



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA.

Trabajo de Diploma

EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Título: Evaluación térmica y exergética de los generadores de vapor de la empresa Pedro Sotto Alba.

Autor: Leonid Rodríguez De Armas.

Tutor: M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja.

Moa - 2008

“Año 50 de la Revolución”



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Leonid Rodríguez de Armas, autor de este trabajo de diploma y el tutor M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja, declaramos la propiedad intelectual de este al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

Leonid Rodríguez de Armas

M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja



PENSAMIENTO

“Todos poseemos más poderes de los que hemos soñado tener. Podemos hacer cosas que nunca imaginamos llegar a realizar. No existen limitaciones excepto las que tenemos en nuestras mentes que nos impiden hacerla. No piense que usted no puede. Piense que sí puede”.

Darwin Kingsley



AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a la revolución y a su líder Fidel Castro, a mi tutor M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja, que me atendió amablemente cada vez que lo necesité.

A: Rolando Ramos Calvo y Laidis Febles por su apoyo incondicional.

A: Federico Díaz Vegas por aguantar mis apuros durante 5 años.

A: Mi cuñado Rolandito.

A: La que más pelea en Cuba Magalis Batista.

A: Mi tía Emilia por preocuparse por mí durante 5 años.

A: Vivian Hernández Lovaina y Maida Hernández.

A: Mi tía Inalvis que sepa que la quiero mucho.

A: Wilder, Irma, Jany, Yusi, Aristonides, Leidis.

A: Todos los profesores que desde 1ro a 5to aportaron lo mejor de sí para obtener mejores profesionales.

A: Los mencionados hoy y a quienes imperdonablemente he olvidado vaya mi agradecimiento desde lo más profundo de mi corazón.

A todos "Muchas Gracias"

Leonid



DEDICATORIA

Cuando se cumple una meta y se desea compartir un momento de alegría se deben tener presente aquellos que con su amor y dedicación contribuyeron a la realización de esta. En forma de agradecimiento y en virtud del bello esfuerzo que estas personas realizaron en aras de mi bienestar, dedico este sueño:

A: Mis padres Ricardo Rodríguez Lambert y Maritza de Armas Casa por quererme y estar siempre conmigo.

A: Mi querido hermano Ricardo Rodríguez de Armas.

A: Mi novia Dailin Ramos Febles.

A: Mis queridas tías Inalvis, Idania, Romelia y Maria Ester.

A: Mis Grandes tíos que son ejemplo para mi: Tony, Paulino y Guzmán.

A: Mis primos: Dennis, Kolian, Erlis, Onel, Egnar, Alexander, Arioknis, Weyler, Adrian, Tom, Carlos Alberto, Deivi, Liuba, Yennis y Arianna.

A: La familia Rodríguez.

A: Mis Abuelos.

A: Los mencionados hoy y a quienes imperdonablemente he olvidado vaya mi dedicatoria desde lo más profundo de mi corazón.

A todos "Les dedico este éxito"

Leonid

RESUMEN

En la Central Termoeléctrica de la empresa Pedro Sotro Alba se explotan 4 generadores de vapor los cuales son los encargados de suministrar una parte del vapor necesario para la producción de níquel. Estos equipos en la actualidad presentan un elevado consumo de combustible. En el presente trabajo se realizó el diagnóstico térmico y exergético de los mismos, a partir de la aplicación de los métodos establecidos en la literatura especializada.

La conjugación de diversos aspectos metodológicos permitió obtener el rendimiento térmico promedio calculado por los métodos directos e indirectos los cuales fueron 89,92; 86,91; 86,68 y 92,31% para los generadores de vapor 1, 2, 3 y 5 respectivamente. Los rendimientos exergéticos fueron 87,52; 84,86; 85,72 y 89,79%.

Se comprobó que en el periodo en que se desarrolló la investigación (Enero–Mayo) los generadores de vapor consumieron 1 161 940 toneladas de combustible lo que representa un gasto de 75 140 160 USD por concepto de consumo de combustible. Siendo las emisiones continuas de gases contaminantes la afectación medioambiental más significativa.

ABSTRACT

In the Thermoelectric Power station of the company Pedro Sotillo Alba four steam generators are being exploited which are charged to supply part of the necessary steam for the nickel production. In the actual condition of exploitation these boilers present a high consumption of fuel. In the present work was carried out the thermal and exergetic diagnosis of these generators, using the application of the methods settled down in the specialized bibliography.

The conjugation of various methodological aspects allow to obtain the average thermal efficiency using the direct and indirect methods which were 89,92; 86,91; 86,68 and 92,31% for the boiler 1, 2, 3 and 5 respectively. The exergetic efficiency were 87,52; 84,86; 85,72 and 89.79%.

We find that in the period of the investigation (January-May) the steam generators consumed 1 161 940 tons of fuel what represents an expense of 75 140 160 USD for concept of consumption of fuel. According to the investigation the emissions continue of polluting gases represent the most significant environmental affectation.



ÍNDICE

Contenido	Págs.
Introducción.....	1
Capítulo I Marco teórico- metodológico de la investigación.....	4
1.1- Introducción.....	4
1.2- Estado del arte sobre los generadores de vapor	4
1.3- Trabajos precedentes	6
1.4- Descripción de la Central Termoeléctrica.....	10
1.5- Descripción de los generadores de	11
1.6- Sistema de automatización.....	20
1.7- Conclusiones del capítulo I.....	23
Capítulo II Diagnóstico térmico y exergético de los generadores de vapor de la empresa Ernesto Pedro Sotto Alba.....	24
2.1- Introducción.....	24
2.2- Materiales empleados en la medición de los parámetros	24
2.3- Procedimiento de cálculo para el balance térmico y exergético	24
2.4- Mediciones promedio obtenidas en cada generador de vapor.....	33
2.5- Balance térmico y exergético de los generadores de vapor	34
2.6- Conclusiones del capítulo II.....	36
Capítulo III Análisis de los resultados, valoración económica e impacto ambiental de la investigación.....	37
3.1- Introducción.....	37
3.2- Análisis de los resultados de la investigación	37
3.3- Valoración económica.....	40
3.4- Impacto ambiental de los generadores de vapor.....	40
3.5- Conclusiones del Capítulo III.....	43
Conclusiones.....	44
Recomendaciones.....	45
Bibliografía.....	46
Anexos.	---

INTRODUCCIÓN

La industria cubana del níquel juega un papel importante dentro de la economía nacional, es por ello que el incremento de la eficiencia de la Central Termoeléctrica (CTE) en la empresa Pedro Sotillo Alba incide considerablemente en la reducción de los costos y las emisiones de gases contaminantes al medio ambiente.

La obtención de concentrado de níquel más cobalto con tecnología de lixiviación ácida a presión está presente en la empresa Moa Nickel S.A. Con los índices de producción más altos de la historia.

La empresa "Pedro Sotillo Alba, la segunda fábrica productora de níquel construida en la provincia de Holguín, comienza su explotación a mediana capacidad en Octubre de 1959 por la compañía Moa Bay Mini Company. En diciembre del año 1994 se firma el convenio con una compañía canadiense. En la actualidad cuenta con una instalación de generación de vapor con una caldera de procedencia mexicana y tres originales americanas, modernizadas por una firma canadiense.

Esta empresa está inmersa en un proceso de expansión para aumentar su capacidad de producción. Su esquema tecnológico está basado en el proceso de lixiviación ácida a presión, donde se evidencian las siguientes plantas de proceso: Mina, Pulpa, Espesadores, Lixiviación, Lavado, Neutralización, Sulfuro; y auxiliares: Termoeléctrica, Tratamiento de agua, Preparación de pulpa de Coral, Producción de ácido, Producción de Hidrógeno y Sulfuro de Hidrógeno, Secado de Sulfuro y planta de Derretimiento de azufre.

A pesar de la importancia que revisten todas las plantas que forman la fábrica, la Central Termoeléctrica juega un rol fundamental dentro de estas porque además de generar energía eléctrica, produce vapor. Teniendo así dos funciones de gran importancia para la producción de níquel.

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

Fundamento de la investigación

La CTE de las empresas niquelíferas de Moa fueron diseñadas para garantizar la energía calorífica, agua suavizada, CO₂ y parte de la energía eléctrica que se necesita para la obtención de Ni+Co.

Una forma eficaz de obtener grandes ahorros de combustibles y una disminución considerable de los costos de la libra de Ni+Co es potenciar la cogeneración aprovechando las posibilidades energéticas de cada una de ellas. Para esto es necesaria la explotación racional de los generadores de vapor que posibilite el aumento de la eficiencia térmica y exergética, el incremento de la disponibilidad y fiabilidad de las calderas y el uso confiable de los combustibles. Para esto se hace necesario utilizar modernas instalaciones productoras de vapor que permitan el aprovechamiento racional de la energía que se libera en la combustión del fuel oil y el correcto funcionamiento de las máquinas dinámicas presentes en esta instalación.

Los generadores de vapor acuotubulares son muy utilizados en las industrias de procesos, pues estos constituyen el corazón de la industria moderna, (Pérez, 1972).

En la CTE de la empresa Pedro Sotto Alba se explotan 4 generadores de vapor los cuales son los encargados de suministrar gran parte del vapor necesario para la producción de níquel. Estos equipos presentan un elevado consumo de combustible marcado por su propio principio de funcionamiento, en todos los casos se ha podido comprobar según las investigaciones precedentes (Suárez, 2005; Hernández, 2006, Caballero y González., 2007) que el consumo es superior a las 6 t/h esta situación a propiciado que estos equipos sean considerados como puestos clave para el ahorro de combustible a nivel nacional por el elevado costo de la tonelada de petróleo en la actualidad. Por estas razones se hace necesario tener el control periódico de la eficiencia térmica y exergética de los generadores de vapor.

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

No se conocen las eficiencias térmica y exergética de los generadores de vapor de la empresa Pedro Sotto Alba, ni la incidencia económica que tienen en el consumo de combustible de la entidad en las condiciones actuales de explotación.

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

Los generadores de vapor de la empresa Pedro Sotto Alba.

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

Si se realiza un diagnóstico termoeenergético de los generadores de vapor estudiados, basado en los parámetros actuales que caracterizan a estas instalaciones entonces es posible determinar las eficiencias térmicas y exergéticas de las mismas y la incidencia económica que tienen en el consumo de combustible de la empresa.

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

Determinar las eficiencias térmicas y exergéticas de los generadores de vapor objeto de estudio y su incidencia en el consumo de combustible de la empresa Pedro Sotto Alba.

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

1. Establecer el estado del arte y la situación actual del proceso a partir del análisis bibliográfico realizado.
2. Adecuar al objeto de estudio el procedimiento de cálculo establecido para el balance térmico de los generadores de vapor.
3. Obtener las eficiencias térmicas y exergéticas de los generadores de vapor estudiados para los valores promedio de los parámetros.
4. Establecer los gráficos de comportamiento que reflejan la interdependencia existente entre los diferentes parámetros de la instalación.
5. Comparar los resultados obtenidos para cada generador de vapor y analizar a que se deben las diferencias.
6. Valorar el impacto económico y medio ambiental de los generadores de vapor estudiados.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO- METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1- Introducción

Las Centrales Eléctricas son instalaciones energéticas que sirven para transformar la energía química de los combustibles en energía eléctrica. Las más difundidas han sido las Centrales Termoeléctricas en las cuales se produce potencia a partir de la utilización del vapor como agente transportador de energía, en estas plantas los generadores de vapor constituyen los equipos fundamentales ya que determinan la eficiencia energética de la misma, la descripción precisa de estos equipos constituye un aspecto importante cuando suministran de modo continuo el vapor requerido por la Turbina, de acuerdo con la carga de la planta en condiciones de presión y temperatura adecuada, en tal sentido el **objetivo** del capítulo es:

Describir los generadores de vapor que se explotan en la Central Termoeléctrica de la empresa Pedro Sotto Alba.

1.2- Estado del arte sobre los generadores de vapor

Los primeros tipos de calderas usadas para la producción de vapor a mediados del siglo XVIII eran unos recipientes metálicos remachados, llenos parcialmente de agua y calentados exteriormente. El empeño de obtener una mayor superficie de transferencia y una mas alta eficiencia en la transferencia de calor condujo a crear otros tipos de calderas. En este sentido se trabajó en dos direcciones que resultaron ser las más perspectivas y determinaron el desarrollo de las calderas de vapor por más de 50 años. A estas calderas se les llamó de “Tubos de Fuego”. Sin embargo, con estas calderas no pudo obtenerse una capacidad evaporativa alta pues para ello se requería que el diámetro del domo o cilindro principal fuese cada vez mayor y debido a que el esfuerzo de tensión en la pared del domo es una función de su diámetro y de la presión entonces las calderas tenían que construirse con espesores cada vez mayores y esto provoca dificultades insalvables a la hora de realizar la junta remachada. Por ejemplo, tamaños límites fueron de cerca de 3 m de diámetro y de 6 de longitud con presiones de hasta 9 atmósferas.

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

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

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

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

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

La temperatura del vapor creció rápidamente en la década del 50 llegando alcanzar hacia 1960 el valor de 570 °C y aun mayores en algunas instalaciones. Luego la temperatura del vapor bajo, este descenso estuvo relacionado con el aumento en los costos de los aceros termorresistentes y por la baja seguridad del sobrecalentador cuando trabaja con vapor a tan alta temperatura.

En 1965 el generador de vapor mas potente que se construyó en Estados Unidos tenía una evaporación de 3000 t/h. Estos generadores de vapor, de alta capacidad producen vapor a alta presión 240 atm y alta temperatura 570°C.

Estas calderas, como regla, recalientan el vapor a una temperatura cercana a la inicial, después que este ha pasado por la parte de alta presión de la turbina cuando su presión cae, por ejemplo, hasta 35 atm y la temperatura hasta 350°C.

En la actualidad la generación de vapor en las calderas de tubos de agua no se ve limitada como las de tubo de fuego, solo que en estas no se esta aprovechando al máximo la energía del condensado producido después que sale del calentamiento de los combustibles por lo que dicho condensado con presión y temperatura suficiente llega a los depósitos abiertos a la atmósfera y se expansiona, con la separación del vapor que se pierde, mientras el condensado recuperado es almacenado normalmente y retornado al ciclo termodinámico de las unidades , siempre que el mismo no se halle contaminado con trazas de combustible.

1.3- Trabajos precedentes

En el desarrollo de la investigación se consultaron diferentes trabajos, Generación de vapor (1970), trata la automatización en los generadores de vapor, aspecto este poco abordado en la literatura especializada (Pérez, 1972; Tanquero et al., 1987; Rizhkin, 1987; Oliva et al., 1988), en el libro los autores realizan un estudio profundo sobre las características, tipos y como funcionan los generadores de vapor y las múltiples ventajas proporcionadas por estos. Se ha puesto atención a los detalles más esenciales de sus construcciones, explicándose los principios generales de su diseño y construcción.

Colaboró cuantiosamente el trabajo de Pérez (1972), que tiene en cuenta los aspectos teóricos metodológicos para el correcto estudio y comprensión de los generadores de vapor, en esta publicación se exponen los criterios técnicos necesarios para la selección, evaluación y explotación de estos equipos y sus agregados, explica además las principales leyes termodinámicas que rigen 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.

Al estudio de las centrales termoeléctricas dedica particular interés Rizhkin (1987), en el trabajo se abordan los aspectos técnicos generales para la explotación de este tipo de instalaciones, se analizan algunos parámetros económicos relacionados con el consumo de calor de las centrales termoeléctricas de condensación y calorificación. Finalmente se muestran los ejemplos de cálculo correspondiente al esquema térmico del bloque energético de condensación y calorificación.

Por su parte Tanquero et al. (1987), dedica su trabajo al cálculo térmico de los diferentes equipos y agregados de los generadores de vapor además emplea ecuaciones fundamentales para el análisis térmico de los mismos y constituye una guía metodológica para la realización de cálculos relacionados con el tema. Otra publicación importante en esta área del conocimiento lo constituye la realizada por Oliva et al. (1988), donde se exponen aspectos sobre la explotación de los generadores de vapor y los materiales constructivos empleados en estos, los así como las características más importantes de los materiales y expresan sus valoraciones sobre el impacto ambiental en el proceso de generación de vapor.

Fernández (1994), plantea las leyes termodinámicas más empleadas en los procesos térmicos con sus fundamentos teóricos y una clara metodología para la solución de problemas prácticos, otro aporte de este trabajo es que describe otra forma de analizar los procesos térmicos en la industria a través del concepto de exergía el cual es aplicado para el balance exegético de varios equipos industriales entre los que se encuentran turbina, bombas y los generadores de vapor.

También se dedicó al balance térmico de estos equipos Jarrosay (2000), quien calculó el rendimiento térmico del generador de vapor del hospital Guillermo Luis Fernández y propone acciones de mantenimiento para la instalación, este autor aplica consecuentemente los métodos de cálculos existentes en la literatura, expone las características del generador y los requisitos a tener en cuenta para una correcta explotación del mismo, finalmente hace un profundo análisis de las causas que originan las pérdidas en la instalación.

Pereira (2001), realiza un estudio del comportamiento de la energía en el generador de vapor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa y analiza las variaciones del sistema cuando varía su estado de explotación. El autor comprobó a partir de datos

experimentales la influencia directa de la temperatura de los gases de escape en la eficiencia del generador, para las condiciones de explotación de la instalación arrojó el resultado siguiente: un aumento de la temperatura en los gases de escape de 4 °C la pérdida en los gases de escape aumenta instalación arrojó el resultado siguiente: un aumento de la temperatura en los gases de escape de 4 °C la pérdida en los gases de escape aumenta.

Al diagnóstico de los generadores de vapor 1 y 2 de la central termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez”, se dedicó Lahens (2001), para ello tomó como punto de referencia la influencia de la temperatura de los gases de escape en la eficiencia y consumo de combustible de los generadores.

En el trabajo se demuestra que estos equipos trabajan con valores de temperatura superiores a los establecidos por las normas para combustibles líquidos y que existen factores que influyen en la explotación racional de la instalación citando entre otros: las infiltraciones de aire, suciedad en las trampas de vapor y en las superficies de transferencia de calor, así como mala selección de los quemadores.

Muñoz (2001), realizó la selección del esquema térmico de cogeneración para la producción sostenida de electricidad durante todo el año en el complejo agroindustrial Argeo Martínez, a través de criterios técnicos y económicos se calculan los indicadores energéticos que caracterizan a las instalaciones de este tipo. El investigador basado en criterios tecnológicos y científicos definió los esquemas de cogeneración que pueden aplicarse en las condiciones de esta industria, para lograr con precisión la selección, analizó cuatro esquemas térmicos de cogeneración, obteniendo el más racional mediante la evaluación técnica y económica de todos.

Otro investigador propone a la empresa mecánica del níquel una variante de fabricación por conformación de las láminas para las empaquetaduras de los calentadores de aire regenerativo de la termoeléctrica de Felton (Jiménez, 2001).

En este trabajo se realiza un estudio de los métodos de conformado convencionales y los ajusta a la problemática tratada, calcula la fuerza de conformado, tomando esta como referencia para proponer un diseño de la instalación para la conformación.

Al estudio de los generadores de vapor instalados en la empresa René Ramos Latour también se han dedicado algunos trabajos, Del Valle (2002) realiza una evaluación

verificativa de la eficiencia en la planta eléctrica de esta empresa, a partir de la instalación de dos generadores de vapor, en este trabajo se establecen comparaciones con parámetros anteriores del mismo proceso lo que demostró que hubo un aumento considerable de la eficiencia en la producción de níquel hasta el 95 %.

De forma análoga Abreu (2003), realizó una evaluación de la eficiencia del generador de vapor No. 10 de la CTE basándose en este trabajo el autor realizó un cálculo verificativo de la eficiencia de la instalación, teniendo en cuenta la utilización de crudo nacional mejorado y la aplicación de la tecnología aditivación – emulsión del combustible, permitiéndole llegar entre otras a las siguientes conclusiones:

- 1- La tecnología de aditivación aplicada a partir de septiembre del 2002 logró incrementar la eficiencia del generador de vapor en 1.1 %.
- 2- Esta tecnología debe mejorarse en lo que respecta al ensuciamiento del calentador de aire regenerativo, con la misma se logra disminuir las emulsiones de contaminantes al medio ambiente.

Otro trabajo importante en este sentido fue dado por Suárez (2005) quien realizó un diagnóstico del sistema de generación de la central termoeléctrica de la empresa antes mencionada, 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.

En el manual de operaciones de la Central Termoeléctrica de la empresa Pedro Sotto Alba se detalla el proceso de generación de vapor y se ofrecen las principales características de las máquinas y agregados que componen la planta.

Caballero y Gonzáles (2007) calcularon los rendimientos y los consumos de combustible de las calderas de la empresa Pedro Sotto Alba y Ernesto Che Guevara, pero no establecieron el comportamiento de los parámetros más influyentes respecto a la eficiencia.

1.4- Descripción de la Central Termoeléctrica

El agua de alimentación viene a través de la tubería de dos colectores generales de la central al nudo de alimentar, (una llamada línea automática y la otra de emergencia) el cual es un sistema de tubos con valvulería. Después del nudo de alimentar el agua llega al domo de la caldera.

El vapor sobrecalentado de la caldera llega a través de dos válvulas instaladas en serie al colector general de vapor de la central.

Para mejorar la calidad de agua de alimentar de calderas, está prevista una instalación de fosfatación que se compone de dos recipientes de solución de fosfato y dos bombas dosificadoras. El fosfato se carga al tanque de almacenamiento, se disuelve, y desde el recipiente es bombeado por una de las bombas dosificadoras al domo de la caldera. El recipiente es alimentado con agua y aire.

Para mantener el nivel necesario de calidad de agua de alimentación de caldera se utiliza el barrido continuo que se realiza por medio de válvulas reguladoras automáticas, que toman directamente del domo superior y que descargan a un colector y estos a la atmósfera.

Para quitar el barro de la caldera existe el soplado periódico que se produce desde los puntos inferiores del domo inferior de calderas el cual se realiza cada 24 horas en casos normales y en los casos de desviación de los parámetros se hacen estas extracciones de acuerdo a los resultados del laboratorio e instruida por el personal administrativo.

El petróleo del conducto general de la central alimenta 4 pulverizadores instalados en el frente de la caldera. En la línea del conducto de petróleo para cada pulverizador hay una válvula de mando neumático y una válvula de mando manual.

Una parte del petróleo por medio del conducto de recirculación regresa al conducto general de recirculación de la CTE.

Los quemadores son alimentados de vapor desde el colector general de la central. En el conducto de vapor hay una rama de tubo que está unida con el conducto de petróleo de alimentación de quemadores y sirve para el soplado de vapor de este. Todos los conductos del grupo de caldera tienen una cantidad necesaria de boquillas y válvulas.

El aire para la combustión se suministra a la caldera desde la atmósfera por medio de un ventilador de tiro forzado. Se calienta previamente en los calentadores de aire (calentadores regenerativos) para evitar la aparición del rocío en las últimas etapas, según el paso de gases en las superficies de caldeo, ya que este ácido afecta los cestos o paquetes del calentador de aire y las planchas metálicas de los conductos. Los gases producto de la combustión el mismo ventilador de tiro forzado los impulsa y salen a través de una chimenea metálica a la atmósfera. La limpieza de las superficies de caldeo de la parte convectiva de la caldera (sobrecalentador y calentadores de aire) se produce por medio de un flujo de aire de los sopladores del calentador regenerativo.

1.5- Descripción de los generadores de vapor

Código -----	303-BO-1,2,3
Tipo -----	Caldera de horno integral
Capacidad-----	1,2,3- 150 t/h
Presión diseño-----	50.9 kg/cm ²
Temperatura-----	398.8 °C
Marca-----	Bakcock and Wilcox Co. Modernizadas por Combustion Engineer.
Temperatura del agua de alimentación-	171°C
Temperatura de petróleo-----	93.3 – 104.4 °C.
Presión de vapor atomizado-----	7.03 – 7.73kg/cm ²
Volumen de agua a nivel normal-----	25 718.6 kg
Condiciones de operación. del horno----	Presión negativa - 0.15 "H ₂ O.

La instalación comprende no sólo la caldera propiamente dicha, sino, además, componentes principales y accesorios tales como:

- Economizadores y chimeneas.
- Sobrecalentadores y recalentadores.
- Quemadores y alimentadores de aire.

- Condensadores.
- Bombas y tanques de alimentación.
- Domos.

1.5.1- Partes componentes fundamentales de las calderas

Esquema de las calderas

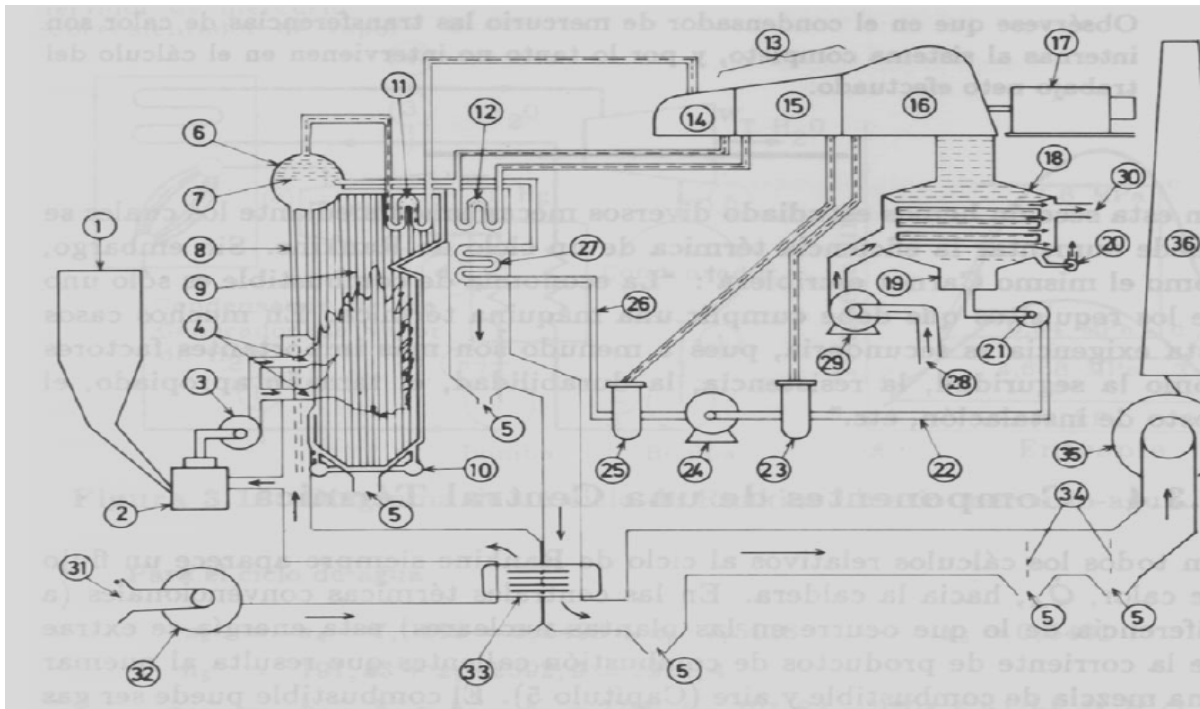


Figura 1.1. Esquema de las partes fundamentales de las calderas

Domo superior

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

Domo inferior

Es un recipiente cilíndrico ubicado en la parte inferior de la caldera cuya función es

colectar las partículas y los sólidos en suspensión que precipitan para su extracción al exterior.

Colectores inferiores

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

Pantallas de tubos evaporadores

Se encuentran en la parte radiante del horno y como su nombre lo indica es donde se evapora el agua que pasa en forma de vapor al domo superior.

Sobrecalentador de vapor

Debe aumentar la temperatura del vapor por encima de la temperatura de saturación, con el objetivo de disminuir la humedad, ya que esta es perjudicial para la turbina.

Ventilador de tiro forzado

Se encuentra en la parte inferior derecha de la caldera. Es el encargado de suministrar al horno de la caldera el aire necesario para lograr una combustión completa con exceso. Según su diseño es análogo al aspirador de humo.

Ventilador de tiro inducido

Se encuentra situado en la parte inferior izquierda de la caldera. Es el encargado de extraer los gases producto de la combustión y expulsarlos al exterior a través de la chimenea, manteniendo una presión negativa en el horno igual a 0.15" de agua.

Precalentador de aire

Este equipo es el encargado de calentar el aire que se suministra al horno de la caldera, lo que permite aumentar su eficiencia disminuyendo el consumo de petróleo, transfiriendo gran parte de la temperatura de los gases a través de las laminas que

posee, existiendo los cestos calientes y cestos fríos, se encuentran 2 situado entre los conductos de aire y gases, en operación normal gira a 3 rpm.

Diafragmas

Son las paredes de ladrillos refractarios que se encuentra en el eje convectivo de las calderas, cuya función es guiar el recorrido de los gases para lograr un mejor aprovechamiento de su temperatura. Es importante destacar que esta caldera a diferencia de la soviética difiere en cuanto a sus superficie de intercambio de calor en el eje convectivo, así como de la forma en que los gases recorren el mismo, haciéndolo de forma longitudinal, de zigzag y bañando los tubos situados en ese lugar realizando la función similar a la de un economizador.

Sopladores IK

Son equipos que tienen la función de desprender de las paredes de los tubos del sobrecalentador el hollín o las partículas adheridas a los mismos. Cada caldera cuenta con cuatro sopladores del tipo retráctiles para evitar que las altas temperaturas de los gases donde estos trabajan dañen su estado mecánico.

Sopladores G9

Tienen la función de desprender de las paredes de los tubos de la zona convectiva, tubos de domo a domo, el hollín o partículas adheridas a los mismos, Estos sopladores son fijos ya que la temperatura de los gases en esta zona es menor.

Sopla-precalentador

Este equipo es el encargado de desprender el hollín y las partículas adheridas a las láminas de los paquetes del precalentador de aire, utilizando para ello vapor procedente de la cascada. Este soplador es fijo, ya que la temperatura de los gases en esta zona lo permite.

Deareadores

El deareador tiene tres funciones:

Remover - eliminar gases disueltos (O_2 y CO_2)

Aumentar la temperatura del agua.

Garantizar una reserva de agua para fallos de corta duración.

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

Desgasificador

Datos del equipo:

Código	313-TO-1
Dimensiones	7'0" Ø x 42' de altura
Empaquetado	8' de cama de anillos Raching de 1-11/2'
Nivel de agua en operación	10'
Presión de trabajo negativa	vacío máximo 28 mm columna de Hg.

La función de este equipo es eliminar el CO_2 y el O_2 disueltos en el agua que se forma producto al ácido carbónico de la reacción de los catexer, este ácido carbónico CO_3H_2 está débilmente ionizado y se comporta en realidad como una solución de CO_2 en agua.

Calentadores de agua

La función de estos equipos, como su nombre lo indica, es la de calentar el agua que va a ser alimentada a las calderas, empleando para tal objetivo vapores que ya han realizado "trabajo". El calentador de baja recibe vapor de la extracción automática de 85 del TG-1 o cuando este no está en operación lo toma de la cascada y el calentador de alta lo recibe de la extracción incontrolable de los TG -2 (300), La presión va a estar en correspondencia de la carga que tenga el TG.

Calentadores de petróleo

Los calentadores están situados entre las bombas y los filtros de salida, son dos, estando en operación uno y el otro en espera, ya que uno tiene la capacidad para abastecer a plena carga a las cuatro calderas. Para su función de calentar el petróleo se abastece de vapor del sistema de 150, teniendo cada uno su control automático que responde a la temperatura obtenida, siendo posible hacerle ajuste para modificarla de acuerdo a la necesidad.

Se ajusta para obtener alrededor de 93.3-104.4 °C a la salida del calentador, de acuerdo a la viscosidad.

Sistema de enfriamiento.

Torres de Enfriamiento

Código	321- CT- 1
Fabricante	Ceramic Cooling Tower
Capacidad	18 000 gpm
Temp. Agua entrada	41.6 °C
Temp. Agua salida	32.2 °C
Total flujo de aire	1 460 000 pie ³ / min.
Número de celdas	4
Dimensiones celdas	28 x 28 x 31 pie.

La torre de enfriamiento tiene la función de enfriar el agua usada por los equipos .El agua es tomada del pozo de la torre por las bombas de recirculación y enviada a la red de distribución o sistema de enfriamiento, retornando a la torre por su parte superior a través de un sistema de toberas o rociadores (256 por celdas, 1024 en total).

Sistema de alimentación de agua a caldera.

Este sistema , como su nombre lo indica ,tiene la función de suministrar el agua necesaria para la producción de vapor en las calderas , disponiendo de condiciones tales que le permiten mantener la alimentación necesaria en cada momento , independiente de las magnitudes que tenga las variaciones provocadas por los cambio de carga.

Tanques de Almacenaje

Datos del Equipo:

Código	313-TK-3A, 3B.
Cantidad de equipo	2

Dimensiones	27'0'' Ø X 24' 1/8'' Altura
Capacidad	100 000 gls.

Estos tanques almacenan el agua efluente de los anexos con el objetivo de contar con una reserva de agua que garantice el suministro a los consumidores en los casos de paro por anomalías en el sistema. En los casos de avería solo se garantiza el suministro de agua durante un periodo relativamente corto (2-4 horas), que varía de acuerdo a como este el consumo en ese momento; no se debe permitir que la reserva de agua disminuya a menos de 13' sin que se tomen medidas urgentes para disminuir el consumo, el nivel más crítico que se puede permitir es 6', por debajo de este valor se pone en emergencia la planta tomando todas las medidas necesarias para recuperar nivel nuevamente.

Parámetros Tecnológicos	Valores
Potencia de vaporización	75 t/h
Presión de vapor después de la válvula	45,1 kgf/cm ²
Presión del vapor en la cúpula de caldera	50 kgf/cm ²
Temperatura del vapor	400 °C
Temperatura del agua de alimentación	171°C (176,6 °C)

Superficie de calentamiento

Zona de evaporación	211 m ²
Sobrecalentador de 1 ^{ra} . Etapa	260 m ²
Sobrecalentador de 2 ^{da} . Etapa	187,5 m ²
Economizador de 1 ^{ra} . Etapa	420 m ²
Economizador de 2 ^{da} . Etapa	650 m ²
Calentador de aire de 1 ^{ra} . Etapa	1415 m ²
Calentador de aire de 2 ^{da} . Etapa	735m ²

Agua	23,7 m ³
Vapor	11,2 m ³
Alimentación	1,3 m ³
Economizador	6,04 m ³

1.5.2- Tratamiento interno de los generadores de vapor

Un tratamiento cualquiera para que resulte efectivo debe tener en cuenta dos cuestiones fundamentales:

La calidad del agua de que se dispone y el grado de pureza que se desea. Cualquier industria exige características especiales en el agua que se emplea en el proceso fabril, los cuales pueden ser más o menos severas.

En la industria metalúrgica se requiere de un agua exenta de materia en suspensión, pero para cierto tipo de proceso se requiere agua de alto grado de pureza (producción de vapor y energía eléctrica) ya que la utilización de agua sin tratamiento previo puede provocar graves consecuencia en el ciclo de la planta.

Las Calderas para la producción de vapor consumen agua desmineralizada que presenta características específicas, no obstante este tratamiento previo a la presión y temperatura que hay en el domo no es suficiente para esta agua ya que le quedan Sólidos y Gases disueltos como son: Sales Minerales de Calcio y Magnesio, Sílica y Oxígeno. Es por esta razón que se aplica el tratamiento interno a las calderas, que consiste en la inyección a los Domos y los Deareadores, de productos químicos con propiedades que contrarresten o imposibiliten los daños que ocasionarían las mencionadas impurezas.

1.5.3- Otros parámetros importantes

Flujo de aire: requiere especial atención este detalle. El flujo de aire debe mantenerse en el punto mas bajo posible que permita la combustión. Todos los detalles que afectan a la combustión deben ser atendidos escrupulosamente, evitándose que por ejemplo, una pobre atomización esté obligando a alimentar demasiado aire. La plumilla de flujo de aire sirve de guía para detectar los sobrantes. El operador esta en la obligación de

mantener el flujo de aire requerido sistemáticamente.

Cono de llama: se controla por la abertura del damper. El cono no debe ser tan largo que se mantenga tocando los tubos del fondo, ni tan ancho que pegue a las paredes laterales. Cuando la llama toca a los tubos, se enfría y apaga (se interrumpe la combustión), motivando mala combustión y formación de panales. El largo del cono debe ser tal que toque esporádicamente los tubos del fondo.

Tiro del horno: debe mantenerse en alrededor de 0.15 “. Este mide la rapidez de circulación en la cámara del horno. El mantenerlo en 0.15 “es lo recomendable.

Presión de petróleo a los quemadores: debe mantenerse en alrededor de 7.03 kg/cm², que es el punto intermedio donde podemos aceptar los cambios, imprevistos o no, pues disponemos de un margen de 1.05-1.40 kg/cm² en aumento o disminución.

Presión de vapor de atomizado: debe mantenerse en alrededor de 20 psi por encima de la presión que tenga el petróleo. Con esta presión se obtiene una correcta atomización, por lo que no debe variarse pronunciadamente, se permite una desviación de (+ -) 0.21 kg/cm²

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

Soplete de hollín: los sopladores de hollín son equipos que tienen la función de desprender de las paredes de los tubos en varias zonas de la caldera el hollín o partículas adheridas a los mismos, es necesario mantener el programa de soplete establecido.

Extracción de fondo: no debe hacerse con carga superior a 120 t/hr, ya que a esa capacidad no deben producirse el cambio brusco de nivel que ocasiona dicha extracción.

Exceso de carga: cuando las calderas se trabajan muy próximas a la máxima carga, se corre el riesgo de que se produzcan aumentos en el consumo de vapor que no sean capaces de admitir por falta de capacidad.

En estos casos, si la gestión para disminuir consumo no da resultado positivo a tiempo, debe de impedirse que el petróleo sea aumentado a la cantidad que el horno no pueda quemar. Esto se obtiene pasando a manual su control y si ya ha habido exceso de petróleo se le reducirá enseguida hasta normalizar la combustión. La presión de vapor del sistema se afectará, pero es preferible esto a trabajar las calderas “ahogadas”, además en la caldera “ahogada” el horno se enfría, resultando afectada de todas maneras la presión de vapor, por otro lado puede acumularse petróleo sin quemar que podría ser causante de una explosión en el horno.

1.6- Sistema de automatización

Esta es una de las plantas de la empresa completamente automatizada, donde el operador de control tiene acceso a cualquier parámetro de los generadores de vapor desde su PC a través de un programa adaptado a las condiciones actuales de operación de la CTE.

A continuación se muestran los instrumentos de medición que registran los valores correspondientes al estado de trabajo del generador de vapor, facilitándole al operador eficiencia y comodidad en el trabajo

- Termoresistencia PT 100, este se utiliza para medir la temperatura de los gases de salida, posee convertidor incorporado, señal de salida, standard de 4 a 20 miliampere.

Rango de medición 0 - 500 °C.

- Transmisor de presión diferencial SITRANS P, modelo 4432 SMAR, se emplea para medir la presión del vapor; posee indicación digital y señal de salida de 4-20 miliampere.

Rango de medición: hasta 60 Mbar.

- Analizador de oxígeno ABB, con el se mide el % de oxígeno en los productos de la combustión, el principio de medición es óxido de circonio.

- El flujo de vapor se mide con un flujometro y la temperatura del mismo con una termoresistencia.

- **PLC**

El sistema de control de quemadores está dirigido por un PLC. (Autómata) SIEMENS S115-U, programado en STEP 5.

La visualización de las señales del campo, el estado de las válvulas, los ventiladores y los mandos se realizan en el OP-35 (panel del operador) situado en la cabina de control.

Las operaciones se ejecutan presionando las teclas laterales y en la parte inferior del panel del operador. Cada tecla tiene una breve etiqueta que indica su uso.

En la parte izquierda de la pantalla se encuentran las operaciones de abrir y encender como se describe a continuación:

DIES TV	Abrir la válvula principal de Diesel para los ignitores.
OIL TV	Abrir la válvula de petróleo para los quemadores.
QUEMAD.1	Encender el quemador 1 automáticamente.
QUEMAD. 2	Encender el quemador 2 automáticamente.
QUEMAD.3	Encender el quemador 3 automáticamente.
QUEMAD.4	Encender el quemador 4 automáticamente.

En la parte derecha de la pantalla se encuentren las operaciones de cerrar y apagar como se describe a continuación:

DIES.TV	Cerrar la válvula principal de diesel para los ignitores.
OIL TV	Cerrar la válvula principal de petróleo .

Quemadores

QUEMAD.1	Apagar quemador 1.
QUEMAD.2	Apagar quemador 2.
QUEMAD.3	Apagar quemador 3.
QUEMAD.4	Apagar quemador 4.

➤ Normas del Régimen Tecnológico

Tabla 1.1. Principales parámetros medidos en los generadores de vapor

No	Parámetros que se mide	Norma	Unidad	Lugar de inst. del equipo
Presión				
1.	En el domo de la caldera	50.9	kg/cm ²	En la pizarra y en el lugar
2.	Del agua de alimentación en la línea principal	63.27	kg/cm ²	En la pizarra y en el lugar
3.	Del petróleo en la línea principales a los quemadores.	12.3	kg/cm ²	En la pizarra y en el lugar
4.	Del vapor en la línea principal a los quemadores	10.54	kg/cm ²	En la pizarra y en el lugar.
Consumo				
5.	De agua a la caldera	200	t/h	En la pizarra y en el lugar.
6.	De vapor de la caldera.	150	t/h	En la pizarra.
7.	Del petróleo hacia la caldera	10-12	t/h	En la pizarra y en el lugar.
Temperatura				
8.	Agua de alimentación hacia la caldera	182.2	°C	En el área y pizarra
9.	Vapor en el colector de salida	398.8	°C	En la pizarra
10.	Petróleo antes de los quemadores	98.8	°C	En el lugar.
11.	Aire después del calentador	260	°C	En la pizarra.
12.	Gases después del calentador de aire.	226.6	°C	En la pizarra.
Rarificación (vacío)				
13.	En el horno de la caldera.	- 0.15	mm de H ₂ O	En la pizarra.
Nivel				
14.	En el domo de la caldera	- 2.54	cm	En la pizarra
No	Parámetros que se mide	Norma	Unidad	Lugar de inst. del equipo
Concentración				
15.	De oxígeno en los gases de salida después de la caldera	5 - 7	%	En la pizarra
Agua de alimentación				
16.	Dureza general	3,0	ppm	En la pizarra
17.	Contenido de hierro	50	ppm	
18.	Contenido de cobre	10	ppm	En la pizarra
19.	Oxígeno disuelto	20	ppm	En la pizarra
20.	Ácido carbónico libre	0	ppm	En la pizarra

21.	Contenido de ácido silícico	80	ppm	En la pizarra
22.	Contenido de aceite	0,3	ppm	En la pizarra
23.	Indicador pH	8,5 / 9,1		En la pizarra
24.	Contenido de amoniaco.	> 1000	ppm	En la pizarra
Vapor saturado.				
25.	Salinidad	200	ppm	En la pizarra
26.	Contenido de ácido carbónico libre	10	ppm	En la pizarra
Agua de caldera				
27.	Exceso de fosfato	20 - 40	ppm	En la pizarra

1.7- Conclusiones del capítulo I

- ✓ El análisis bibliográfico y de la situación actual del proceso de generación de vapor demostró la existencia de varios trabajos relacionados con el diagnóstico energético a instalaciones productoras de vapor, pero solo uno fue desarrollado en la empresa Pedro Sotto Alba.
- ✓ La situación actual del proceso demuestra el mal estado de algunas partes componentes que influyen en la eficiencia de los generadores de vapor y el estado avanzado que presenta la automatización de la planta.

CAPÍTULO II

DIAGNÓSTICO TÉRMICO Y EXERGÉTICO DE LOS GENERADORES DE VAPOR DE LA EMPRESA PEDRO SOTTO ALBA

2.1- Introducción

Los generadores de vapor que operan en la Central Termoeléctrica de la empresa Pedro Sotto Alba deben garantizar el vapor necesario para la producción de níquel y generación de energía, la eficiencia de estos equipos determina el grado de aprovechamiento de la energía térmica, de ahí que el control y evaluación del rendimiento térmico en las caldera es de gran importancia para el correcto funcionamiento de la termoeléctrica. El **objetivo** del capítulo es:

Realizar el diagnóstico térmico y exergético de los generadores de vapor estudiados, mediante la aplicación del procedimiento de cálculo expuesto en este capítulo.

2.2- Materiales empleados en la medición de los parámetros

Las mediciones de los parámetros se realizaron con un sistema de adquisición de datos, haciendo uso de la instrumentación, utilizando un conjunto básico de sensores, el cual incluye la medición, adquisición, procesamiento y registro de datos en PC para las variables: temperatura del vapor y el agua, flujo de combustible, presión del vapor, flujo de vapor, presión en el horno, presión del vapor de atomizado, temperatura de los gases de escape, entre otros.

Actualmente el proceso de generación de vapor en la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba” se encuentra altamente automatizado, cada operador tiene visualizado los datos precisos y necesarios para mantener un correcto funcionamiento de la CTE.

2.3- Procedimiento de cálculo para el diagnóstico térmico y exergético

El balance energético del generador estará basado en el análisis térmico y exergético porque estos aspectos caracterizan energéticamente a la instalación. La metodología a utilizar se establece a continuación.

2.3.1- Poder calórico bajo del combustible

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

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

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

⇒ Volumen de aire teórico

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

⇒ Volumen total real de gases triatómicos

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

⇒ Volumen teórico de nitrógeno

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

⇒ Volumen teórico de los gases secos

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

⇒ Volumen teórico de los vapores de agua

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

⇒ Volumen teórico total de gases

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

⇒ Volumen real de gases

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

⇒ Volumen real de aire

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

2.3.3- Cálculo del coeficiente de exceso de aire

Para combustión incompleta

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

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

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

Las entalpías de los gases son las que caracterizan la capacidad de entrega de calor de los equipos del generador de vapor a los medios de trabajo como el agua, vapor o aire.

⇒ 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} se expresa en (kJ / kg) .

Tabla 2.1. Valores de entalpía para diferentes temperaturas.

T^0C	I_{CO_2}	I_{N_2}	I_{H_2O}	I_{aire}	I_{ceniza}
100	169,98	129,79	150,72	132,30	80,80
200	357,55	260	304,38	266,28	169,14
300	558,93	311,88	462,64	403,77	263,76

Fuente: Faires, 1991.

⇒ Entalpía real de los gases

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

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

Donde:

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

i_{aire} : Se busca a la temperatura que entra el aire. (kJ/kg)

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

2.3.5- Balance térmico por el método directo

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

Donde:

η_{GV} : Eficiencia bruta del generador de vapor.

B : Consumo de combustible se mide directamente en el generador (kg/s)

⇒ Determinación del calor disponible (kJ / kg).

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

Donde:

Q_{fc} : Calor físico del combustible (kJ/kg)

Q_{fa} : Calor físico del aire (kJ/kg)

Q_{atm} : Calor para la atomización (kJ/kg)

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

Cc calor específico del combustible a la temperatura t

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

Donde:

i_{sp} : Entalpía a la salida del precalentador de aire (kJ/m³)

i_{af} : Entalpía del aire frío (kJ/m³)

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

Donde:

i_v : Entalpía del vapor de atomización se busca a la temperatura y presión del vapor que entra al generador. (kJ/kg)

i_{vge} : Entalpía del vapor en los gases de escape se busca a la temperatura de los gases de escape y la presión atmosférica. (kJ/kg)

⇒ Determinación del calor útil (kJ / s).

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

Donde:

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

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

2.3.6 - Balance térmico por el método indirecto

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

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

Determinación de las pérdidas de calor

⇒ 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- ΔT mínima para lograr la transferencia de calor.
- 2- Temperatura adecuada para evitar la corrosión.

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

⇒ Pérdida por incombustión química (q_3)

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

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

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

⇒ Pérdida por incombustión mecánica (q_4)

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

Los rangos de su magnitud son:

$q_4 = 0,5 - 5\%$ sólido en cámara

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

$q_4 = 0\%$ líquidos y gaseosos

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

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

Donde:

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

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

B_{esc} , B_{cen} : Flujo de cenizas

d : índice de generación

$\Rightarrow$ Pérdida por radiación 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 convección al aire. El calor perdido sale por conducción por las paredes.

Los rangos de estas pérdidas son:

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

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

Donde:

D_N : Producción de vapor nominal; (kg/s).

D : Producción de vapor; (kg/s).

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

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

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

Donde:

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

Para combustibles líquidos $q_6 = 0$

2.3.7- Análisis exergético del sistema

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

La exergía puede ser calculada para tres casos diferentes, ellos son: para un sistema cerrado en reposo, para un flujo y para una fuente de calor, el procedimiento en cada caso se muestra a continuación.

⇒ Exergía de un sistema cerrado en reposo

Para hallar el valor del trabajo útil máximo se considera que en un proceso que produzca trabajo, éste será el máximo si el proceso es termodinámicamente perfecto, es decir, totalmente reversible interna y externamente, en cuyo caso se cumple que:

El cambio de entropía del sistema aislado integrado por el sistema y el medio ambiente es nulo.

En este caso la exergía total es:

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

y por unidad de masa del sistema cerrado

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

En las ecuaciones expresadas anteriormente (2.30) y (2.31) los parámetros corresponden a las propiedades termodinámicas siguientes: energía interna, temperatura, entropía y volumen; los subíndices 1 y 0 corresponden a las propiedades a la temperatura del sistema y del medio ambiente respectivamente.

⇒ Exergía de un flujo

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

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

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

Donde:

h : entalpía del flujo; kJ/kg.

⇒ Exergía de una fuente de calor

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

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

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

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

Donde:

T_M : Temperatura media calculada; K.

Rendimiento exergético de la instalación

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

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

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

Verificándose que:

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

Para el cálculo del rendimiento exergético se considera como exergía recuperada: la del vapor sobrecalentado, empleada: la exergía del combustible, la exergía del agua de alimentación y la exergía perdida: la exergía de los gases de escape.

2.4- Mediciones promedio obtenidas en cada generador de vapor

Los datos necesarios para el cálculo de la instalación están reflejados en la Tabla 2.2 y los mismos fueron obtenidos en el proceso de medición en la caldera.

La composición química del combustible en masa de trabajo y expresada en porciento (se utiliza el mismo para todos los generadores de vapor de la Moa Níkel).

$$C^t = 85,00 \quad H^t = 10,10 \quad S^t = 2,65 \quad O^t = 0,20 \quad W^t = 1,0 \quad A^t = 0,044$$

➤ Mediciones promedio obtenidas para cada generador de vapor.

Tabla 2.2. Mediciones para cada generador de vapor

Parámetros de los generadores	GV.1	GV.2	GV.3	GV.5	U/M
Producción de vapor sobrecalentado	145	141.7	135.9	220.5	t/h
Presión del vapor sobrecalentado	46.5	47.3	46.9	45.6	Kg/cm ²
Temperatura del vapor sobrecalentado	653	662	653	666	K
Temperatura del agua de alimentación	465	458	465	472	K
Temperatura del combustible	385.9	386.4	385.9	380	K
Temperatura de los gases de escape	507	491.4	515.3	491	K
Temperatura de medio ambiente	303.15	303.15	303.15	303.15	K
Consumo de combustible	10.2	10.3	10.2	14,3	t/h
Coeficiente de exceso de aire	1.2	1.2	1.2	1.2	---

2.5- Balance térmico y exergético de los generadores de vapor

El balance térmico de la instalación se realizó en correspondencia con el método de cálculo mostrado (epígrafe 2.3) y los datos obtenidos en la instalación (epígrafe 2.4) a partir de la aplicación exitosa de los métodos directo e indirecto descritos en la literatura especializada (Generación de vapor; Pérez, 1972), lo cual permite el contraste de los resultados obtenidos. El balance exergético se desarrollo correctamente y los principales parámetros calculados para cada generador se muestran en la Tabla 2.3.

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

Ptros.	GV- 1	GV- 2	GV- 3	GV- 5	Unidad	Ec.
Qb^t	$3,948 \cdot 10^{-4}$	$3,948 \cdot 10^4$	$3,948 \cdot 10^4$	$3,948 \cdot 10^4$	(kJ/kg)	(2.1)
V^0_a	10,315	10,315	10,315	10,315	(m ³ /kg)	(2.2)
V_{RO_2}	1,605	1,605	1,605	1,605	(m ³ /kg)	(2.3)
$V^0_{N_2}$	8,151	8,151	8,151	8,151	(m ³ /kg)	(2.4)
V^0_{gs}	9,756	9,756	9,756	9,756	(m ³ /kg)	(2.5)
$V^0_{H_2O}$	1,288	1,288	1,288	1,288	(m ³ /kg)	(2.6)
V^0_g	11,043	11,043	11,043	11,043	(m ³ /kg)	(2.7)
V_g	12,439	12,369	12,439	12,439	(m ³ /kg)	(2.8)
V_a	11,56	11,504	11,56	11,56	(m ³ /kg)	(2.9)
α	1,121	1,115	1,121	1,121	----	(2.10)
l^0_g	$4,201 \cdot 10^3$	$5,39 \cdot 10^3$	$5,41 \cdot 10^3$	$3,69 \cdot 10^3$	(kJ/kg)	(2.12)
l_g	$4,26 \cdot 10^3$	$5,446 \cdot 10^3$	$5,47 \cdot 10^3$	$3,52 \cdot 10^3$	(kJ/kg)	(2.13)
Q_d	$3,971 \cdot 10^4$	$3,971 \cdot 10^4$	$3,971 \cdot 10^4$	$3,971 \cdot 10^4$	(kJ/kg)	(2.16)
$Q_{\text{útil}}$	$3,634 \cdot 10^8$	$3,545 \cdot 10^8$	$3,494 \cdot 10^8$	$5,259 \cdot 10^8$	(kJ/h)	(2.20)
η_{GV} M.D	89,70	86,67	86,24	92,63	%	(2.15)
q_2	9,35	12,348	12,375	7,51	%	(2.22)
q_3	0,0002	0,0004	0,0002	0,0002	%	(2.23)
q_4	0	0	0	0	%	(2.24)
q_5	0,5	0,5	0,5	0,5	%	(2.26)
q_6	0	0	0	0	%	(2.27)
η_{GV} M.I	90,15	87,15	87,12	91,99	%	(2.21)
$\eta_{\text{Exerg.}}$	87,52	84,86	85,72	89,79	%	(2.35)
γ	12,476	15,138	14,271	10,205	%	(2.36)

Como se observa en los valores de la eficiencia térmica calculados (Tabla 2.3) todos son superiores al 86 %. La capacidad de entregar calor útil máxima de los generadores de vapor en todos los casos supera el 84%.

El procedimiento de cálculo empleado se resolvió con la ayuda del software Mathcad Professional 2001. Los resultados íntegros para el generador de vapor 1 se exponen en el Anexo.

2.6- Conclusiones del capítulo II

- Quedó establecido el procedimiento de cálculo adecuado para el diagnóstico termoexergético de la instalación, de su aplicación se calcularon las eficiencias térmicas siendo por el método directo 89,70; 86,67; 86,24 y 92,63 % por el método indirecto fueron 90,15; 87,15; 87,12 y 91,99 % para los generadores de vapor 1, 2, 3 y 5 respectivamente.
- Las eficiencias energéticas fueron 87,52; 84,86; 85,72 y 89,79 % para los generadores estudiados. En todos los casos la pérdida de exergía fue inferior al 16 %.

CAPÍTULO III

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

3.1- Introducción

La protección del medio ambiente es uno de los problemas científico - técnicos más complejos que enfrenta la humanidad. El desarrollo vertiginoso de la industria en los últimos años ha llevado a niveles sin precedentes 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 natural, en tal sentido:

El **objetivo** del presente capítulo es:

Valorar económicamente el funcionamiento de las calderas de la CTE considerando el impacto ambiental asociado a las mismas.

3.2- Análisis de los resultados de la investigación

Los resultados derivados del diagnóstico térmico y exegético aplicado a los generadores de vapor de la CTE de la empresa Pedro Sotto Alba demuestran un elevado aprovechamiento de la energía térmica en estos equipos con un rendimiento promedio superior al 86 % para cada uno a través de los métodos directos e indirectos. Demostrando que mediante este último diagnóstico se pueden encontrar las mayores deficiencias del proceso. Estos generadores de vapor presentan un elevado consumo de combustible por lo que deben ser considerados como puntos claves para el ahorro debido al creciente precio del combustible en el mercado internacional.

3.2.1- Comportamiento de los parámetros del proceso

En la figura 3.1 se muestra la dependencia existentes entre el rendimiento térmico y la entalpía de vapor, en la figura se evidencia un aumento del rendimiento en la medida en que aumenta la entalpía, esto se debe a la importancia que tiene la calidad del vapor (elevada temperatura y presión) en el calor útil aprovechado por la sustancia de trabajo y su incidencia en la eficiencia bruta del generador de vapor. El comportamiento mostrado indica además la importancia que debe prestarse a las superficies

recuperadoras de calor ya que de ellas (sobrecalentadores) dependen las propiedades termodinámicas del vapor.

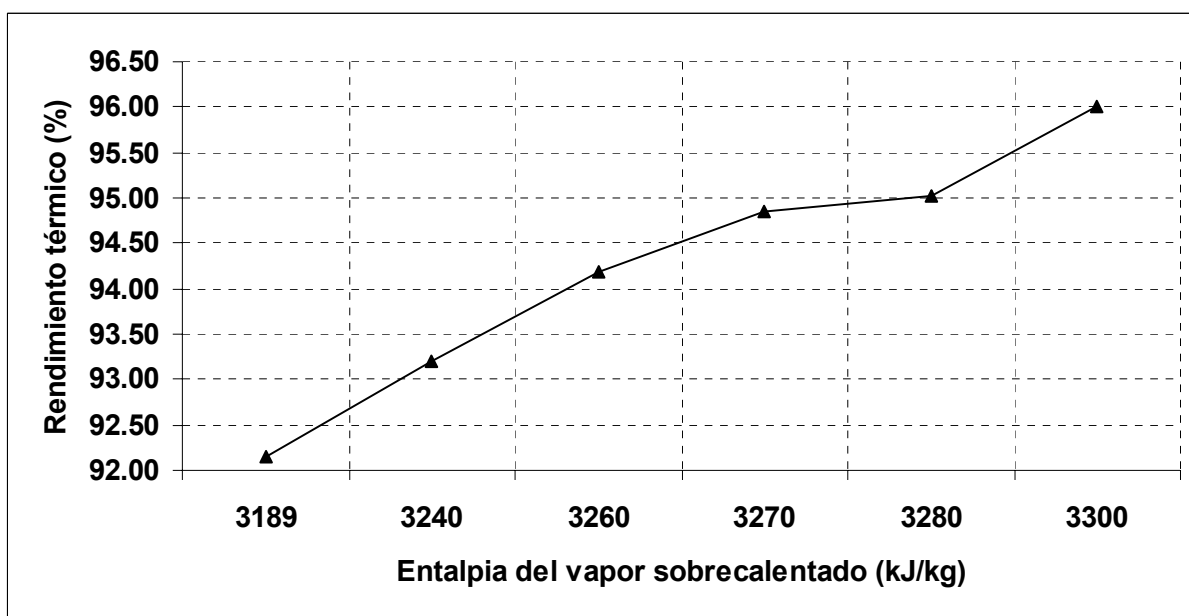


Figura 3.1. Comportamiento del rendimiento térmico respecto a la entalpía del vapor sobrecalentado.

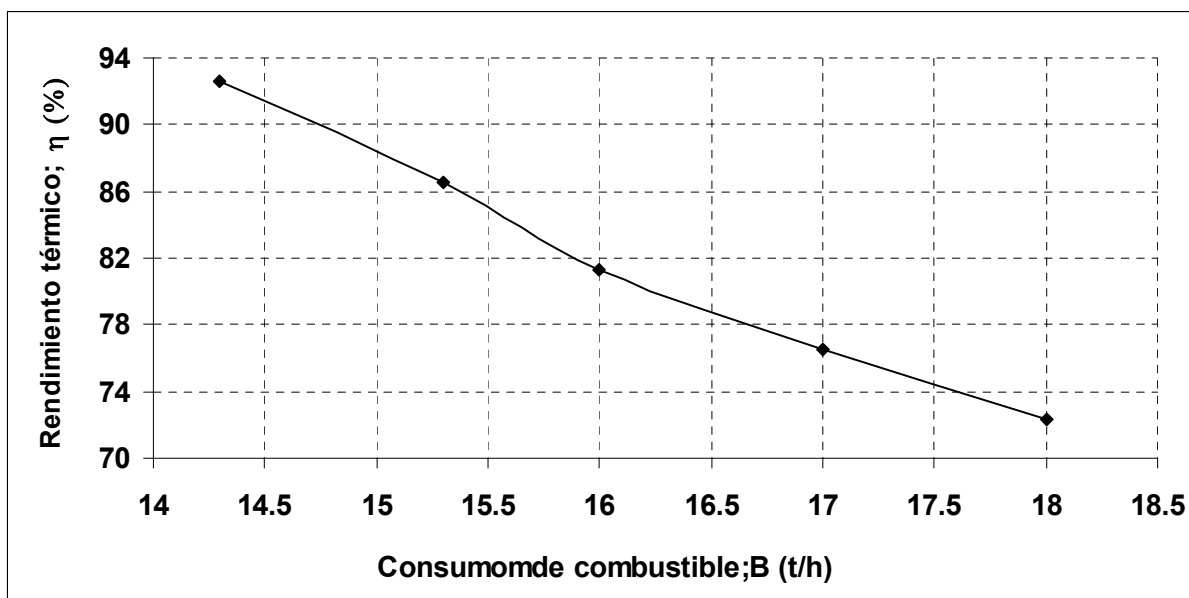


Figura 3.2. Comportamiento del rendimiento térmico respecto al consumo de combustible.

En las figuras 3.2 y 3.3 se ilustran el comportamiento del rendimiento térmico respecto a dos parámetros fundamentales en la primera (Figura 3.2) se observa un decrecimiento acentuado de la eficiencia con el incremento del consumo de combustible; el mismo está asociado a la relación inversamente proporcional que tienen estos parámetros (Ecuación 2.15) al valorar el referido comportamiento se comprueba la importancia que tienen para la instalación la combustión de un combustible con mejores propiedades lo que reduciría el consumo del mismo.

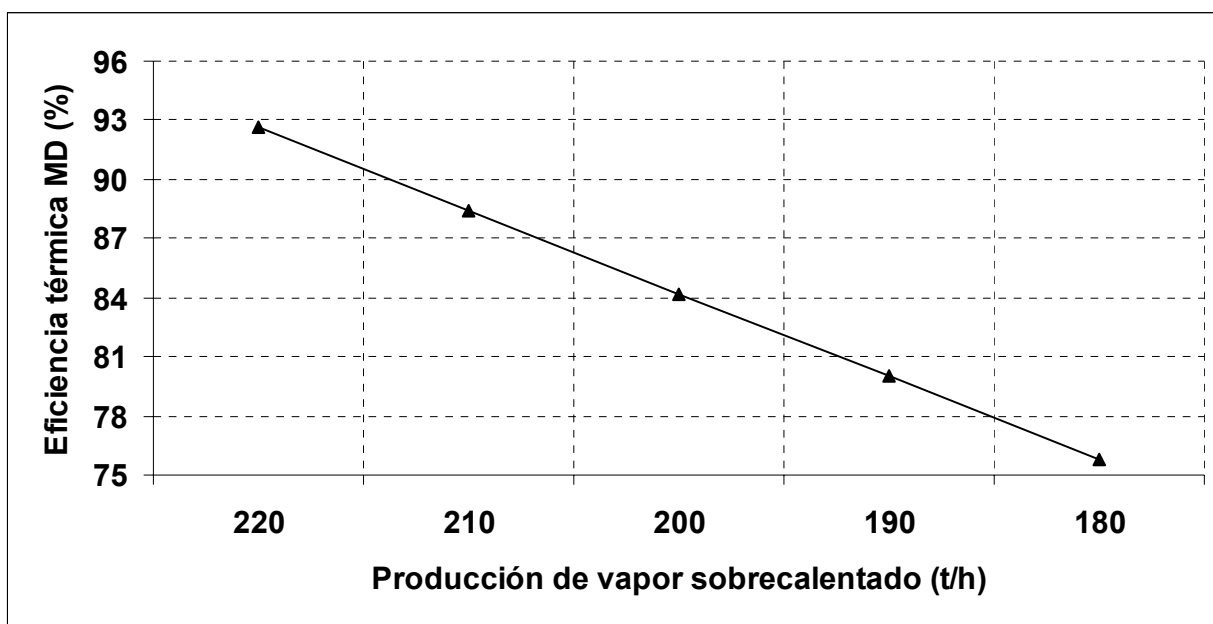


Figura 3.3. Comportamiento del rendimiento térmico respecto a la producción de vapor sobrecalentado.

En la figura 3.3 el comportamiento es lineal y proporcional a la producción de vapor debido a la importancia que tiene este parámetro en el calor aprovechado por el vapor, en general se debe trabajar la caldera en los mayores índices de eficiencia pero sin descuidar la productividad de la misma.

Las dependencias mostradas (figuras 3.1, 3.2 y 3.3) fueron obtenidas para los diferentes parámetros del proceso constantes, se procedió de esta manera para ilustrar

la influencia que tienen los analizados y la difícil interrelación que existe entre los múltiples parámetros que caracterizan el proceso de producción de vapor.

3.3- Valoración económica

La valoración económica expuesta en este trabajo está definida por el consumo de combustible que presentan estos generadores de vapor. Para ello se consideró que el precio del combustible es 464 USD/t . Los resultados se relacionan a continuación.

➤ Para los generadores de vapor de la Empresa Pedro Sotto Alba

Considerando que los generadores de vapor trabajaron 24 horas en el periodo de Enero-Mayo se determina el gasto total por consumo de combustible para cada caldera el mismo se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Consumo de combustible para los diferentes generadores de vapor.

Generadores de vapor	Consumos de combustibles para diferentes periodos			
	t/h	t/dia	t/mes	t/5meses
Generador de vapor 1	10.2	244.8	7344	36 720
Generador de vapor 2	10.3	247.2	7416	37050
Generador de vapor 3	10.2	244.8	7344	36 720
Generador de vapor 5	14.3	343.2	10296	51 450
Total de consumos	45	1080	32400	1 161 940
Importe total para el consumo calculado (USD)				75 140 160

Los resultados mostrados indican la incidencia económica que tienen los generadores de vapor en la empresa. En general la entidad debe invertir grandes suma de dinero a la compra del combustible que consumen estos equipos.

3.4- Impacto ambiental de los generadores de vapor

La protección del medio ambiente es uno de los problemas científico-técnicos más complejos que enfrenta la humanidad , el desarrollo vertiginoso de la industria en los últimos años ha llevado a niveles sin precedentes la contaminación de la atmósfera y las aguas con sustancias nocivas al hombre, los animales y plantas.

Nuestro país, donde desde el triunfo de la revolución se ha desarrollado notablemente la industria, no está exento de esta problemática, aunque debemos reconocer que la contaminación ambiental no alcanza aun los niveles de los países altamente industrializados.

El gobierno revolucionario ha tomado las medidas pertinentes para garantizar y conservación del medio ambiente.

A nivel mundial las centrales termoeléctricas consumen más de la tercera parte de la cantidad total de combustible extraído, por lo que ejercen gran influencia sobre el medio ambiente, lo anterior está condicionado por los siguientes factores:

1. La emisión a la atmósfera de una gran cantidad de gases producto de la combustión.
2. La contaminación térmica de ríos, mares y lagos.
3. La evacuación de aguas contaminadas con petróleos y otras sustancias químicas.

Un impacto negativo asociado a la quema de petróleo y gas natural es la lluvia ácida en este caso no tanto por la producción de óxidos de azufre, como en el caso del carbón, sino sobre todo por la producción de óxidos de nitrógeno.

Las plantas termoeléctricas son consideradas fuentes importantes de emisiones atmosféricas y pueden afectar la calidad del aire en el área local o regional. La combustión que ocurre en los proyectos termoeléctricos emite dióxido de sulfuro (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) y partículas (que pueden contener metales menores). Las cantidades de cada uno dependerán del tipo y el tamaño de la instalación y del tipo y calidad del combustible, y la manera en que se queme. La dispersión y las concentraciones de estas emisiones, a nivel de la tierra, son el resultado de una interacción compleja de las características físicas de la chimenea de la planta, las cualidades físicas y químicas de las emisiones, las condiciones meteorológicas en el sitio, o cerca del mismo durante el tiempo que se requiere para que las emisiones se trasladen desde la chimenea hasta el receptor a nivel de la tierra, las condiciones topográficas del sitio de la planta y las áreas circundantes, y la naturaleza de los receptores.

Monóxido de carbono

Está presente en los gases de la combustión que se expulsan por la chimenea cuando este proceso es incompleto, que no permite que el mayor por ciento del Carbono se combustione a Dióxido de Carbono.

Dióxido de azufre

Su acción toxica sobre las plantas consiste en la alteración de la fotosíntesis debido a la destrucción de la clorofila lo que conduce a la caída de las hojas .Las plantas que cambian las hojas anualmente sufren la acción del SO_2 en el aire en menor escala.

No existen datos absolutamente confiables acerca de la influencia de una alta concentración de SO_2 sobre el organismo humanos, aunque investigaciones realizadas por la Organización mundial de la salud muestran que un aumento de la concentración de SO_2 en el aire atmosférico está acompañado por el incremento de los índices de mortalidad.

Oxido de Nitrógeno

La gran actividad biológica de los óxidos de nitrógeno ha sido comprobada por medio de experimento y observaciones naturales. En las zonas contaminadas con NO_2 se incrementa la incidencia de la enfermedades respiratorias y además el NO_2 en concentraciones de $4\text{--}6 \text{ mg/m}^3$ ocasiona serios daños en las plantas.

Los óxidos de nitrógeno al absorber la radiación solar, tanto en la parte ultravioleta como la visible del espectro, disminuye la transparencia de la atmósfera y condiciona la niebla fotoquímica o smog.

La presencia de sustancias contaminantes en el aire atmosférico acelera la corrosión de las construcciones metálicas y destruye la pintura de os edificios lo que representa una perdida económica considerable.

3.5- Conclusiones del capítulo III

- El gasto total por consumo de combustible para los generadores de vapor de la empresa Pedro Sotto Alba para el periodo analizado es de 75 140 160 USD.
- En la CTE los principales agentes contaminantes son: los óxidos de azufre y nitrógeno, el Pentóxido de Vanadio y el Monóxido de Carbono. Las concentraciones en que se encuentran no han sido determinadas debido a la no existencia del equipamiento adecuado en la planta.

CONCLUSIONES

- Se comprobó la existencia de varios trabajos relacionados con el diagnóstico térmico y exergético de los generadores de vapor pero en ninguna de las investigaciones precedentes se determina la incidencia económica que tienen en el consumo de combustible de la entidad para las condiciones actuales de explotación.
- La conjugación de los aspectos metodológicos permitieron establecer el procedimiento de cálculo adecuado para el diagnóstico térmico y exergético de los equipos estudiados. Siendo los rendimientos térmicos promedio calculado por los métodos directos e indirectos igual a 89,92; 86,91; 86,68 y 92,31% para los generadores de vapor 1, 2, 3 y 5 respectivamente.
- Todos los generadores analizados presentan un elevado aprovechamiento de la energía útil máxima disponible que se evidencia en los rendimientos exergéticos los cuales fueron 87,52; 84,86; 85,72 y 89,79%. El valor promedio para los generadores es de 87.47 %.
- En el periodo en que se desarrolló la investigación (Enero–Mayo) los generadores de vapor consumieron 1 161 940 toneladas de combustible lo que representa un gasto de 75 140 160 USD por concepto de consumo de combustible.



RECOMENDACIONES

- Evaluar térmicamente y de forma sistemática los generadores de vapor analizados debido a la importancia que tienen desde el punto de vista técnico y económico.
- Determinar la eficiencia neta de la instalación, la cual no pudo ser calculada por falta de información en la planta.
- Impartir cursos de capacitación a los operarios lo que permitirá atenuar los consumos energéticos asociados a la inadecuada explotación de estos equipos.

RERERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abreu, J. *Evaluación de la eficiencia actual del generador de vapor 10 de la Central Termoeléctrica de la Empresa René Ramos Latour*. Trabajo de Diploma. ISMM.2003. 70p.
2. Caballero, B. A; Y. González. *Diagnóstico energético de los Generadores de Vapor de las empresas productoras de níquel en Moa*. Trabajo de Diploma. ISMM 2007. 43 p.
3. Carcallido, M. *Balance energético y exergético del CAI Guatemala*. Trabajo de Diploma. ISMM 1999. 71 p.
4. Colectivo de Autores. *Generadores de Vapor*. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana, 1970. 520 p.
5. Conceptos básicos de agua de aporte a calderas.
<http://www.monografias.com/trabajos5/aguacald/aguacald.shtml>. Marzo 2008.
6. Contaminación por ruido. http://www.conam.gob.pe/educamb/cont_ruido.htm. Marzo 2008.
7. Del Valle, R. *Balance energético verificativo de la planta eléctrica de la empresa René Ramos Latour*. Trabajo de Diploma. ISMM 2002. 64 p.
8. Faïres, V. *Termodinámica*. La Habana: Edición Revolucionaria, 1991. 807p.
9. Fernández, E. *Termodinámica Técnica*. La Habana: Editorial "Félix Varela, 1994. Tomo I. 290 p.
10. Fernández, E. *Utilización del vapor en la industria*. Editorial Científico-Técnica. La Habana, 2001. 138 p.
11. Ficha Técnica de los Generadores de Vapor 6 y 7. Proyecto de Modernización de la Central Termoeléctrica. Moa, 2004. 25 p.
12. Hernández, J. N. *Diagnóstico térmico verificativo de los generadores de vapor insertados en la Central Termoeléctrica de la empresa "Ernesto Ché Guevara"*. Trabajo de Diploma. ISMM 2006. 48 p.
13. Hurtado, F. G. *Estudio de la Influencia en el Medio Ambiente del Sistema de Generación de la Empresa del Níquel Ernesto Che Guevara y el Sistema de Transmisión Eléctrico Adyacente*. Tesis doctoral. ISMM, Moa. 1999. 120p.

14. Jarrosay, E. *Balance energético de las calderas del hospital "Guillermo Luis Fernández"*. Trabajo de Diploma. ISMM 2000. 63 p.
15. 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.
16. Lahenz, V. *Calculo de la eficiencia en los generadores de vapor. Trabajo de Diploma*. ISMM 2001. 56 p.
17. *Manual de operaciones de la Central Termoeléctrica Empresa "Ernesto Che Guevara"*. Moa, 2005.
18. *Manual de operaciones de la Central Termoeléctrica Empresa "Pedro Sotto Alba"*. Moa, 2006.
19. 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.
20. Muhica, J. *Evaluación termoeconómica del ciclo de la central termoeléctrica de la empresa Ernesto Guevara*. Trabajo de Diploma. ISMM, 2001. 62 p.
21. Oliva, R. Luis. *Explotación y materiales constructivos de generadores de vapor*. Ediciones ISPJAM. Santiago de Cuba. 1988. 320 p.
22. Pankratov. G. *Problemas de termotecnia*. Editorial MIR Moscú. URSS, 1987. 235 p.
23. Pereira, M. *Balance de energía de la caldera del comedor del ISMM*. Proyecto de curso. 2001. 33 p.
24. Pérez, Garay. L.: *Generadores de Vapor*. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana. 1972. 447 p.
25. *Proyecto de Modernización de la Central Termoeléctrica*. Moa, 2005. 50 p.
26. 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.
27. Rizhkin, Y. V. *Centrales termoeléctricas. Primera y segunda parte*. Editorial pueblo y educación. Ciudad de La Habana. 1987. 370 p.

28. Rodríguez, Y. *Análisis del petróleo crudo nacional empleado en la empresa Ernesto Guevara*. Trabajo de Diploma. ISMM, 2001. 57 p.
29. Steam and electricity generation.
<http://www.schoolscience.co.uk/content/4/chemistry/petroleum/knowl/4/2/index.htm?steam.html>, Marzo 2008.
30. Steam Generation. <http://www.segainc.com/energystmgeneration.html>. Marzo 2008.
31. 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.
32. 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.
33. Tanquero, N. *Guía metodológica para proyectos del curso de generadores de vapor*. Editorial ISPJAE. La Habana. Cuba. 1997. 120 p.
34. Tuzón, E. Diagnóstico energético del generador de vapor 1 de la empresa Ernesto Che Guevara. Proyecto de Curso. ISMM. 2005. 30 p.
35. Vukalovitch, M. *Propiedades Termodinámicas del agua y el vapor*. Editorial. Revolucionaria 1978. 245 p.

ANEXO

BALANCE TÉRMICO Y EXERGÉTICO DEL GENERADOR DE VAPOR 1 DE LA EMPRESA PEDRO SOTTO ALBA

Poder calórico bajo del combustible Q_b (J/kg)

Todos los elementos en masa de trabajo

$$C := 85.00 \quad H := 10.10 \quad O := 0.20 \quad S := 2.65 \quad W := 0.044$$

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

$$Q_b = 3.948 \times 10^7 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

Volumen de aire teórico V_a

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

$$V_a = 10.315 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen total real de gases triatómicos V_{RO2}

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

$$V_{RO2} = 1.605 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

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

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

$$V_{N2} = 8.151 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen teórico de los gases secos V_{gs}

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

$$V_{gs} = 9.756 \frac{m^3}{kg}$$

Volumen teórico de los vapores de agua V_{H_2O}

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

$$V_{H_2O} = 1.288 \frac{m^3}{kg}$$

Volumen teórico total de gases V_{og}

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

$$V_{og} = 11.043 \frac{m^3}{kg}$$

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

$$CO_2 := 12.53 \quad O_2 := 2.62 \quad CO := 0.4 \quad H_2 := 0 \quad CH_4 := 0$$

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

$$N_2 = 84.45$$

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

$$\alpha = 1.121$$

Volumen real de gases V_g

$$V_{a_{real}} := V_a \cdot \alpha \quad V_{a_{real}} = 11.56 \frac{m^3}{kg}$$

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

$$V_g = 12.439 \frac{m^3}{kg}$$

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

Entalpía teórica de los gases I_{go} Calculada para T_{ge} = 233 °C

$$I_{RO2} := 464.55 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3} \quad I_{N2} := 371.94 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3} \quad I_{H2O} := 329.38 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3}$$

$$I_{cen} := 212.14 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad A := 0.01 \quad A_{arr} := 0.7$$

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

$$I_{go} = 4.201 \times 10^6 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

El calor específico del aire C_{af} se expresa en kJ/m³ °C

La temperatura del aire se expresa en °C

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

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

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

$$I_{ge} = 4.26 \times 10^6 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

Balance térmico por el método Directo

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

$$D_{vsc} := 145 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

$$I_{vsc} := 772.9 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad I_{aa} := 174.30 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

$$Q_{\text{útil}} = 3.634 \times 10^{11} \frac{\text{joule}}{\text{hr}}$$

Consumo de combustible B (kg/h)

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

Determinación del calor disponible Q_d (J/kg)

Calor físico del Combustible (J/kg)

La temperatura del combustible t_c expresada en (°C)

$$t_c := 112.85 \quad f_{\text{conversión}} := 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

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

$$Q_{fc} = 2.282 \times 10^5 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

Cálculo del calor disponible Q_d (J/kg)

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

$$Q_d = 3.971 \times 10^7 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

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

$$N_{\text{gvMD}} = 89.704$$

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

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

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

$$I_{\text{af}} = 4.883 \times 10^5 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

$$q_2 = 9.35$$

Pérdida de calor por incombustión química (q_3)

$$V_{\text{gs}} = 9.756 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad f_{\text{conversión}} := 1 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3}$$

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

$$q_3 = 2.968 \times 10^{-4}$$

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

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

Cálculo del rendimiento térmico del generador de vapor N_{gvMI} (%)

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

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

$$N_{gvMI} = 90.15$$

Diferencia entre los valores de rendimiento calculados por los dos métodos

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

$$\Delta\eta = 0.446$$

BALANCE EXERGÉTICO DEL GENERADOR DE VAPOR

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

Exergía del agua (J/s)

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

$$h_{agua} = 7.297 \times 10^5 \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad h_{0a} := 32.0 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$T_0 := 32$$

$$S_{agua} := 0.5377 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad S_{0a} := 0.1108 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

$$Ex_{agua} = 2.168 \times 10^7 \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

Exergía del aire (J/s)

$$h_{\text{aire}} := 519.12 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad S_{\text{aire}} := 0.72438 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad m_{\text{aire}} := 14080.1 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

$$h_{0\text{aire}} := 302.1 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad S_{0\text{aire}} := 0.60078 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad T_0 := 32$$

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

$$Ex_{\text{aire}} = 1.964 \times 10^6 \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

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

$$Q := Q_b \quad T_0 := 32 \quad T_m := \frac{1200 + 1800}{2} \quad m_{\text{combustible}} := B$$

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

$$Ex_{\text{combustible}} = 1.095 \times 10^8 \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

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

Exergía del vapor

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

$$h_{\text{vapor}} = 3.236 \times 10^6 \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad h_{0\text{v}} := 32 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad T_0 := 32$$

$$S_{\text{vapor}} := 1.6603 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad S_{0\text{v}} := 0.1050 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

$$Ex_{\text{vapor}} = 1.165 \times 10^8 \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

Determinación del rendimiento exergético (%)

Exergía empleada (J/s)

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

$$\mathbf{Ex_{empleada} = 1.331 \times 10^8 \frac{joule}{sec}}$$

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

$$\mathbf{\eta_{Ex} = 87.524}$$

Exergía recuperada (kJ/s)

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

$$\mathbf{Ex_{recuperada} = 1.165 \times 10^8 \frac{joule}{sec}}$$

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

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

$$\mathbf{\gamma = 12.476}$$