

**Ministerio de Educación Superior  
Instituto Superior Minero Metalúrgico  
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”**

**Facultad de Metalurgia-Electromecánica  
Departamento de Ingeniería Mecánica**

**Análisis termoexergético de los generadores  
de vapor de la empresa Ernesto Che Guevara**

**Tesis en Opción al Título de Ingeniero Mecánico**

**Autor:** *Alexey Fonseca Vázquez*

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

*Moa-2009*

*“Año del 50 Aniversario del Triunfo de la Revolución”*



## DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

---

Yo: Alexey Fonseca Vázquez autor de este trabajo de Diploma y el tutor M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja declaramos la propiedad intelectual de este servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

---

*Diplomante: Alexey Fonseca Vázquez*

---

*MSc. Yoalbys Retirado Mediaceja*



---

## PENSAMIENTOS

---

*Para los que luchan nada es imposible.*

*Alex's Fon*

*Hay muchos que luchan una hora y son buenos, hay otros que luchan un año y son mejores, hay otros que luchan muchos años y son muy buenos, pero poco luchan la vida entera. Esos son los imprescindibles.*

*Beltrólt Breeff*

*El tema relativo al conocimiento es de especial relieve en nuestra agenda, porque en el abordamos los problemas que deciden, en buena medida, el futuro de nuestros países, conectarnos al conocimiento y participar en una verdadera globalización la información que signifique compartir y no incluir, es un imperativo estratégico para la supervivencia de nuestras identidades culturales de cara al próximo siglo.*

*Fidel Castro Ruz*



## AGRADECIMIENTOS

---

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

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

*A mis padres María Elena Vázquez Peña y Arsenio Fonseca Moreno por haberme guiado en la vida y darme una educación basada en valores y principios de nuestra Revolución. Por la ayuda incondicional que me brindaron para que yo realizara mi sueño.*

*A mi segundo padre Rafael Casas Domínguez que en el cielo está.*

*A mi tutor: M.Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja por la confianza depositada y ayuda ofrecida durante la realización de la tesis.*

*A mi esposa Yuliet García Sánchez por darme fuerzas para seguir adelante y estar junto a mí en los momentos difíciles con todo su amor y dedicación.*

*A toda mi Familia y en especial a mi hermano Arsenio Fonseca Fera por su ayuda incondicional y su confianza depositada en mí.*

*A mis abuelos José Manuel Vázquez Cuenca y Ana Celia Peña Paneque por la crianza y educación que me brindaron en los primeros años de mi vida.*

*A mis amigos Reilis Fuentes, Orlando Vega, Eduardo Terrero y Jorge Matos que a la vez han sido como mis padres por su ayuda brindada en todos los momentos.*

*A mis amigos especiales Nitza Navarro, Mercy Matos, Odalis Urrutia, Vilma Leyva y Nilser Batista que me ayudaron en los primeros momentos de mi carrera.*

*A mis vecinos Yonny, Ildegarde, Jorge Daniel, Ever, Minalvis, Geraldo la Tola, Luis, Dioelís, Osmel, Sandra, Yordanis y Yamilet por su ayuda prestada en cada momento que los necesité.*

*A todos los profesores del Departamento de Ingeniería Mecánica, y mis compañeros de estudio que de una forma u otra me ayudaron para alcanzar este éxito.*

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

*Muchas Gracias.*



## DEDICATORIA

---

*A mis padres Arsenio Fonseca Moreno y María Elena Vázquez Peña ya que siempre confiaron en mi y se que se sienten orgullosos ya que nunca los he defraudado.*

*A mi querido tío Rafael Casas Domínguez que fue como un padre para mí; aunque no pudo ver este sueño hecho realidad le dedico este éxito; gracias por brindarme tu apoyo en los momentos más difíciles. Que Dios te tenga en la Gloria.*

*A mis abuelos: Que donde quiera que estén disfrutarán de la realización de este sueño.*

*A mí querido hermano: Arsenio Fonseca Feria quien siempre me alentó.*

*A mí tía Marilín Vázquez Peña que ha sido como una madre, y siempre me ha apoyado en todo.*

*A mis vecinos: Quienes siempre demostraron preocupación por este momento.*

*A mi esposa: Yuliet García Sánchez por su apoyo y dedicación para yo poder llegar hasta aquí.*

*A mi Tutor: M.Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja por colaborar en la realización de este trabajo.*

*A los profesores del Instituto Superior Minero Metalúrgico: Que colaboraron con mi formación profesional.*

*A la Revolución Cubana: Por haberme permitido llegar hasta aquí y en el futuro pueda brindarle mi ayuda, ella pueda contar conmigo.*

*A nuestro Comandante en Jefe "Fidel Castro Ruz": Quien siempre ha velado por el bienestar del ser humano. A Dios, y a él en especial.*

*A todos "les dedico este éxito"*

*Alex's Fon*



## RESUMEN

---

En la Central Termoeléctrica de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” se desarrolla un proceso inversionista que contempla la modernización del sistema de generación de vapor a través de la inserción de dos generadores de vapor, los cuales deben ser evaluados térmica y exergéticamente, para ello se realizó el presente trabajo, en el cual se determinaron los rendimientos térmicos promedios calculados por los métodos directo e indirecto los cuales fueron 92,43% y 91,14% para los generadores de vapor 6 y 7. Los rendimientos exergéticos ascendieron a 48,14%, y 45,97%, siendo por consiguiente las pérdidas de exergía de 51,86% y 54,03% para las calderas analizadas.

Las diferencias obtenidas entre los rendimientos térmicos promedios y los rendimientos exergéticos fueron de 44,29% y 45,16%. El consumo de combustible medido en la instalación difiere del calculado en 85,68 kg/h y 253,27 kg/h. Los gastos por concepto de consumo de combustible en el periodo analizado ascienden a 8260660,8 USD y 8240205,83 USD, los mismos son superiores a las normas establecidas por los fabricantes de las calderas para el proyecto de modernización de la Central Termoeléctrica.

Se detectaron como principales agentes contaminantes presentes en los generadores de vapor de la Empresa Ernesto Che Guevara los óxidos de azufre, monóxido de carbono, óxidos nitrosos, particulados y compuestos orgánicos volátiles.



## ABSTRACT

---

At Power Station Plant "Ernesto Che Guevara", an investing process is developed which summarizes the system's modernization based on steam generation by the insertion of two steam generators, which should be evaluated thermically and exergeticly, the present work has been developed for that reason, in which thermic efficiency rates were determined and calculated by direct and indirect methods which were 92,43% and 91,14% for steam generators 6 and 7. Exergetic efficiency raised to 48,14%, and 45,97%, and for that reason exergic losses were about 51,86% and 54,03% to analyzed boilers.

Differences obtained between thermal efficiency rates and exergetic efficiency were about 44,29% and 45,16%. Fuel consume measured in the plant differs from the one calculated in 85,68 kg/h and 253,27 kg/h. Cost by fuel consume concept in the analyzed period ascend to 82 606 60,8 USD and 82 402 05,83 USD, those are higher than standars established by boilers' manufacturer to the project's modernization for the Power station.

Sulphur oxides, carbon monoxide, nitrous oxides, particles and organic volatile compounds were detected as main polluting agents at Ernesto Che Guevara steam generators.



---

**ÍNDICE**

---

<b>Contenido</b>	<b>Págs.</b>
<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>	15
1.5- <i>Descripción de los generadores de vapor insertados en el proceso</i>	17
1.6- <i>Conclusiones del capítulo I.....</i>	21
<b>Capítulo II Diagnóstico térmico y exergético de los generadores de vapor perteneciente a la Empresa Ernesto Che Guevara.....</b>	<b>22</b>
2.1- <i>Introducción.....</i>	22
2.2- <i>Procedimiento de cálculo para el balance térmico y exergético de los generadores de vapor que operan en la instalación.....</i>	22
2.3- <i>Datos obtenidos en la instalación para los diferentes generadores de vapor.....</i>	31
2.4- <i>Balance térmico y exergético de la instalación.....</i>	33
2.5- <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>	41
3.4- <i>Generalidades de la contaminación ambiental en la generación de vapor.....</i>	43
3.5- <i>Particularidades del Impacto ambiental de las centrales termoeléctricas.....</i>	50
3.6- <i>Conclusiones del Capítulo III.....</i>	52
<b>Conclusiones.....</b>	<b>53</b>
<b>Recomendaciones.....</b>	<b>54</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>55</b>
<b>Anexos.</b>	<b>---</b>





## INTRODUCCIÓN

---

La empresa Ernesto Che Guevara juega un papel fundamental dentro de la economía nacional, es por ello que el incremento de la eficiencia de los diferentes equipos e instalaciones que la componen incide considerablemente en la reducción del consumo de portadores energéticos.

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.

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 cubano, debido entre otros factores a que en los últimos años la industria del níquel ha tenido un rol importante en la economía del país constituyendo uno de los regiones que más divisas aporta a la economía cubana.

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 productivo, 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.

El combustible utilizado en la CTE es el petróleo crudo nacional, debido a que en los últimos años se ha elevado el precio del petróleo regular en el mercado internacional y aunque recientemente se han estabilizados los precios alrededor de 70 USD, la tendencia es creciente debido a la gran crisis económica en la que está sumergido el mundo capitalista, por los elementos señalados anteriormente se hace necesario lograr mayor eficiencia en la combustión del petróleo en los generadores de vapor 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 ahorros 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 termoexergético 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 (generadores de vapor 6 y 7) son puntuales y no reflejan la situación real de las mismas. Esto implica la adecuación del procedimiento de cálculo existente en las literaturas especializadas en la temática que garantice la evaluación termoexergética de las calderas.

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

***La necesidad de realizar la evaluación termoexergética de los generadores de vapor de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara que permita determinar los parámetros de funcionamiento y las eficiencias térmica y exergética para las condiciones actuales de operación de los generadores.***

*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**:*

***Si se realiza la evaluación termoexergética de los generadores de vapor de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara a partir de la adecuación del procedimiento de cálculo existente en los textos clásicos consultados, entonces es posible obtener las eficiencias térmicas y exergéticas de estos equipos y la influencia que tienen los diferentes parámetros de funcionamiento en las mismas.***

*En correspondencia con la hipótesis planteada, se define como **objetivo del trabajo:***  
**Realizar la evaluación termoexergética de los generadores de vapor estudiados para las condiciones actuales de explotación y diferentes situaciones de operación.**

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

- 1- Establecer el marco teórico que sustenta la investigación a través del análisis de los trabajos precedentes y los principales fundamentos teóricos asociados al objeto de estudio.
- 2- Adecuar el procedimiento de cálculo establecido en los textos consultados para el balance térmico y exergético de los generadores de vapor analizados.
- 3- Obtener las eficiencias térmicas y exergéticas los generadores de vapor estudiados para diferentes condiciones de explotación.
- 4- Realizar el análisis de los resultados del diagnóstico térmico y exergético de los generadores de vapor para las condiciones reales de explotación.
- 5- Establecer la dependencia existente entre los diferentes parámetros del proceso de producción de vapor para los generadores estudiados a través de gráficos de comportamiento.
- 6- Valorar los impactos económico y medioambiental del proceso de generación de vapor para las condiciones de explotación de la empresa Ernesto Che Guevara.

## CAPÍTULO I

---

### MARCO TEÓRICO- METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 1.1- Introducción

Para la evaluación térmica y exergética de los generadores de vapor es necesario conocer las principales características de estos equipos y las particularidades del proceso productivo y la planta donde están instalados, es necesario además estudiar los trabajos precedentes realizados y otros fundamentos que permiten el estudio integral de los referidos equipos, todo esto es posible a través del marco teórico de la investigación, es por ello que el **objetivo** del capítulo es:

Establecer el marco teórico necesario para la reevaluación térmica y exergética de los generadores de vapor de la empresa Ernesto Che Guevara.

#### 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 fueron los generadores 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”.

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 al 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 la 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 textos especializados en la temática relacionada con el diagnóstico energético a equipos e instalaciones con la finalidad de adecuar el procedimiento de cálculo empleado en el balance térmico, algunos de ellos se analizan a continuación:

Colectivo de autores (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.

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

Carcallido (1999), demuestra que en el complejo agroindustrial Guatemala el 62% de la exergía total del proceso se pierde por irreversibilidad en los procesos de combustión y transferencia de calor y 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.

**Al análisis de generadores de vapor instalados en las CTE de las empresas del níquel se han dedicado algunos trabajos:**

En la empresa René Ramos Latour 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 %.

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.

Fadel (2008) calculó el rendimiento térmico y exergético de los generadores de vapor 6 y 7 de la empresa Ernesto Che Guevara y estableció gráficos de comportamiento que permiten inferir la dependencia entre las eficiencias térmicas y exergéticas y los restantes parámetros de funcionamiento de estos equipos, estudios similares fueron desarrollados por De Armas (2008) en los generadores de la empresa Pedro Sotto Alba.

Existe una amplia variedad de trabajos dedicados al diagnóstico térmico y exergético de los generadores de vapor tanto en las instalaciones de las empresas presupuestadas con en el sector industrial, pero solo se reportan tres estudios realizados a los generadores de vapor suministrados por la compañía eslovaca a la empresa Ernesto Che Guevara, uno para los datos nominales de los generadores (Hernández, 2006) y dos para las condiciones reales de explotación presentes en el momento del estudio (Caballero y González, 2007 y Fadel, 2008), estos estudios aunque en su momento mostraron la realidad del proceso, en la actualidad no pueden ser considerados como referencia para la toma de decisiones, por cuanto las condiciones de explotación en la CTE han cambiado, de ahí la importancia de reevaluar los generadores desde el punto de vista térmico y exergético.

#### **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  | <b>2</b>        |
| - Producción de vapor nominal de caldera  | <b>150 t/ h</b> |
| - 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 | <b>92-93 %</b>  |

## 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 $\mu\text{S}/\text{cm}$ máx.
- Contenido de $\text{O}_2$	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

- La revisión bibliográfica de los textos y los trabajos técnicos especializados en la temática de generación de vapor indican que es posible adecuar los procedimientos de cálculo existentes a los generadores de vapor para su posterior diagnóstico térmico y exergético.
- Se reportan tres estudios realizados a los generadores de vapor estudiados, de ellos solo dos fueron desarrollados para las condiciones de explotación existentes en la CTE de la empresa analizada.
- Se comprobó que los generadores de vapor tienen un alto grado de automatización y un eficiente sistema de medición y control de los parámetros del proceso, lo que garantiza que para las condiciones para las cuales fueron diseñados presenten una alta eficiencia térmica.

## CAPÍTULO II

---

# DIAGNÓSTICO TÉRMICO Y EXERGÉTICO DE LOS GENERADORES DE VAPOR PERTENECIENTE A LA EMPRESA ERNESTO CHE GUEVARA

### 2.1- Introducción

Desde el punto de vista práctico el diagnóstico térmico y exergético de los generadores de vapor es muy importante para las empresas que tienen estos equipos en su proceso productivo debido a que son altos consumidores de combustibles, es por ello que conocer los parámetros fundamentales de funcionamiento constituye para los tecnólogos e investigadores un aspecto de primera importancia y por tanto orientan la evaluación energética periódica de estos equipos, en este sentido el **objetivo** de este capítulo es:

Obtener las eficiencias térmicas y exergéticas de los generadores de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

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

El procedimiento de cálculo que a continuación se muestra es extraído de los textos especializados en la temática de generación de vapor (Colectivo de autores, 1970; Pérez, 1972; Pankratov, 1987) y adecuado a los generadores estudiados.

#### 2.2.1 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.

### 2.2.2 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*

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

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

*Para combustión incompleta*

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

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

## 2.2.4 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:

$I_g$  - Entalpía real de los gases producto de la combustión (kJ/kg).

$i_{aire}$  - Entalpía del aire (kJ/m<sup>3</sup>).

$I^0_g$  - Entalpía teórica de los gases de escape (kJ/kg).



### 2.2.5 Balance térmico por el método directo

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

Donde:

$Q_{\text{útil}}$  – Calor útil (KJ/s)

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

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

$Q_d$  - Calor disponible (KJ/Kg)

⇒ *Determinación del calor disponible*

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

Donde:

$Q_{fc}$  - Calor físico del combustible (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  $t$

$$Q_{atm} = D_{atm} \cdot (i_v - i_{vge}) \quad (2.18)$$

Donde:

$i_v$  - Entalpía del vapor de atomización (kJ/kg).

$i_{vge}$  - Entalpía del vapor en los gases de escape (kJ/kg).

⇒ *Determinación del calor útil.*

$$Q_{\text{útil}} = D_{vsc} \cdot (i_{vsc} - i_{aa}) \quad (2.19)$$

Donde:

$D_{vsc}$  - Flujo de vapor sobrecalentado (kg/s)

$i_{vsc}$  - Entalpía del vapor sobrecalentado (kJ/kg).

$i_{aa}$  - Entalpía del agua de alimentación (kJ/kg).

### 2.2.6 Balance térmico por el método indirecto

$$\eta_{GV} = 100 - \sum q_n \quad (\%) \quad (2.20)$$

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

#### **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.

$$q_2 = \frac{(I_{ge} - \alpha \cdot I_{af}) \cdot (100 - q_4)}{Q_d} \quad (2.21)$$

Donde:

$q_4$  - Pérdida por incombustión mecánica (%)

⇒ **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:

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

$$q_3 = \frac{(30,2 \cdot CO + 25,8 \cdot H_2 + 85,5 \cdot CH_4) \cdot V_{gs} \cdot (100 - q_4)}{Q_d} \quad (2.22)$$

⇒ **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

$$q_4 = \left[ a_{esc} \cdot \frac{C_{esc}}{100 - C_{esc}} + a_{cen} \cdot \frac{C_{cen}}{100 - C_{cen}} + a_{arr} \cdot \frac{C_{arr}}{100 - C_{arr}} \right] \cdot \frac{327,8 \cdot A^t}{Q_d} \quad (2.23)$$

$$a_{esc} = \frac{B_{esc} \cdot A_{esc}}{B \cdot A^t}; a_{cen} = \frac{B_{cen} \cdot A_{cen}}{B \cdot A^t}; a_{arr} = 1 - a_{esc} - a_{cen} \quad B = \frac{D}{d} \quad (2.24)$$

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:

$q_{5n}$  - Pérdida de calor normal (%)

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

$D$  - Producción de vapor real (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.

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

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

Donde:

$I_{esc}$  - Entalpía de la escoria (KJ/Kg)

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

Para combustibles líquidos y gaseosos  $q_6 = 0$

### 2.2.7 Análisis exerético 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 para los dos últimos (los presentes en un generador) se muestran a continuación:

⇒ *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:

$$e_x = (h_1 - h_0) - T_0 \cdot (s_1 - s_0) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.29)$$

$$E_x = \dot{m} \cdot [(h_1 - h_0) - T_0 \cdot (S_1 - S_0)] \quad (\text{kJ/s}) \quad (2.30)$$

Donde:

h - Entalpía del flujo (kJ/kg).

S - Entropía (KJ/KgK)

T<sub>0</sub> - Temperatura del medioambiente (K)

⇒ *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:

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

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:

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

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:

$$\eta_{\text{Exergético}} = \frac{\text{Exergía recuperada}}{\text{Exergía empleada}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (2.33)$$

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 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:

$$\gamma = 1 - \eta_{\text{Exergético}} \quad (2.34)$$

Donde.

$\gamma$  - Pérdida de exergía (%)

$\eta_{\text{Exergético}}$  - Rendimiento exergético (%)

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.

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

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. Este sistema permite tener una alta confiabilidad de los valores de los parámetros medidos.

Los datos necesarios para el cálculo de la instalación se muestran en las tablas 2.2 y 2.3 (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 obtenidos en la instalación	Generador de vapor 6				
	V - 1	V - 2	V - 3	V - 4	V - 5
<b>Variantes calculadas para cada uno</b>					
<b>Producción de vapor sobrecalentado (t/h)</b>	146,7	148,9	149,8	152	153,3
Presión del vapor sobrecalentado (atm)	39,1	39,3	39,7	39,4	39,6
Temperatura del vapor sobrecalentado (°C)	440,1	440,3	439,9	440,1	440
Temperatura del agua de alimentación (°C)	143,4	142,7	141,4	142	143,5
Temperatura del combustible (°C)	122	122	122	122	122
Temperatura de los gases de escape (°C)	199,2	199,7	198,7	203,3	207,5
Temperatura de medio ambiente (°C)	32,0	32,0	32,0	32,0	32,0
<b>Consumo de combustible (t/h)</b>	10,2	10,3	10,6	10,6	10,8
<i>Composición química de los gases producto de la combustión (%)</i>					
Dioxígeno (O <sub>2</sub> )	2,62	2,65	2,70	2,80	2,70
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	13,55	13,89	13,01	13,62	13,77
Monóxido de Carbono (CO)	0,9	0,7	0,8	0,9	0,8
Dihidrógeno (H <sub>2</sub> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Metano (CH <sub>4</sub> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 2.3. Parámetros medidos en la instalación de generación

Parámetros obtenidos en la instalación	Generador de vapor 7				
	V - 1	V - 2	V - 3	V - 4	V - 5
<b>Variantes calculadas para cada uno</b>					
<b>Producción de vapor sobrecalentado (t/h)</b>	137,8	140,8	141,3	143,8	144,9
Presión del vapor sobrecalentado (atm)	38,98	39,26	39,5	39,43	39,74
Temperatura del vapor sobrecalentado (°C)	440	440	440	440	440
Temperatura del agua de alimentación (°C)	120	124	119	129	127
Temperatura del combustible (°C)	122	123	123	123	123
Temperatura de los gases de escape (°C)	198,5	200,6	195,9	203,2	201,6
Temperatura de medio ambiente (°C)	32,0	32,0	32,0	32,0	32,0
<b>Consumo de combustible (t/h)</b>	10,18	10,31	10,43	10,62	10,83
<i>Composición química de los gases producto de la combustión (%)</i>					
Dioxígeno (O <sub>2</sub> )	2,68	2,70	2,70	2,80	2,75
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	13,89	13,92	13,90	13,62	13,51
Monóxido de Carbono (CO)	1,0	0,8	0,9	0,7	0,9
Dihidrógeno (H <sub>2</sub> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Metano (CH <sub>4</sub> )	0,00	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.*

### **Generadores de vapor 6 y 7 variantes 1 - 5**

$$C^t = 81 \quad H^t = 13.5 \quad S^t = 2.6 \quad O^t = 0.7 \quad W^t = 1.8 \quad A^t = 0,02$$

Se utilizó el mismo valor para los generadores de vapor 6 y 7 porque en el periodo analizado se empleó el mismo combustible, el cual fue suministrado desde el Puerto de Moa.



## 2.4- 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 2.2) y los datos obtenidos en la instalación (epígrafe 2.3) 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 las tablas 2.4 y 2.5.

**Tabla 2.4.** Valores de los parámetros fundamentales del balance térmico realizado.

Parámetros calculados	Generador de vapor 6						
	Variantes calculadas					U/M	Ec.
	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5		
$Qb^t$	$4,153 \times 10^7$	$4,153 \times 10^7$	$4,153 \times 10^7$	$4,153 \times 10^7$	$4,153 \times 10^7$	(J/kg)	(2.1)
$V^0_a$	10,842	10,842	10,842	10,842	10,842	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.2)
$V_{RO_2}$	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.3)
$V^0_{N_2}$	8,569	8,569	8,569	8,569	8,569	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.4)
$V^0_{gs}$	10,099	10,099	10,099	10,099	10,099	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.5)
$V^0_{H_2O}$	1,695	1,695	1,695	1,695	1,695	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.6)
$V^0_g$	11,794	11,794	11,794	11,794	11,794	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.7)
$V_g$	13,106	13,207	13,192	13,247	13,207	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.8)
$V_a$	12,025	12,107	12,095	12,139	12,107	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.9)
$\alpha$	1,109	1,117	1,116	1,12	1,117	---	(2.10)
$I^0_g$	$3,278 \times 10^6$	$3,286 \times 10^6$	$3,269 \times 10^6$	$3,325 \times 10^6$	$3,367 \times 10^6$	(J/kg)	(2.12)
$I_g$	$3,333 \times 10^6$	$3,345 \times 10^6$	$3,328 \times 10^6$	$3,386 \times 10^6$	$3,427 \times 10^6$	(J/kg)	(2.13)
$Q_d$	$4,182 \times 10^7$	$4,182 \times 10^7$	$4,181 \times 10^7$	$4,181 \times 10^7$	$4,181 \times 10^7$	(J/kg)	(2.16)

$Q_{\text{útil}}$	$3,963 \times 10^{11}$	$4,028 \times 10^{11}$	$4,058 \times 10^{11}$	$4,115 \times 10^{11}$	$4,14 \times 10^{11}$	(J/h)	(2.19)
$\eta_{GV}$ (M.D)	92,921	93,52	91,548	92,849	91,675	%	(2.15)
$q_2$	6,623	6,635	6,597	6,725	6,83	%	(2.21)
$q_3$	0,656	0,511	0,583	0,656	0,584	%	(2.22)
$q_4$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	%	(2.23)
$q_5$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	%	(2.26)
$q_6$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	%	(2.27)
$\eta_{GV}$ (M.I)	92,22	92,355	92,32	92,119	92,086	%	(2.20)
$\Delta\eta_{D-I}$	0,701	1,166	0,772	0,73	0,411	%	---
$\eta_{PGV}$	92,571	92,937	91,934	92,484	91,881	%	---
$\eta_{\text{Exergético}}$	48,36	48,65	47,63	48,28	47,79	%	(2.33)
$\gamma$	51,64	51,35	52,37	51,72	52,21	%	(2.34)
$\Delta\eta_{T-E}$	44,21	44,28	44,30	44,19	44,08	%	---
Bc	$1,028 \times 10^4$	$1,043 \times 10^4$	$1,051 \times 10^4$	$1,068 \times 10^4$	$1,075 \times 10^4$	kg/h	---
$\Delta B$	77,535	129,988	88,624	84,043	48,218	kg/h	---

Para el balance térmico y exergético del generador de vapor 7 se procedió de forma análoga al anterior y se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en la tabla 2.5.

**Tabla 2.5.** Valores de los parámetros fundamentales del balance térmico realizado.

Parámetros Calculados	Generador de vapor 7						U/M	Ec.
	Variantes calculadas							
	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5			
$Qb^t$	$4,153 \times 10^7$	$4,153 \times 10^7$	$4,153 \times 10^7$	$4,153 \times 10^7$	$4,153 \times 10^7$	(J/kg)	(2.1)	
$V^0_a$	10,842	10,842	10,842	10,842	10,842	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.2)	
$V_{RO_2}$	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.3)	
$V^0_{N_2}$	8,569	8,569	8,569	8,569	8,569	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.4)	

$V_{gs}^0$	10,099	10,099	10,099	10,099	10,099	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.5)
$V_{H_2O}^0$	1,695	1,695	1,695	1,695	1,695	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.6)
$V_g^0$	11,794	11,794	11,794	11,794	11,794	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.7)
$V_g$	13,123	13,211	13,174	13,319	13,205	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.8)
$V_a$	12,039	12,11	12,081	12,198	12,106	(m <sup>3</sup> /kg)	(2.9)
$\alpha$	1,11	1,117	1,114	1,125	1,117	---	(2.10)
$I_g^0$	$3,266 \times 10^6$	$3,297 \times 10^6$	$3,223 \times 10^6$	$3,324 \times 10^6$	$3,307 \times 10^6$	(J/kg)	(2.12)
$I_g$	$3,322 \times 10^6$	$3,357 \times 10^6$	$3,281 \times 10^6$	$3,388 \times 10^6$	$3,367 \times 10^6$	(J/kg)	(2.13)
$Q_d$	$4,185 \times 10^7$	$4,185 \times 10^7$	$4,185 \times 10^7$	$4,185 \times 10^7$	$4,185 \times 10^7$	(J/kg)	(2.16)
$Q_{\text{útil}}$	$3,86 \times 10^{11}$	$3,92 \times 10^{11}$	$3,963 \times 10^{11}$	$3,973 \times 10^{11}$	$4,015 \times 10^{11}$	(J/h)	(2.19)
$\eta_{GV}$ (M.D)	90,6	90,844	90,782	89,381	88,58	%	(2.15)
$q_2$	6,588	6,655	6,482	6,71	6,681	%	(2.21)
$q_3$	0,729	0,583	0,656	0,51	0,656	%	(2.22)
$q_4$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	%	(2.23)
$q_5$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	%	(2.26)
$q_6$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	%	(2.27)
$\eta_{GV}$ (M.I)	92,183	92,262	92,362	92,28	92,163	%	(2.20)
$\Delta\eta_{D-I}$	1,582	1,418	1,58	2,899	3,584	%	---
$\eta_{PGV}$	91,392	91,553	91,572	90,83	90,371	%	---
$\eta_{\text{Exergético}}$	46,01	46,38	46,11	45,92	45,45	%	(2.33)
$\gamma$	53,99	53,62	53,89	54,08	54,55	%	(2.34)
$\Delta\eta_{T-E}$	45,38	45,17	45,46	44,91	44,92	%	---
BC	$1,001 \times 10^4$	$1,015 \times 10^4$	$1,025 \times 10^4$	$1,029 \times 10^4$	$1,041 \times 10^4$	kg/h	---
$\Delta B$	174,759	158,448	178,449	333,586	421,126	kg/h	---

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

- Al calcular los valores del rendimiento térmico promedio por ambos métodos se obtuvieron valores igual a 92,50% y 92,36% para el generador de vapor 6 y 90,03% y 92,25% para el generador 7.
- Los valores promedios del rendimiento exergético para los dos generadores de vapor calculados de acuerdo con la expresión 2.33 fueron 48,14%, y 45,97%, y por consiguiente las pérdidas de exergía resultaron ser 51,86% y 54,03% para los generadores 6 y 7 respectivamente.
- Las diferencias obtenidas entre los rendimientos térmicos promedios y los rendimientos exergéticos fueron de 44,29% y 45,16% para los generadores de vapor 6 y 7 respectivamente.
- Existe una diferencia notable entre el consumo de combustible medido en la instalación y el calculado a partir del empleo del rendimiento térmico obtenido por el método indirecto, dicha diferencia promedio asciende a 85,68 kg/h y 253,27 kg/h para los generadores analizados.

## CAPÍTULO III

---

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

#### 3.1- Introducción

El desarrollo vertiginoso de la industria en los últimos años ha llevado a niveles sin precedentes a la contaminación de la atmósfera, es por ello que las investigaciones actuales deben garantizar una mejora en los índices económicos de una región o país y la conservación del entorno. La protección del medio ambiente es uno de los problemas científico - técnicos más complejos que enfrenta la humanidad, en tal sentido.

El **objetivo** del presente capítulo es.

Realizar la valoración técnica, económica y ambiental de los resultados fundamentales de la investigación.

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

Al analizar los resultados obtenidos en el diagnóstico térmico y exergético de los generadores de vapor se observa que para el combustible utilizado en la instalación el poder calórico bajo es superior a 41 MJ/kg lo que indica un elevado desprendimiento de energía por kilogramo de combustible combustionado, de lo anterior se infiere que el poder calórico tiene una gran influencia en el calor disponible y determina la eficiencia térmica obtenida por ambos métodos en las instalaciones estudiadas.

Los volúmenes de aire necesarios para la combustión ( $V_a$ ) y de gases producto de la combustión ( $V_g$ ) son diferentes para las variantes calculadas en cada uno de los generadores de vapor y entre las dos calderas, esto se debe a los resultados obtenidos para el coeficiente de exceso de aire, el cual está en correspondencia con la composición química de los gases y del tipo de combustión.

En general ambos generadores tienen un elevado aprovechamiento de la energía térmica que se evidencia en el rendimiento térmico promedio de ambos el cual es superior al 90% en todas las variantes calculadas, sin embargo el rendimiento exergético no excede el 50%, esto indica la irreversibilidad existente entre la sustancia de trabajo y el agente de transformación.

Los valores obtenidos para la pérdida de exergía indican que solo se aprovecha una cantidad relativamente pequeña del calor disponible para producir vapor en ambas instalaciones. También se aprecia una diferencia considerable entre ambos rendimientos (térmico y exergético) que oscila alrededor de 44%, esto evidencia las diferencias notables existentes entre ambos conceptos termodinámicos.

Finalmente se calcula el consumo de combustible a partir del empleo del rendimiento térmico obtenido por el método indirecto, los resultados indican diferencias significativas respecto al consumo medido en la instalación, esto permite recomendar la calibración de los equipos de medición.

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

En la figuras 3.1 y 3.2 se ilustran el comportamiento de la producción de vapor sobrecalentado y el consumo de combustible respecto al rendimiento térmico promedio para los generadores de vapor 6 y 7, en ambos se observa que la eficiencia térmica alcanza su máximo valor no precisamente en el punto de máxima producción de vapor lo que se justifica en la cantidad de parámetros que influyen en la eficiencia térmica de estos equipos y en curva de rendimiento contra producción de vapor descrita en las literaturas especializadas (Colectivo de autores 1970 y Pérez, 1972).

En ambos generadores existe un elevado aprovechamiento de la energía térmica que se manifiesta en los rendimientos térmicos los cuales son superiores al 91,5% y 90% para los generadores de vapor 6 y 7 respectivamente. En general el consumo de combustible se comportó alrededor (pero ligeramente superior) de los valores establecidos en el proyecto modernización de la Central Termoeléctrica y equivalentes a los calculados por Hernández (2006) para los valores nominales.

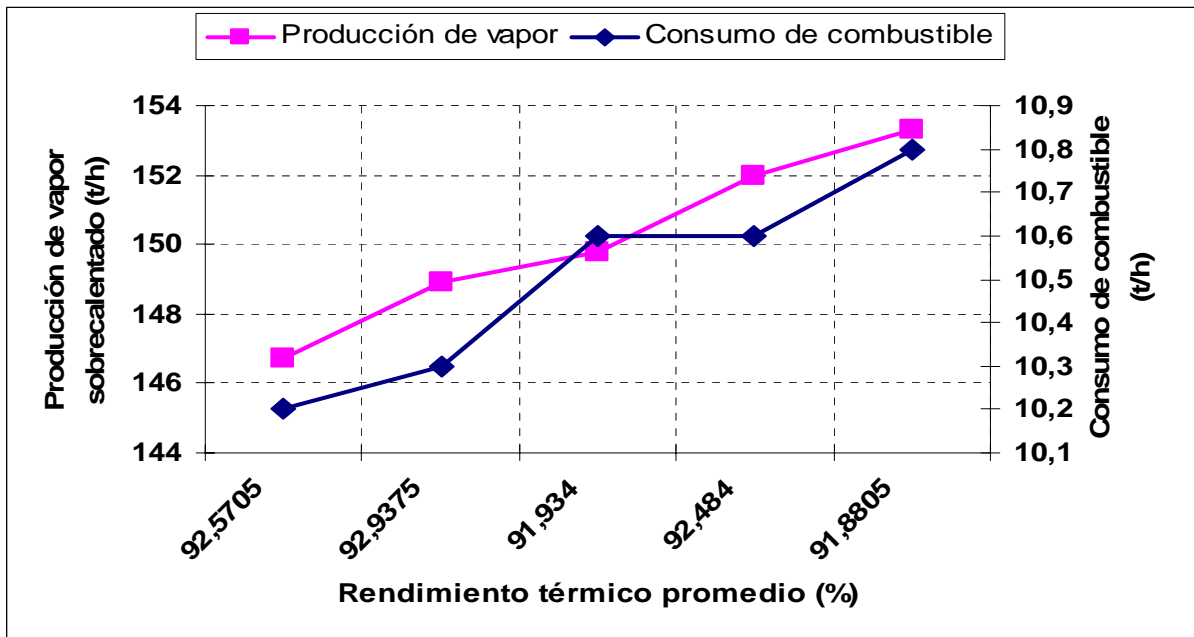


Figura 3.1. Comportamiento de la producción de vapor sobrecalentado y el consumo de combustible respecto al rendimiento térmico (generador de vapor 6).

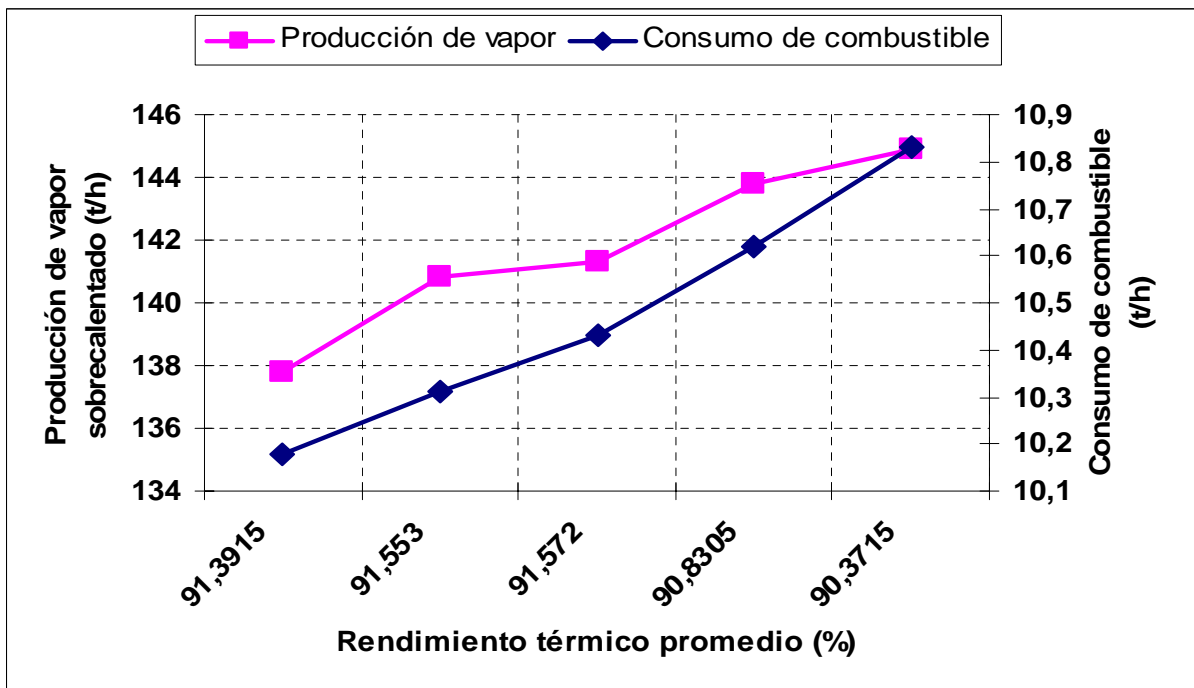


Figura 3.2. Comportamiento de la producción de vapor sobrecalentado y el consumo de combustible respecto al rendimiento térmico (generador de vapor 7).

En las figuras 3.3 y 3.4 reflejan el comportamiento de los rendimientos térmicos y exergéticos respecto al consumo de combustible, en ellas se observan algunos picos que para el Generador de vapor 6 coinciden con los máximos y mínimos valores de rendimientos térmicos y exergéticos, sin embargo en el Generador de vapor 7 no coincide, pero en general los comportamientos reflejan la dependencia existente entre los parámetros planteados, se destaca las dependencias notables existentes entre ambos rendimientos para un mismo valor de consumo de combustible, que pueden ser atribuidas a las diferencias de temperaturas existentes entre el agua de alimentación y los gases producto de la combustión, también esta determinado por la eficiencia de la combustión y la variabilidad de la temperatura de combustión. En general se puede afirmar que el Generador de vapor 6 tiene eficiencias exergéticas superiores que al Generador de vapor 7.

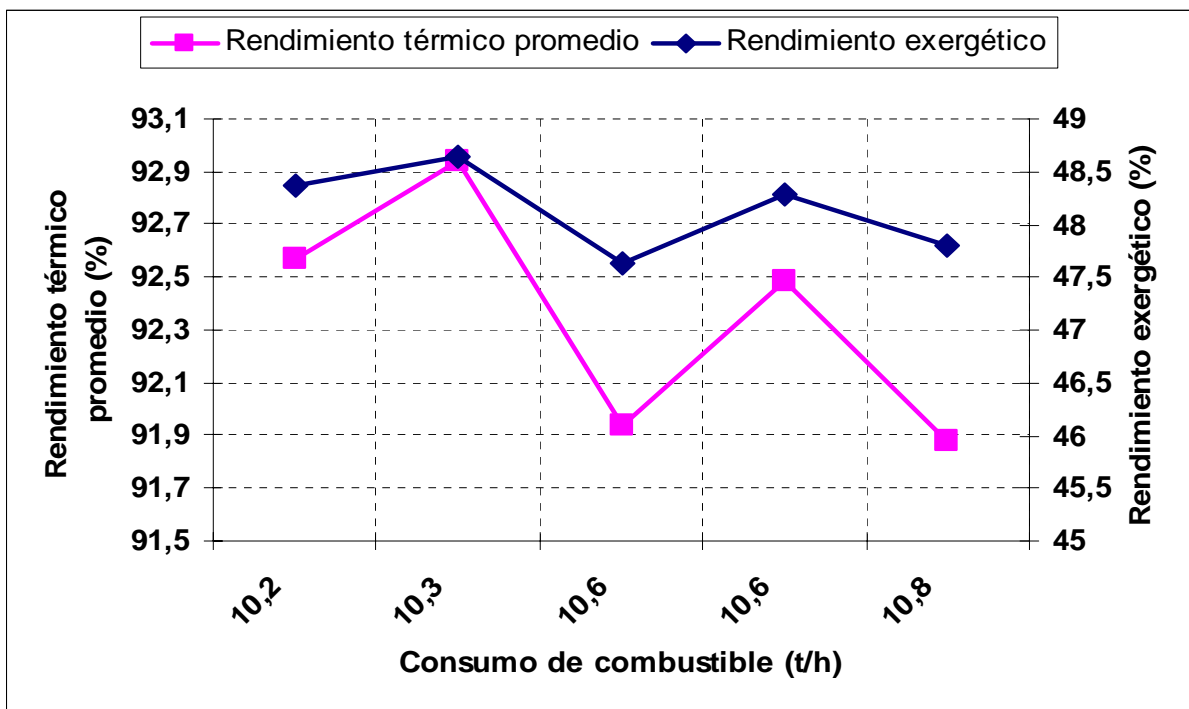
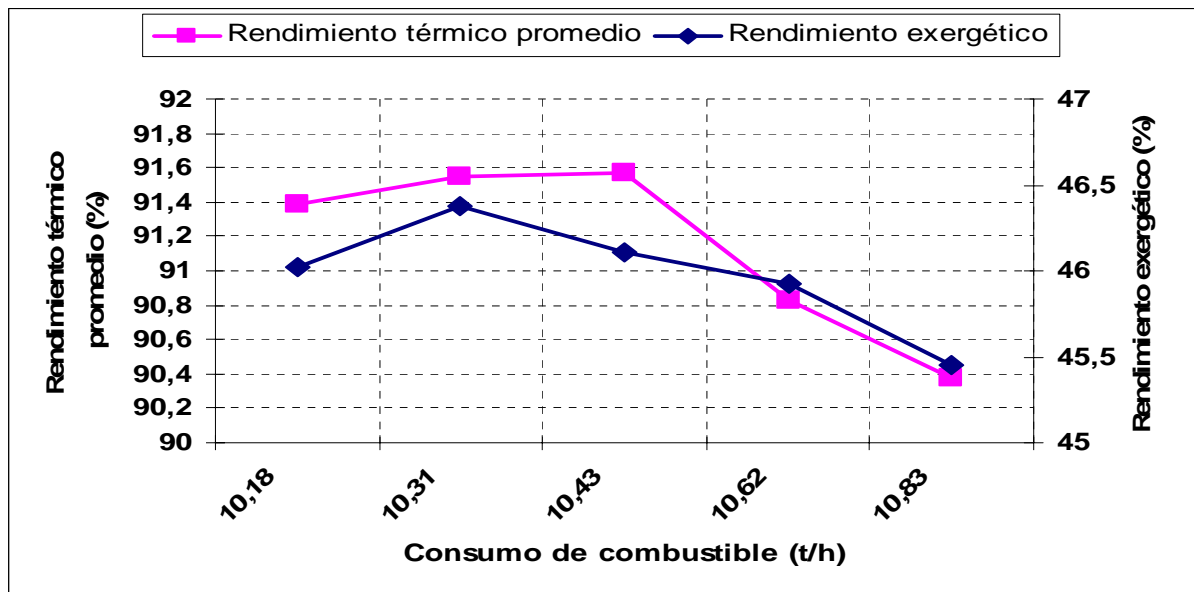


Figura 3.3. Comportamiento de los rendimientos térmico promedio y exergético respecto al consumo de combustible (generador de vapor 6).





**Figura 3.4.** Comportamiento de los rendimientos térmico promedio y exergético respecto al consumo de combustible (generador de vapor 7).

### 3.3- Valoración económica

Los valores expuestos en las tabla 3.1 muestran la valoración económica referida al consumo de combustible para las condiciones de explotación existente en el momento de las mediciones. El precio utilizado en el cálculo (273.17 USD/t) fue el reportado por el departamento de Economía energética de la empresa referido al mes de Mayo.

**Tabla 3.1.** Gasto económico por concepto de consumo de combustible horario para el generador de vapor 6.

Generador de vapor	Rendimiento del Generador de vapor (%)	Consumo de Combustible (t/h)	Precio del Combustible (USD/t)	Importe (USD/h)
GV-6: V-1	Rend. Prom actual = 92,571	10,2	273,17	2786,334
GV-6: V-2	Rend. Prom actual = 92,937	10,3	273,17	2813,651
GV-6: V-3	Rend. Prom actual = 91,934	10,6	273,17	2895,602
GV-6: V-4	Rend. Prom actual = 92,484	10,6	273,17	2895,602
GV-6: V-5	Rend. Prom actual = 91,881	10,8	273,17	2950,236
<b>Gasto horario por concepto de consumo de combustible</b>		<b>10,5</b>	<b>273,17</b>	<b>2868,285</b>

Como se aprecia en la Tabla 3.1 el gasto horario por concepto de consumo de combustible en el generador de vapor 6 asciende a **2868,285 USD**.

El gasto por concepto de consumo de combustible para los meses en que se desarrolló la investigación (Febrero-Mayo) se expone en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Gasto económico por concepto de consumo de combustible para el generador de vapor 6 en los cuatro meses analizados.

Generador de vapor	Rendimiento del Generador de vapor (%)	Consumo de Combustible (t/día)	Consumo de Combustible (t/4 meses)	Importe (USD)
<b>GV-6: V-1</b>	Rend. Prom actual = 92,571	244,8	29 376	8 024 641,92
<b>GV-6: V-2</b>	Rend. Prom actual = 92,937	247,2	29 664	8 103 314,88
<b>GV-6: V-3</b>	Rend. Prom actual = 91,934	254,4	30 528	8 339 333,76
<b>GV-6: V-4</b>	Rend. Prom actual = 92,484	254,4	30 528	8 339 333,76
<b>GV-6: V-5</b>	Rend. Prom actual = 91,881	259,2	31 104	8 496 679,68
<b>Gasto total por concepto de consumo de combustible</b>		<b>252</b>	<b>30240</b>	<b>8260660,8</b>

Para el generador de vapor 7 se realizaron cálculos análogos, los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 3.3 y 3.4.

**Tabla 3.3** Gasto económico por concepto de consumo de combustible horario para el generador de vapor 7.

Generador de vapor	Rendimiento del Generador de vapor (%)	Consumo de Combustible (t/h)	Precio del Combustible (USD/t)	Importe (USD/h)
<b>GV-7: V-1</b>	Rend. Prom actual = 91,392	10,18	273,17	2 780,8706
<b>GV-7: V-2</b>	Rend. Prom actual = 91,553	10,31	273,17	2 816,3827
<b>GV-7: V-3</b>	Rend. Prom actual = 91,572	10,43	273,17	2 849,1631
<b>GV-7: V-4</b>	Rend. Prom actual = 90,830	10,62	273,17	2 901,0654
<b>GV-7: V-5</b>	Rend. Prom actual = 90,371	10,83	273,17	2 958,4311
<b>Gasto horario por concepto de consumo de combustible</b>		<b>10,474</b>	<b>273,17</b>	<b>2861,1825</b>

El gasto horario por concepto de consumo de combustible en el generador de vapor 7 asciende a **2861,1825 USD** (Tabla 3.3). El gasto para los meses en que se desarrolló la investigación se expone en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4.** Gasto económico por concepto de consumo de combustible para el generador de vapor 7 en los cuatro meses analizados.

<b>Generador de vapor</b>	<b>Rendimiento del Generador de vapor (%)</b>	<b>Consumo de Combustible (t/día)</b>	<b>Consumo de Combustible (t/4 meses)</b>	<b>Importe (USD)</b>
<b>GV-7: V-1</b>	Rend. Prom actual = 91,392	244,32	29 318,4	8 008 907,33
<b>GV-7: V-2</b>	Rend. Prom actual = 91,553	247,44	29 692,8	8 111 182,18
<b>GV-7: V-3</b>	Rend. Prom actual = 91,572	250,32	30 038,4	8 205 589,73
<b>GV-7: V-4</b>	Rend. Prom actual = 90,830	254,88	30 585,6	8 355 068,35
<b>GV-7: V-5</b>	Rend. Prom actual = 90,371	259,92	31 190,4	8 520 281,57
<b>Gasto total por concepto de consumo de combustible</b>		<b>251,376</b>	<b>30165,12</b>	<b>8240205,83</b>

Al comparar los resultados del consumo horario de combustible obtenidos para ambos generadores se observa una ligera disminución en el generador 7 que asciende a 0,026 t/h lo cual genera un ahorro de **20454,9696 USD** en cuatro meses de trabajo, de estos resultados se infiere la importancia económica que tiene el ahorro del consumo de combustible en estas instalaciones.

Los gastos económicos obtenidos en este trabajo son superiores a los reportados por Hernández (2006), quien calculó los gastos asociados a la explotación de los generadores para las condiciones nominales, esto se debe al incremento en el consumo de combustible experimentado por estos equipos. De mantenerse esta situación no se podrá lograr un periodo de recuperación de la inversión de 5 años como fue previsto en el proyecto de modernización de la Central Termoeléctrica.

### **3.4- Generalidades de la contaminación ambiental en la generación de vapor**

En una caldera constituyen efluentes contaminantes: los gases producto de la combustión, las cenizas de parrilla y de ceniceros y las aguas de las extracciones de

fondo. Podría incluirse también como elementos alteradores del medio el ruido y el calor.

Las cenizas, tanto de parrilla como de ceniceros, pueden utilizarse como materia prima de diferentes procesos, dándoles así un empleo útil. Las sales de las agua de las extracciones de fondo, siempre que se manipulen adecuadamente, no constituyen un elemento contaminante; pero los gases producto de la combustión sí constituyen elementos altamente contaminantes y es esta la razón por la que este estudio se centrará en ellos.

### 3.4.1. Principales fuentes de contaminación

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

- **Oxidos 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.

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 (gas incoloro e inodoro) 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.

- **Oxidos 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.

Los  $\text{NO}_x$  formados por la oxidación – a altas temperaturas- del nitrógeno del aire, reciben el nombre de  $\text{NO}_x$  térmicos: La temperatura a partir de la cual se intensifica la oxidación del nitrógeno es de 1 200 °C. Los  $\text{NO}_x$  formados a través de reacciones químicas del nitrógeno presente en el combustible, durante el proceso de quemado de este, reciben el nombre de  $\text{NO}_x$  del combustible. En general, la formación de  $\text{NO}_x$  se ve favorecida por las medidas adoptadas para favorecer la combustión, por ello, su control conlleva un compromiso entre los factores que incrementan la eficiencia de la combustión y los que reducen la formación de  $\text{NO}_x$ .

- **Particulados**

El término particulado incluye un conjunto de materias orgánicas e inorgánicas que, en forma sólida o líquida, acompañan a los gases formando una suspensión. El tamaño de estas partículas está en el rango de 1 a 100  $\mu$  aunque pueden encontrarse también partículas menores.

La magnitud de la emisión de particulados depende del modo de combustión, de la aerodinámica de la instalación y de la existencia o no de sistemas de limpieza de gases.

**Las principales afectaciones que causan son:**

- Alteraciones de la capacidad respiratoria 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.

La emisión total de particulados en Estados Unidos está en el orden de los 8 millones de toneladas anuales, pero las calderas solo contribuyen con un 11 % del total.

- **Compuestos orgánicos volátiles**

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

La emisión de COV en países como Estados Unidos está en el orden de los 22 millones de toneladas anuales, pero las calderas solo participan en menos de un 1 %.

### 3.4.2. Regulaciones sobre emisiones contaminantes

Las regulaciones sobre las emisiones contaminantes son distintas en cada país y en ocasiones dentro de un mismo país las hay diferentes por regiones.

Por otro lado, hay países que tienen regulaciones mínimas y en algunos aún no existen. El grado de restricción que se imponga mediante las regulaciones toma en cuenta varios factores, entre otros: el deterioro ambiental existente, las condiciones poblacionales, el hecho de que se trate de una instalación ya existente o que sea nueva, el tipo de combustible, el modo de combustión y los compromisos internacionales del país.

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

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

Existen regulaciones establecidas para diferentes países. En el caso de Cuba la regulación de las emisiones está establecida en la NC 93-02-202: 87, en la que se dan los límites, abajo apuntados, para máxima concentración admisible (CMA), como promedio diario, a la altura de la chimenea.

<b>Sustancias</b>	<b>CMA</b>
<b>Contaminantes</b>	<b>Promedio diario (mg/m<sup>3</sup>)</b>
Sulfuro de carbono	0,03
Monóxido de carbono	3,00
Oxidos de nitrógeno	0,04
Ozono	0,03
Sulfuro de hidrógeno	0,008

Dióxido de azufre	0,05
Hollín	0,05

### 3.4.3- Métodos de reducción de las emisiones contaminantes

La selección de las vías para la reducción de las emisiones contaminantes toma en cuenta diferentes factores, tales como:

- La naturaleza de la emisión contaminante y su magnitud.
- Las exigencias impuestas por las regulaciones existentes.
- El rendimiento de las diferentes tecnologías disponibles para ser aplicadas, así como su demanda de productos químicos y energía.
- Los costos inversionistas, de operación y mantenimiento.

Las diferentes tecnologías con que se cuenta en la actualidad se relacionan seguidamente:

- **Reducción del SO<sub>2</sub>**

- Scrubber húmedo: Lavado de los gases con spays de agua y participación de otras sustancias (cal, soda ash, óxido de magnesio, etc.).
- Scrubber seco: los gases son rociados con una solución acuosa de cal apagada para eliminar el SO<sub>2</sub>. El agua está en una cantidad tal que se evapora toda en el equipo
- Lecho fluidizado: Empleo de inertes absorbentes del azufre en el lecho.
- Inyección neumática del horno: El horno es inyectado neumáticamente con sustancias tales como cal, dolomita o cal hidratada.

- **Reducción del CO**

Las técnicas para la reducción del CO son propiamente todas las desarrolladas para lograr una combustión eficiente y ya han sido tratadas anteriormente.

- **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. Otra técnica se basa en el mezclado previo del gas y el aire.

- 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  $\text{NO}_x$ .

- Inyección de agentes químicos.

La reducción de los  $\text{NO}_x$  a  $\text{N}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , puede conseguirse inyectando amoníaco o urea 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.

En este caso, 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.

Los colectores, mecánicos basan su principio de trabajo para separar las partículas de la corriente de gases, en los cambios bruscos de la dirección de dicha corriente. Los tipos más conocidos son los llamados ciclones.

- Scrubber húmedo.

Estos dispositivos son similares a los utilizados para captar el  $\text{SO}_2$ .

La contaminación ambiental que provocan los generadores de vapor, junto con la producida por el transporte, constituye una de las afectaciones ecológicas más graves que provoca el hombre, por lo que debe ser enfrentada con alta responsabilidad, tanto durante el diseño como durante la explotación de estos equipos.

### **3.5- Particularidades del 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 de la empresa Ernesto Che Guevara 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 ( $V_2O_5$ ).
- Dióxido de azufre ( $SO_2$ ).

### **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.

### **3.6- Conclusiones del capítulo III**

- Los gastos por concepto de consumo de combustible en el periodo analizado ascienden a 8260660,8 y 8240205,83 USD para los generadores de vapor 6 y 7 respectivamente, los mismos son superiores a las normas establecidas en el proyecto de modernización de la Central Termoeléctrica.
- Los principales agentes contaminantes presentes en los generadores de vapor de la Empresa Ernesto Che Guevara son los óxidos de azufre, monóxido de carbono, óxidos nitrosos, particulados y compuestos orgánicos volátiles.

## CONCLUSIONES GENERALES

---

- Se comprobó que los generadores de vapor tienen un alto grado de automatización y la existencia de tres estudios relacionados con los generadores de vapor estudiados, de ellos solo dos fueron desarrollados para las condiciones de explotación existentes en la Central Termoeléctrica de la empresa analizada.
- Los rendimientos térmicos promedios calculados por ambos métodos fueron 92,50% y 92,36% para el generador de vapor 6 y para el generador 7 se obtuvieron 90,03% y 92,25%. Los rendimientos exergéticos ascendieron a 48,14%, y 45,97%, siendo por consiguiente las pérdidas de exergía de 51,86% y 54,03% para las calderas analizadas.
- Las diferencias obtenidas entre los rendimientos térmicos promedios y los rendimientos exergéticos fueron de 44,29% y 45,16% para los generadores de vapor 6 y 7 respectivamente. El consumo de combustible medido en la instalación difiere del calculado en 85,68 kg/h y 253,27 kg/h para los generadores analizados.
- Los gastos por concepto de consumo de combustible en el periodo analizado ascienden a 8260660,8 USD y 8240205,83 USD, los mismos son superiores a las normas establecidas por los fabricantes de las calderas para el proyecto de modernización de la Central Termoeléctrica.
- Los principales agentes contaminantes presentes en los generadores de vapor de la Empresa Ernesto Che Guevara son los óxidos de azufre, monóxido de carbono, óxidos nitrosos, particulados y compuestos orgánicos volátiles, pero 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.



## RECOMENDACIONES

---

- Trabajar en la disminución del consumo de energía de los equipos agregados a los generadores de vapor para aumentar las eficiencias de los referidos equipos y el rendimiento neto de los generadores.
- Impartir curso de capacitación y posgrado a los operarios y tecnólogos de los generadores de vapor con la finalidad de potenciar los conocimientos que tienen sobre estos equipos e incorporarles nuevos enfoques referidos a la eficiencia energética.
- Elaborar un software que permita la evaluación térmica y exergética en tiempo real de los generadores de vapor analizados y de los restantes existentes en el municipio.



## 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*. 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. Del Valle, R. *Balance energético verificativo de la planta eléctrica de la empresa René Ramos Latour*. Trabajo de Diploma. ISMM 2002. 64 p.
6. Fadel. A. *Diagnóstico energético de los generadores de vapor de la empresa Ernesto Che Guevara*. Trabajo de Diploma. ISMM 2008. 51 p
7. Faires, V. *Termodinámica*. La Habana: Edición Revolucionaria, 1991. 807p.
8. Fernández, E. *Termodinámica Técnica*. La Habana: Editorial "Félix Varela, 1994. Tomo I. 290 p.
9. Fernández, E. *Utilización del vapor en la industria*. Editorial Científico-Técnica. La Habana, 2001. 138 p.
10. *Ficha Técnica de los Generadores de Vapor 6 y 7. Proyecto de Modernización de la Central Termoeléctrica*. Moa, 2004. 25 p.
11. 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.
12. 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.
13. 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.



14. Lahenz, V. *Calculo de la eficiencia en los generadores de vapor. Trabajo de Diploma*. ISMM 2001. 56 p.
15. *Manual de operaciones de la Central Termoeléctrica Empresa "Ernesto Che Guevara"*. Moa, 2005.
16. *Manual de operaciones de la Central Termoeléctrica Empresa "Pedro Sotro Alba"*. Moa, 2006.
17. 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.
18. Muhica, J. *Evaluación termoeconómica del ciclo de la central termoeléctrica de la empresa Ernesto Guevara*. Trabajo de Diploma. ISMM, 2001. 62 p.
19. Oliva, R. Luis. *Explotación y materiales constructivos de generadores de vapor*. Ediciones ISPJAM. Santiago de Cuba. 1988. 320 p.
20. Pankratov. G. *Problemas de termotecnia*. Editorial MIR Moscú. URSS, 1987. 235 p.
21. Pereira, M. *Balance de energía de la caldera del comedor del ISMM*. Proyecto de curso. 2001. 33 p.
22. Pérez, Garay. L.: *Generadores de Vapor*. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana. 1972. 447 p.
23. *Proyecto de Modernización de la Central Termoeléctrica*. Moa, 2005. 50 p.
24. 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.
25. Rizhkin, Y. V. *Centrales termoeléctricas. Primera y segunda parte*. Editorial pueblo y educación. Ciudad de La Habana. 1987. 370 p.
26. Rodríguez, Y. *Análisis del petróleo crudo nacional empleado en la empresa Ernesto Guevara*. Trabajo de Diploma. ISMM, 2001. 57 p.
27. 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.





28. 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.
29. Tanquero, N. *Guía metodológica para proyectos del curso de generadores de vapor*. Editorial ISPJAE. La Habana. Cuba. 1997. 120 p.
30. Tuzón, E. Diagnóstico energético del generador de vapor 1 de la empresa Ernesto Che Guevara. Proyecto de Curso. ISMM. 2005. 30 p.
31. Vukalovitch, M. *Propiedades Termodinámicas del agua y el vapor*. Editorial. Revolucionaria 1978. 245 p.

## ANEXO 1: BALANCE TÉRMICO DE LOS GENERADORES DE VAPOR ESTUDIADOS

### GENERADOR DE VAPOR 6 VARIANTE 1 EMPRESA ERNESTO CHE GUEVARA

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

Todos los elementos en masa de trabajo

$$C := 81 \quad H := 13.5 \quad O := 0.7 \quad S := 2.6 \quad W := 1.8$$

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

$$Q_b = 4.153 \times 10^7 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

Volumen de aire teórico  $V_a$

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

$$V_a = 10.842 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

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

$$V_{RO2} = 1.53 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

$$N := 0.5 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

$$V_{N2} = 8.569 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

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

$$V_{gs} = 10.099 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

### Volumen teórico de los vapores de agua $V_{H2O}$

$$V_{H2O} := (0.111 \cdot H + 0.0124 \cdot W) \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} + 0.0161 \cdot V_a$$

$$V_{H2O} = 1.695 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

$$V_{og} := V_{gs} + V_{H2O}$$

$$V_{og} = 11.794 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

$$CO_2 := 13.55 \quad O_2 := 2.62 \quad CO := 0.9 \quad H_2 := 0 \quad CH_4 := 0$$

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

$$N_2 = 82.93$$

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

$$\alpha = 1.109$$

### Volumen real de aire $V_a$ real

$$V_{a\text{real}} := V_a \cdot \alpha$$

$$V_{a\text{real}} = 12.025 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

### Volumen real de gases $V_g$

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

$$V_g = 13.106 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

Entalpía teórica de los gases  $I_{go}$  Calculado para  $T_{ge}=199.2$  °C

$$I_{RO2} := 356.04 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3} \quad I_{N2} := 258.95 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3} \quad I_{H2O} := 303.15 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3}$$

$$I_{cen} := 168.43 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad A := 0.02 \quad A_{arr} := 0.6$$

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

$$I_{go} = 3.278 \times 10^6 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

### Entalpía real de los gases para $I_g$ (J/kg)

El calor específico del aire  $C_{af}$  se expresa en  $\text{kJ/m}^3$  °C

La temperatura del aire se expresa en °C

$$C_{af} := 1.3188 \quad t_{aire} := 32 \quad f_{conversión1} := 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3}$$

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

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

$$I_{ge} = 3.333 \times 10^6 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

### Balance térmico por el método Directo

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

$$D_{vsc} := 146.7 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \quad I_{vsc} := 790.36 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad I_{aa} := 145.01 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

$$Q_{\text{útil}} = 3.963 \times 10^{11} \frac{\text{joule}}{\text{hr}}$$

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

$$B := 10.2 \times 10^3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

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

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

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

$$t_c := 122 \quad f_{\text{conversión}} := 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$C_c := 1.74 + 0.0025 \cdot t_c \quad C_c = 2.045$$

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

$$Q_{\text{fc}} = 2.495 \times 10^5 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

$$I_v := 680.33 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad I_{\text{ve}} := 600 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad D_{\text{vatm}} := 1165 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

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

$$D_{\text{atm}} := \frac{D_{\text{vatm}} \cdot \text{kg}}{B}$$

$$Q_{\text{atm}} = 3.841 \times 10^4 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

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

$$Q_d = 4.182 \times 10^7 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

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

$$N_{gvMD} = 92.921$$

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

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

$$t_{af} := 32 \quad c_{paf} := 1.3199 \quad f_{conversión1} := 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3}$$

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

$$I_{af} = 5.079 \times 10^5 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$q_2 := \frac{(I_{ge} - \alpha \cdot I_{af}) \cdot (100 - q_4)}{Q_d} \quad q_2 = 6.623$$

**Pérdida de calor por incombustión química (q3)**

$$V_{gs} = 10.099 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad f_{\text{conversión}} := 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3}$$

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

$$q_3 = 0.656$$

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

$$q_5 := 0.5 \quad \text{Para generadores de vapor de D mayor de 100 t/h (Pérez, 1972)}$$

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

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

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

$$N_{gvMI} = 92.22$$

**Cálculo del consumo de combustible utilizando el rendimiento obtenido por el método indirecto**

$$B_c := \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_d \cdot N_{gvMI}} \cdot 100$$

$$B_c = 1.028 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \quad \Delta B := |B - B_c| \quad \Delta B = 77.535 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

Diferencia entre los valores de rendimiento calculados por los dos métodos

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

$$\Delta\eta_{DI} = 0.701$$

## BALANCE EXERGÉTICO DE LOS GENERADORES DE VAPOR

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

Exergía del agua (J/s)

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

$$h_{agua} = 6.071 \times 10^5 \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad h_{0a} := 32.02 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$S_{agua} := 0.4224 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad S_{0a} := 0.1108 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

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

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

$$Ex_{agua} = 3.058 \times 10^6 \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

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

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

$$m_{combustible} := B$$



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

$$\mathbf{Ex_{combustible}} = 9.798 \times 10^7 \frac{\mathbf{joule}}{\mathbf{sec}}$$

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

#### Exergía del vapor

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

$$\mathbf{h_{vapor}} = 3.309 \times 10^6 \frac{\mathbf{joule}}{\mathbf{kg}} \quad \mathbf{h_{0v}} := 32 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\mathbf{joule}}{\mathbf{kg}}$$

$$\mathbf{S_{vapor}} := 1.6509 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\mathbf{joule}}{\mathbf{kg \cdot K}} \quad \mathbf{S_{0v}} := 0.1050 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\mathbf{joule}}{\mathbf{kg \cdot K}}$$

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

$$\mathbf{Ex_{vapor}} = 4.886 \times 10^7 \frac{\mathbf{joule}}{\mathbf{sec}}$$

### Determinación de la rendimiento exergético (%)

#### Exergía empleada (J/s)

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

$$\mathbf{Ex_{empleada}} = 1.01 \times 10^8 \frac{\mathbf{joule}}{\mathbf{sec}}$$

#### Exergía recuperada (kJ/s)

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

$$\mathbf{Ex_{recuperada}} = 4.886 \times 10^7 \frac{\mathbf{joule}}{\mathbf{sec}}$$

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

$$\eta_{\text{Ex}} = 48.36$$

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

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

$$\gamma = 51.64$$

**Promedio entre los rendimientos térmicos (%)**

$$\text{N}_{\text{gvP}} := \frac{(\text{N}_{\text{gvMD}} + \text{N}_{\text{gvMI}})}{2}$$

$$\text{N}_{\text{gvP}} = 92.571$$

**Diferencia entre el rendimiento térmico promedio y el rendimiento exergético (%)**

$$\Delta\eta_{\text{TE}} := |\text{N}_{\text{gvP}} - \eta_{\text{Ex}}|$$

$$\Delta\eta_{\text{TE}} = 44.211$$

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

### GENERADOR DE VAPOR 6 VARIANTE 1 EMPRESA ERNESTO CHE GUEVARA

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

Todos los elementos en masa de trabajo

$$C := 81 \quad H := 13.5 \quad O := 0.7 \quad S := 2.6 \quad W := 1.8$$

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

$$Q_b = 4.153 \times 10^7 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

Volumen de aire teórico  $V_a$

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

$$V_a = 10.842 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

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

$$V_{RO2} = 1.53 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

$$N := 0.5 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

$$V_{N2} = 8.569 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

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

$$V_{gs} = 10.099 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

### Volumen teórico de los vapores de agua $V_{H2O}$

$$V_{H2O} := (0.111 \cdot H + 0.0124 \cdot W) \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} + 0.0161 \cdot V_a$$

$$V_{H2O} = 1.695 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

$$V_{og} := V_{gs} + V_{H2O}$$

$$V_{og} = 11.794 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

$$CO_2 := 13.89 \quad O_2 := 2.68 \quad CO := 1.0 \quad H_2 := 0 \quad CH_4 := 0$$

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

$$N_2 = 82.43$$

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

$$\alpha = 1.11$$

### Volumen real de aire $V_{a,real}$

$$V_{a,real} := V_a \cdot \alpha \quad V_{a,real} = 12.039 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

### Volumen real de gases $V_g$

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

$$V_g = 13.123 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

Entalpía teórica de los gases I<sub>go</sub> Calculado para T<sub>ge</sub>=198.5 °C

$$I_{RO2} := 354.73 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3} \quad I_{N2} := 258.04 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3} \quad I_{H2O} := 302.07 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3}$$

$$I_{cen} := 167.81 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad A := 0.02 \quad A_{arr} := 0.6$$

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

$$I_{go} = 3.266 \times 10^6 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

### 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

$$C_{af} := 1.3188 \quad t_{aire} := 32 \quad f_{conversión1} := 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3}$$

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

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

$$I_{ge} = 3.322 \times 10^6 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

### Balance térmico por el método Directo

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

$$D_{vsc} := 137.8 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \quad I_{vsc} := 790.35 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad I_{aa} := 121.21 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

$$Q_{\text{útil}} = 3.86 \times 10^{11} \frac{\text{joule}}{\text{hr}}$$

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

$$B := 10.18 \times 10^3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

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

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

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

$$t_c := 122 \quad f_{\text{conversión}} := 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$C_c := 1.74 + 0.0025 \cdot t_c \quad C_c = 2.045$$

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

$$Q_{\text{fc}} = 2.495 \times 10^5 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

$$I_v := 741.37 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad I_{ve} := 600 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad D_{\text{vatm}} := 1287 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

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

$$D_{\text{atm}} := \frac{D_{\text{vatm}} \cdot \text{kg}}{B \cdot \text{kg}}$$

$$Q_{\text{atm}} = 7.482 \times 10^4 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

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

$$Q_d = 4.185 \times 10^7 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

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

$$N_{gvMD} = 90.6$$

### 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 ( $\text{kJ}/\text{m}^3 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ )

$$t_{af} := 32 \quad c_{paf} := 1.3199 \quad f_{\text{conversión1}} := 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3}$$

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

$$I_{af} = 5.085 \times 10^5 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$q_2 := \frac{(I_{ge} - \alpha \cdot I_{af}) \cdot (100 - q_4)}{Q_d} \quad q_2 = 6.588$$

**Pérdida de calor por incombustión química (q3)**

$$V_{gs} = 10.099 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad f_{\text{conversión}} := 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3}$$

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

$$q_3 = 0.729$$

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

$$q_5 := 0.5 \quad \text{Para generadores de vapor de D mayor de 100 t/h (Pérez, 1972)}$$

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

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

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

$$N_{gvMI} = 92.183$$

**Cálculo del consumo de combustible utilizando el rendimiento obtenido por el método indirecto**

$$B_c := \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_d \cdot N_{gvMI}} \cdot 100 \quad B_c = 1.001 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \quad \Delta B := |B - B_c| \quad \Delta B = 174.759 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

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

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

$$\Delta \eta_{DI} = 1.582$$



## BALANCE EXERGÉTICO DE LOS GENERADORES DE VAPOR

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

Exergía del agua (J/s)

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

$$h_{\text{agua}} = 5.074 \times 10^5 \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad h_{0\text{a}} := 32.02 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

$$S_{\text{agua}} := 0.3637 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad S_{0\text{a}} := 0.1108 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

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

$$Ex_{\text{agua}} = 1.927 \times 10^6 \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

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

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

$$m_{\text{combustible}} := B$$

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

$$Ex_{\text{combustible}} = 9.778 \times 10^7 \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

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

#### Exergía del vapor

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

$$h_{\text{vapor}} = 3.309 \times 10^6 \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad h_{0\text{v}} := 32 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$S_{\text{vapor}} := 1.6512 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad S_{0\text{v}} := 0.1050 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

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

$$Ex_{\text{vapor}} = 4.588 \times 10^7 \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

### Determinación de la rendimient exergético (%)

#### Exergía empleada (J/s)

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

$$Ex_{\text{empleada}} = 9.971 \times 10^7 \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

#### Exergía recuperada (kJ/s)

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

$$Ex_{\text{recuperada}} = 4.588 \times 10^7 \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

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

$$\eta_{Ex} = 46.012$$

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

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

$$\gamma = 53.988$$

**Promedio entre los rendimientos térmicos (%)**

$$N_{\text{gvP}} := \frac{(N_{\text{gvMD}} + N_{\text{gvMI}})}{2}$$

$$N_{\text{gvP}} = 91.392$$

**Diferencia entre el rendimiento térmico promedio y el rendimiento exergético (%)**

$$\Delta\eta_{\text{TE}} := |N_{\text{gvP}} - \eta_{\text{Ex}}|$$

$$\Delta\eta_{\text{TE}} = 45.38$$