

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO  
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"

FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

## TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**Título:** Diagnóstico térmico y exergético de los generadores de vapor de la empresa Ernesto Che Guevara.

**Autor:** Abdrahman Fadel Fdiel.

**Tutor:** M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja.

**Moa-2008**

**"Año 50 de la Revolución"**



## RESUMEN

---

En la Central Termoeléctrica de la empresa Ernesto Che Guevara los generadores de vapor utilizan como combustible el petróleo crudo nacional, debido a que en los últimos años se ha elevado el precio del petróleo regular en el mercado internacional. En la actualidad no se conocen las eficiencias térmica y exérgica de estos equipos debido a que fueron insertados en el proceso modernización que se ejecuta en la entidad.

En el presente trabajo se calcularon los valores promedios del rendimiento térmico para diferentes condiciones de explotación a partir del empleo del método directo, los cuales fueron: 91,32% y 91,57%, siendo para el método indirecto de 93,48% y 93,41% para los generadores 6 y 7 respectivamente. En las variantes calculadas las eficiencias exérgicas promedio obtenidas fueron 89,82% y 89,88%.

Se determinó el gasto horario por consumo de combustible en cinco meses (Enero-Mayo) el cual es 28 466 957 USD. Finalmente se comprobó que con la inserción de los generadores de vapor la situación medioambiental de la termoeléctrica mejoró sustancialmente en cuanto a las emisiones de gases producto de la combustión y los vertimientos líquidos que corresponden al tratamiento químico del agua y el lavado de las calderas.



---

## ABSTRACT

---

In the Thermoelectric Power station of the company Ernesto Che Guevara the steam generators use as fuel the national raw petroleum, because in the last years the price of the regular petroleum has risen in the international market. At the present time the thermal and exegetic efficiencies of these boilers are not known because they were inserted in the process modernization that is executed in the entity.

In this present work the values averages of the thermal efficiency were calculated for different conditions of exploitation starting from the employment of the direct method, which were: 91,32% and 91,57%, and for the indirect method it where 93,48% and 93,41% for the generators 6 and 7 respectively.

In the calculated variants the exegetic efficiencies obtained as average were 89,82% and 89,88% for the generator 6 and 7 respectively.

The total expense was determined by consumption of fuel in five months (January-May) which is 28 466 957 USD. Finally it was proven that with the insert of the steam generators the environmental situation of the thermoelectric got improved substantially as for the emissions of gases product of the combustion.



## ÍNDICE

Contenido	Págs.
<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo I Marco teórico- metodológico de la investigación.....</b>	<b>5</b>
1.1- <i>Introducción.....</i>	5
1.2- <i>Estado del arte sobre los generadores de vapor acuotubulares ....</i>	5
1.3- <i>Trabajos precedentes .....</i>	10
1.4- <i>Descripción del flujo tecnológico de la Central Termoeléctrica.....</i>	16
1.5- <i>Descripción de los generadores de vapor insertados en el proceso</i>	18
1.6- <i>Conclusiones del capítulo I.....</i>	22
<b>Capítulo II Diagnóstico térmico y exergético de los generadores de vapor insertados en el proceso de modernización en la empresa Ernesto Che Guevara.....</b>	<b>23</b>
2.1- <i>Introducción.....</i>	23
2.2- <i>Materiales empleados en la medición de los parámetros .....</i>	23
2.3- <i>Procedimiento de cálculo para el balance térmico y exergético de los generadores de vapor que operan en la instalación .....</i>	24
2.4- <i>Datos obtenidos en la instalación para los diferentes generadores de vapor.....</i>	32
2.5- <i>Balance térmico y exergético de la instalación .....</i>	34
2.6- <i>Conclusiones del capítulo II.....</i>	36
<b>Capítulo III Análisis de los resultados, valoración económica e impacto ambiental de la investigación.....</b>	<b>37</b>
3.1- <i>Introducción.....</i>	37
3.2- <i>Análisis de los resultados de la investigación .....</i>	37
3.3- <i>Valoración económica.....</i>	42
3.4- <i>Impacto ambiental de las centrales termoeléctricas .....</i>	43
3.5- <i>Conclusiones del Capítulo III.....</i>	46
<b>Conclusiones.....</b>	<b>47</b>
<b>Recomendaciones.....</b>	<b>48</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>49</b>
<b>Anexos.</b>	<b>---</b>



## INTRODUCCIÓN

---

El vapor de agua desde la revolución industrial hasta la actualidad ha jugado un papel esencial en el transporte de energía para diferentes aplicaciones industriales y de servicio, debido al impetuoso desarrollo tecnológico e industrial que ha alcanzado la sociedad moderna, se hace difícil predecir cuan importante será en lo adelante el vapor de agua, pero se vislumbra un futuro que inevitablemente estará estrechamente ligado a este agente de transporte de energía, de ahí que se haga necesario obtenerlo con la mayor eficiencia posible, máxime si se trata de Cuba que es un país bloqueado económicamente donde los recursos energéticos son limitados.

Desde hace varios años la industria del níquel ha tenido un rol importante en la economía del país, siendo en los últimos años el reglón más exportado, es por ello que incrementar la eficiencia de los equipos e instalaciones que componen las fábricas productoras de níquel es una prioridad de los dirigentes de dichas entidades y del estado, lo que sin dudas mejoraría los índices de consumo de energía y de los principales portadores energéticos.

Aunque existen dos fabricas en funcionamiento para la obtención del concentrado de níquel más cobalto, con tecnología carbonato amoniacal: a este trabajo le ofrece particular interés la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, la cual se ha desarrollado fundamentalmente a partir de la década anterior, lo que ha hecho posible elevar los ingresos al país por concepto de exportación del producto que en ella se obtiene.

El esquema tecnológico está basado en el proceso de lixiviación carbonato - amoniacal del mineral reducido, donde se evidencian las siguientes *plantas de proceso*: Mina, Preparación de Mineral, Hornos de reducción, Lixiviación y Lavado, Recuperación de Amoniaco, Calcinación y Sínter; y *auxiliares*: Central Termoeléctrica, Potabilizadora de agua y planta de Cobalto, entre otras.



La Central Termoeléctrica (CTE) tiene una importancia fundamental dentro de la entidad porque además de generar una porción de la energía eléctrica que se consume en el proceso, produce el vapor necesario para la destilación del Licor, la Cola y la recuperación de amoníaco en la planta de Recuperación de Amoníaco y para usos generales en el resto de las plantas como son: calentamiento de combustible, atomización, banco de quemadores además de otros servicios como la cocción y el posterior calentamiento de los alimentos en el área de cocina comedor, teniendo así múltiples funciones de gran importancia para la producción de níquel.

En la CTE los generadores de vapor utilizan como combustible el petróleo crudo nacional, debido a que en los últimos años se ha elevado el precio del petróleo regular en el mercado internacional, para ello se hace necesario lograr mayor eficiencia en la combustión del mismo en los hornos mediante el empleo de calderas modernas que garanticen un racional aprovechamiento de la energía liberada durante la combustión, con el consiguiente ahorro de combustible.

### **Fundamento de la investigación**

La CTE de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" fue diseñada para garantizar la energía calorífica, agua suavizada, CO<sub>2</sub> y parte de la energía eléctrica que necesita el proceso para la obtención del producto final.

Con el proceso inversionista que se realiza en esta empresa los niveles productivos deben incrementarse a 36 200 toneladas de Ni+Co en una primera etapa, conjuntamente con el incremento productivo se debe lograr la disminución de los costos de operación y el incremento de la eficiencia metalúrgica.

Una forma eficaz de obtener grandes economías de combustibles y una disminución sustancial del costo de la libra Ni+Co es potenciar la cogeneración aprovechando las posibilidades de esta industria. Para esto es necesario la ejecución de inversiones en la CTE que garanticen: el aumento de la eficiencia en la generación de vapor, el incremento de la disponibilidad y fiabilidad de las calderas, la utilización confiable del



crudo nacional mejorado en las instalaciones y la cogeneración de energía eléctrica en correspondencia con la demanda máxima de la fábrica.

Las autoridades administrativas de la empresa decidieron modernizar la CTE a partir de la inserción de un nuevo turbogenerador de 25 MW a condensación con extracciones reguladas y dos generadores de vapor de 150 t/h de vapor, de horno presurizado y paredes de membranas. Esta inversión por su magnitud e importancia debe estar sustentada en un riguroso análisis termoexérgico de los equipos instalados (turbogenerador y calderas) que permita evaluar de forma eficaz las mejoras introducidas al proceso. Los análisis térmicos realizados a las nuevas calderas son puntuales y no reflejan la situación real de las mismas. Esto implica la confección de un procedimiento de cálculo que garantice la evaluación energética confiable de las calderas y la contraposición de los resultados obtenidos en este trabajo (para las condiciones actuales de explotación) con los reportados por Hernández (2006) para las condiciones nominales.

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

***En la actualidad no se conocen las eficiencias térmica y exérgica de los generadores de vapor de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, debido a las modificaciones realizadas en la central termoeléctrica como resultado del proceso de modernización que se ejecuta en la entidad.***

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

Los **generadores de vapor 6 y 7** de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

*Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente hipótesis:*

***Con la realización del diagnóstico termoexérgico de los generadores de vapor de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara es posible obtener las eficiencias térmica y exérgica de los mismos y establecer a través de gráficos de comportamiento, la dependencia que existe entre los diferentes parámetros del proceso de producción de vapor.***



En correspondencia con la hipótesis planteada, se define como **objetivo del trabajo**:

**Determinar las eficiencias térmica y exergética de los generadores de vapor estudiados para diferentes condiciones de explotación.**

Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean las siguientes **tareas del trabajo**:

- 1- Establecer el estado del arte y la situación actual que presenta la empresa a partir de la revisión bibliográfica realizada.
- 2- Adecuar al objeto de estudio el procedimiento de cálculo establecido para el balance térmico y exergético de los generadores de vapor.
- 3- Determinar las eficiencias térmica y exergética los generadores de vapor estudiados para diferentes condiciones de explotación.
- 4- Analizar los resultados obtenidos para cada generador de vapor y compararlo.
- 5- Establecer los gráficos de comportamiento que reflejan la dependencia existente entre los diferentes parámetros del proceso de producción de vapor.
- 6- Valorar el impacto económico y medioambiental del proceso de generación de vapor para las condiciones actuales de explotación.



## CAPÍTULO I

---

### MARCO TEÓRICO- METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 1.1- Introducción

El estudio y la descripción adecuada de los generadores que intervienen en un proceso productivo es muy importante porque permiten al investigador contar con los criterios más importantes para el posterior análisis energético de estos equipos, en tal sentido el **objetivo** del capítulo es:

Describir los generadores de vapor y el proceso productivo del cual forman parte en la empresa Ernesto Che Guevara como sustento teórico para el diagnóstico térmico.

#### 1.2- Estado del arte sobre los generadores de vapor acuotubulares

Los primeros tipos de calderas usadas para la producción de vapor a mediados del siglo XVIII eran un recipiente grande, hermetizado, con tuberías para entrada de agua y salida de vapor, al mismo se le daba calor por su parte exterior y en su parte superior interna se acumulaba el vapor generado. Con el tiempo se comprendió que si se incrementaba la superficie de transferencia y la eficiencia en la transferencia de calor se debían crear otros tipos de calderas. A estas calderas se les denominó de “tubos de fuego”. Pero con estas no pudo obtenerse una capacidad evaporativa alta pues para ello se requería que el diámetro del domo fuese cada vez mayor.

Entonces comenzó a trabajarse en una segunda dirección, ensayándose un tipo de caldera en la cual el agua y el vapor circulaban por dentro de bancos de tubos, pasando los gases de combustión sobre la superficie exterior. Tales calderas se denominaron “de tubos de agua”.

La superficie de transferencia de estas calderas estaba compuesta por un gran número de tubos de pequeño diámetro (50 a 100 mm) por los que circulaba el agua. El calor se transmitía por radiación y convección, pasando al agua y evaporándola parcialmente de manera que la descarga de los tubos estaba constituida por una mezcla de agua y vapor saturados. La circulación se lograba gracias a la diferencia



en peso específico del fluido entre las secciones de entrada y salida del paquete de tubos.

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

En la década del 20 (1925) apareció en Estados Unidos la primera central de alta presión (Estación Edgard- 84 atm), a la que siguieron otras fundamentalmente en ese país y en Alemania. La temperatura del vapor se elevó a 450 °C.

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

Durante el primer periodo de la aparición de la alta presión (1925 a 1930) en las primeras calderas se confrontaron serias dificultades con la circulación, así como con la corrosión. Además las calderas de tubos de agua verticales de varios domos de aquel tiempo resultaban muy costosas a consecuencia del alto precio de los domos completamente forzados, y las calderas de tubos de agua horizontales presentaban dificultades en su hermeticidad y en la propia circulación.

Todo esto conjunto al estudio de investigación de nuevos esquemas y concepciones, como resultado de lo cual surgieron dos tipos nuevos: caldera de circulación forzada (1930 a 1945), muy utilizadas para agregados de presión media y en la década del 50 para altas presiones (140 a 180 atm); y la caldera de circulación continua, que resultaron ventajosa no solo para presiones supercrítica sino también para altas presiones subcríticas (140 atm y superiores)



La caldera de circulación forzada es análoga en su esquema a la caldera de circulación natural y solo se diferencia en que introduce en el circuito de circulación una bomba. Sin embargo la inclusión de esta bomba provoca una serie de particularidades y cambios en la construcción y explotación de calderas.

La presencia de la bomba amplía las posibilidades de disposición de la superficie de transferencia en su conjunto la situación de los tubos evaporativos no influye en la carga de circulación necesaria para lograr la circulación natural.

Por otro lado la alta carga que provoca la bomba permite utilizar para los tubos evaporativos diámetros pequeños y considerables longitudes, además de que en algunos diseños se utiliza parte de dicha carga para lograr la separación centrífuga del vapor en el domo (ciclones), lo que permite disminuir las dimensiones del domo.

La independencia de la carga de circulación con respecto a la carga de la caldera y por consiguiente la presencia de una alta velocidad de circulación para todas las evaporaciones e incluso durante el encendido de la caldera resulta una característica muy importante que logra un calentamiento homogéneo de toda la caldera durante el encendido y además permite utilizar como superficie evaporativas no solo aquella cuyo movimiento es descendente.

Esta ventaja provocó una rápida propagación de las calderas con circulación forzada en las instalaciones energéticas de la industria y en calidad de agregado utilizando gases de escape de hornos y motores de combustión interna, donde se requería una amplia libertad de disposición de los esquemas, así como la posibilidad de sustituir el domo en cualquier lugar relativo a la superficie de transferencia.

En las estaciones potentes la utilización de la circulación forzada para presiones medias y aun para las altas presiones (80 a 100 atm) no ofreció mayores ventajas en composición de los esquemas evaporativos, entre otras cosas, porque estas instalaciones carecen de superficie evaporativas convectivas.

Por el contrario, la presencia de la bomba aumenta el gasto de energía además de que la bomba en si mismo resultaba costosa y su sellaje para la elevada temperatura del agua (250 a 330 °C ) provocaba dificultades.



Por esta razón hasta 1950 estas calderas fueron pocas utilizadas en las estaciones potentes. Solamente cuando comenzaron a utilizarse presiones de 140 a 180 atm fue que se emplearon ampliamente cuando ya la circulación natural no garantiza un trabajo seguro de las superficies evaporativas sobre todo a cargas parciales.

La caldera con circulación continua, por otro lado, si se diferencia considerablemente de los esquemas anteriores, es decir, de las calderas con domo.

En la caldera de circulación continua no solo en el economizador y en el sobrecalentador sino también en la superficie evaporativa el agua y el vapor circulan solo una vez de manera que en la superficie evaporativa el agua circula por los tubos hasta su completa conversión en vapor.

En las calderas de circulación continua no se requiere, y por tanto no existe, el separador del agua del vapor (domo) y el agua de alimentación transcurre sucesivamente por el economizador, superficie evaporativa y sobrecalentador.

En las calderas de circulación continua también se diferencian considerablemente de las calderas con domo en lo que a calidad del agua se refiere.

En las calderas con domo se realizan las purgas que eliminan parte de las sales que en el domo se acumulan. Esto permite utilizar, para alimentar dicha caldera, agua con un contenido relativamente alto de sales.

En las calderas de circulación continua la evaporación en los tubos es total y los sólidos se depositan en las paredes de estos o son arrastrados con el vapor.

Para altas presiones las sales de sodio son muy solubles en el vapor. Es por ello que su contenido en el agua de alimentación de las calderas de circulación continua no debe ser mayor que su contenido permisible en el vapor. Además, la imposibilidad de extraer estas sales con las purgas requiere organizar su extracción del ciclo.

Todo esto encarece el tratamiento del agua en las estaciones de calderas de circulación continua, sobre todo en aquellas con grandes pérdidas de condensado cuando se requiere desmineralizar considerables cantidades de agua cruda para reponer las pérdidas.



En realidad esta diferencia entre las calderas con domo y la de circulación continua se atenúa cuando la presión aumenta pues en este caso también resulta necesario alimentar agua convenientemente desmineralizadas en las calderas con domo.

Por otro lado las calderas de circulación resultan más baratas al carecer de domo y en general los tres tipos de caldera poseen una u otra ventaja y todas se utilizan en mayor o menor grado.

Un método más efectivo de aumentar la eficiencia de las estaciones resultó la utilización del recalentamiento, de manera que desde 1955 todos los nuevos generadores de vapor que construyeron con recalentador para alcanzar en éste una temperatura del valor cercana a la inicial.

Con el crecimiento de la presión se elevó la temperatura del agua de alimentación, ya en las calderas de 100 atm el calentamiento regenerativo del agua fue elevado hasta 215 °C.

Posteriormente, sin embargo, el desarrollo del calentamiento regenerativo disminuyó y actualmente, a un en instalaciones supercríticas, la temperatura del agua de alimentación no es mayor generalmente de 250 o 280 °C.

En esta condiciones aumentó bruscamente el error del sobrecalentador después de la segunda guerra mundial los combustibles aumentaron el precio en la mayoría de los países, lo que hizo conveniente disminuir la temperatura de los gases de escape entre 120 y 130 °C.

Los generadores de vapor de las instalaciones energéticas de alta potencia son agregados muy complejos.

Todos los procesos de dicha caldera se encuentran mecanizados y automatizados. La caldera posee muchos mecanismos auxiliares, instrumento y decenas de motores eléctricos algunos de los cuales de miles de kW de potencia.

Las dimensiones de este generador son: altura de 35 a 45 m, ancho y profundidad 25 a 35 m. El peso metálico alcanza 3500 a 4500 toneladas. Siendo mayores los generadores de vapor que trabajan con turbinas de 500 a 1000 MW.



En 1965 el generador de vapor más potente que se construyó en Estados Unidos tenía una evaporación de 3000 t/h. En la Unión Soviética ya se han construido con evaporaciones de 1500 a 2400 t/h.

Los generadores de vapor moderno, de alta capacidad producen vapor a alta presión (140 a 240 atm) y alta temperatura (540 a 570 °C), estas calderas, como regla, recalientan el vapor hasta una temperatura cercana a la inicial, después que este ha pasado por la etapa de alta presión de la turbina cuando su presión cae, por ejemplo hasta 25 o 35 atm y temperatura hasta 350 °C.

Las calderas de menor evaporación producen vapor para turbinas de poca o media capacidad con parámetros más bajos, careciendo de recalentamiento.

Los generadores de vapor de capacidad media (160 a 640 t/h), se construyen para presiones de 140 atm sin recalentamiento o con un paso de recalentamiento.

Los generadores de vapor de 950 t/h y mayores se construyen para una presión de 255 atm con un paso de recalentamiento.

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

Las calderas de tubos de agua se utilizan ampliamente en las empresas industriales, centrales azucareros, refinerías, fábricas de papel, de fertilizantes y muchas otras, las mismas se clasifican en: de tubos rectos, de tubos curvos, así como generadores de grandes potencia.

Estos últimos se emplean en aquellas industrias donde se requiere vapor para el proceso y contribuyen a mayores eficiencias en las centrales termoeléctricas debido a los altos parámetros de presión y temperatura con que operan.

### **1.3- Trabajos precedentes**

En el desarrollo de la investigación se consultaron diferentes trabajos, relacionado con el enfoque teórico – metodológico, algunos de ellos se analizan a continuación:



Generadores de vapor (1970), trata los aspectos teóricos y metodológicos relacionados con los generadores de vapor, así como la automatización de estos equipos, aspecto poco abordado en la literatura especializada (Pérez, 1972; Tanquero et al., 1987; Rizhkin, 1987; Oliva et al., 1988), en el trabajo el autor realiza un estudio profundo sobre los lazos de control aplicados en los generadores de vapor y las múltiples ventajas proporcionados por estos. De igual manera se describe acertadamente el proceso de tratamiento químico del agua empleada en la generación de vapor y muestra la influencia de la calidad de la misma en el balance térmico de los generadores de vapor. También se abordan los elementos esenciales de los procesos de transferencia de calor presente en estos equipos y los fundamentos generales de su puesta en marcha y explotación.

Pérez (1972), también aborda los aspectos teóricos metodológicos para el correcto estudio de los generadores de vapor, en esta publicación se exponen los criterios técnicos necesarios para la selección, evaluación y explotación adecuada de estos equipos y sus agregados, muestra además las principales leyes termodinámicas presente en el proceso de producción de vapor y la metodología para el balance térmico fundamentada a partir de ecuaciones empíricas obtenidas mediante modelos matemáticos estadísticos. En este trabajo el autor logra con mucha precisión establecer la dependencia existente entre los numerosos factores involucrados en estos equipos industriales. El autor aborda además los principales parámetros que influyen en la eficiencia térmica y exergéticas de estos equipos.

Tanquero et al. (1987), dedica su trabajo al cálculo térmico de los diferentes equipos y agregados existentes en los generadores de vapor, recoge ecuaciones importantes para el análisis térmico de estos equipos y constituye una guía metodológica para la realización de cálculos relacionados con la temática.

Oliva et al. (1988), exponen aspectos sobre la explotación de los generadores de vapor y los materiales constructivos empleados en estos, los autores exponen las



características más importantes de los materiales y expresan sus valoraciones acerca de la influencia del proceso de generación de vapor en el medio ambiente.

Fernández (2001), muestra los resultados obtenidos en relación con el uso del vapor en la industria, en este trabajo se explican con claridad las ventajas que justifican la preferencia por la utilización del vapor en la industria en relación con otros portadores de energía, además se establecen los objetivos fundamentales para los que se utiliza el vapor y los métodos empleados en la evacuación del condensado.

Al análisis de los modos de transferencia de calor presente en estos intercambiadores de calor también se dedican algunos trabajos (Perry et al., 1967; Burmeister, 1983; Incropera et al., 2003), estos autores estudian con profundidad las leyes físicas y termodinámicas que rigen el proceso y establecen con claridad los métodos científicos para su estudio.

Los trabajos científicos, técnicos y prácticos que se han efectuado en los últimos años y que fueron consultados por el autor se analizan a continuación:

Carcallido (1999), proporciona respuesta a las inquietudes relacionadas con la inestabilidad energética presente en el complejo agroindustrial Guatemala para dar cumplimiento a las tareas propuestas en el mismo el autor utilizó datos correspondiente a la zafra 1998 -1999, estos datos junto al método de cálculo empleado permitieron al investigador demostrar que el 62% de la exergía total del proceso se pierde por irreversibilidad en los procesos de combustión y transferencia de calor. Se obtiene el rendimiento térmico y exergético de la instalación los cuales fueron de 75% y 38% respectivamente.

Muñoz (2001), realizó la selección del esquema térmico de cogeneración para la producción sostenida de electricidad durante todo el año en el complejo agroindustrial Argeo Martínez, a través de criterios técnicos y económicos se calculan los indicadores energéticos que caracterizan a las instalaciones de este tipo. El investigador basado en criterios tecnológicos definió los esquemas de



cogeneración que pueden aplicarse en las condiciones de esta industria, para lograr con precisión la selección, analizó cuatro esquemas térmicos de cogeneración, obteniendo el más racional mediante la evaluación técnica y económica de todos.

Al estudio de los generadores de vapor instalados en la empresa René Ramos Latour también se han dedicado algunos trabajos, Del Valle (2002) realiza 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 hasta el 95 %.

De forma análoga Abreu (2003), realizó una evaluación de la eficiencia del generador de vapor No. 10 de la CTE basándose en este trabajo el autor realizó 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 las conclusiones de que la tecnología de aditivación logró incrementar la eficiencia del generador de vapor en 1.1 % y que debe mejorarse en lo que respecta al ensuciamiento del calentador de aire regenerativo, con la misma se logra disminuir las emisiones de contaminantes al medio ambiente.

Suárez (2005), realizó un diagnóstico del sistema de generación de la central termoeléctrica de la empresa antes mencionada, en este trabajo el autor 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.



Los estudios más importantes realizados a los generadores de vapor que operan en la empresa Ernesto Che Guevara se analizan a continuación:

Suárez (1999), desarrolló el cálculo térmico del ciclo de generación de la central termoeléctrica, para ello realizó el balance térmico de la instalación, en esta investigación se demuestra que es posible disminuir el consumo de electricidad de la red nacional a partir de la 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 en el trabajo, 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 central termoeléctrica de la entidad, el trabajo está encaminado a facilitar la toma de decisiones en la modernización y expansión de la planta, para ello se determinan los principales indicadores del ciclo térmico modernizado, también la investigación expone el cálculo de las pérdidas de energía que ocurren en los equipos tecnológicos principales de la central termoeléctrica, el impacto económico y ambiental de la propuesta estudiada.

Rodríguez (2001), realiza un análisis del petróleo crudo nacional empleado en la fábrica 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 de la empresa.

El trabajo muestra algunas recomendaciones prácticas para la manipulación y quema del combustible, basado en la experiencia práctica aplicada en la planta de secaderos de la fábrica antes mencionada.

Algunas de las conclusiones llegadas por el autor en este tema tan importante para la economía cubana se relacionan a continuación:



- Con el tratamiento químico adecuado y operando con niveles de aire bajos en la caldera se incrementa sustancialmente la producción de CO<sub>2</sub> se garantizan limpieza en las superficies de transferencia de calor y se reduce al mínimo la velocidad de corrosión de los metales.
- El crudo mejorado tiene influencia directa en el potencial de corrosión de los electrofiltros y tratado con aditivo organometálico de base magnesio es posible controlar el potencial de corrosión a valores similares o inferiores alcanzados por el petróleo regular.

Tuzón (2005), realiza el diagnóstico térmico del generador de vapor 1, los resultados mostrados por el mismo demuestran una baja eficiencia térmica y exergética de los generadores instalados, estando la primera en el orden del 86%. Esta situación implica 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 (los cuales son objeto de estudio de este trabajo), pero a diferencia del presente trabajo la autora obtuvo los resultados para los valores teóricos y nominales reportados por el fabricante con el objetivo de comparar ambos resultados, 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 la industria del níquel en Moa, calculando el rendimiento térmico, determinaron los consumos de combustibles asociados al los generadores de vapor y el por ciento de incidencia que tenían en sus respectivas empresas, en el sector industrial y en el municipio, este trabajo si bien es cierto que estudia los generadores de vapor de la empresa Ernesto Che Guevara, cuando se realizó solo estaba



trabajando una de las dos calderas instaladas (de 150 t/h) en el proceso de modernizaron 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.

Un trabajo similar fue desarrollado por Rivera y Regüeiferos (2007) quienes realizaron cálculos análogos 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 Luís Hernández y Pedro Sotto Alba. En la investigación se detectaron numerosas deficiencias que inciden en la baja eficiencia térmica y exergética de las instalaciones estudiadas.

Al analizar los trabajos dedicados al proceso de generación de vapor desde el punto de vista del diagnóstico térmico se encuentran ampliamente estudiados, tanto en las instalaciones de las empresas presupuestadas con en el sector industrial, pero en ninguno de los casos se ha desarrollado un estudio de los generadores de vapor suministrados por la compañía eslovaca, para las condiciones reales de explotación presente en la empresa Ernesto Che Guevara, hasta el momento solo se ha reportado un estudio de estas instalaciones (Hernández, 2006) pero para las condiciones nominales de explotación y se sustentó en los valores teóricos de los parámetros fundamentales del proceso. De los elementos expuestos se deduce la necesidad de realizar el diagnóstico termoexergético del objeto de estudio que permita obtener las eficiencias térmica, exergética y los restantes parámetros que caracterizan el proceso.

#### **1.4- Descripción del flujo tecnológico de la Central Termoeléctrica**

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



calderas de 75 t/h (de reserva) todas de 39 atm y 440 °C, y 2 turbogeneradores de 12 MW de potencia. Está formada por 7 áreas fundamentales, ellas son:

- Base de Petróleo.
- Tratamiento Químico de Agua.
- Calderas.
- Turbinas y Generadores.
- Torres de Enfriamiento.
- Compresores.
- Eléctrica.

Las áreas de mayor influencia en el proceso de producción de vapor se describen a continuación; las restantes se detallan en la bibliografía consultada (Manual de operaciones de la CTE, 2001).

#### **Tratamiento químico del agua**

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

En calidad de agua inicial se recibe agua potable proveniente de la Planta Potabilizadora, la cual llega por dos tuberías de diámetro de 300 mm, que se puede alimentar por cada tubería separadamente.

El agua inicial se somete a un proceso en la Planta Potabilizadora para eliminar las impurezas en suspensión y coloides, evitando la contaminación de las resinas en la planta, la formación de incrustaciones y las causas de la mala calidad del vapor en la central termoeléctrica.

#### **Calderas**

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

El agua de alimentación a las calderas procedente de los deareadores es bombeada mediante las bombas y luego de pasar por los calentadores de alta presión, va al



colector principal de alimentación. Posteriormente se incorpora a las calderas, entrando en los economizadores de dos etapas, continuando su recorrido hasta el domo y alimentando los colectores inferiores, para dar lugar a la circulación natural por las pantallas ubicadas en el horno.

En el domo ocurre la separación agua – vapor, este vapor es sobrecalentado, mejorando su calidad, para después incorporarse al proceso, una vez que halla realizado trabajo en las turbinas. Para la combustión se utiliza el Petróleo Regular o el Crudo Mejorado. Los gases producto de la combustión son enviados, mediante dos ventiladores y líneas de 530 mm hacia las torres lavadoras, para una vez limpios ser transportados hacia la planta de Recuperación de Amoniaco, donde tomarán parte en el proceso de carbonatación.

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

El petróleo es suministrado a través de bombas desde la base de petróleo para alimentar los quemadores de las calderas. El vapor sobrecalentado que sale de las calderas se distribuye a las turbinas donde llega con presión de 35 atm y 435 °C, y a las estaciones reductoras de 40/10 atm y de 40/2 atm.

El vapor de 10 atm que sale de la RED 40/10 atm con temperatura 250 °C se une al vapor de la toma regulada de la turbina. El vapor de 2 atm que sale de la RED 40/2 con temperatura 150 °C se une al vapor de la contrapresión de la turbina, esta tiene una toma no regulada de presión de 5 atm que se utiliza en el calentador de alta presión.



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

- Preparación de Mineral.
- Hornos de Reducción.
- Lixiviación y lavado.
- Calcinación.
- Puerto.
- Laboratorio Central.
- Centro de Investigaciones.
- Comedor Central.

El vapor de 2 atm se utiliza en la Planta de Recuperación de Amoniac y Comedor Interno.

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

#### **Parámetros generales de la caldera**

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

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

#### **Emisiones en los gases de escape**

Emisiones en condiciones normales y 3% O<sub>2</sub> en los gases secos de salida:

- Contenido de CO 150 mg/ Nm<sup>3</sup>
- Contenido NO<sub>x</sub> (0,3 N<sub>2</sub> en el combustible máx.) 450 mg/ Nm<sup>3</sup>

#### **1.5.1- Descripción técnica de los generadores de vapor**

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



Las mismas constan de tres tiros:

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

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

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

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

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

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

La mezcla de vapor y agua se lleva mediante los tubos de interconexión desde las cámaras superiores de las paredes de membrana a los separadores de vapor de la estructura interior del cuerpo de caldera.

El vapor seco de la parte superior del cuerpo de caldera fluye por los tubos de interconexión a la cámara de entrada del sobrecalentador 1.



Entre la cámara de salida del sobrecalentador 1 y la cámara de entrada del sobrecalentador 2 está colocada la tubería de interconexión con el eyector de inyección que regula la temperatura de vapor en la salida de caldera.

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

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

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

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

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



reparos en el ECO 1. La protección de la parte de chimenea está garantizada con la compuerta de la misma construcción.

El sistema de presión de la caldera es autosostenedor, colocado en pedestales de hormigón debajo de las paredes laterales.

### 1.5.2- Requisitos técnicos para mantener los parámetros citados

#### Combustible Crudo 1400

- Potencia calorífica inferior	9200 - 9208 kcal/ kg
- Peso específico en 60°F (15,5°C)	0,9881 - 0,9994 kg/ dm <sup>3</sup>
- Azufre	6,33 - 8,0 % hm
- Hidrógeno	9,64 - 10,27 % hm.
- Carbono	79,70 - 80,95 % hm.
- Ceniza	0,044 - 0,076 % hm.
- Agua	1,6 - 2,0 % hm.
- Vanadio	64 - 86 ppm
- Níquel	30 - 48 ppm
- Conradson	10,55 - 13,34 % hm.
- Sales	310 - 462 ppm
- Asfaltenos	17,3 - 19,75 % hm.
- Viscosidad en 50°C	859 - 1484 cSt
- Viscosidad en 80°C	133 - 213 cSt
- Punto de inflamación en el recipiente abierto	40°C

#### Agua de alimentación

- Temperatura	145°C
- Contenido de SiO <sub>2</sub>	0,02 mg/ l
- Dureza	5 µmol/ l máx.
- pH	9
- Conductividad eléctrica específica	0,2 µS/ cm máx.
- Contenido de O <sub>2</sub>	0,02 mg/ l máx.



- 
- |                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| - Oxidabilidad como $\text{KMnO}_4$ | 3 mg/ l   |
| - Contenido del aceite              | 0,5 mg/ l |

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

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

### **1.6- Conclusiones del capítulo I**

- A partir del análisis bibliográfico realizado se comprobó que existe el soporte teórico- metodológico satisfactorio para el desarrollo del diagnóstico termoexergético de los generadores estudiados.
- No se reportan estudios para las condiciones actuales de explotación de la CTE de la empresa analizada, solo se ha desarrollado un diagnóstico térmico para las condiciones de diseño de los generadores de vapor estudiados.
- Del estudio de la documentación técnica de los generadores de vapor, así como, de la visitas realizadas a la CTE se puede afirmar que los mismos tienen un alto grado de complejidad y un eficiente sistema de medición y control de los parámetros del proceso, lo cual hace posible que bajo las condiciones para las cuales fueron diseñados presenten una eficiencia térmica superior al 90%.



## CAPÍTULO II

---

### DIAGNÓSTICO TÉRMICO Y EXERGÉTICO DE LOS GENERADORES DE VAPOR INSERTADOS EN EL PROCESO DE MODERNIZACIÓN EN LA EMPRESA ERNESTO CHE GUEVARA

#### 2.1- Introducción

En las empresas que tienen dentro de su proceso productivo uno o varios generadores de vapor es muy importante realizarles diagnósticos termoexergéticos de forma periódica, pues estos equipos presentan elevados consumos de combustible es por ello que son considerados puestos clave, en este sentido el **objetivo** de este capítulo es:

Realizar el balance térmico y exergético de los generadores insertados de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

#### 2.2- Materiales empleados en las mediciones de los parámetros

El proceso de generación de vapor en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” se encuentra en una etapa avanzada desde el punto de vista de su automatización y control, todos los parámetros se miden, controlan y ajustan de forma automática a partir de un sistema de control neumático.

Algunos de los instrumentos de medición con los parámetros que se registran y las correspondientes características técnicas de los mismos se analizan a continuación:

1. Termorresistencia PT 100, mide la temperatura de los gases de salida, posee convertidor incorporado, señal de salida, standard de 4 a 20 miliampere.
  - ❖ 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 miliampere.
  - ❖ Rango de medición: hasta 60 atm



3. Analizador de oxígeno ABB, con el se mide el % de oxígeno en los productos de la combustión, el principio de medición es Óxido de Circonio.

## 2.3- Procedimiento de cálculo para el balance térmico y exergético de los generadores de vapor que operan en la instalación

### 2.3.1 Poder calórico bajo del combustible ( $kJ / kg$ )

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

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.

### 2.3.2 Cálculo de los volúmenes de la combustión ( $m^3 / kg$ )

⇒ *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*

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

### 2.3.3 Cálculo del coeficiente de exceso de aire (adimensional)

*Para combustión incompleta*

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

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

### 2.3.4 Cálculo de las entalpías de los gases de la combustión y el aire

Las entalpías de los gases son las que caracterizan la capacidad de entrega de calor a las diferentes sustancias de trabajo como el aire, agua y vapor.

⇒ *Entalpía teórica de los gases*

$$I^0_g = V_{RO_2} \cdot I_{RO_2} + V^0_{N_2} \cdot I_{N_2} + V^0_{H_2O} \cdot I_{H_2O} + 0,01 \cdot A^t \cdot A_{arr} \cdot I_{cen} \quad (2.12)$$

Donde:

$A_{arr}$  -Fracción de ceniza arrastrada por los gases

$A^t$  - Por ciento de ceniza arrastrada por los gases

Para  $\alpha = 1$   $I_{CO_2} = I_{RO_2}$

Todos los valores se expresan en  $kJ / m^3$  excepto  $I_{ceniza}$  que se expresa en  $(kJ / kg)$



**Tabla 2.1.** Valores de entalpía para diferentes temperaturas.

T°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

Fuente: Faires, 1991.

⇒ *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:

$I_g$  - Cantidad de calor de los gases producto de la combustión (kJ/kg).

$i_{aire}$  - Se busca a la temperatura que entra el aire (kJ/m<sup>3</sup>).

$I^0_g$  - Se busca a la temperatura de los gases de escape (kJ/kg).

### 2.3.5 Balance térmico por el método directo

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

Donde:

$\eta_{GV}$  - Eficiencia bruta del generador de vapor.

$B$  - Consumo de combustible (kg/s).

⇒ *Determinación del calor disponible (kJ / kg).*

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

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).

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

Cc calor específico del combustible a la temperatura 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 la presión atmosférica (kJ/kg).

⇒ *Determinación del calor útil (kJ / s).*

$$Q_{\text{útil}} = D_{vsc} \cdot (i_{vsc} - I_{aa}) + D_{vs} \cdot (i_{vs} - i_{aa}) + D_R \cdot (i_{SR} - i_{ER}) + D_P \cdot (i_{lsa} - i_{aa}) \quad (2.20)$$

Donde:

Los flujos de vapor presente en la ecuación (2.20) son: el flujo de vapor sobrecalentado, saturado, para ser recalentado y de las extracciones, todos expresados en (kg/s).



Las entalpías presente en la ecuación anterior son: del vapor sobrecalentado, del agua de alimentación, del vapor saturado, a la salida y entrada del recalentador, del líquido saturado respectivamente, todas expresadas en (kJ/kg).

### 2.3.6 Balance térmico por el método indirecto

$$\eta_{GV} = 100 - \sum q_n \quad (\%) \quad (2.21)$$

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

#### **Determinación de las pérdidas**

⇒ **Pérdida en los gases de escape** ( $q_2$ )

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) Coeficiente de exceso de aire.
- b) Temperatura de los gases de escape.

Además esta pérdida depende de:

- 1-  $\Delta T$  mínima para lograr la transferencia de calor.
- 2- Temperatura adecuada para evitar la corrosión.

$$q_2 = \frac{(I_{ge} - \alpha \cdot I_{af}) \cdot (100 - q_4)}{Q_d} \quad (2.22)$$

⇒ **Pérdida por incombustión química** ( $q_3$ )

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 desprende cierta cantidad de calor, la misma depende de:



- a) Coeficiente de exceso de aire.  
 b) Mala selección de los equipos auxiliares (calentador, ventiladores y quemadores)

$$q_3 = \frac{(30,2 \cdot CO + 25,8 \cdot H_2 + 85,5 \cdot CH_4) \cdot V_{gs} \cdot (100 - q_4)}{Q_d} \quad (2.23)$$

⇒ **Pérdida por incombustión mecánica** ( $q_4$ )

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:

$q_4 = 0,5 - 5\%$  sólido en cámara

$q_4 = 2 - 15\%$  sólido en capa y pila

$q_4 = 0\%$  líquidos y gaseosos

$$q_4 = \left[ a_{esc} \cdot \frac{C_{esc}}{100 - C_{esc}} + a_{cen} \cdot \frac{C_{cen}}{100 - C_{cen}} + a_{arr} \cdot \frac{C_{arr}}{100 - C_{arr}} \right] \cdot \frac{327,8 \cdot A^t}{Q_d} \quad (2.24)$$

$$a_{esc} = \frac{B_{esc} \cdot A_{esc}}{B \cdot A^t}; a_{cen} = \frac{B_{cen} \cdot A_{cen}}{B \cdot A^t}; a_{arr} = 1 - a_{esc} - a_{cen} \quad B = \frac{D}{d} \quad (2.25)$$

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.

$d$  - índice de generación.



⇒ **Pérdida por transferencia de calor al medio ambiente** ( $q_5$ )

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. 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	$q_5 = 0,4 - 0,5\%$

$$q_5 = q_{5N} \frac{D_N}{D} \quad (2.26)$$

Donde:

$D_N$  - Producción de vapor nominal (kg/s).

$D$  - Producción de vapor (kg/s).

⇒ **Pérdida de calor con la ceniza extraída del horno** ( $q_6$ )

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

$$q_6 = \frac{(a_{esc} - I_{esc \cdot A \cdot t})}{Q_d} \quad (2.27)$$

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

Donde:

$C$  y  $t$  son calor específico (kJ/kg K) y temperatura de la escoria (K).

Para combustibles líquidos y gaseosos  $q_6 = 0$

### 2.3.7 Análisis exergético del sistema

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 en cada caso se muestra a continuación.

⇒ *Exergía de un sistema cerrado en reposo*

Para hallar el valor del trabajo útil máximo se considera que en un proceso que produzca trabajo, éste será el máximo si el proceso es termodinámicamente perfecto, es decir, totalmente reversible interna y externamente, en cuyo caso se cumple que: El cambio de entropía del sistema aislado integrado por el sistema y el medio ambiente es nulo.

En este caso la exergía total es:

$$E_x = (U_1 - U_0) - T_0 \cdot (S_1 - S_0) - p_0 \cdot (V_0 - V_1) \quad (\text{kJ}) \quad (2.29)$$

y por unidad de masa del sistema cerrado

$$e_x = (u_1 - u_0) - T_0 \cdot (s_1 - s_0) - p_0 \cdot (v_0 - v_1) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.30)$$

En las ecuaciones expresadas anteriormente (2.29) y (2.30) los parámetros corresponden a las propiedades termodinámicas siguientes: energía interna, temperatura, entropía y volumen; los subíndices 1 y 0 corresponden a las propiedades a la temperatura del sistema y del medio ambiente respectivamente.

⇒ *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:



$$e_x = (h_1 - h_0) - T_0 \cdot (s_1 - s_0) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.31)$$

$$E_x = \dot{m} \cdot [(h_1 - h_0) - T_0 \cdot (s_1 - s_0)] \quad (\text{kJ/s}) \quad (2.32)$$

Donde:

h - Entalpía del flujo; kJ/kg.

⇒ *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 térmica de Carnot, o sea:

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

Siendo Q el calor entregado por la fuente a la temperatura T. 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).

### **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:

$$\eta_{\text{Exergético}} = \frac{\text{Exergía recuperada}}{\text{Exergía empleada}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (2.35)$$



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 salen del sistema y exergía empleada todas las exergías que entran al sistema. La pérdida de exergía puede también expresarse por medio de la definición de grado de pérdida.

Verificándose que:

$$\gamma = 1 - \eta_{\text{Exergético}} \quad (2.36)$$

Para los generadores de vapor de la empresa Ernesto Che Guevara se considera como exergía recuperada: la del vapor sobrecalentado, como exergía empleada: la del combustible y agua de alimentación y la exergía perdida: la de los gases de escape.

#### 2.4- Datos obtenidos en la instalación para los diferentes generadores de vapor

Los datos necesarios para el cálculo de la instalación están reflejados en la tabla 2.2 (solo se representan los valores promedios de los parámetros) los mismos se obtuvieron a partir de las mediciones realizadas en los equipos en producción, donde los instrumentos realizan las mediciones y envían la señal al panel de control obteniéndose así los resultados de estas.

**Tabla 2.2.** Parámetros medidos en la instalación de generación

Parámetros	Generador de Vapor 6		Generador de Vapor 7	
	Variante 1	Variante 2	Variante 1	Variante 2
Producción de vapor sobrecalentado (tn/h)	112	112	115	114
Presión del vapor sobrecalentado (atm)	37,5	37,4	37,0	37,5
Temperatura del vapor sobrecalentado (°C)	440	443	441	440



Temperatura del agua de alimentación (°C)	119	120	119	118
Temperatura del combustible (°C)	118	117	120	120
Temperatura de los gases de escape (°C)	189	181	193	181
Temperatura de medio ambiente (°C)	32,0	32,0	32,0	32,0
Consumo de combustible (tn/h)	8,424	8,220	8,720	8,720
<i>Composición química de los gases producto de la combustión (%)</i>				
Dioxígeno (O <sub>2</sub> )	2,63	2,63	2,65	3,10
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	12,0	13,71	14,02	12,0
Monóxido de Carbono (CO)	0,6	0,7	0,7	1,5
Dihidrógeno (H <sub>2</sub> )	0,00	0,00	0,00	0,00
Metano (CH <sub>4</sub> )	0,00	0,00	0,00	0,00

La composición química del combustible en masa de trabajo y expresada en por ciento (empleadas en los cálculos), se muestra a continuación.

#### **Generador de vapor 6 variantes 1 y 2**

$$C^t = 82,7 \quad H^t = 11,75 \quad S^t = 3,5 \quad O^t = 0,10 \quad W^t = 1,7 \quad A^t = 0,01$$

$$C^t = 81 \quad H^t = 13,5 \quad S^t = 2,62 \quad O^t = 0,7 \quad W^t = 1,6 \quad A^t = 0,02$$

#### **Generador de vapor 7 variantes 1 y 2**

$$C^t = 81 \quad H^t = 12 \quad S^t = 2,66 \quad O^t = 1,7 \quad W^t = 1,8 \quad A^t = 0,01$$

$$C^t = 82,5 \quad H^t = 11,5 \quad S^t = 3,4 \quad O^t = 0,2 \quad W^t = 1,5 \quad A^t = 0,01$$

### **2.5- Balance térmico y exergético de la instalación**

El balance térmico de los generadores de vapor se realizó en correspondencia con el método de cálculo mostrado anteriormente (epígrafe 2.3) y los datos obtenidos en la instalación (epígrafe 2.4) logrando la aplicación exitosa de los métodos directo e indirecto descrito por Pérez (1972), estos métodos permiten la contraposición de los resultados obtenidos, el balance exergético se efectuó de acuerdo con Fernández



(1994). Los parámetros principales calculados para cada generador se muestran en la tabla 2.3.

**Tabla 2.3.** Valores de los parámetros fundamentales del balance térmico realizado.

Parámetros calculados	Generadores de vapor estudiados				Unidad	Ecuación
	Generador de vapor G.V 6		Generador de vapor G.V 7			
	Variante 1	Variante 2	Variante 1	Variante 2		
$Qb^t$	$4.047 \times 10^7$	$4.153 \times 10^7$	$3.988 \times 10^7$	$4.013 \times 10^7$	(J/kg)	(2.1)
$V^0_a$	10.579	10.842	10.413	10.488	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.2)
$V_{RO_2}$	1.568	1.53	1.53	1.563	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.3)
$V^0_{N_2}$	8.36	8.569	8.229	8.288	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.4)
$V^0_{gs}$	9.928	10.099	9.759	9.852	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.5)
$V^0_{H_2O}$	1.496	1.693	1.522	1.464	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.6)
$V^0_g$	11.423	11.791	11.281	11.315	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.7)
$Vg$	12.783	13.185	12.64	12.706	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.8)
$Va$	11.798	12.092	11.63	11.731	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.9)
$\alpha$	1.115	1.115	1.117	1.119	----	(2.10)
$I^0_g$	$3.012 \times 10^6$	$2.974 \times 10^6$	$3.038 \times 10^6$	$2.856 \times 10^6$	(J/kg)	(2.12)
$Ig$	$3.069 \times 10^6$	$3.033 \times 10^6$	$3.096 \times 10^6$	$2.915 \times 10^6$	(J/kg)	(2.13)
$Q_d$	$4.091 \times 10^7$	$4.197 \times 10^7$	$4.024 \times 10^7$	$4.049 \times 10^7$	(J/kg)	(2.16)
$Q_{\text{útil}}$	$3.146 \times 10^{11}$	$3.152 \times 10^{11}$	$3.237 \times 10^{11}$	$3.21 \times 10^{11}$	(J/h)	(2.20)
$\eta_{GV}$ (M.D)	91.305	91.353	92.245	90.911	%	(2.15)
$q_2$	6.145	5.869	6.33	5.83	%	(2.22)
$q_3$	0.0004	0.0005	0.0005	0.001	%	(2.23)



$q_4$	0.00	0.00	0.00	0.00	%	(2.24)
$q_5$	0.5	0.5	0.5	0.5	%	(2.26)
$q_6$	0.00	0.00	0.00	0.00	%	(2.27)
$\eta_{GV}$ (M.I)	93.335	93.63	93.169	93.669	%	(2.21)
$\eta_{Exergético}$	89.795	89.862	90.48	89.298	%	(2.35)
$\gamma$	10.205	10.168	9.52	10.702	%	(2.36)

Los resultados íntegros obtenidos en la evaluación térmica y exergética de los generadores de vapor estudiados (para la variante 1) se exponen en los anexos 1 y 2. Para la variante 2 se procedió de forma análoga considerando los datos correspondientes.

## 2.6- Conclusiones del capítulo II

- Los valores de rendimiento térmico obtenidos a partir de la aplicación del método directo se calculan por la expresión 2.15, los mismos son: 91,30%; 91,35%; 92,24% y 90,91% para los generadores de vapor 6 y 7 respectivamente.
- El rendimiento térmico calculado por el método indirecto se obtiene con el empleo de la expresión 2.21, ellos son: 93,33%; 93,63%; 93,16% y 93,66%.
- Los valores del rendimiento exergético para los dos generadores de vapor de calculados de acuerdo con la expresión 2.35 fueron: 89,79%; 89,86%; 90,48% y 89,29%.
- Las pérdidas de exergía calculadas por la ecuación 2.36 son 10,20%; 10,16%; 9,52% y 10,70%.



## CAPÍTULO III

---

### ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS, VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO AMBIENTAL DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1- Introducción

La valoración de los resultados de una investigación es fundamental por cuanto permite al investigador profundizar en los elementos que a su juicio son más importantes y que en alguna medida determinan el comportamiento del objeto investigado, en tal sentido el **objetivo** del presente capítulo es:

Valorar los resultados de la investigación teniendo en cuenta los criterios técnicos, económicos y medioambientales.

#### 3.2- Análisis de los resultados de la investigación

La valoración que en este epígrafe se realiza está fundamentada en el análisis térmico de los generadores de vapor.

Los resultados obtenidos a partir de los métodos de cálculos (directo e indirecto) arrojan un grado de coincidencia satisfactorio, que confirman la veracidad de los métodos empleados en la investigación, los valores promedio de los mismos diferencian en 1,99%. Esta diferencia puede ser atribuible al hecho de que en la instalación no existe un control eficaz del flujo de vapor para la atomización, el cual debe estar en correspondencia con la productividad de la caldera, en general cuando el generador de vapor trabaja con productividades diferentes a la nominal (150t/h) no se conoce con exactitud el flujo de las extracciones que se deben realizar.

Por lo general las extracciones realizadas son superiores a las recomendadas para cada una de las productividades, esto lógicamente aumenta el calor disponible y por consiguiente disminuye el valor del rendimiento térmico obtenido por el método directo. Estos elementos son los que permiten explicar que en todos los casos el



rendimiento calculado por el método directo sea inferior al obtenido por el método indirecto en las mismas condiciones de trabajo.

Los valores calculados demuestran además la alta eficiencia bruta con que operan los generadores, mostrando en su conjunto un rendimiento térmico superior al 90%; Un análisis más profundo de la instalación permite calcular el rendimiento exergético promedio de la misma, el cual para los generadores de vapor es 89,85%. Como se puede apreciar el valor del rendimiento térmico difiere del exergético en un 2,59% y el grado de pérdida de exergía oscila entre (9,52 – 10,70%), esta pérdida de exergía se debe fundamentalmente a la irreversibilidad externa causada por la diferencia de temperatura entre la fuente de calor y el agente de transformación.

En general para los generadores de vapor estudiados los valores de rendimiento térmico y exergético indican un alto aprovechamiento de la energía entregada evidenciándose que el proceso ha ocurrido con una alta eficiencia.

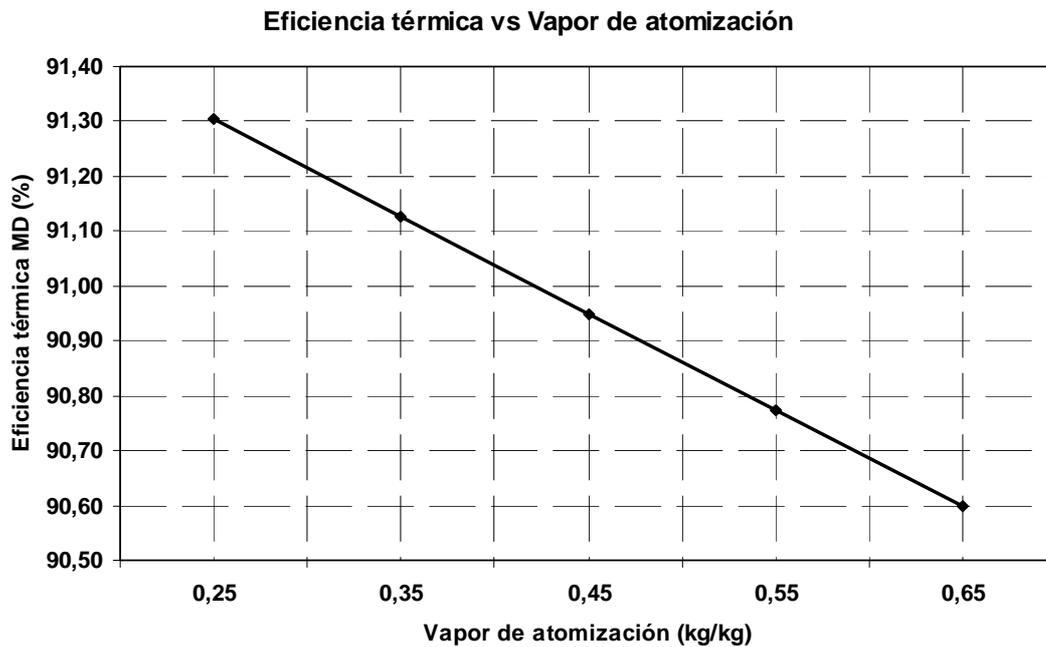
Al valorar los resultados obtenidos en la presente investigación (Tabla 2.3) y los expuestos por Hernández (2006) para las condiciones nominales y otras recomendadas por el fabricante de las calderas, se comprobó que la compañía eslovaca sugiere trabajar los generadores en cuatro valores de productividad (75, 120, 150 y 165 t/h). Si se observa la Tabla 2.2 resulta evidente que las productividades reales de las calderas fueron inferiores (entre 5 y 8 t/h) al valor más cercano (120 t/h) estas diferencias sugieren que a pesar de que los generadores trabajaron con productividades entre 112 y 115 t/h, las extracciones fueron realizadas para 120 t/h.

### **3.2.1- Comportamiento de los diferentes parámetros del proceso**

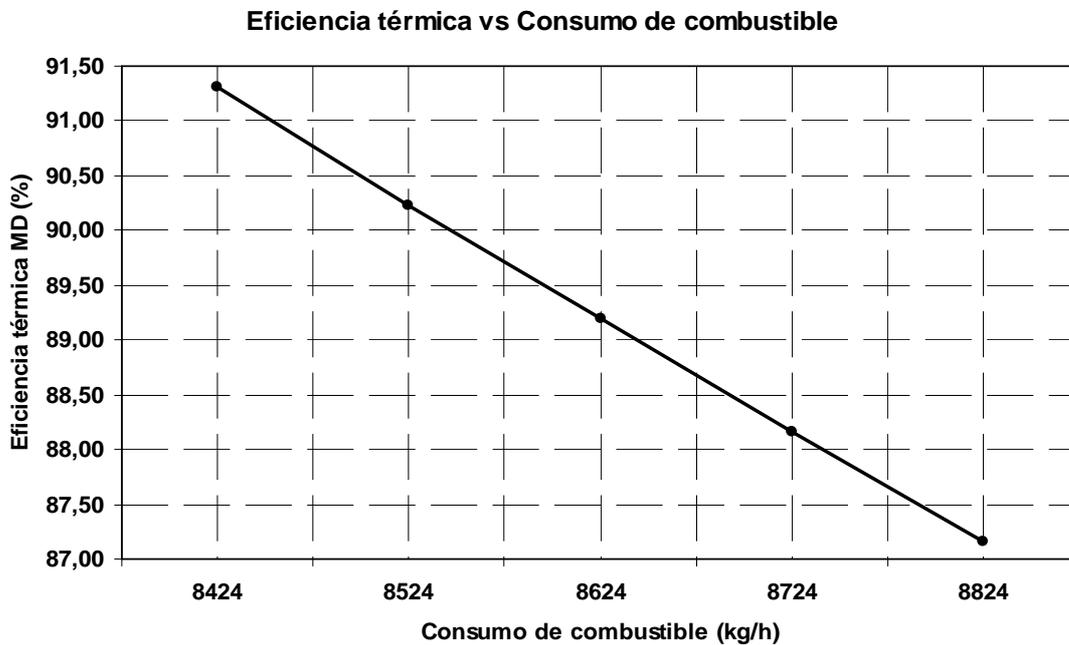
Al valorar el comportamiento mostrado en la Figura 3.1 se observa una dependencia lineal entre los parámetros graficados, para obtener la dependencia se mantuvieron constantes todos los parámetros y se varió el valor del vapor de atomización. Como se observa el rendimiento térmico calculado por el método directo decrece con el



aumento del vapor de atomización, este comportamiento demuestra la importancia que tiene el control de este parámetro en el correcto funcionamiento de la caldera. En general cuando las extracciones son superiores a las recomendadas existe un incremento del calor disponible en el generador de vapor y con ello decrece la eficiencia térmica.

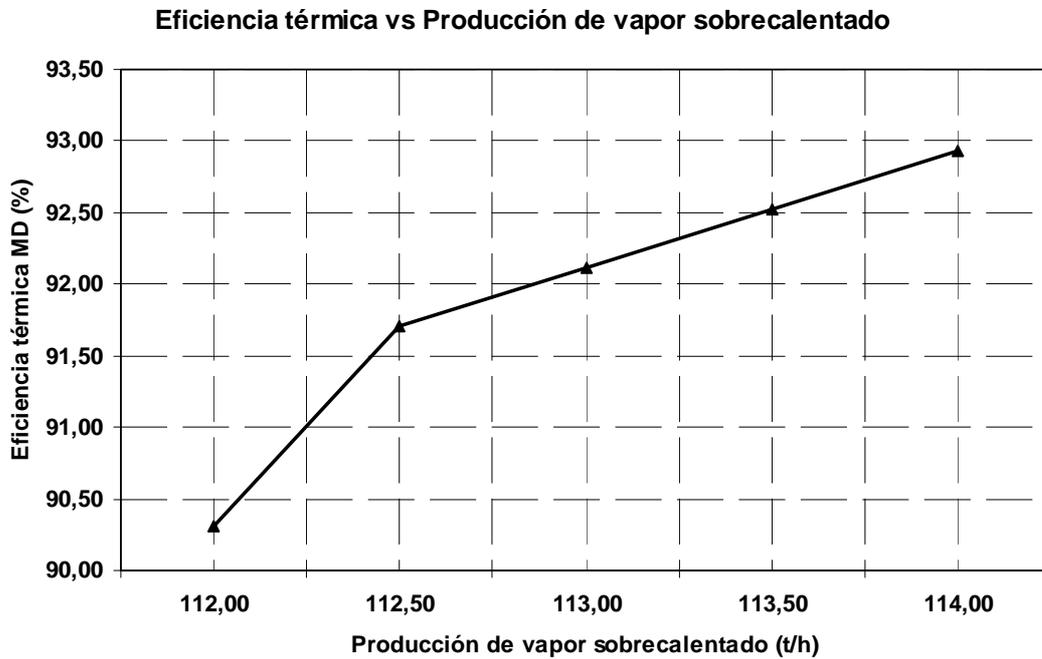


**Figura 3.1.** Comportamiento de la eficiencia térmica respecto al vapor de atomización para la variante 1 (generador de vapor 6).



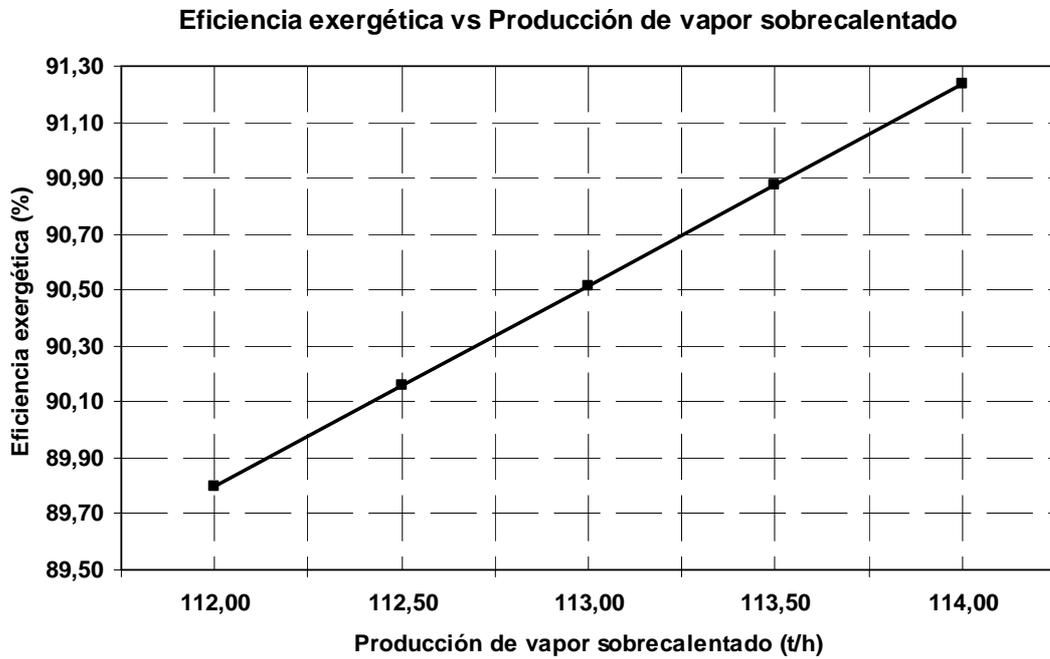
**Figura 3.2.** Comportamiento de la eficiencia térmica respecto al consumo de combustible para la variante 1 (generador de vapor 6).

En la Figura 3.2 el comportamiento de la eficiencia térmica es lineal debido a las condiciones en que fue graficado este parámetro, pero se observa que la dependencia es acentuada variando en un rango amplio (87-91,5%). Esta observación es importante debido a la importancia que tienen estos equipos en el consumo de combustible de las empresa, sector y municipio a los que pertenecen. Debido a los índices de consumo que tienen los generadores de vapor son considerados puestos clave en el ahorro de portadores energéticos.

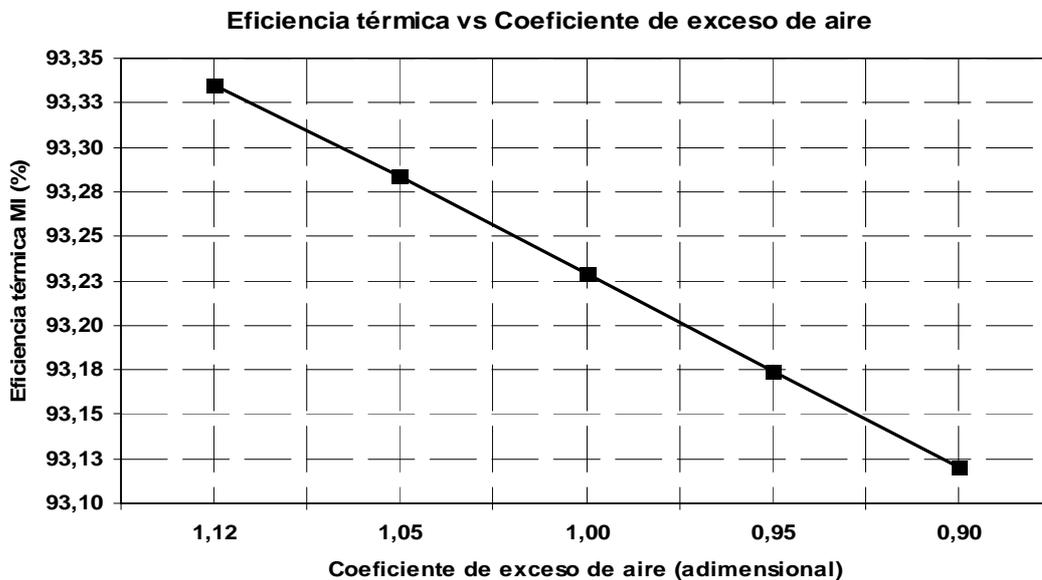


**Figura 3.3.** Comportamiento de la eficiencia térmica respecto a la producción de vapor sobrecalentado para la variante 1 (generador de vapor 6).

De la Figura 3.3 se deduce que el generador de vapor solo alcanza aproximadamente la eficiencia máxima (93%) para la productividad de 114 t/h, esto indica que bajo las mismas condiciones solo es posible elevar la eficiencia térmica aumentando la producción de vapor, también se aprecia que al elevar la producción de vapor de 112 a 112,5 t/h la eficiencia térmica se elevó en 1,41% siendo menos acentuado el crecimiento para las restantes productividades. De aquí se infiere que solo existe un intervalo en el cual se puede mejorar considerablemente la eficiencia.



**Figura 3.4.** Comportamiento de la eficiencia exergética respecto a la producción de vapor sobrecalentado para la variante 1 (generador de vapor 6).



**Figura 3.5.** Comportamiento de la eficiencia térmica respecto al coeficiente de exceso de aire para la variante 1 (generador de vapor 6).



Al graficar la eficiencia exergética contra la producción de vapor sobrecalentado (Figura 3.4) el comportamiento es lineal, esto indica que se puede elevar la eficiencia del generador logrando un incremento de la productividad de la instalación manteniendo en niveles estables los restantes parámetros que caracterizan el proceso.

De la Figura 3.5 se infiere la influencia que tiene el coeficiente de exceso de aire en la eficiencia térmica del generador de vapor (calculada por el método indirecto). Al interpretar los resultados que se exponen resulta evidente la importancia que tiene la selección apropiada de los quemadores y los ventiladores de tiro forzado e inducido (VTF y VTI), esencialmente el VTF que es el encargado de suministrar el aire para la combustión, en el generador de vapor analizado es mucho más acentuada esta importancia debido a que además este ventilador debe crear la caída de presión necesaria para la evacuación de los gases producto de la combustión.

### 3.3- Valoración económica

Los valores expuestos en las tabla 3.1 muestran la valoración económica referida al consumo de combustible para las condiciones actuales de explotación. El precio (464 USD/t) utilizado en el cálculo fue el reportado por el departamento de Economía energética de la empresa Ernesto Che Guevara referido al mes de Mayo de 2008.

**Tabla 3.1.** Análisis económico para los dos generadores de vapor de 150 t/h.

<b>Generador de vapor</b>	<b>Rendimiento del Generador de vapor (%)</b>	<b>Consumo de Combustible (t/h)</b>	<b>Precio del Combustible (USD/t)</b>	<b>Importe (USD/h)</b>
<b>GV-6</b>	Rend. Prom actual = 91,32	8,322	464	3861,408
<b>GV-7</b>	Rend. Prom actual = 91,57	8,720	464	4046,08
<b>Gasto total por concepto de consumo de combustible</b>		<b>17,042</b>	<b>464</b>	<b>7907,488</b>



Como se puede apreciar en la Tabla 3.1 el gasto horario por concepto de consumo de combustible asciende a **7907,488 USD**.

El gasto por concepto de consumo de combustible entre los meses Enero-Mayo considerando el mismo precio se muestra en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Análisis económico para los 5 meses analizados.

<b>Generador de vapor</b>	<b>Rendimiento del Generador de vapor (%)</b>	<b>Consumo de Combustible (t/día)</b>	<b>Precio del Combustible (t/5 meses)</b>	<b>Importe (USD)</b>
<b>GV-6</b>	Rend. Prom actual = 91,32	199,728	29959,2	13901069
<b>GV-7</b>	Rend. Prom actual = 91,57	209,28	31392	14565888
<b>Gasto total por concepto de consumo de combustible</b>		<b>409,008</b>	<b>61351,2</b>	<b>28 466 957</b>

Al comparar los gastos obtenidos en este trabajo con los reportados por Hernández (2006), quien calculó los gastos asociados a las condiciones nominales se aprecia un incremento en el consumo de combustible, esto unido al creciente precio del petróleo en el mercado internacional dificultará lograr un periodo de recuperación de la inversión inferior a 5 años como se concibió en el proyecto de modernización de la empresa.

### **3.4- Impacto ambiental de las centrales termoeléctricas**

A nivel mundial las Centrales Termoeléctricas consumen más de la tercera parte de la cantidad total del combustible extraído, por lo que ejercen gran influencia sobre el medio ambiente (Hurtado, 1999). Lo anterior está condicionado por los siguientes factores:

1. La emisión a la atmósfera de una gran cantidad de gases y partículas producto de la combustión, causantes de afecciones respiratorias en la población que vive en las áreas afectadas y daños al ecosistema.



2. La contaminación física, química y térmica de aguas superficiales y subterráneas de ríos, mares y lagos con los consiguientes efectos secundarios sobre los ecosistemas acuáticos y sobre el hombre.

### **Situación actual de la CTE con referencia a los gases producto de la combustión**

La planta Termoenergética cuenta con 2 Calderas para la producción de vapor de proceso y para la generación de energía eléctrica, como elemento fundamental para reducir la contaminación de la atmósfera con los productos de la combustión y su efecto en la población circundante está la chimenea de la planta con una altura de 160m para lograr una dispersión de estos productos evitando su concentración en las inmediaciones, utilizando chimeneas altas, los gases con hollín expulsados en las capas altas de la atmósfera, se propagan en ellas, lo cual reduce considerablemente la concentración de las impurezas nocivas. Los elementos contaminantes del proceso de la combustión del petróleo en lo fundamental son los siguientes:

- Monóxido de carbono (CO).
- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).
- Hollín.
- Pentóxido de Vanadio (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).
- Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).

### **Monóxido de carbono**

Está presente en los gases de la combustión que se expulsan por la chimenea cuando este proceso es incompleto, que no permite que el mayor por ciento del Carbono se combustione a Dióxido de Carbono. El sistema de combustión presenta algunas dificultades en las cuales se trabaja para eliminarlas mediante la incorporación de quemadores de mejor calidad fabricados en talleres más especializados, en estos momentos se evalúa un prototipo que debe mejorar sustancialmente este problema.



### **Dióxido de carbono**

Este gas producto de la combustión es un efecto que está estrechamente ligado al proceso y es de donde proviene la mayor cantidad de la energía que se aprovecha en la producción del vapor por lo que su expulsión a la atmósfera es una consecuencia que no puede separarse de la industrialización, el mismo es incoloro y en este caso el efecto se minimiza con respecto a las termoeléctricas tradicionales de nuestro país como Renté, Nuevitas, Felton, etc. debido a que en esta planta el dióxido de carbono se utiliza en el proceso productivo y por tanto un por ciento de este no se envía a la atmósfera.

### **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.

### **Dióxido de azufre**

Es un producto de la combustión y depende del tipo de combustible utilizado y del contenido de azufre en el mismo, el combustible usado en estos momentos (Crudo



Mejorado) tiene un por ciento alto de azufre por lo que las concentraciones de Dióxido de azufre en los gases es apreciable en este caso la medida fundamental para la mitigación de su efecto es la utilización de aditivos.

### **Situación actual de la CTE con referencia a los vertimientos líquidos productos del tratamiento químico del agua y al lavado de las calderas**

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

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

### **Perspectivas futuras de la planta respecto a los gases de la combustión y su evacuación por la chimenea**

La CTE está inmersa en las negociaciones para la modernización de sus equipos fundamentales (Turbogeneradores, Calderas y Sistema de Combustible) lo cual redundará en una mejoría de los elementos contaminantes que expulsa al medio ambiente, situando de esta forma las concentraciones de los principales gases contaminantes dentro de las normas permisibles a nivel mundial. Las nuevas calderas garantizan normas de emisión (epígrafe 1.5) comparables con las de países europeos.



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

Todo lo antes expuesto, junto con la altura de la chimenea de la Central Termoeléctrica permitirá disminuir el impacto ambiental de la planta.

El proyecto de modernización incluye una mejora sustancial en cuanto a los vertimientos líquidos, por cuanto está prevista la construcción de una piscina de neutralización con sus equipos auxiliares donde verterán todos los drenajes contaminantes para su tratamiento.

### **3.5- Conclusiones del capítulo III**

- El gasto por consumo de combustible en el periodo analizado (Enero-Mayo) asciende a **28 466 957 USD**, el mismo es superior a la norma establecida para las condiciones nominales de explotación.
- Con la implementación del proyecto de modernización se introducen mejoras sustanciales en la contaminación medioambiental que presenta la planta respecto a los gases producto de la combustión.



## CONCLUSIONES

---

- Del estudio de la documentación técnica, los trabajos precedentes y las consultas realizadas a los operarios de la CTE se comprobó que a los generadores de vapor estudiados no se le han realizado diagnósticos térmicos y exergéticos para las condiciones actuales de explotación, que los mismos tienen un efectivo sistema de medición y control de los parámetros y que en la actualidad trabajan por debajo de la productividad nominal.
- Los valores promedios obtenidos en el cálculo del rendimiento térmico para las variantes analizadas, a partir del empleo del método directo son: 91,32% y 91,57%, siendo para el método indirecto de 93,48% y 93,41% para los generadores 6 y 7 respectivamente. Estos valores muestran una variación de 2,16% y 1,84% para los generadores estudiados.
- En todas las variantes calculadas existe un alto aprovechamiento de la energía útil máxima disponible en el sistema, siendo la eficiencia exergética promedio igual a 89,82% y 89,88%, la pérdida de exergía siempre fue inferior al 11%.
- En las condiciones actuales de explotación en el proceso de producción de vapor existe un gasto por consumo de combustible en cinco meses (Enero-Mayo) que asciende a 28 466 957 USD, el cual es superior a la norma establecida para las condiciones nominales de explotación.
- Con la inserción de los generadores de vapor la situación medioambiental de la CTE mejoró sustancialmente en cuanto a las emisiones de gases producto de la combustión y los vertimientos líquidos que corresponden al tratamiento químico del agua y el lavado de las calderas.



---

## RECOMENDACIONES

---

- Continuar con las evaluaciones energéticas de los generadores de vapor para nuevas condiciones de explotación no abordadas en este trabajo por ser estos equipos puestos clave en el ahorro de combustible.
- Corregir los valores de los parámetros calculados en la investigación utilizando una data experimental más representativa.
- Crear un software que permita la evaluación dinámica de los generadores de vapor desde el punto de vista térmico y exergético.



## RERERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

1. Abreu, J. *Evaluación de la eficiencia actual del generador de vapor 10 de la Central Termoeléctrica de la Empresa René Ramos Latour*. Trabajo de Diploma. ISMM.2003. 70p.
2. Caballero, B. A; Y. González. *Diagnóstico energético de los Generadores de Vapor de las empresas productoras de níquel en Moa*. Trabajo de Diploma. ISMM 2007. 43 p.
3. Carcallido, M. *Balance energético y exergético del CAI Guatemala*. Trabajo de Diploma. ISMM 1999. 71 p.
4. Colectivo de Autores. *Generadores de Vapor*. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana, 1970. 520 p.
5. Conceptos básicos de agua de aporte a calderas.  
<http://www.monografias.com/trabajos5/aguacald/aguacald.shtml>. Marzo 2008.
6. Contaminación por ruido. [http://www.conam.gob.pe/educamb/cont\\_ruido.htm](http://www.conam.gob.pe/educamb/cont_ruido.htm).  
Marzo 2008.
7. Del Valle, R. *Balance energético verificativo de la planta eléctrica de la empresa René Ramos Latour*. Trabajo de Diploma. ISMM 2002. 64 p.
8. Faires, V. *Termodinámica*. La Habana: Edición Revolucionaria, 1991. 807p.
9. Fernández, E. *Termodinámica Técnica*. La Habana: Editorial "Félix Varela, 1994. Tomo I. 290 p.
10. Fernández, E. *Utilización del vapor en la industria*. Editorial Científico-Técnica. La Habana, 2001. 138 p.
11. Ficha Técnica de los Generadores de Vapor 6 y 7. Proyecto de Modernización de la Central Termoeléctrica. Moa, 2004. 25 p.
12. Hernández, J. N. *Diagnóstico térmico verificativo de los generadores de vapor insertados en la Central Termoeléctrica de la empresa "Ernesto Ché Guevara"*. Trabajo de Diploma. ISMM 2006. 48 p.



13. Hurtado, F. G. *Estudio de la Influencia en el Medio Ambiente del Sistema de Generación de la Empresa del Níquel Ernesto Che Guevara y el Sistema de Transmisión Eléctrico Adyacente*. Tesis doctoral. ISMM, Moa. 1999. 120p.
14. Jiménez, U. *Propuesta para el plegado de las chapas del sistema de mantenimiento de aire regenerativo de las centrales termoeléctricas*. Trabajo de Diploma. ISMM 2001. 72 p.
15. Lahenz, V. *Calculo de la eficiencia en los generadores de vapor*. Trabajo de Diploma. ISMM 2001. 56 p.
16. *Manual de operaciones de la Central Termoeléctrica Empresa "Ernesto Che Guevara"*. Moa, 2005.
17. *Manual de operaciones de la Central Termoeléctrica Empresa "Pedro Sotro Alba"*. Moa, 2006.
18. Muñoz, C. *Aprovechamiento de la biomasa forestal para la producción sostenida de electricidad en el CAI "Argeo Martínez" de Guantánamo*. Trabajo de Diploma. ISMM 2001. 69 p.
19. Muhica, J. *Evaluación termoeconómica del ciclo de la central termoeléctrica de la empresa Ernesto Guevara*. Trabajo de Diploma. ISMM, 2001. 62 p.
20. Oliva, R. Luis. *Explotación y materiales constructivos de generadores de vapor*. Ediciones ISPJAM. Santiago de Cuba. 1988. 320 p.
21. Pankratov. G. *Problemas de termotecnia*. Editorial MIR Moscú. URSS, 1987. 235 p.
22. Pereira, M. *Balance de energía de la caldera del comedor del ISMM*. Proyecto de curso. 2001. 33 p.
23. Pérez, Garay. L.: *Generadores de Vapor*. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana. 1972. 447 p.
24. *Proyecto de Modernización de la Central Termoeléctrica*. Moa, 2005. 50 p.
25. Rivera, B. Y; Y. *Regueíferos. Diagnóstico térmico de los Generadores de Vapor de las empresas presupuestadas del municipio Moa*. Trabajo de Diploma. ISMM 2007. 50 p.



26. Rizhkin, Y. V. Centrales termoeléctricas. Primera y segunda parte. Editorial pueblo y educación. Ciudad de La Habana. 1987. 370 p.
27. Rodríguez, Y. *Análisis del petróleo crudo nacional empleado en la empresa Ernesto Guevara*. Trabajo de Diploma. ISMM, 2001. 57 p.
28. Steam and electricity generation.  
<http://www.schoolscience.co.uk/content/4/chemistry/petroleum/knowl/4/2index.htm?steam.html>, Marzo 2008.
29. Steam Generation. <http://www.segainc.com/energystmgeneration.html>. Marzo 2008.
30. Suárez, L; E. Rodríguez. *Propuesta de selección del esquema térmico principal para la modernización de la planta termoeléctrica de la Empresa Ernesto Che Guevara*. Trabajo de Diploma. ISMM 1999. 75 p.
31. Suárez, V. *Diagnóstico del sistema de generación de vapor de la Central Termoeléctrica perteneciente a la empresa "Comandante René Ramos Latour"*. Trabajo de Diploma. ISMM, 2005. 70 p.
32. Tanquero, N. *Guía metodológica para proyectos del curso de generadores de vapor*. Editorial ISPJAE. La Habana. Cuba. 1997. 120 p.
33. Tuzón, E. Diagnóstico energético del generador de vapor 1 de la empresa Ernesto Che Guevara. Proyecto de Curso. ISMM. 2005. 30 p.
34. Vukalovitch, M. *Propiedades Termodinámicas del agua y el vapor*. Editorial. Revolucionaria 1978. 245 p.