esc} \quad (2.30)$$

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 análisis 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 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:

$$e_x = (h_1 - h_0) - T_0 \cdot (s_1 - s_0) \quad (2.31)$$

$$E_x = m \cdot [(h_1 - h_0) - T_0 \cdot (S_1 - S_0)] \quad (2.32)$$

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:

$$E_Q = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (2.33)$$

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:

$$E_Q = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_M}\right) \quad (2.34)$$

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:

$$\eta_{eGV} = \frac{E_R}{E_E} \cdot 100 \quad (2.35)$$

Donde:

$\eta_{eGV}$ : 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:

$$\gamma = 1 - \eta_E \quad (2.36)$$

Donde.

$\gamma$  : pérdida de exergía; %

Para los generadores de vapor de la empresa “Comandante Pedro Sotro Alba” 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. Materiales empleados en la medición de los parámetros

Los datos utilizados para la realización de los cálculos fueron obtenidos de las lecturas tomadas por los operadores de los parámetros de operación de los generadores de vapor, haciendo uso de la instrumentación existente; los cuales realizan la medición y la envían al procesador de datos PC, donde el operador tiene acceso a los parámetros de operación necesarios para mantener un correcto funcionamiento de la Central Termoeléctrica.

### 2.4.1. Principales parámetros medidos en las calderas

La composición química del combustible, en masa de trabajo y expresada en por ciento, se muestra a continuación. Los valores relacionados corresponden a las 3 variantes analizadas durante el primer trimestre del año 2014.

$V_1 \longrightarrow$	$C^t = 82,20$	$H^t = 10,10$	$S^t = 3,50$	$O^t = 0,30$	$W^t = 2,03$
$V_2 \longrightarrow$	$C^t = 83,40$	$H^t = 10,10$	$S^t = 2,23$	$O^t = 0,30$	$W^t = 1,40$
$V_3 \longrightarrow$	$C^t = 83,40$	$H^t = 10,10$	$S^t = 2,23$	$O^t = 0,30$	$W^t = 1,40$

#### Observación importante:

Todos los generadores de vapor emplean el mismo combustible en cada variante, el cual es suministrado desde la empresa Puerto Moa.

La composición química de los gases producto de la combustión es otra variable importante a considerar en la evaluación térmica y exergética de los generadores de vapor. La misma se expone en la Tabla 2.2. Por su parte, los restantes parámetros de funcionamiento de los equipos se relacionan en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.2.** Análisis químico de los gases producto de la combustión.

<b>Composición química de los gases producto de la combustión (%)</b>				
<b>Generador de vapor 1 (valores promedios para las variantes 1-3)</b>				
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	Dioxígeno (O <sub>2</sub> )	Monóxido de Carbono (CO)	Dihidrógeno (H <sub>2</sub> )	Metano (CH <sub>4</sub> )
10,98	2,70	0,41	0,00	0,00
11,02	2,45	0,45	0,00	0,00
11,05	4,10	0,43	0,00	0,00
<b>Generador de vapor 2 (valores promedios para las variantes 1-3)</b>				
11,01	2,80	0,44	0,00	0,00
11,07	2,65	0,45	0,00	0,00
10,95	4,40	0,46	0,00	0,00
<b>Generador de vapor 3 (valores promedios para las variantes 1-3)</b>				
11,21	3,00	0,51	0,00	0,00
11,11	3,04	0,47	0,00	0,00
11,14	4,70	0,48	0,00	0,00
<b>Generador de vapor 5 (valores promedios para las variantes 1-3)</b>				
12,32	3,90	0,50	0,00	0,00
12,38	5,00	0,54	0,00	0,00
12,39	4,90	0,55	0,00	0,00

En la instalación también se midieron los parámetros fundamentales que caracterizan el trabajo de los generadores de vapor. Se contempló el mismo periodo que para la composición química del combustible y los gases producto de la combustión (enero-marzo de 2014)

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

<b>Mediciones realizados en los generadores de vapor</b>							
<b>Valores promedios de los parámetros de funcionamiento</b>	<b>GV-1</b>			<b>GV-2</b>			<b>Unidad</b>
	<b>V-1</b>	<b>V-2</b>	<b>V-3</b>	<b>V-1</b>	<b>V-2</b>	<b>V-3</b>	
Producción de vapor sobrecalentado	62,3	67,7	58,6	60,4	66,8	55,9	(t/h)
Presión del vapor sobrecalentado	45	46	45	46	46	45	(atm)
Temperatura del vapor sobrecalentado	380	380	385	378	370	365	(°C)
Temperatura del agua de alimentación	189	186	198	189	186	198	(°C)

Temperatura del combustible	112	113	110	112	113	110	(°C)
Temperatura de los gases de escape	206	200	196	230	232	230	(°C)
Temperatura del medio ambiente	32	32	32	32	32	32	(°C)
Consumo de combustible	3,95	4,32	3,61	3,9	4,18	3,38	(t/h)
<b>Valores promedios de los parámetros de funcionamiento</b>	<b>GV-3</b>			<b>GV-5</b>			<b>Unidad</b>
	<b>V-1</b>	<b>V-2</b>	<b>V-3</b>	<b>V-1</b>	<b>V-2</b>	<b>V-3</b>	
Producción de vapor sobrecalentado	63,5	65,9	58,2	95,8	97,7	81,4	(t/h)
Presión del vapor sobrecalentado	45	46	45	45	45	44	(atm)
Temperatura del vapor sobrecalentado	376	380	385	396	396	405	(°C)
Temperatura del agua de alimentación	189	186	198	195	210	206	(°C)
Temperatura del combustible	112	113	110	96	95	96	(°C)
Temperatura de los gases de escape	235	225	220	211	218	205	(°C)
Temperatura del medio ambiente	32	32	32	32	32	32	(°C)
Consumo de combustible	3,97	4,18	3,57	6,2	6,45	5,37	(t/h)

Durante el primer trimestre del presente año se tomaron cuatro mediciones diarias de cada parámetro en diferentes horarios del día (6; 12; 18 y 24 horas). Los valores expuestos en las Tablas 2.2 y 2.3 para los parámetros de los generadores de vapor constituyen los resultados promedios de las mediciones realizadas; correspondiendo las variantes 1; 2 y 3, a los meses enero; febrero y marzo, por ese orden.

## 2.5. Conclusiones del capítulo 2

- ✓ Se establecieron los aspectos fundamentales relacionados con los procedimientos y herramientas que incorpora la Tecnología de Gestión Total Eficiente de la Energía. Siendo objeto de aplicación, para el caso de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”, el diagrama de Pareto, la estratificación y el gráfico de consumo y producción en el tiempo.
- ✓ Se particularizaron, a las calderas investigadas, los procedimientos de cálculo establecidos para el balance térmico y exergético de los generadores de vapor. Para ello se integraron los aspectos teóricos definidos en la literatura especializada en la temática de generación de vapor, con las características propias del proceso y las instalaciones objeto de análisis.
- ✓ El procedimiento establecido para las instalaciones productoras de vapor de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba” contiene las expresiones específicas para el cálculo de los rendimientos térmicos por los métodos Directo e Indirecto y el exergético. Además, permite la determinación de los flujos de aire y gases, y otros parámetros que requieren las instalaciones para su funcionamiento en las actuales condiciones de explotación.

## CAPÍTULO 3

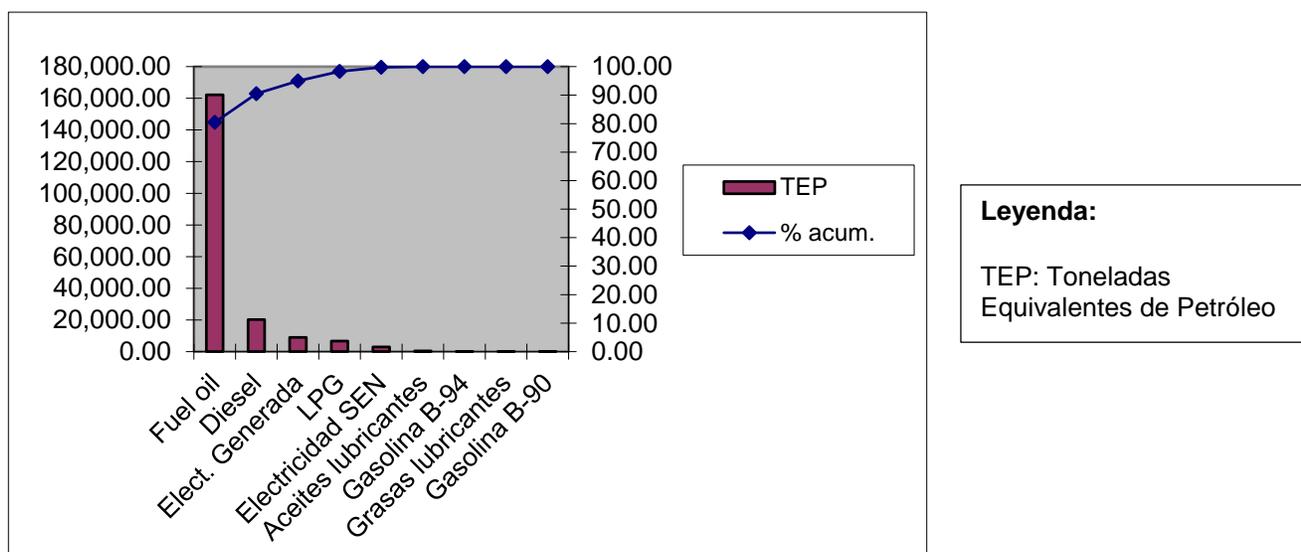
# RESULTADOS DEL DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO E IMPACTOS ECONÓMICO-AMBIENTALES ASOCIADOS A LAS CALDERAS

### 3.1. Introducción

En este capítulo se exponen los resultados de la aplicación de la TGTEE y la evaluación energética de los generadores de vapor de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”. Además, se relacionan los impactos económicos y ambientales asociados a estas instalaciones. En tal sentido el **objetivo** del capítulo es valorar los resultados obtenidos en la investigación y los impactos económico-ambientales asociados al objeto de estudio.

### 3.2. Comportamiento de los portadores energéticos en el año 2013

En las Tablas 1 y 2 del Anexo 1 se relacionan los portadores energéticos utilizados en la empresa y en la CTE, respectivamente. La representación gráfica, a través del Diagrama de Pareto, indica cuál de ellos es el de mayor consumo (Figuras 3.1 y 3.2).



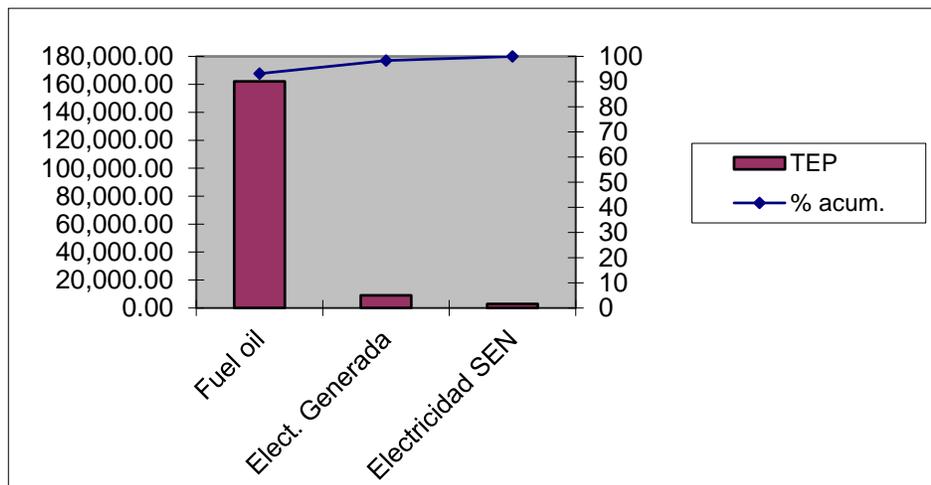
**Figura 3.1.** Diagrama de Pareto de los portadores energéticos en la empresa.

#### 3.2.1. Estratificación de los portadores energéticos en cuanto a gastos en TEP

Para conocer la influencia de cada portador energético, en cuanto al consumo, se realiza una estratificación. Lo anterior permite determinar cuál o cuáles de estos superan el 80 %, y sobre la base de los resultados se toman medidas pertinentes para disminuir los consumos.

Como se aprecia, el consumo de fuel oil representa el 80,459 % de todos los portadores energéticos de la empresa (Tabla 1 del Anexo 1) y el 93,149 % de los principales portadores

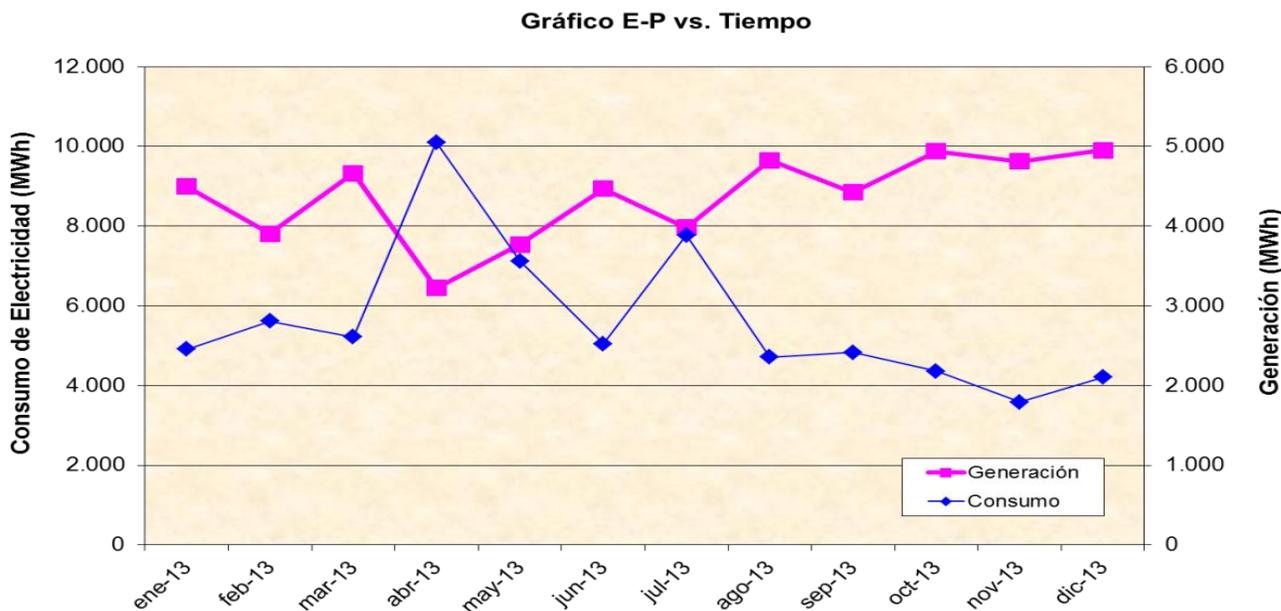
energéticos de la planta Termoeléctrica (Tabla 2 del Anexo 1), por tales razones se decide concentrar el trabajo sobre este portador. Por tanto se realiza un diagnóstico energético a las calderas de la empresa, equipos que reportan el mayor consumo de combustible en la entidad.



**Figura 3.2.** Diagrama de Pareto de los portadores energéticos en la CTE.

### 3.2.2. Análisis de los portadores que representan los mayores consumos

En la Figura 3.3 se muestra que la generación y el consumo de electricidad están estrechamente relacionados, al aumentar una disminuye la otra, y viceversa. Esto se debe a que la empresa tiene una demanda que oscila entre 16-17 MW/h, aproximadamente (entre generada y consumida por el SEN), por lo que cuando disminuye la generación, hay que aumentar la importación de energía (compra de energía) de la Red Nacional para mantenerse alrededor del plan.

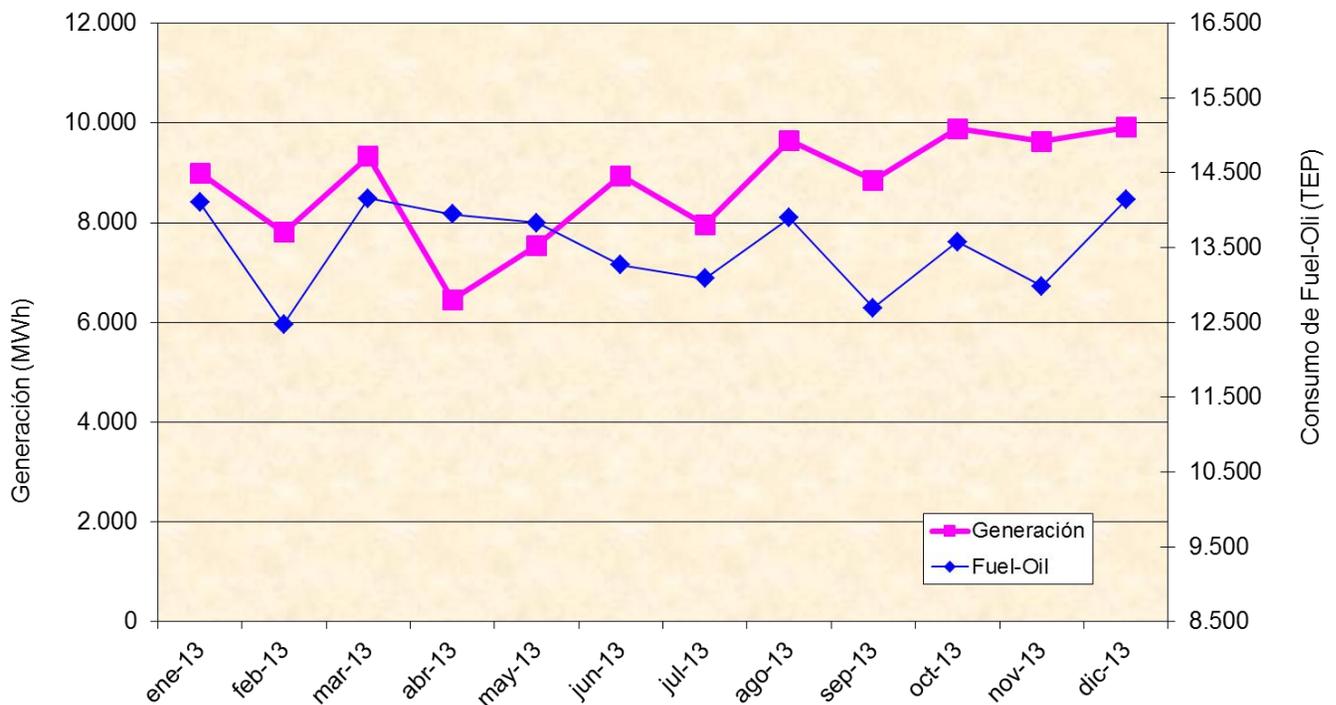


**Figura 3.3.** Comportamiento del Consumo de Electricidad vs. Producción (Generación).

En la figura anterior también se aprecia que en el mes de abril se alcanzó el mayor consumo de electricidad y el menor valor de generación de la misma. Esto se debe a que en ese mes hubo un déficit de vapor al sacar un Tren de ácido para mantenimiento capital, provocando que éste deje de generar aproximadamente 70 000 lb/h de vapor, por lo que fue necesario disponer de todo el vapor posible para el proceso. Para ello se redujo el suministro de vapor a los turbogeneradores, con la consiguiente disminución de la generación de electricidad y el aumento del consumo de energía del SEN. Se debe señalar que en la empresa el 75 % del vapor que se genera es destinado al proceso y el 25 % a la generación de electricidad.

En la Figura 3.4 se muestra la variación del consumo de combustible en función de la producción (generación de electricidad). Este portador de energía (el fuel oil) es el de mayor consumo en la empresa y para el periodo considerado se observa un comportamiento adecuado entre estos parámetros. Es decir, existe una dependencia entre el consumo de combustible y la generación de electricidad, pero no es directamente proporcional porque no todo el vapor producido en la planta se destina a la generación, sino que es solo el 25 %.

En el mes de febrero hubo un déficit en el consumo de combustible debido a una caldera que salió de mantenimiento, lo que provocó una disminución en la generación de electricidad y un aumento en el consumo del SEN.



**Figura 3.4.** Consumo de fuel oil en función de la generación de electricidad en el año 2013

### 3.3. Análisis de los resultados del balance térmico y exergético

En las Tablas 3.1 y 3.2 se exponen, de forma simplificada, los resultados obtenidos en el cálculo de los rendimientos térmicos y exergéticos de los generadores de vapor investigados, para las tres variantes consideradas. En el Anexo 2 se relaciona el cálculo íntegro de la variante 1 para el generador de vapor 1, no se exponen las restantes variantes porque el procedimiento utilizado es el mismo y las calderas son semejantes por lo que solo cambian los datos iniciales.

**Tabla 3.1.** Valores de los parámetros fundamentales obtenidos en el balance térmico y exergético realizado a los generadores de vapor 1 y 2.

	Generador de vapor 1			Generador de vapor 2			Unidad	Ec.
	V-1	V-2	V-3	V-1	V-2	V-3		
$Q_b^t$	3,857x10 <sup>7</sup>	3,885x10 <sup>7</sup>	3,885x10 <sup>7</sup>	3,857x10 <sup>7</sup>	3,885x10 <sup>7</sup>	3,885x10 <sup>7</sup>	J/kg	2.1
$V^0a$	10,091	10,155	10,155	10,091	10,155	10,155	m <sup>3</sup> /kg	2.2
$VR_{O_2}$	1,558	1,572	1,572	1,558	1,572	1,572	m <sup>3</sup> /kg	2.3
$V^0N_2$	7,974	8,025	8,025	7,974	8,025	8,025	m <sup>3</sup> /kg	2.4
$V^0gs$	9,532	9,597	9,597	9,532	9,597	9,597	m <sup>3</sup> /kg	2.5
$V^0H_2O$	1,309	1,302	1,302	1,309	1,302	1,302	m <sup>3</sup> /kg	2.6
$V^0g$	10,841	10,899	10,899	10,841	10,899	10,899	m <sup>3</sup> /kg	2.7
$Vg$	12,23	12,110	13,468	12,293	12,249	13,755	m <sup>3</sup> /kg	2.8
$Va$	11,328	11,248	12,280	11,378	11,362	12,479	m <sup>3</sup> /kg	2.9
$\alpha$	1,123	1,108	1,209	1,128	1,119	1,229	adim.	2.10
$Q_d$	4,201x10 <sup>7</sup>	4,162x10 <sup>7</sup>	4,181x10 <sup>7</sup>	4,155x10 <sup>7</sup>	4,244x10 <sup>7</sup>	4,270x10 <sup>7</sup>	J/kg	2.16
$Q_{\text{útil}}$	1,465x10 <sup>11</sup>	1,600x10 <sup>11</sup>	1,362x10 <sup>11</sup>	1,421x10 <sup>11</sup>	1,562x10 <sup>11</sup>	1,271x10 <sup>11</sup>	J/h	2.19
$\eta_{C-MD}$	88,304	88,991	90,197	87,681	88,037	88,082	%	2.15
$\eta_{C-MD} (P)$	<b>89,164</b>			<b>87,933</b>			%	-
$Q_a$	4,474x10 <sup>4</sup>	4,859x10 <sup>4</sup>	4,433x10 <sup>4</sup>	4,437x10 <sup>4</sup>	4,749x10 <sup>4</sup>	4,218x10 <sup>4</sup>	m <sup>3</sup> /h	2.20
$Q_g$	4,831x10 <sup>4</sup>	5,232x10 <sup>4</sup>	4,862x10 <sup>4</sup>	4,794x10 <sup>4</sup>	5,120x10 <sup>4</sup>	4,649x10 <sup>4</sup>	m <sup>3</sup> /h	2.21
$q_2$	6,204	6,174	5,893	6,810	6,751	6,502	%	2.23
$q_3$	0,281	0,313	0,298	0,305	0,307	0,312	%	2.24

q <sub>4</sub>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	%	2.25
q <sub>5</sub>	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	%	2.27
q <sub>6</sub>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	%	2.28
η <sub>C-MI</sub>	92,415	92,413	92,709	91,885	91,942	92,185	%	2.22
η <sub>C-MI (P)</sub>	<b>92,512</b>			<b>92,004</b>			%	
η <sub>ex C</sub>	53,901	53,691	55,190	53,502	54,022	54,828	%	2.34
η <sub>ex C (P)</sub>	<b>54,261</b>			<b>54,183</b>			%	-
γ	46,099	46,309	44,810	46,498	45,978	45,172	%	2.35

**Nota:** En el diagnóstico energético se emplearon los softwares Mathcad13 y VAPOR. EXE y la Tabla de propiedades termodinámicas del agua y el vapor (Vulkalovitch, 1978).

**Tabla 3.2.** Valores de los parámetros fundamentales obtenidos en el balance térmico y exergético realizado a los generadores de vapor 3 y 5.

	Generador de vapor 3			Generador de vapor 5			Unidad	Ec.
	V-1	V-2	V-3	V-1	V-2	V-3		
Q <sub>b</sub> <sup>t</sup>	3,857x10 <sup>7</sup>	3,885x10 <sup>7</sup>	3,885x10 <sup>7</sup>	3,857x10 <sup>7</sup>	3,885x10 <sup>7</sup>	3,885x10 <sup>7</sup>	J/kg	2.1
V <sup>0</sup> <sub>a</sub>	10,091	10,155	10,155	10,091	10,155	10,155	m <sup>3</sup> /kg	2.2
VR <sub>02</sub>	1,558	1,572	1,572	1,558	1,572	1,572	m <sup>3</sup> /kg	2.3
V <sup>0</sup> <sub>N<sub>2</sub></sub>	7,974	8,025	8,025	7,974	8,025	8,025	m <sup>3</sup> /kg	2.4
V <sup>0</sup> <sub>gs</sub>	9,532	9,597	9,597	9,532	9,597	9,597	m <sup>3</sup> /kg	2.5
V <sup>0</sup> <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	1,309	1,302	1,302	1,309	1,302	1,302	m <sup>3</sup> /kg	2.6
V <sup>0</sup> <sub>g</sub>	10,841	10,899	10,899	10,841	10,899	10,899	m <sup>3</sup> /kg	2.7
V <sub>g</sub>	12,422	12,532	14,082	13,225	14,485	14,357	m <sup>3</sup> /kg	2.8
V <sub>a</sub>	11,480	11,586	12,700	12,082	12,964	12,882	m <sup>3</sup> /kg	2.9
α	1,138	1,141	1,251	1,197	1,277	1,268	adim.	2.10
Q <sub>d</sub>	4,273x10 <sup>7</sup>	4,239x10 <sup>7</sup>	4,267x10 <sup>7</sup>	3,901x10 <sup>7</sup>	3,927x10 <sup>7</sup>	3,928x10 <sup>7</sup>	J/kg	2.16
Q <sub>útil</sub>	1,496x10 <sup>11</sup>	1,557x10 <sup>11</sup>	1,352x10 <sup>11</sup>	2,222x10 <sup>11</sup>	2,245x10 <sup>11</sup>	1,903x10 <sup>11</sup>	J/h	2.19
η <sub>C-MD</sub>	88,161	87,888	88,769	91,859	88,646	90,215	%	2.15

$\eta_{C-MD} (P)$	<b>88,273</b>			<b>90,240</b>			%	-
$Q_a$	$4,556 \times 10^4$	$4,843 \times 10^4$	$4,534 \times 10^4$	$7,491 \times 10^4$	$8,362 \times 10^4$	$6,918 \times 10^4$	m <sup>3</sup> /h	2.20
$Q_g$	$4,932 \times 10^4$	$5,238 \times 10^4$	$5,027 \times 10^4$	$8,200 \times 10^4$	$9,343 \times 10^4$	$7,710 \times 10^4$	m <sup>3</sup> /h	2.21
$q_2$	6,718	6,581	6,319	6,719	6,789	6,404	%	2.23
$q_3$	0,344	0,321	0,326	0,369	0,399	0,406	%	2.24
$q_4$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	%	2.25
$q_5$	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	%	2.27
$q_6$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	%	2.28
$\eta_{C-MI}$	91,939	92,097	92,355	92,412	92,312	92,690	%	2.22
$\eta_{C-MI} (P)$	<b>92,130</b>			<b>92,471</b>			%	-
$\eta_{ex C}$	55,152	53,895	55,438	52,709	51,979	52,617	%	2.34
$\eta_{ex C} (P)$	<b>54,828</b>			<b>52,435</b>			%	-
$\gamma$	44,818	46,105	44,562	47,291	48,021	47,383	%	2.35

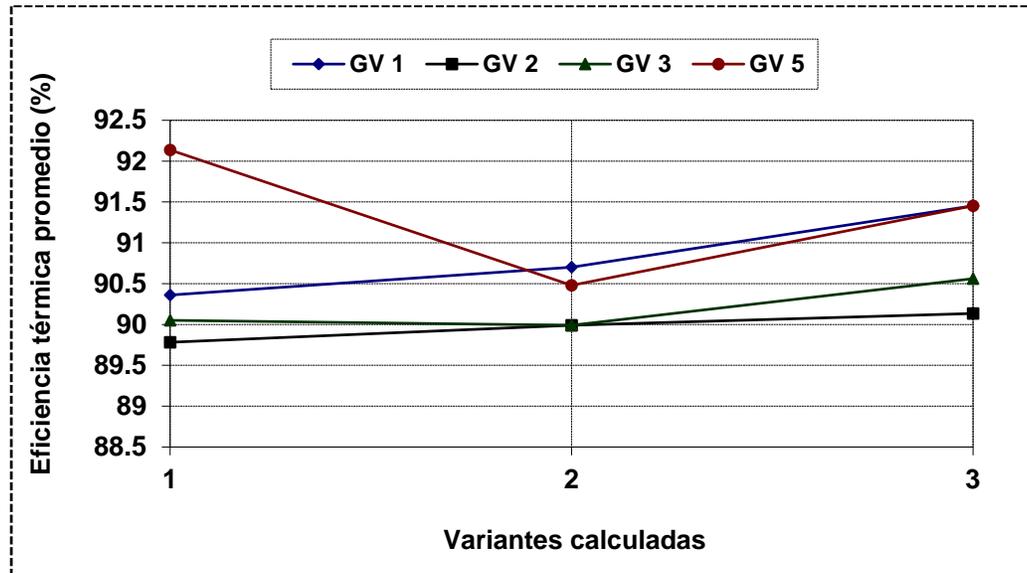
Los cálculos obtenidos demuestran la alta eficiencia térmica que tienen los generadores de vapor analizados, ya que el rendimiento térmico en todos los casos supera el 87 % a pesar de los años de explotación que tienen las instalaciones. Por su parte, el grado de aprovechamiento de la energía útil máxima es satisfactorio, debido a que el rendimiento exergetico está alrededor del 55 %.

### 3.3.1. Comportamiento de los principales parámetros del proceso

#### 3.3.1.1. Rendimiento térmico y exergetico

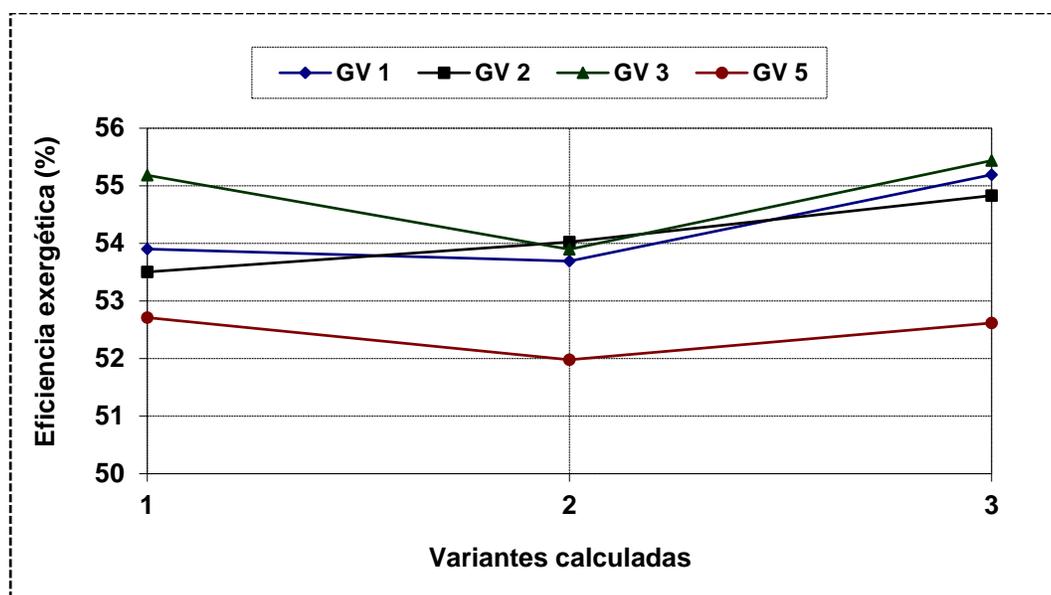
De acuerdo con la literatura especializada estos parámetros son los más importantes a considerar en el análisis energético de las instalaciones productoras de vapor (Pérez, 1972; Pankratov, 1987). Para las calderas estudiadas se observa que el rendimiento térmico en todas las variantes se comporta de forma similar. Sin embargo, se aprecia que en la caldera 5, por lo general, es superior a las restantes (Figura 3.5).

Lo anterior se evidencia claramente en los valores promedios obtenidos entre los métodos Directo e Indirecto [90,838; 89,969; 90,202 y 91,356 % (ver Tablas 3.1 y 3.2)]. Este comportamiento puede ser atribuido, fundamentalmente, a la diferencia que existe en el aprovechamiento del calor generado en el horno de los equipos y a las propiedades termofísicas del agua de alimentación.



**Figura 3.5.** Comportamiento del rendimiento térmico en los generadores de vapor.

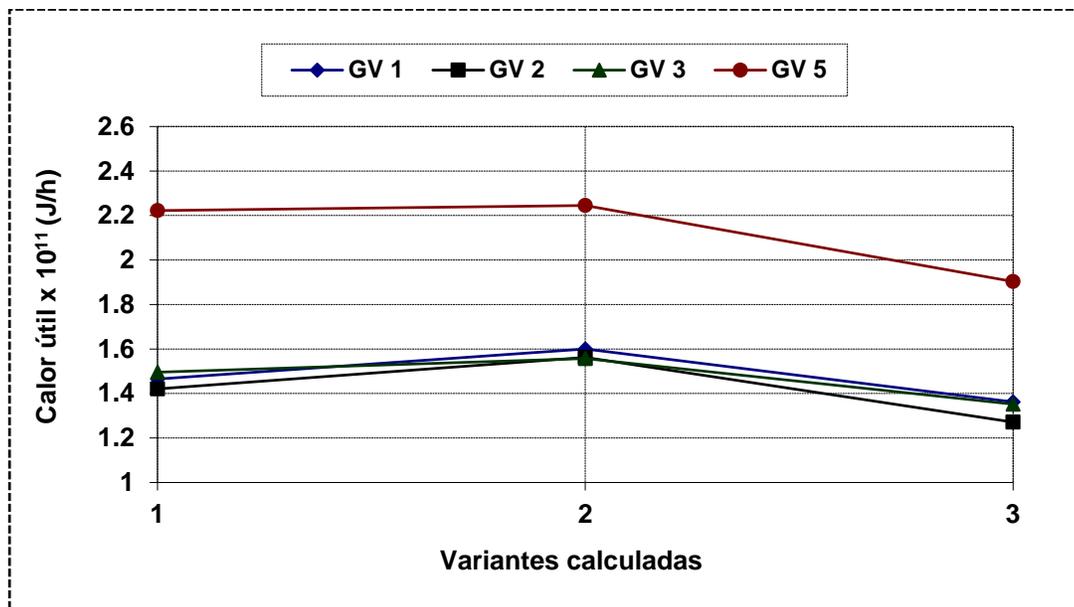
Respecto al rendimiento exergético se observa que el generador de vapor 3 tiene valores superiores a los otros considerados (Figura 3.6)]. Estos resultados evidencian la influencia que tiene la temperatura del agua de alimentación en la irreversibilidad del proceso de transformación del agua en vapor. Al valorar integralmente los resultados se aprecia además que los mismos son semejantes y oscilan en el intervalo comprendido entre 51 y 55 %. Estos valores aunque no son muy elevados, se pueden considerar satisfactorios debido a las precarias condiciones físicas que presentan los generadores, además los mismos están influenciados por la variabilidad de los parámetros de funcionamiento de los equipos.



**Figura 3.6.** Comportamiento de la eficiencia exergética en los generadores de vapor.

### 3.3.1.2. Calor útil

Este parámetro caracteriza la capacidad de aprovechamiento del calor disponible en la instalación y determina de manera directa la eficiencia térmica que se puede obtener en la misma.



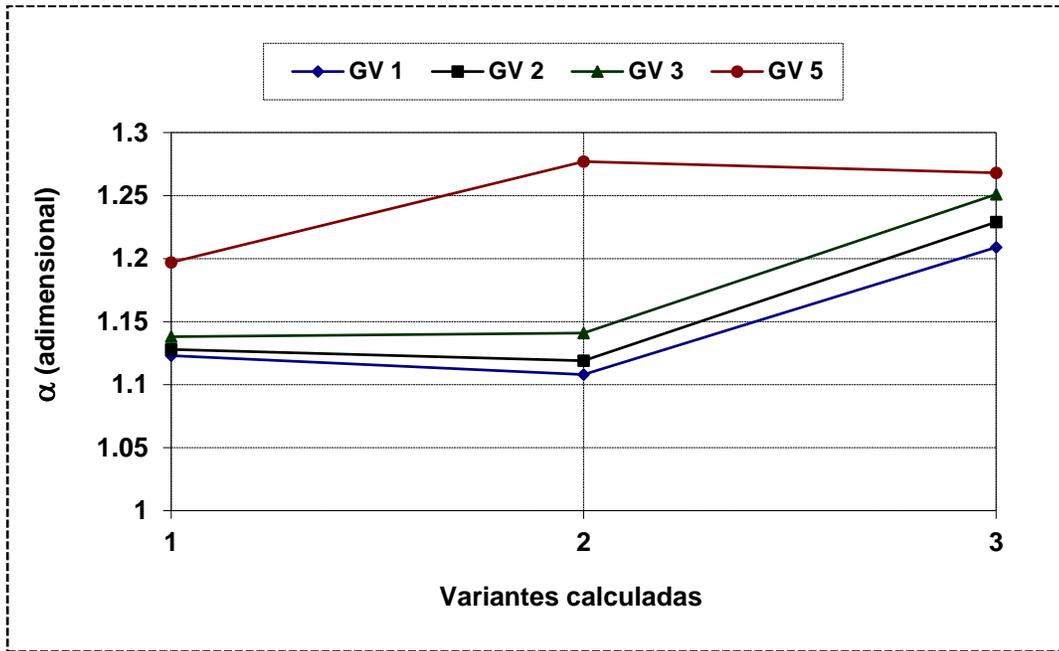
**Figura 3.7.** Comportamiento del calor útil en los generadores de vapor.

Para las condiciones de trabajo analizadas los generadores 1; 2 y 3 alcanzaron valores cercanos a  $1,6 \times 10^{11}$  J/h, pero en el generador 5 se obtienen resultados superiores a  $1,9 \times 10^{11}$  J/h (Figura 3.7). Lo anterior es indicativo de la efectividad con que se realiza la transformación de la energía en el proceso de combustión. Al observar su rendimiento térmico se aprecia que el mismo es, en general, superior al de los restantes generadores (Figura 3.5).

### 3.3.1.3. Coeficiente de exceso de aire

Es uno de los parámetros que influye en todos los indicadores energéticos de los generadores de vapor porque está determinado por el tipo de combustión, la composición química de los gases y los volúmenes de aire y gases obtenidos en el proceso de combustión.

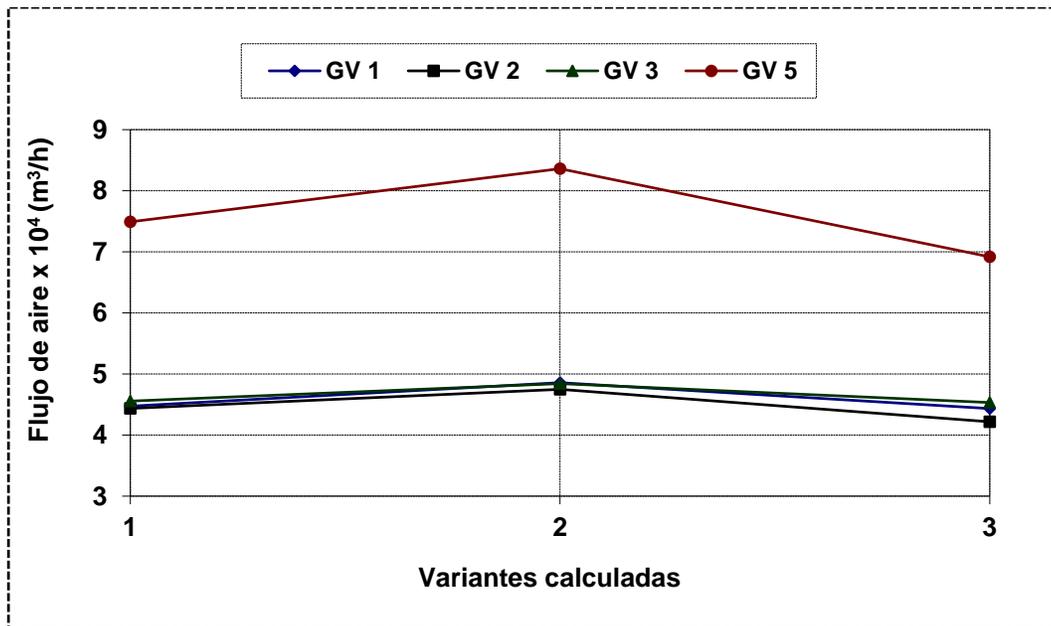
En las instalaciones productoras de vapor es muy importante controlar esta variable porque, como se ha indicado, influye en las eficiencias térmicas y exergéticas de los generadores. Al respecto la literatura especializada indica que se debe mantener una estricta vigilancia sobre el mismo porque una pequeña variación de este puede afectar considerablemente la eficiencia de la combustión y de las calderas. En todas las variantes analizadas el exceso de aire osciló ente 10 y 28 %; aproximadamente (Figura 3.8).



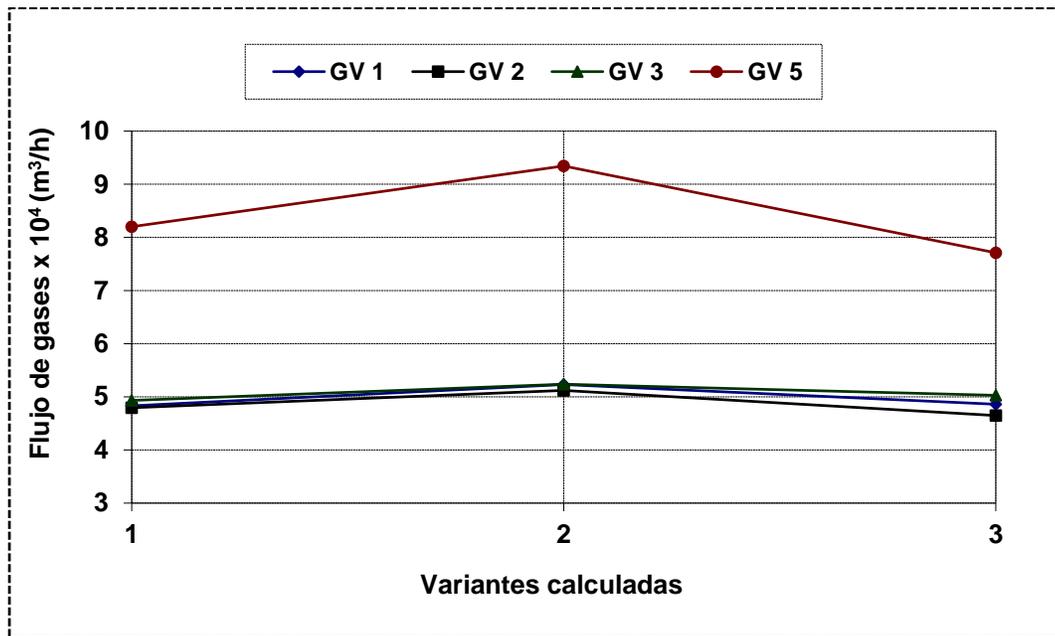
**Figura 3.8.** Comportamiento del coeficiente de exceso de aire en los generadores de vapor.

### 3.3.1.4. Flujos de aire y gases

Estos parámetros son muy importantes porque posibilitan determinar los flujos de aire y gases que deben trasegar los ventiladores de tiro forzado e inducido para las condiciones reales de operación de los generadores. Además, permiten conocer si los referidos ventiladores se encuentran subutilizados o sobredimensionados, lo que resulta muy importante para el ahorro de energía eléctrica en estos equipos auxiliares.



**Figura 3.9.** Comportamiento del flujo de aire en los generadores de vapor.



**Figura 3.10.** Comportamiento del flujo de gases en los generadores de vapor.

En las Figuras 3.9 y 3.10 se aprecia que en ambos casos el generador de vapor 5 demanda mayor capacidad instalada en los ventiladores. Esto es lógico porque el mencionado generador tiene una productividad que supera en más de 30 t/h a la que presentan los otros generadores. También de las mencionadas figuras se infiere que para evacuar el aire se requiere de un ventilador de menos capacidad que el que se necesita para evacuar los gases. Estos criterios constituyen elementos de juicio para comprar los ventiladores en caso de averías. La oscilación de estos parámetros estuvo entre 4 y 5 x10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/h para los generadores 1; 2 y 3 y entre 6 y 9 x10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/h para la caldera 5.

### 3.4. Valoración económica

Los valores expuestos en la Tabla 3.3 muestran la valoración económica referida al consumo de combustible por meses en los que se desarrolló la investigación (enero-marzo de 2014). El precio utilizado en el cálculo (598,56 USD/t) es reportado por el departamento de Economía Energética de la empresa.

**Tabla 3.3.** Gasto económico por concepto de consumo de combustible para los generadores de vapor en el periodo enero-marzo de 2014.

Generadores de vapor	Días de operación (régimen de 24 horas)	Consumo de Combustible (t/mes)	Precio del Combustible (USD/t)	Importe (USD)
<b>Enero</b>				
<b>GV 1: V-1</b>	31	3 021	598,56	1 808 249,76
<b>GV 2: V-1</b>	31	2 942	598,56	1 760 963,52
<b>GV 3: V-1</b>	31	3 019	598,56	1 807 052,64

<b>GV 5: V-1</b>	31	4 530	598,56	2 711 476,80
<b>Consumo calculado</b>		<b>13 512,00</b>	<b>598,56</b>	<b>8 087 742,72</b>
<b>Plan de Producción (presupuesto)</b>		<b>13 033,54</b>	<b>615,00</b>	<b>8 015 627,10</b>
<b>Generadores de vapor</b>	<b>Días de operación</b>	<b>Consumo de</b>	<b>Precio del</b>	<b>Importe</b>
<b>Febrero</b>	<b>(régimen de 24</b>	<b>Combustible</b>	<b>Combustible</b>	<b>(USD)</b>
	<b>horas)</b>	<b>(t/mes)</b>	<b>(USD/t)</b>	
<b>GV 1: V-2</b>	28	2 726	598,56	1 631 674,56
<b>GV 2: V-2</b>	25	2 348	598,56	1 405 418,88
<b>GV 3: V-2</b>	28	2 723	598,56	1 629 878,88
<b>GV 5: V-2</b>	23	3 377	598,56	2 021 337,12
<b>Consumo calculado</b>		<b>11 174,00</b>	<b>598,56</b>	<b>6 688 309,44</b>
<b>Plan de Producción (presupuesto)</b>		<b>12 244,72</b>	<b>615,00</b>	<b>7 530 502,80</b>
<b>Generadores de vapor</b>	<b>Días de Operación</b>	<b>Consumo de</b>	<b>Precio del</b>	<b>Importe</b>
<b>Marzo</b>	<b>(régimen de 24</b>	<b>Combustible</b>	<b>Combustible</b>	<b>(USD)</b>
	<b>horas)</b>	<b>(t/mes)</b>	<b>(USD/t)</b>	
<b>GV 1: V-3</b>	31	2 956	598,56	1 769 343,36
<b>GV 2: V-3</b>	31	3 005	598,56	1 798 672,80
<b>GV 3: V-3</b>	31	2 971	598,56	1 778 321,76
<b>GV 5: V-3</b>	30	4 070	598,56	2 436 139,20
<b>Consumo calculado</b>		<b>13 002,00</b>	<b>598,56</b>	<b>7 782 477,12</b>
<b>Plan de Producción (presupuesto)</b>		<b>12 882,08</b>	<b>615,00</b>	<b>7 922 479,20</b>

En la Tabla 3.3 se observa que en enero hubo un sobregasto de 478,46 t de combustible lo que equivale a 72 115,62 USD; esto se debe a que los trenes de Lixiviación debieron trabajar varios días más de lo planificado. En febrero el consumo se comportó por debajo del plan porque las calderas 2 y 5 sufrieron averías que limitó su trabajo a 25 y 23 días, respectivamente. En marzo el consumo fue superior al planificado en 119,92 t pero no representó un monto superior al plan porque el precio del combustible se mantuvo inferior al presupuestado para este año, lo que conllevó a un ahorro de 140 002,08 USD en el mes.

Como se aprecia en los resultados obtenidos en este epígrafe comparados con el Plan de Producción (presupuesto) los generadores de vapor son altamente consumidores de combustible y, en consecuencia, tienen un gasto económico elevado por este concepto, de los resultados antes mencionados se infiere la importancia económica que tiene el ahorro de este portador de energía en estas instalaciones.

### 3.5. Impacto ambiental asociado a los generadores de vapor

A nivel mundial las centrales termoeléctricas consumen más de la tercera parte de la cantidad total de combustible extraído, por lo que ejercen gran influencia sobre el medio ambiente debido

a la emisión a la atmósfera de gran cantidad de gases producto de la combustión y a la contaminación de los ríos, mares y lagos con sustancias tóxicas como restos de petróleo y otras. En Cuba a pesar del desarrollo de las industrias, el gobierno revolucionario ha adoptado las medidas necesarias para garantizar la conservación del medio ambiente. Las plantas termoeléctricas son consideradas fuentes importantes de emisiones atmosféricas debido a que afectan la calidad del aire en el área local. La combustión que ocurre en los procesos termoeléctricos emite dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), entre otras sustancias que resultan perjudiciales para el hombre, los animales y las plantas.

Los principales elementos nocivos que van con los gases de la combustión son:

- **Óxidos de azufre**

Los óxidos de azufre que se forman durante el proceso de quemado de un combustible son el  $\text{SO}_2$  y, en menor medida, el  $\text{SO}_3$ . 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. La biomasa solo contiene trazas de azufre.

En la empresa “Comandante Pedro Sotelo Alba” a ésta emisión nociva es la que más se le da seguimiento, debido a sus grandes efectos para la salud y el medio ambiente. Se estimó que para el  $\text{SO}_2$ , el límite máximo estándar de operaciones en el día es de 1467 kg/h y que el contenido de azufre total en el combustible no debe ser superior al 3,9 %. Esta entidad en conjunto con el Laboratorio Central de la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos” realizan ensayos según los métodos ASTM D-1552, 4294 y 129 para controlar el por ciento de azufre en el combustible. Dándole seguimiento a los reportes diarios de emisiones de  $\text{SO}_2$  se pudo observar que se han mantenido dentro de los límites permisibles, encontrándose de enero a marzo un promedio de 556; 509 y 667 kg/h, por ese orden. En la Tabla 4 del Anexo 1 se expone el comportamiento de las emisiones para los meses enero-marzo y en la Figura 1 del propio anexo se pueden observar las emisiones de gases.

*Los efectos nocivos más importantes de estos óxidos son:*

- Afectaciones en las vías respiratorias de los seres humanos y animales.
- Formación de lluvias ácidas con graves consecuencias ecológicas.

- **Monóxido de carbono**

El monóxido de carbono 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:*

- Afectaciones a la capacidad respiratoria de personas y animales.
- Creación de stress psicológico y alteración de las habilidades motoras.

- **Óxidos nitrosos**

Los óxidos nitrosos ( $\text{NO}_x$ ) 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 ( $\text{NO}_2$ ) y el óxido nitroso ( $\text{NO}$ ). De acuerdo al nivel de nocividad el más peligroso de los dos resulta el  $\text{NO}_2$ .

La cantidad de  $\text{NO}_x$  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  $\text{NO}_x$  son:*

- Creación de desórdenes respiratorios en seres humanos y animales.
- Reducción de la visibilidad por adsorción del espectro visible para el hombre.
- 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 también con la formación de ozono en las zonas bajas de la atmósfera, el cual resulta un tóxico para el hombre.
- Se le atribuyen también propiedades cancerígenas.

## **Hollín**

Se produce de igual manera que el Monóxido de Carbono y en la actualidad se toman medidas para evitar que se expulsen a la atmósfera las partículas de carbón no quemado, aumentando el exceso de aire y controlando el proceso de combustión, con la implementación de quemadores más eficientes logrando disminuir de forma apreciable este efecto. Indudablemente las medidas tomadas han mejorado la situación en comparación con años anteriores; estas medidas son:

- Reparaciones capitales a las calderas.
- Mejor control de la combustión.
- Concientización de los operadores del efecto de una mala combustión.
- Modernización de la Central Termoeléctrica.

### **Pentóxido de Vanadio**

Este elemento no es apreciable en los gases que se expulsan por la chimenea ya que depende del tipo de combustible utilizado en el proceso, el proceso objeto de estudio tiene un contenido bajo de vanadio.

#### • **Particulados**

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 $\mu$  aunque pueden encontrarse también partículas menores. La magnitud de la emisión de estas partículas 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 de personas y animales.
- Reducción de la visibilidad.
- Alteración de las propiedades de los suelos cultivables.
- Intensificación de los efectos negativos del SO<sub>2</sub>.
- Contribución a la formación del smog.

#### • **Compuestos orgánicos volátiles**

Los compuestos orgánicos volátiles están formados por sustancias gaseosas a base de carbono e hidrógeno y son principalmente hidrocarburos aromáticos olefínicos y parafínicos. Además, incluyen aldehídos, cetonas e hidrocarburos halogenados. Sus principales efectos perjudiciales son:

- Contribución a la formación del smog fotoquímico.
- Creación de problemas respiratorios e irritación en los ojos.
- Daños a las plantas y reducción de la visibilidad.

### **3.5.1. Métodos de reducción de las emisiones contaminantes**

La selección de las vías para la reducción de las emisiones contaminantes tiene en cuenta algunos factores fundamentales, entre ellos se destacan:

- La naturaleza de la emisión contaminante y su magnitud.
- Las exigencias impuestas por las regulaciones existentes.
- Los costos inversionistas, de operación y mantenimiento.

*Las distintas tecnologías con que se cuenta en la actualidad se relacionan a continuación:*

### **Reducción del SO<sub>2</sub>**

- Scrubber húmedo: consiste en el lavado de los gases con sprays de agua y participación de otras sustancias (Cal y Óxido de magnesio).
- Scrubber seco: los gases son rociados con una solución acuosa de cal apagada para eliminar el SO<sub>2</sub>.
- Lecho fluidizado: empleo de inertes absorbedores del azufre en el lecho.
- Inyección neumática del horno: el horno es inyectado neumáticamente con sustancias como Cal, Dolomita o Cal hidratada.

### **Reducción del CO**

Las técnicas para la reducción del CO son todas las desarrolladas para lograr una combustión eficiente.

### **Reducción de los NO<sub>x</sub>**

#### *- Quemadores de bajo NO<sub>x</sub>*

Se trata de quemadores de sólidos, líquidos o gases, en los que mediante el diseño aerodinámico se reduce el pico de temperatura de la llama. También puede hacerse una oxidación por partes del combustible, suministrando el aire por etapas y con un enfriamiento intermedio.

#### *- Lecho fluidizado*

El empleo del lecho fluidizado con superficies de enfriamiento sumergidas, permite el mantenimiento de la temperatura en valores tan bajos, que logra una significativa reducción de los NO<sub>x</sub>.

#### *- Inyección de agentes químicos*

La reducción de los NO<sub>x</sub> a N<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, puede conseguirse inyectando amoníaco en el horno, por encima de la zona de los quemadores a valores de temperatura de los gases de 760 a 1 093 °C.

### **Reducción de particulados**

#### *- Precipitadores electrostáticos*

Este dispositivo está dotado de electrodos alimentados por una fuente de potencia de alto voltaje, que atrapan las partículas sólidas, cuando por ellos pasan los gases.

#### *- Filtros fábricas*

Los gases se dividen en un alto número de corrientes paralelas mediante una placa perforada; cada corriente se hace entrar en un tubo de material filtrante -generalmente un tejido de fibra de vidrio, dicho tubo tiene cerrada su salida, lo que obliga a los gases a atravesar sus paredes y filtrarse. Cada cierto tiempo el filtro se limpia mediante un contralavado y vibraciones mecánicas.

#### *- Colectores mecánicos*

El principio de trabajo de los colectores mecánicos se basa en separar las partículas de la corriente de gases, a través de cambios bruscos de la dirección de dicha corriente. Los tipos más conocidos son los llamados ciclones.

### **3.6- Conclusiones del capítulo 3**

- ✓ La aplicación de la Tecnología de Gestión Total Eficiente de la Energía evidenció que el consumo de fuel oil representa el 80,459 % de todos los portadores energéticos de la empresa y el 93,149 % de los principales portadores energéticos de la planta Termoeléctrica.
- ✓ En las tres variantes calculadas para los generadores de vapor 1; 2; 3 y 5 las eficiencias térmicas promedios por los métodos Directo e Indirecto oscilaron en los intervalos 87,9-90,2 y 92,0-92,5 %, respectivamente. Por su parte, los rendimientos exergéticos variaron entre 52,4 y 54,8 %. Estos resultados muestran que es satisfactoria la capacidad que tienen las instalaciones para aprovechar la energía térmica y la energía útil máxima disponible en el sistema.
- ✓ Los consumos de combustible totales de los generadores de vapor investigados en los meses enero, febrero y marzo de 2014 ascienden a 13 512,00; 11 174,00 y 13 002,00 toneladas, por ese orden. Los gastos asociados a este concepto, para un precio del combustible de 598,56 USD/t; son 8 087 742,72; 6 688 309,44 y 7 782 477,12 USD.
- ✓ Las principales fuentes contaminantes asociadas al trabajo de los generadores de vapor investigados lo constituyen las emisiones de ruido y gases nocivos producto de la combustión de petróleo (los óxidos de azufre y de nitrógeno, el Pentóxido de Vanadio, el Monóxido de Carbono). También en la CTE se producen emanaciones de agua caliente contaminada.

## CONCLUSIONES GENERALES

- ✓ Se estableció el procedimiento para la realización del diagnóstico energético del proceso de generación de vapor en la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”. El mismo conjuga diversos aspectos teóricos expuestos en investigaciones precedentes e incluye la aplicación de la Tecnología de Gestión Total Eficiente de la Energía en la entidad y la Central Termoeléctrica; y la evaluación térmica y exergética de los generadores de vapor.
- ✓ El diagnóstico energético realizado al proceso de generación de vapor evidenció que el consumo de fuel oil constituye aproximadamente el 80 y 93 % de los principales portadores energéticos empleados en la empresa y la Central Termoeléctrica, respectivamente. Además, se comprobó que las calderas, de manera conjunta, trabajan con rendimientos térmicos y exergéticos promedios iguales a 90,591 y 53,910 %, los cuales se consideran satisfactorios.
- ✓ El consumo de combustible promedio de los cuatro generadores de vapor analizados, en el periodo enero-marzo de 2014, ascendió a 37 688 toneladas. El mismo constituye el 98,76 % del gasto planificado y equivale a 22 558 529,28 USD, para un precio del combustible de 598,56 USD/t. Lo anterior generó, durante la explotación de las calderas, emisiones de ruido, óxidos de azufre y de nitrógeno, Pentóxido de Vanadio, Monóxido de Carbono, entre otros gases contaminantes.

## RECOMENDACIONES

- ✓ Realizar futuras investigaciones considerando un periodo de tiempo más prolongado. Esto posibilitará la generalización de los resultados y el perfeccionamiento del trabajo de las calderas.
- ✓ Utilizar el contenido esencial de la presente investigación para la capacitación del personal que labora en la explotación de los generadores de vapor investigados.

## 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. 2003. 65 h.
2. Borroto, A.; Rubio, Á. *Combustión y Generación de vapor*. Maestría en eficiencia energética. Universidad de Cienfuegos. 2007. 248 p.
3. Caballero, A; Y. González. *Diagnóstico energético de los Generadores de Vapor de las empresas productoras de níquel*. Trabajo de Diploma. ISMMM. 2007. 43 h.
4. Carcallido, M. *Balance energético y exergético del CAI Guatemala*. Trabajo de Diploma. ISMMM. 1999. 54 h.
5. Cuza, O. *Influencia del cambio de combustible en el generador de vapor de la Termoeléctrica de Felton*. Tesis de Maestría. ISMMM, 2011. 116 h.
6. Del Valle, R. *Balance energético verificativo de la planta eléctrica de la empresa René Ramos Latour*. Trabajo de Diploma. ISMMM. 2002. 64 h.
7. 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 2011. 64 h.
8. Fadel, A. *Diagnóstico térmico y exergético de los generadores de vapor de la empresa Ernesto Che Guevara*. Trabajo de Diploma. ISMMM. 2008. 51 h.
9. Faires, V. *Termodinámica*. La Habana: Edición Revolucionaria, 1991. 807 p.
10. Fernández, E. *Termodinámica Técnica*. La Habana: Editorial "Félix Varela, 1994. Tomo I. 290 p.
11. Fernández, E. *Utilización del vapor en la industria*. Editorial Científico-Técnica. La Habana, 2001. 138 p.
12. Fonseca, A. *Análisis termoexergético de los generadores de vapor de la empresa Ernesto Che Guevara*. Trabajo de Diploma. ISMMM 2009. 55 h.
13. Frómeta, K. *Evaluación energética de los generadores de vapor de la empresa "Comandante Pedro Sotto Alba*. Trabajo de Diploma. ISMMM. 2012. 78 h.
14. 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 2010. 51 h.
15. Góngora, E. *Evaluación de los generadores de vapor, deareadores y calentadores de agua de la empresa Pedro Sotto Alba*. Trabajo de Diploma. ISMMM. 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. 2006. 48 h.
17. Hurtado, G. Estudio de la influencia en el medio ambiente del sistema de generación de la empresa de níquel Ernesto Che Guevara y el sistema de transmisión eléctrico adyacente. Tesis doctoral. ISMMM. 1999. 120 h.
18. Jarrosay, E. Balance energético de las calderas del hospital Guillermo Luis Fernández. Trabajo de Diploma. ISMMM. 2000. 70 h.
19. Leyva, R. Determinación de los parámetros de la combustión en los generadores de vapor de la Empresa Termoeléctrica de Felton. Trabajo de Diploma. ISMMM, 2013. 75 h.
20. *Manual de operaciones de la central termoeléctrica de la empresa "Comandante Pedro Sotro Alba"*. Moa. 2005. 120 h.
21. Maxi, E. Diagnóstico termoexergético del proceso de generación de vapor en la Central Termoeléctrica de Felton. Trabajo de Diploma. ISMMM. 2008. 56 h.
22. Muhica, J. Evaluación termoeconómica del ciclo de la central termoeléctrica de la empresa Ernesto Guevara. Trabajo de Diploma. ISMMM. 2001. 62 h.
23. Muñoz, C. *Aprovechamiento de la biomasa para la producción sostenida de electricidad en el CAI "Argeo Martínez" de Guantánamo*. Trabajo de Diploma. ISMMM. 2001. 61 h.
24. Pankratov, G. Problemas de Termotecnia. Editorial MIR Moscú. URSS, 1987. 235 p.
25. Peña, R. Evaluación energética del generador de vapor 7 de la empresa "Comandante René Ramos Latour". Trabajo de Diploma. ISMMM. 2013. 74 h.
26. Pérez, L. Generadores de Vapor. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana. 1972. 447 p.
27. Plana, Y. Evaluación termoexergética de los generadores de vapor de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Trabajo de Diploma. ISMMM. 2011. 63 h.
28. Quevedo, W. Diagnóstico termoexergético de los generadores de vapor 9; 10 y 11 de la empresa "Comandante René Ramos Latour". Trabajo de Diploma. ISMMM. 2014. 79 h.
29. Reyes, L. Análisis termoexergético del generador de vapor de la Planta de Asfalto de Sagua de Tánamo. Trabajo de Diploma. ISMMM 2010. 51 h.
30. Rivera, Y.; Y. Regueiferos. Diagnóstico térmico de los Generadores de Vapor de las empresas presupuestadas del municipio Moa. Trabajo de Diploma. ISMMM. 2007. 50 h.
31. Rodríguez, Y. Análisis del petróleo crudo nacional empleado en la empresa Ernesto Che Guevara. Trabajo de Diploma. ISMMM. 2001. 80 h.
32. Rodríguez, L. Evaluación térmica y exergética de los generadores de vapor de la empresa Pedro Sotro Alba. Trabajo de Diploma. ISMMM. 2008. 53 h.

33. 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. 1999. 71 h.
34. Suárez, V. Diagnóstico del sistema de generación de la CTE de la empresa René Ramos Latourt. Trabajo de Diploma. ISMMM. 2005. 62 h.
35. Tanquero, N. Guía metodológica para proyectos del curso de generadores de vapor. Editorial ISPJAE. La Habana. Cuba. 1997. 120 p.
36. Tuzón, E. Diagnóstico energético del generador de vapor 1 de la empresa Ernesto Che Guevara. Proyecto de Ingeniería Mecánica IV. ISMMM. 2005. 30 h.
37. Vega, M. Evaluación energética de los generadores de vapor de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Trabajo de Diploma. ISMMM. 2013. 85 h.
38. Villoch, A. Evaluación térmica y exergética del generador de vapor del bloque 1 de la Empresa Termoeléctrica de Felton. Trabajo de Diploma. ISMMM. 2013. 75 h.
39. Vukalovitch, M. *Propiedades termodinámicas del agua y el vapor*. Editorial. Revolucionaria 1978. 245 p.

## ANEXO 1.

### DATOS OBTENIDOS EN LA EMPRESA PEDRO SOTTO ALBA E IMAGEN DE LAS EMISIONES DE GASES PRODUCTO DE LA COMBUSTIÓN EN LA CTE

**Tabla 1.** Estructura de consumo de portadores energéticos en la empresa en el año 2013.

No.	Portador	Consumo	Unidad	Fc	C-TEP	%	% Ac.
1	Fuel Oil	158 989,314	t	1,0200	162 169,100	80,459	80,459
2	Diesel	18 672,544	t	1,0850	20 259,710	10,052	90,511
3	Elect. generada	104 936,024	MWh	0,0860	9 024,498	4,477	94,988
4	LPG	5 578,821	t	1,1980	6 683,427	3,316	98,304
5	Electricidad SEN	33 744,010	MWh	0,0860	2 901,985	1,440	99,744
6	Aceites Lubricantes	452,954	t	1,0300	466,543	0,231	99,975
7	Gasolina B-94	24,085	t	1,1300	27,216	0,014	99,989
8	Grasas Lubricantes	16,780	t	1,0300	17,283	0,009	99,998
9	Gasolina B-90	3,630	t	1,1300	4,102	0,002	100
<b>Total</b>					<b>201553,864</b>	<b>100</b>	

**Tabla 2.** Estructura de consumo de portadores energéticos en la CTE en el año 2013.

No.	Portador	Consumo	Unidad	Fc	C-TEP	%	% Ac
1	Fuel Oil	158 989,314	t	1,0200	162 169,100	93,149	93,149
2	Elect. generada	104 936,024	MWh	0,0860	9 024,498	5,184	98,333
3	Electricidad SEN	33 744,010	MWh	0,0860	2 901,985	1,667	100
<b>Total</b>					<b>174.095,583</b>	<b>100</b>	

Fc: Factor de conversión; C-TEP: Consumo en Toneladas Equivalentes de Petróleo; % Ac: Por ciento Acumulativo

**Tabla 3.** Consumo de Fuel Oil y generación de electricidad en la CTE en el año 2013.

Meses	Consumo de Fuel-Oil (TEP)	Generación (MWh)
Enero	14 101,260	8 994,459
Febrero	12 475,431	7 806,547
Marzo	14 158,181	9 331,258
Abril	13 947,378	6 449,399
Mayo	13 832,558	7 538,999
Junio	13 270,704	8 936,827

Julio	13 085,108	7 961,109
Agosto	13 898,201	9 651,247
Septiembre	12 696,282	8 852,037
Octubre	13 579,673	9 880,913
Noviembre	12 983,533	9 626,496
Diciembre	14 140,790	9 906,733
<b>Total</b>	<b>162 169,10</b>	<b>104 936,02</b>

**Tabla 4.** Comportamiento de las emisiones de SO<sub>2</sub> en la CTE de enero a marzo de 2014.

Día	Emisión de SO <sub>2</sub> (kg/Hora) - Enero					Emisión de SO <sub>2</sub> (kg/Hora) - Febrero					Emisión de SO <sub>2</sub> (kg/Hora) - Marzo				
	Caldera 1	Caldera 2	Caldera 3	Caldera 5	Total	Caldera 1	Caldera 2	Caldera 3	Caldera 5	Total	Caldera 1	Caldera 2	Caldera 3	Caldera 5	Total
1	129	122	129	194	573	129	122	129	194	573	130	135	135	0	400
2	129	124	128	193	574	133	131	135	198	597	130	137	135	60	462
3	129	127	130	195	581	131	102	135	198	567	123	127	128	141	519
4	131	126	130	194	582	137	0	138	200	475	126	126	124	166	542
5	131	131	133	195	591	134	0	136	199	470	119	119	117	169	523
6	132	127	133	191	582	136	0	138	199	473	121	120	120	174	534
7	134	128	134	195	590	125	76	127	246	575	132	135	133	195	595
8	124	118	125	188	555	127	131	128	183	569	131	135	136	195	596
9	120	118	125	190	553	126	126	123	193	568	133	134	135	194	597
10	124	125	125	191	565	126	128	124	195	573	119	120	120	177	536
11	129	125	128	192	574	128	128	126	191	573	159	160	161	232	713
12	130	126	131	195	581	117	118	118	179	531	154	159	159	229	701
13	115	111	111	175	513	106	106	107	169	488	157	159	159	235	710
14	130	126	128	190	573	109	110	110	168	497	164	168	171	248	751
15	117	114	117	175	524	115	114	115	174	517	162	162	163	242	728
16	114	109	113	174	511	116	115	113	177	521	156	155	155	218	684
17	116	115	114	179	524	112	110	109	169	500	146	150	150	186	632
18	90	87	87	131	395	112	110	109	169	500	140	130	130	189	589
19	109	104	106	163	482	134	136	136	198	604	152	152	137	216	657
20	124	118	123	187	552	131	131	130	192	583	156	169	154	253	732
21	116	114	114	180	524	115	112	112	174	514	162	169	164	251	746
22	119	115	119	181	534	102	100	98	197	498	168	161	170	254	753
23	131	125	134	192	583	112	111	106	144	473	163	167	162	250	742
24	119	116	131	192	559	134	135	135	0	404	159	158	157	234	708
25	133	131	135	196	595	132	136	134	0	402	157	158	154	226	694
26	126	120	127	184	557	133	135	136	0	404	159	163	147	245	715
27	128	129	122	193	573	131	134	133	0	398	182	184	182	272	820
28	132	129	132	193	586	132	135	134	0	401	185	188	186	271	831
29	127	128	129	189	573						182	190	187	273	832
30	131	131	130	194	586						178	184	184	276	822
31	130	130	128	197	585						181	186	185	275	828



**Figura 1.** Emisiones de gases producto de la combustión de petróleo en la CTE.

## ANEXO 2. BALANCE TÉRMICO DE LOS GENERADORES DE VAPOR ESTUDIADOS

### GENERADOR DE VAPOR No.1 VARIANTE 1 EMPRESA PEDRO SOTTO ALBA

Poder calórico bajo del combustible  $Q_b$  (J/kg)

La composición química de los elementos se expresan en masa de trabajo

$$\underset{\text{www}}{\mathbf{C}} := 82.2 \quad \underset{\text{www}}{\mathbf{H}} := 10.10 \quad \mathbf{O} := 0.30 \quad \underset{\text{www}}{\mathbf{S}} := 3.5 \quad \underset{\text{www}}{\mathbf{W}} := 2.03$$

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

$$Q_b = 3.857 \times 10^7 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

Determinación de los volúmenes de los gases producto de la combustión ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )

Volumen de aire teórico  $V_a$

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

$$V_a = 10.091 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen total real de gases triatómicos  $V_{RO2}$

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

$$V_{RO2} = 1.558 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

$$\underset{\text{www}}{\mathbf{N}} := 0.3 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

$$V_{N2} = 7.974 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

### Volumen teórico de los gases secos $V_{gs}$

$$V_{gs} := V_{RO_2} + V_{N_2}$$

$$V_{gs} = 9.532 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

### Volumen teórico de los vapores de agua $V_{H_2O}$

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

$$V_{H_2O} = 1.309 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

### Volumen teórico total de gases $V_{og}$

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

$$V_{og} = 10.841 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

### Cálculo del coeficiente de exceso de aire para combustión incompleta ( $\alpha$ )

$$CO_2 := 10.98 \quad O_2 := 2.70 \quad CO := 0.41 \quad H_2 := 0 \quad CH_4 := 0$$

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

$$N_2 = 85.91$$

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

$$\alpha = 1.123$$

### Volumen real de gases $V_g$

$$V_{a_{real}} := V_a \cdot \alpha \quad V_{a_{real}} = 11.328 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

$$V_g = 12.23 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

Entalpía teórica de los gases I<sub>go</sub> Calculado para T<sub>ge</sub>=200 °C

$$I_{RO2} := 369.63 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3} \quad I_{N2} := 263.1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3} \quad I_{H2O} := 313.87 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3}$$

$$I_{cen} := 174.81 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad A_{arr} := 0.044 \quad A_{arr} := 0.7$$

$$I_{go} := V_{RO2} \cdot I_{RO2} + V_{N2} \cdot I_{N2} + V_{H2O} \cdot I_{H2O} + 0.01 \cdot A \cdot A_{arr} \cdot I_{cen}$$

$$I_{go} = 3.085 \times 10^6 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

### Entalpía real de los gases para I<sub>g</sub> (J/kg)

El calor específico del aire C<sub>af</sub> se expresa en kJ/m<sup>3</sup> °C

La temperatura del aire se expresa en °C

$$C_{af} := 1.3205 \quad t_{aire} := 32 \quad f_{conversión1} := 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3}$$

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

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

$$I_{ge} = 3.144 \times 10^6 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

### Balance térmico por el método Directo

#### Cálculo del calor útil Q<sub>útil</sub> (J/hr)

$$D_{vsc} := 62.3 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \quad D_{vs} := 0 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \quad D_R := 0 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \quad D_P := 0.26 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

$$I_{vsc} := 753.3 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad I_{SR} := 0 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$I_{vs} := 0 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$I_{ER} := 0 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$I_{LS} := 271.29 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$I_{aa} := 191.79 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$Q_{\text{útil}} := D_{vsc} \cdot (I_{vsc} - I_{aa}) + D_{vs} \cdot (I_{vs} - I_{aa}) + D_R \cdot (I_{SR} - I_{ER}) + D_P \cdot (I_{LS} - I_{aa})$$

$$Q_{\text{útil}} = 1.465 \times 10^{11} \cdot \frac{\text{joule}}{\text{hr}}$$

**Consumo de combustible B (kg/hr)**

$$B := 3.95 \times 10^3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

**Determinación del calor disponible  $Q_d$  (J/kg)**

**Calor físico del Combustible (J/kg)**

**La temperatura de combustible  $t_c$  expresada en ( $^{\circ}\text{C}$ )**

$$t_c := 112 \quad f_{\text{conversión}} := 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

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

$$Q_{fc} = 2.262 \times 10^5 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

**Calor físico del aire (J/kg)**

**La temperatura del aire  $T_{\text{aire}}$  expresada en ( $^{\circ}\text{C}$ )**

**El calor específico del aire se expresa en ( $\text{kJ/m}^3 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ )**

$$T_{\text{aire}} := 242 \quad C_{\text{psaire}} := 1.33 \quad f_{\text{conversión1}} := 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3}$$

$$T_{\text{aire}} := 32 \quad C_{\text{epaire}} := 1.3205$$

$$I_{\text{spaire}} := C_{\text{psaire}} \cdot T_{\text{aire}} \quad I_{\text{epaire}} := C_{\text{epaire}} \cdot T_{\text{aire}}$$

$$Q_{\text{faire}} := \alpha \cdot V_a \cdot (I_{\text{spaire}} - I_{\text{epaire}}) \cdot f_{\text{conversión1}}$$

$$Q_{\text{faire}} = 3.167 \times 10^6 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

#### Cálculo del calor de atomización $Q_{\text{atm}}$ (J/kg)

$$I_v := 738.4 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad I_{\text{ve}} := 689 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad D_{\text{atm}} := 0.23 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

$$Q_{\text{atm}} := D_{\text{atm}} \cdot (I_v - I_{\text{ve}})$$

$$Q_{\text{atm}} = 4.761 \times 10^4 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

#### Cálculo del calor disponible $Q_d$ (J/kg)

$$Q_d := Q_b + Q_{\text{fc}} + Q_{\text{faire}} + Q_{\text{atm}}$$

$$Q_d = 4.201 \times 10^7 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

#### Cálculo del rendimiento del generador de vapor $N_{\text{gvMD}}$ (%)

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

$$N_{\text{gvMD}} = 88.304$$

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

### Aire necesario para la combustión

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

$$Q_a = 12.429 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_a = 4.474 \times 10^4 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

### Gases producto de la combustión

$$Q_g := V_g \cdot B$$

$$Q_g = 13.419 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_g = 4.831 \times 10^4 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

### Balance térmico 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  $T_{\text{aire}}$  expresada en ( $^{\circ}\text{C}$ )

El calor específico del aire se expresa en ( $\text{kJ}/\text{m}^3 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ )

$$t_{\text{af}} := 32 \quad c_{\text{paf}} := 1.3205 \quad f_{\text{conversión1}} := 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3}$$

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

$$I_{\text{af}} = 4.787 \times 10^5 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

$$q_2 = 6.204$$

#### Pérdida de calor por incombustión química ( $q_3$ )

$$V_{gs} = 9.532 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad f_{\text{conversión}} := 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3}$$

$$q_3 := \frac{(30.2 \cdot \text{CO} + 25.8 \cdot \text{H}_2 + 85.5 \cdot \text{CH}_4) \cdot V_{gs} \cdot (100 - q_4)}{Q_d} \cdot f_{\text{conversión}}$$

$$q_3 = 0.281$$

**Pérdida de calor al exterior a través del generador de vapor (q5)**

$$q_5 := 1.1 \quad \text{Para generadores de vapor de D mayor de 100 t/h (Pérez, 1972)}$$

**Cálculo del rendimiento térmico del generador de vapor  $N_{\text{gvMI}}$**

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

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

$$N_{\text{gvMI}} = 92.415$$

**Diferencia entre los valores de rendimiento calculados por los dos métodos**

$$\Delta\eta := |N_{\text{gvMD}} - N_{\text{gvMI}}|$$

$$\Delta\eta = 4.111$$

**BALANCE EXERGÉTICO DE LOS GENERADORES DE VAPOR**

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

**Exergía del agua (J/s)**

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

$$h_{\text{agua}} = 8.029 \times 10^5 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad h_{0a} := 32.02 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad T_0 := 32 + 273$$

$$S_{\text{agua}} := 0.5315 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad S_{0a} := 0.1108 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

$$Ex_{\text{agua}} = 2.269 \times 10^6 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

**Exergía del combustible (fuente de calor); J/s**       $T_1 := 1200 + 273$      $T_2 := 1300 + 273$

$$Q := Q_b \quad T_0 := 32 + 273 \quad T_m := \frac{T_1 + T_2}{2} \quad m_{\text{combustible}} := B$$

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

$$Ex_{\text{combustible}} = 3.384 \times 10^7 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

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

##### Exergía del vapor

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

$$h_{\text{vapor}} = 3.154 \times 10^6 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad h_{0v} := 32 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad T_0 := 32 + 273$$

$$S_{\text{vapor}} := 1.5876 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad S_{0v} := 0.1050 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

$$\mathbf{Ex}_{\text{vapor}} = 1.946 \times 10^7 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

**Determinación del rendimiento exergético (%)**

**Exergía empleada (J/s)**

**Exergía recuperada (kJ/s)**

$$\mathbf{Ex}_{\text{empleada}} := \mathbf{Ex}_{\text{agua}} + \mathbf{Ex}_{\text{combustible}}$$

$$\mathbf{Ex}_{\text{recuperada}} := \mathbf{Ex}_{\text{vapor}}$$

$$\mathbf{Ex}_{\text{empleada}} = 3.611 \times 10^7 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

$$\mathbf{Ex}_{\text{recuperada}} = 1.946 \times 10^7 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

$$\eta_{\text{Ex}} := \frac{\mathbf{Ex}_{\text{recuperada}}}{\mathbf{Ex}_{\text{empleada}}} \cdot 100$$

$$\eta_{\text{Ex}} = 53.901$$

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

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

$$\gamma = 46.099$$