

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

FACULTAD METALURGIA-ELECTROMECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA 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 para diferentes calidad del agua de alimentación.

Autor: Ardis Fuentes de Armas

Tutor: M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja

Moa-2010

"Año 52 de la Revolución"



Declaración de autoridad

Yo: **Ardís Fuentes de Armas** autor de este Trabajo de Diploma y el tutor Yoalbys Retirado Mediaceja declaramos la propiedad intelectual de este al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa y de la empresa Pedro Sotto Alba para que dispongan de su uso cuando estimen conveniente.

Ardís Fuentes de Armas

M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja



Pensamiento

Esfuézrate y sé valiente, no temas ni desmayes porque Jehová tu Dios estará contigo en donde quiera que vayas.

Texto bíblico

Agradecimientos

Agradezco profundamente a Dios por estar conmigo en todo momento y ser mi Padre protector, a la Revolución Cubana y a su líder Fidel Castro, a mis tutores Yoalbys Retirado y Alexis Barrios, que me atendieron amablemente cada vez que los necesité.

A mi esposa Yalemnis Ramírez Córdova por el amor que me ha profesado todo este tiempo y por la ayuda incondicional que siempre tengo de ella. A mi suegra Ángela por siempre estar dispuesta a ayudar cuando la necesito.

A mis hijos Elianet, Emanuel, Esther y Eliza por ser mi motivo de inspiración para cumplir las metas trazadas.

A mis padres, hermanos, tíos, primos y el resto de la familia por su apoyo en todo momento.

A los profesores del Departamento de Mecánica especialmente a Marbelis y Yodelkis por su ayuda y apoyo.

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

A todos Muchas Gracias

El autor



Dedicatoria

A mi familia en general, especialmente a mi esposa e hijos por lo que representan en mi vida.

El autor



Resumen

En el trabajo se realizó una evaluación térmica y exergética de los generadores de vapor de la empresa Pedro Sotro Alba. Los rendimientos térmicos promedios obtenidos para los generadores estudiados fueron inferiores al 84 y 85% cuando se produjo vapor con agua de mala y buena calidad, respectivamente. Las eficiencias exergéticas determinadas para los generadores de vapor 1, 2, 3 y 5 fueron satisfactorias, siendo sus valores promedios superiores al 48,5%. Los gastos económicos asociados a la explotación de los generadores de vapor de la empresa fueron igual a 45 356 256, 1 y 48 337 605, 12 USD para el agua de alimentación de mala y buena calidad. Finalmente se comprobó que los gases producto de la combustión del petróleo, el agua caliente contaminada, el ruido y las altas temperaturas son las fuentes que más influyen en la contaminación del medio ambiente.



Abstract

In the work was carried out a thermal evaluation and exergetic of the steam generators of the company Pedro Sotro Alba. The yields thermal averages obtained for the studied generators went inferior to the 84 and 85% when vapor took place with water of bad and good quality, respectively. The exergetic efficiencies certain for the steam generators 1, 2, 3 and 5 were satisfactory, being their values superior averages to 48,5%. The economic expenses associated to the exploitation of the steam generators of the company went similar to 45 356 256, 1 and 48 337 605, 12 USD for the water of feeding of bad and good quality. Finally was proven that the gases product of the combustion of the petroleum, the polluted hot water, the noise and the high temperatures are the sources that more they influence in the contamination of the environment.

Índice

Contenido	Págs.
Introducción.	1
Capítulo 1. Marco teórico de la investigación.	4
1.1- Introducción.	4
1.2- Estado del arte.	4
1.3- Trabajos precedentes.	6
1.4- Flujo tecnológico de la Planta Termoenergética.	9
1.5- Caracterización química del agua de alimentación a las calderas.	10
1.6- Estado actual de la automatización en la Planta Termoenergética.	17
1.7- Conclusiones del capítulo 1.	18
Capítulo 2. Evaluación térmica y exergética de los generadores de vapor de la empresa Pedro Sotto Alba.	19
2.1- Introducción.	19
2.2- Procedimiento de cálculo para el diagnóstico térmico y exergético de los generadores de vapor.	19
2.3- Mediciones obtenidas en los generadores de vapor analizados.	25
2.4- Resultados de la evaluación realizada a los generadores de vapor.	27
2.5- Conclusiones del capítulo 2.	31
Capítulo 3. Análisis de los resultados. Valoración económica e impacto ambiental.	32
3.1- Introducción.	32
3.2- Análisis de los resultados de la evaluación térmica y exergética.	32
3.3- Valoración económica.	36
3.4- Impacto ambiental.	38
3.5- Conclusiones del capítulo 3.	43
Conclusiones.	44
Recomendaciones.	45
Bibliografía.	46
Anexo.	-

Introducción

Las industrias del Níquel son de gran importancia para la economía del país, estas constituyen uno de los principales renglones exportables con que cuenta, por tanto es una prioridad para la dirección del país mantener estas industrias operando con una alta eficiencia, por lo que se ha llevado a cabo un proceso de modernización y automatización de estas industrias que garanticen una mayor confiabilidad en el proceso.

Dentro de estas empresas se encuentra la empresa productora de níquel Comandante Pedro Sotto Alba ubicada en la carretera del puerto S/N Rolo Monterrey, Municipio Moa, donde se obtiene el sulfuro de Ni + Co con una tecnología de lixiviación ácida a presión.

La referida empresa comienza su explotación en Octubre de 1959 por la compañía Moa Bay Mini Company. En diciembre del año 1994 se firma un convenio con la compañía canadiense Sherritt pasando a ser empresa mixta. 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.

Su esquema tecnológico está basado en el proceso de lixiviación ácida a presión del mineral, esta fabrica cuenta con Minas a cielo abierto donde se extrae el mineral, 6 plantas de proceso: Pulpa, Espesadores, Lixiviación, Lavadero, Neutralización, Sulfuro; y 5 plantas auxiliares: Termoeléctrica, Preparación de pulpa de Coral, Planta de ácido, Planta de Hidrógeno y Planta de Secado de Sulfuro y derretido de azufre.

Dentro de todas estas plantas, la termoeléctrica juega un papel fundamental ya que es la encargada de generar la energía eléctrica y el vapor utilizados en el proceso productivo. Para ello cuenta con 4 generadores de vapor, 3 de 70 t/h de capacidad y 1 de 100 t/h. Además cuenta con 2 generadores de corriente eléctrica con una capacidad de generación de 7,5 MW cada uno.

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

Fundamento de la investigación

La planta Termoeléctrica de la empresa niquelífera Comandante Pedro Sotto Alba es la encargada de garantizar la energía calorífica, el agua tratada y parte de la energía eléctrica que necesita el proceso para la obtención del producto final. Esta planta es cogeneradora ya que una parte del vapor es utilizada para producir corriente eléctrica y la otra es aprovechada en el proceso productivo.

Los generadores de vapor estudiados son altos consumidores de combustible debido a su principio de funcionamiento el cual se basa en la combustión de petróleo, por lo que se hace necesario disminuir el consumo de petróleo por cada tonelada de vapor producida y una disminución sustancial de los costos de producción. Por esta razón se ha hecho necesaria la ejecución de inversiones en la termoeléctrica que garanticen una mayor eficiencia y fiabilidad de los generadores de vapor y una disminución del consumo de combustible. Para ello se requiere de modernas instalaciones productoras de vapor que permitan un mejor aprovechamiento de la energía que se libera durante la combustión de los combustibles.

Un elemento importante en la explotación eficiente de estos equipos es el agua de alimentación, su temperatura y calidad varían continuamente durante la operación de las calderas, pero solo se reportan trabajos relacionados con la influencia de la temperatura del agua y ninguno se refiere a la incidencia de la calidad de la misma en las eficiencias térmicas y exergéticas de las instalaciones productoras de vapor.

Como **problema de la investigación** se plantea:

El insuficiente conocimiento del comportamiento de las eficiencias térmicas y exergéticas de los generadores de vapor de la empresa Pedro Sotto Alba, cuando varía la calidad del agua de alimentación utilizada.

Objeto de estudio de la investigación:

Los generadores de vapor de la empresa Pedro Sotto Alba.

Hipótesis:

Si se realiza un diagnóstico energético de los generadores vapor de la empresa Pedro Sotto Alba para diferentes condiciones de trabajo, entonces es posible determinar el comportamiento de las eficiencias térmicas y exergéticas cuando varía la calidad del agua de alimentación.

Objetivo del trabajo:

Determinar las eficiencias térmicas y exergéticas de los generadores de vapor de la empresa Pedro Sotto Alba considerando la variación de la calidad del agua de alimentación.

Tareas del trabajo:

- 1- Actualizar el estado del arte sobre los procesos de generación de vapor con generadores acuotubulares.
- 2- Particularizar el procedimiento de cálculo para la determinación de las eficiencias térmicas y exergéticas a los generadores de vapor analizados.
- 3- Calcular las eficiencias térmicas y exergéticas de los generadores de vapor para diferentes condiciones de operación.
- 4- Valorar la influencia que tiene el agua de alimentación en las eficiencias térmicas y exergéticas de las calderas.
- 5- Establecer los gráficos de comportamiento de los diferentes parámetros del proceso.
- 6- Realizar la valoración económica y ambiental del proceso de generación de vapor.

Capítulo 1

Marco teórico de la investigación

1.1- Introducción

El marco teórico constituye un elemento de mucha importancia dentro de una investigación por cuanto permite sistematizar los conocimientos relacionados con el objeto de estudio y además posibilita caracterizarlo, en tal sentido el **objetivo** del capítulo es:

Establecer el marco teórico de la investigación necesario para la evaluación térmica y exergética de los generadores de vapor analizados.

1.2- Estado del arte

Las primeras calderas que fueron diseñadas consistían de un simple recipiente con una entrada de agua y una salida de vapor, montada entre paredes de ladrillos y utilizando la parte vacía entre las paredes de ladrillo y el recipiente como cámara de combustión y el calor desprendido actuaba de forma directa sobre la parte baja del cilindro donde estaba el agua y los gases producto de la combustión salían al exterior por una chimenea. Pero muy rápido se notó que estas eran muy ineficientes por la poca superficie de transferencia entre el agua y el calor.

Más tarde y como consecuencia de la ineficiencia se fueron buscando mejoras para lograr mayor producción de vapor y aprovechamiento de la energía calórica y se incrementaron las superficies de transferencia para lograr que el agua tuviera un mayor tiempo de contacto con el calor, y los gases cubrieran mayor cantidad de área antes de salir del horno y se lograra mejorar la calidad del vapor y se disminuyera el consumo de combustible.

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

A medida que se avanzó en la tecnología se fueron incorporando otros accesorios y equipos necesarios para mejorar la eficiencia y la calidad del vapor obtenido, así como se logró disminuir el consumo de combustible para la producción de vapor.

Así surge la primera clasificación de calderas, con estos dos diseños se logró mejorar e incrementar la superficie de transferencia de ambas calderas, en las calderas de tubos de agua además se logró disminuir el tamaño de los domos e incrementar la presión de trabajo y aumentar la capacidad de generación de vapor.

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.

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.

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 tienen una amplia utilización en las empresas industriales, centrales azucareros, refinerías, fábricas de papel, de fertilizantes y muchas otras, las mismas se clasifican en: de tubos rectos, de tubos curvos, así como generadores de vapor de grandes potencias.

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

1.3- Trabajos precedentes

En el desarrollo de la investigación se consultaron múltiples trabajos, los más importantes según el criterio del 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_2 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, la autora obtuvo los resultados para los valores teóricos y nominales reportados por el fabricante con el objetivo de compararlos, en ese sentido llegó a la conclusión de que existía un alto grado de confiabilidad en los valores ofrecidos por la compañía extranjera. También en su trabajo ofrece el procedimiento de cálculo adecuado a las condiciones de diseño de las calderas.

Caballero y González (2007) realizaron el diagnóstico térmico de los generadores de vapor insertados en 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 modernización y para suplir el consumo de vapor se operaban dos calderas de las viejas de 75 t/h de vapor, en la actualidad la situación es diferente ya que se explotan las dos calderas nuevas.

Un trabajo similar fue desarrollado por Rivera y Regüeyeros (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) y Fonseca (2009) calcularon el rendimiento térmico y exergético de los generadores de vapor 6 y 7 de la empresa Ernesto Che Guevara y establecieron gráficos de comportamientos 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) y Góngora (2009) en los generadores de la empresa Pedro Sotto Alba.

Del análisis de los trabajos consultados, en general se aprecia la existencia de 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 dos estudios realizados a los generadores de vapor de la empresa Pedro Sotto Alba, pero ninguno de estos trabajo consideran la influencia que tiene de la calidad del agua de alimentación en las eficiencias térmicas y exergéticas de estas instalaciones, lo anterior fundamenta la necesidad de realizar la presente investigación y confirma la importancia de la misma.

1.4- Flujo tecnológico de la Planta Termoenergética

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.

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- Caracterización química del agua de alimentación a las calderas

El agua es ampliamente usada en la industria, pero aunque es generalmente abundante y relativamente económica, esta realidad ha estado cambiando drásticamente debido a una mayor demanda, a la destrucción de las cuencas hidrográficas y la contaminación de la misma.

1.5.1- El agua como materia prima para la generación de vapor

El agua libre de impurezas es un líquido incoloro, inodoro e insípido. Es el único material inorgánico que se encuentra en sus tres estados físicos (sólido, líquido y gaseoso) en los intervalos de temperatura encontrados en la superficie terrestre. Debido a que el agua puede ser convertida en vapor a temperaturas convenientes es ideal para generar potencia y transportar calor. Además el agua es la única que es capaz de absorber más calor que cualquier otra sustancia inorgánica común. Sin embargo, el agua pura no se encuentra disponible en la naturaleza. Todas las agua naturales contienen varios tipos y cantidades de impurezas. Estas impurezas pueden dividirse en:

- ✓ Sólidos disueltos.
- ✓ Gases disueltos.
- ✓ Materia suspendida.
- ✓ Microorganismos

Las calderas, independientemente de su forma y tamaño, usan generalmente agua para producir vapor o agua caliente, que es luego empleada en la industria en una gran variedad de operaciones como generación de energía eléctrica, calentamiento, secado, elevación de la presión y muchos otros procesos físicos y químicos.

La presión y el diseño de la caldera, calidad requerida del vapor y condensado, así como las impurezas del agua determinan tanto los tratamientos previos como los posteriores. Los principales objetivos del acondicionamiento del agua de caldera son la prevención de los siguientes problemas:

- ✓ Incrustaciones
- ✓ Corrosión en la caldera
- ✓ Contaminación del vapor
- ✓ Corrosión del sistema de condensado

Existen tres vías para mantener controlados los problemas mencionados, estos son:

Pretratamiento del agua: entre estos se pueden tener tratamientos de precipitación (clarificación, floculación) filtración (arena, membranas), suavización con cal o resinas,

desmineralización (resinas, ósmosis inversa). Se realizan con el fin de eliminar o reducir las impurezas del agua como minerales, gases y sólidos suspendidos.

Tratamiento interno de la caldera: se utilizan en este caso productos químicos naturales y sintéticos inhibidores de corrosión e incrustaciones, como fosfatos, polímeros, soda y aminas. Todos con el fin de evitar o controlar las incrustaciones, depósitos, corrosión a la caldera y al sistema de condensado, así como evitar el arrastre de contaminantes al vapor.

Control de la purga: es el método básico de control de impurezas sólidas y disueltas, así como de la concentración de productos químicos en el agua de la caldera. De esta forma se evitan los depósitos y el arrastre en el vapor.

1.5.2- Impurezas del agua y problemas asociados

A continuación se detallan los diferentes tipos de impurezas encontradas comúnmente en aguas naturales y que interesan desde el punto de vista del control y el tratamiento del agua de alimentación a las calderas.

Sólidos disueltos y suspendidos

Corresponden a sales minerales solubles, procedentes de las rocas con las cuales ha estado en contacto el agua. Los sólidos disueltos abarcan una amplia gama de compuestos minerales que son capaces de disociarse a sus formas iónicas. Se encuentran en el seno del agua y no pueden separarse por medios mecánicos. Pueden presentarse también en forma molecular como sílice.

Sales de dureza

Se denomina dureza al contenido de calcio y magnesio presente en el agua. Todos los cationes, excepto el sodio y el potasio, también producen dureza, pero generalmente su presencia es tan pequeña que siempre son ignorados. Las sales de Ca y Mg son altamente insolubles a altas temperaturas y alcalinidades, formando depósitos minerales sobre las superficies de intercambio de calor, que ocasionan puntos calientes y posterior ruptura de los tubos, por lo que deben ser eliminadas. Su concentración se indica usualmente como ppm de CaCO_3 . Los iones de calcio y magnesio pueden estar asociados a iones carbonatos y bicarbonatos en cuyo caso se denominan dureza temporal o asociados a iones sulfato y cloruros, entre otros.

Denominándose entonces dureza permanente. El tipo de dureza en un agua natural dependerá de su procedencia.

Alcalinidad

Indica la capacidad de una sustancia para neutralizar ácidos. La alcalinidad llega al agua por la acción disolvente del dióxido de carbono (CO_2) y del agua al pasar por suelos ricos en carbonatos y bicarbonatos. La figura siguiente muestra las diferentes relaciones entre la alcalinidad y el pH:

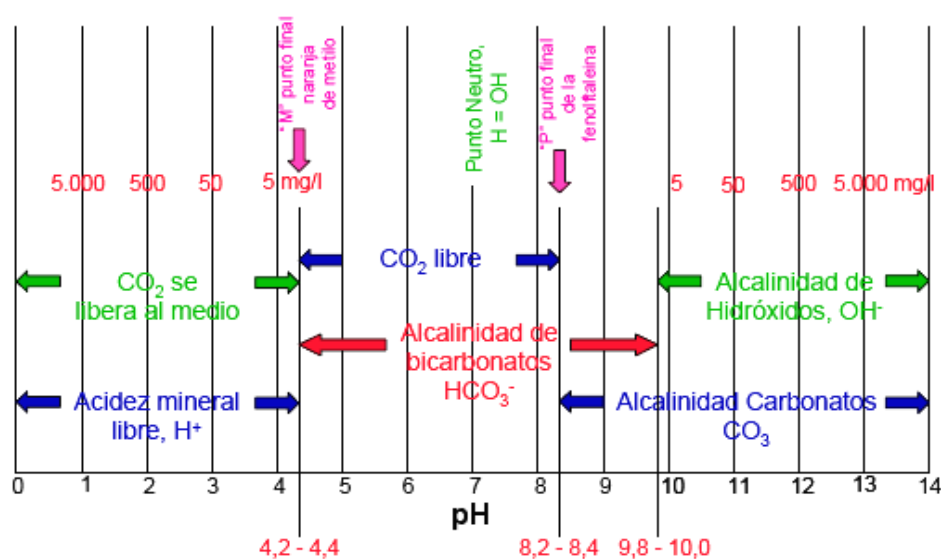


Figura 1.1. Relación entre el pH, la acidez y la alcalinidad.

La alcalinidad, representa la concentración de iones bicarbonato, carbonato o hidróxido, expresados como carbonato de calcio. Se distinguen tres tipos de alcalinidad:

- Alcalinidad "M" o total: se obtiene al neutralizar con ácido una muestra conocida de agua hasta un pH de 4,2 – 4,4 usando el naranja de metilo como indicador.
- Alcalinidad "P" o a la fenolftaleína: se obtiene al neutralizar con ácido una muestra conocida de agua hasta un pH de 8,2 – 8,4.
- Alcalinidad "O", que corresponde a la concentración de iones OH^- . Se calcula normalmente a partir de los valores de "P" y "M": $\text{OH}^- = 2\text{P} - \text{M}$.

Sílice

Se encuentra siempre en dos formas: no reactiva (coloidal) y reactiva (disuelta), ésta clasificación discrimina si se halla en solución o suspendida y se determina a través de la reacción positiva ante un reactivo como molibdato de amonio. En la forma no reactiva, esta se halla finamente dividida; en este caso se elimina por una efectiva coagulación y filtración. Sin embargo, la sílice reactiva es más difícil de eliminar y es en esta forma que puede ocasionar la formación de incrustaciones, si no es controlada adecuadamente. En ausencia de alcalinidad, forma incrustaciones muy fuertes que sólo pueden ser eliminadas por ácido fluorhídrico u otros compuestos del flúor.

Hierro

Rara vez se encuentran en las aguas superficiales, ya que en su forma soluble (Fe^{2+}) sólo se encuentra en aguas exentas de oxígeno disuelto. Por lo tanto, es más frecuente en las aguas de pozos, debido a los estratos por los que ha pasado. Cuando pasa de su forma ferrosa a férrica por acción de un agente oxidante forma depósitos voluminosos, los cuales ocasionan taponamientos y son altamente aislantes. La presencia de oxígeno promueve la oxidación del ion ferroso al férrico, el cual precipita como hidróxido a un pH superior a 4,5.

Manganeso

El Manganeso, al igual que el hierro, sólo se encuentra en aguas subterráneas, aunque con mucha menor frecuencia. Su tendencia es a oxidarse y precipitar como dióxido de manganeso.

Cloruros

Son compuestos altamente solubles y abundantes en las aguas naturales. Los problemas que ocasionan están principalmente relacionados con la corrosión.

Sulfatos

Son altamente solubles, pero el CaSO_4 , puede formar incrustaciones cuando su solubilidad es excedida. También son corrosivos.

1.5.3 Gases disueltos

Virtualmente todas las aguas tienen gases corrosivos como producto del contacto con la atmósfera, principalmente el oxígeno, dióxido de carbono y eventualmente

amoníaco. Los gases encontrados con mayor frecuencia son oxígeno (O_2), nitrógeno (N_2), dióxido de carbono (CO_2) y en menor grado amoníaco (NH_3), ácido sulfhídrico (H_2S) y dióxido de azufre (SO_2).

Oxígeno

La atmósfera (21% O_2) es la fuente de este gas, el cual tiene una solubilidad de hasta 9 ppm a temperatura y presión atmosférica. Su presencia en el agua es el factor determinante en muchos procesos de corrosión.

1.5.4- Problemas asociados con los gases disueltos en el agua

Los gases presentes en el agua deben ser removidos o reducidos a los niveles más bajos posibles, antes de que esta entre en contacto con la caldera. El O_2 disuelto en el agua de la caldera se hace dos veces más corrosivo con cada aumento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la temperatura del agua. Esto resalta la importancia de mantener el O_2 fuera de la caldera.

El dióxido de carbono también causa problemas de corrosión al acompañar el vapor, produciendo un condensado agresivo debido a la formación de ácido carbónico. Los equipos de desgasificación pueden remover la mayoría del oxígeno y dióxido de carbono, presentes en el agua de alimentación. Las cantidades residuales de estos gases pueden y deben ser neutralizados con tratamientos químicos. Ocasionalmente el agua de alimentación puede ser contaminada con amoníaco, el cual en ciertas condiciones acelerará el proceso de corrosión en aleaciones con cobre.

1.5.5- Temperatura del agua de alimentación

Cuando el agua se encuentra a la temperatura de todos los gases libres son teóricamente insolubles. En la práctica, aún cuando las solubilidades de los gases disminuyen substancialmente, estos no son completamente removidos, ya que la temperatura del vapor es ligeramente superior a la del agua líquida. Esto hace que el gas sea más soluble en el agua que en el vapor. Para minimizar esta diferencia de temperatura, los equipos desgasificadores tienen accesorios destinados a la formación de pequeñas gotas de agua (mediante rociadores o bandejas por las cuales desciende el agua). Esta situación, no solo permite una menor diferencia entre el agua y el vapor, sino que además proporciona una mayor superficie para el escape de los gases disueltos.

1.5.6- Mecanismos responsables de formación de incrustaciones

Las incrustaciones se forman por uno de los siguientes mecanismos, o por la combinación de ellos:

1. Precipitaciones erróneas de las sales de dureza relativamente insolubles

Se dice precipitaciones erróneas porque la dureza debe precipitarse en el agua del tambor de vapor de la caldera en forma de lodo, o acomplejarse en forma soluble, antes de que comience a recircular a través de la superficie del metal, donde es dura, adherente y aislante en la transferencia de calor.

Sobresaturación o cristalización de sales relativamente solubles, en la capa de agua que hace contacto con la superficie caliente. La película de agua de caldera que está inmediatamente adyacente a la superficie caliente, viene a ser más concentrada que la masa principal de agua. Cuando se forman las burbujas de vapor y abandonan la superficie, dejan un depósito circular detrás de ellas, posteriormente esta formación circular se llena de incrustaciones. Este hecho puede ocurrir aún cuando el producto de solubilidad de la sal en la masa principal de agua no se haya excedido. Aún la sal más soluble puede formar depósitos, si el agua del tubo se evapora a sequedad, por taponamiento, recirculación pobre, o rata de calentamiento excesivo.

La acumulación de productos de corrosión tales como Fe_2O_3 y CuO , u otro material suspendido, presentes en el agua de alimentación. Estos compuestos sedimentan en la caldera en zonas de altas transferencia de calor. Los aceites y grasas presentes en el agua de alimentación contribuyen a facilitar el depósito de material suspendido.

1.5.7- Control de incrustaciones

Existen métodos para prevenir la formación de incrustaciones en calderas

1. Tratamiento externo del agua de alimentación
2. Tratamiento interno al agua de caldera

Tratamiento externo

Llamado también pretratamiento es una de las partes más críticas del tratamiento del agua de caldera. En él se reducen las impurezas del agua hasta límites aceptables para la operación confiable de la caldera. El pretratamiento va desde una clarificación - suavización hasta la desmineralización completa.

Tratamiento interno

Tiene como objetivo terminar de eliminar, por precipitación o solubilización, los iones (de calcio, magnesio y sílice) causantes de incrustaciones. Igualmente incluye la aplicación de químicos para el control de corrosión en la caldera, tales como eliminadores de oxígeno, soda, cáustica y de químicos acondicionadores de lodos.

1.6- Estado actual de la automatización en la Planta Termoenergética

La CTE de la empresa Pedro Sotto Alba es una de las plantas del país que cuenta con un sistema automatizado con una tecnología moderna, en la misma el operador dispone de un sistema de control donde de una manera muy sencilla puede controlar todos los parámetros del proceso de cada uno de los generadores de vapor desde su PC a través de un programa adaptado a las condiciones de operación de la planta, el cual le permite detectar a tiempo cualquier desviación de los parámetros y poder accionar sobre estos.

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

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

1.7- Conclusiones del capítulo 1

- Se estableció el marco teórico de la investigación, el mismo considera los aspectos más importantes que se deben considerar para la evaluación térmica y exergética de los generadores de vapor objeto de estudio.
- Mediante la revisión bibliográfica se pudo comprobar la existencia de varios trabajos relacionados con el diagnóstico térmico y exergético a instalaciones generadoras de vapor, pero de los realizados en la empresa Pedro Sotto Alba ninguno ha considerado la influencia de la calidad del agua de alimentación.
- La Planta Termoenergética de la empresa Pedro Sotto Alba tiene un alto nivel de automatización, lo que permite el control y la manipulación de los parámetros operacionales en función de las necesidades energéticas de la planta.

Capítulo 2

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

2.1- Introducción

La realización del diagnóstico energético de los generadores estudiados es de gran importancia porque permite determinar la incidencia que tiene el agua de alimentación en las eficiencias térmicas y exergéticas de estas instalaciones, en este sentido el **objetivo** del capítulo es: Realizar el diagnóstico térmico y exergético de los generadores de vapor pertenecientes a la Central Termoeléctrica de la Empresa Pedro Sotto Alba.

2.2- Procedimiento de cálculo para el diagnóstico térmico y exergético de los generadores de vapor

El diagnóstico térmico a los generadores de vapor es de gran importancia ya que determina el consumo de combustible y la eficiencia térmica de los mismos. A continuación se establece la metodología utilizada:

2.2.1- Poder calórico inferior del combustible

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

El cálculo de los volúmenes de los gases producto de la combustión es importante ya que estos son los que transfieren el calor al aire y al agua utilizada en el proceso.

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

- Volumen de aire teórico

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

- Volumen total real de gases triatómicos

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

- Volumen teórico de nitrógeno

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V_a^0 + 0,008 \cdot N^t \quad (2.4)$$

- Volumen teórico de los gases secos

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

- Volumen teórico de los vapores de agua

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

- Volumen teórico total de gases

$$V_g^0 = V_{gs}^0 + V_{H_2O}^0 \quad (2.7)$$

- Volumen real de gases

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

- Volumen real de aire

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

2.2.3- Cálculo del coeficiente de exceso de aire

Para combustión incompleta

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

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

2.2.4- - Cálculo de las entalpías de los gases de la combustión y el 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 : porciento 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^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: Faïres, 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 de los gases producto de la combustión (kJ/kg).

i_{aire} : entalpía del aire (kJ/kg).

I^0_g : entalpía teórica de los gases de escape (kJ/kg).

2.2.5- - Balance térmico por el método directo

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

Donde:

η_{GV} : eficiencia bruta del generador de vapor (%)

B : consumo de combustible (kg/s)

$Q_{\text{útil}}$: calor útil (kJ/s)

Q_d : calor disponible (kJ/kg)

- Determinación del calor disponible.

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

Donde:

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

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

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

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

Donde:

Cc : calor específico del combustible a la temperatura t

$$Cc = 1.783 + 0.025 (t_c - 273)$$

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

Donde:

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

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

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

Donde:

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

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

- Determinación del calor útil.

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

Donde:

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

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

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

D_p : extracciones de purga (kg/s)

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

2.2.6- 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 para los que se corresponden con el presente trabajo se muestra a continuación.

En las ecuaciones (2.21 y 2.22) los parámetros corresponden a las propiedades termodinámicas siguientes: entalpía, temperatura y entropía; los subíndices 1 y 0 corresponden a las propiedades a la temperatura del sistema y del medio ambiente, respectivamente.

▪ Exergía de un flujo

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

$$e_x = (h_1 - h_0) - T_0 \cdot (s_1 - s_0) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.21)$$

$$E_x = \dot{m} \cdot [(h_1 - h_0) - T_0 \cdot (S_1 - S_0)] \quad (\text{kJ/s}) \quad (2.22)$$

Donde:

h : entalpía del flujo; (kJ/kg)

S : entropía del flujo (kJ/kg.K)

m : flujo másico (kg/s)

T_0 : temperatura del medio ambiente (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:

$$E_Q = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (kJ) \quad (2.23)$$

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:

$$E_q = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_M}\right) \quad (2.24)$$

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:

$$\eta_{\text{Exergético}} = \frac{\text{Exergía recuperada}}{\text{Exergía empleada}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (2.25)$$

Considerando 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:

$$\gamma = 1 - \eta_{\text{Exergético}} \quad (2.26)$$

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

2.3- Mediciones obtenidas en los generadores de vapor analizados

Los datos necesarios para el cálculo de las instalaciones productoras de vapor se exponen en la tabla 2.2 los cuales fueron obtenidos en el proceso productivo en las calderas.

La composición química del combustible en masa de trabajo y expresada en porciento es la siguiente:

$$C^t = 86,5 \quad H^t = 10,5 \quad S^t = 1,28 \quad O^t = 0,6 \quad W^t = 1,03 \quad A^t = 0,046$$

Tabla 2.2. Mediciones de los parámetros para los cuatro generadores de vapor.

Mediciones de los parámetros para el generador de vapor 1							
Parámetros del generador de vapor (Valores promedio)	Generador de vapor 1 con agua de mala calidad			Generador de vapor 1 Con agua de buena calidad			U/M
	V-1	V-2	V-3	V-1	V-2	V-3	
Producción de vapor sobrecalentado	61,8	57,7	58,6	67,3	68	68	(t/h)
Presión del vapor sobrecalentado	45	46	45	46	45	45	(atm)
Temperatura del vapor sobrecalentado	380	380	385	383	383	382	(°C)
Temperatura del agua de alimentación	189	186	198	189	193	197	(°C)
Temperatura del combustible	112	113	110	110	110	111	(°C)
Temperatura de los gases de escape	206	200	196	238	240	238	(°C)
Temperatura del medio ambiente	32	32	32	32	32	32	(°C)
Consumo de combustible	4,5	4,1	4,3	4,5	4,5	4,6	(t/h)
Mediciones de los parámetros para el generador de vapor 2							
Parámetros del generador de vapor (Valores promedio)	Generador de vapor 2 con agua de mala calidad			Generador de vapor 2 Con agua de buena calidad			U/M
	V-1	V-2	V-3	V-1	V-2	V-3	
Producción de vapor sobrecalentado	63,5	57,3	56,3	67,3	68	68	(t/h)
Presión del vapor sobrecalentado	45	46	45	46	46	46	(atm)
Temperatura del vapor sobrecalentado	376	380	385	382	381	383	(°C)
Temperatura del agua de alimentación	189	186	198	194	194	194	(°C)
Temperatura del combustible	112	113	110	110	110	112	(°C)
Temperatura de los gases de escape	235	225	220	170	171	172	(°C)

Temperatura del medio ambiente	32	32	32	32	32	32	(°C)
Consumo de combustible	4,1	3,9	3,8	4,4	4,6	4,6	(t/h)
Mediciones de los parámetros para el generador de vapor 3							
Parámetros del generador de vapor (Valores promedio)	Generador de vapor 3 con agua de mala calidad			Generador de vapor 3 Con agua de buena calidad			U/M
	V-1	V-2	V-3	V-1	V-2	V-3	
Producción de vapor sobrecalentado	66	52,3	58,6	67,3	68	68	(t/h)
Presión del vapor sobrecalentado	45	46	45	46	46	46	(atm)
Temperatura del vapor sobrecalentado	376	380	385	371	373	374	(°C)
Temperatura del agua de alimentación	189	186	198	190	191	191	(°C)
Temperatura del combustible	112	113	110	112	113	113	(°C)
Temperatura de los gases de escape	235	225	220	248	252	251	(°C)
Temperatura del medio ambiente	32	32	32	32	32	32	(°C)
Consumo de combustible	4,4	3,5	4,0	4,5	4,5	4,5	(t/h)
Mediciones de los parámetros para el generador de vapor 5							
Parámetros del generador de vapor (Valores promedio)	Generador de vapor 5 con agua de mala calidad			Generador de vapor 5 Con agua de buena calidad			U/M
	V-1	V-2	V-3	V-1	V-2	V-3	
Producción de vapor sobrecalentado	99	98	97,6	99	100	102	(t/h)
Presión del vapor sobrecalentado	45	46	45	45	46	46	(atm)
Temperatura del vapor sobrecalentado	376	380	385	395	393	393	(°C)
Temperatura del agua de alimentación	189	186	198	210	212	212	(°C)
Temperatura del combustible	112	110	110	111	113	113	(°C)
Temperatura de los gases de escape	235	225	220	233	240	240	(°C)
Temperatura del medio ambiente	32	32	32	32	32	32	(°C)
Consumo de combustible	6,9	6,7	6,6	6,5	6,8	6,8	(t/h)

2.4- Resultados de la evaluación realizada a los generadores de vapor

El balance térmico de la instalación se realiza en correspondencia con la metodología de cálculo expuesta, utilizando los métodos directo e indirecto descritos en la literatura especializada (Generación de vapor, 1970; Pérez, 1972; Pankrátov, 1987). Los

parámetros calculados en las condiciones de explotación analizadas en el trabajo se muestran en la tabla 2.3-2.6.

Tabla 2.3. Valores de los parámetros fundamentales de la evaluación térmica y exergética realizada al generador de vapor 1.

Parámetros	Con agua de mala calidad			Con agua de buena calidad			U/M
	V- 1	V- 2	V- 3	V-1	V- 2	V- 3	
Qb^t	$4,019 \times 10^7$	$4,019 \times 10^7$	$4,019 \times 10^7$	$4,017 \times 10^7$	$4,017 \times 10^7$	$4,017 \times 10^7$	(J/kg)
V^0_a	10,495	10,495	10,495	10,489	10,489	10,489	(m ³ /kg)
V_{RO_2}	1,623	1,623	1,623	1,622	1,622	1,622	(m ³ /kg)
$V^0_{N_2}$	8,293	8,293	8,293	8,289	8,289	8,289	(m ³ /kg)
V^0_{gs}	9,917	9,917	9,917	9,911	9,911	9,911	(m ³ /kg)
$V^0_{H_2O}$	1,347	1,347	1,347	1,347	1,347	1,347	(m ³ /kg)
V^0_g	11,264	11,264	11,264	11,258	11,258	11,258	(m ³ /kg)
V_g	17,141	13,106	13,083	12,701	12,814	14,571	(m ³ /kg)
V_a	14,693	12,094	12,076	11,775	11,865	13,135	(m ³ /kg)
α	1,4	1,152	1,151	1,123	1,131	1,252	-
Q_d	$4,398 \times 10^7$	$4,335 \times 10^7$	$4,334 \times 10^7$	$4,362 \times 10^7$	$4,364 \times 10^7$	$4,399 \times 10^7$	(J/kg)
$Q_{\text{útil}}$	$1,505 \times 10^{11}$	$1,426 \times 10^{11}$	$1,441 \times 10^{11}$	$1,578 \times 10^{11}$	$1,595 \times 10^{11}$	$1,582 \times 10^{11}$	(J/h)
η_{GV} M.D	76,031	80,226	77,32	80,404	81,194	78,187	(%)
$\eta_{\text{Exergético}}$	47,027	49,166	47,108	49,446	49,926	48,534	(%)
γ	52,973	50,834	52,892	50,554	50,074	51,466	(%)

Tabla 2.4. Valores de los parámetros fundamentales de la evaluación térmica y exergética realizada al generador de vapor 2.

Parámetros	Con agua de mala calidad			Con agua de buena calidad			U/M
	V- 1	V- 2	V- 3	V-1	V- 2	V- 3	
Qb^t	$4,019 \times 10^7$	$4,019 \times 10^7$	$4,019 \times 10^7$	$4,017 \times 10^7$	$4,017 \times 10^7$	$4,017 \times 10^7$	(J/kg)

V^0_a	10,495	10,495	10,495	10,489	10,489	10,489	(m ³ /kg)
V_{RO_2}	1,623	1,623	1,623	1,622	1,622	1,622	(m ³ /kg)
$V^0_{N_2}$	8,293	8,293	8,293	8,289	8,289	8,289	(m ³ /kg)
V^0_{gs}	9,917	9,917	9,917	9,911	9,911	9,911	(m ³ /kg)
$V^0_{H_2O}$	1,347	1,347	1,347	1,347	1,347	1,347	(m ³ /kg)
V^0_g	11,264	11,264	11,264	11,258	11,258	11,258	(m ³ /kg)
V_g	13,152	14,035	14,082	12,827	13,567	14,571	(m ³ /kg)
V_a	12,129	12,772	12,805	11,775	12,437	13,175	(m ³ /kg)
α	1,156	1,217	1,22	1,128	1,186	1,252	----
Q_d	$4,378 \times 10^7$	$4,395 \times 10^7$	$4,396 \times 10^7$	$4,256 \times 10^7$	$4,256 \times 10^7$	$4,284 \times 10^7$	(J/kg)
$Q_{\text{útil}}$	$1,477 \times 10^{11}$	$1,334 \times 10^{11}$	$1,311 \times 10^{11}$	$1,572 \times 10^{11}$	$1,588 \times 10^{11}$	$1,588 \times 10^{11}$	(J/h)
η_{GV} M.D	82,28	77,829	78,64	83,945	86,529	80,6	(%)
$\eta_{\text{Exergético}}$	50,299	47,99	48,308	50,198	51,78	48,626	(%)
γ	49,701	52,01	51,692	49,802	48,22	51,374	(%)

Tabla 2.5. Valores de los parámetros fundamentales de la evaluación térmica y exergética realizada al generador de vapor 3.

Parámetros	Con agua de mala calidad			Con agua de buena calidad			U/M
	V- 1	V- 2	V- 3	V-1	V- 2	V- 3	
Qb^t	$4,019 \times 10^7$	$4,019 \times 10^7$	$4,019 \times 10^7$	$4,017 \times 10^7$	$4,017 \times 10^7$	$4,017 \times 10^7$	(J/kg)
V^0_a	10,495	10,495	10,495	10,489	10,489	10,489	(m ³ /kg)
V_{RO_2}	1,623	1,623	1,623	1,622	1,622	1,622	(m ³ /kg)
$V^0_{N_2}$	8,293	8,293	8,293	8,289	8,289	8,289	(m ³ /kg)
V^0_{gs}	9,917	9,917	9,917	9,911	9,911	9,911	(m ³ /kg)
$V^0_{H_2O}$	1,347	1,347	1,347	1,347	1,347	1,347	(m ³ /kg)
V^0_g	11,264	11,264	11,264	11,258	11,258	11,258	(m ³ /kg)

V_g	13,078	12,426	13,106	13,686	14,631	14,759	(m ³ /kg)
V_a	12,073	11,551	12,094	12,523	13,175	13,259	(m ³ /kg)
α	1,50	1,101	1,152	1,194	1,256	1,264	----
Q_d	$4,367 \times 10^7$	$4,353 \times 10^7$	$4,367 \times 10^7$	$4,4 \times 10^7$	$4,426 \times 10^7$	$4,428 \times 10^7$	(J/kg)
$Q_{\text{útil}}$	$1,528 \times 10^{11}$	$1,207 \times 10^{11}$	$1,363 \times 10^{11}$	$1,558 \times 10^{11}$	$1,583 \times 10^{11}$	$1,583 \times 10^{11}$	(J/h)
η_{GV} M.D	79,535	79,24	78,017	78,695	83,205	79,462	(%)
$\eta_{\text{Exergético}}$	48,385	47,893	47,756	48,244	51,133	49,000	(%)
γ	51.615	52,107	52,244	51,756	48,867	51,000	(%)

Tabla 2.6. Valores de los parámetros fundamentales de la evaluación térmica y exergética realizada al generador de vapor 5.

Parámetros	Con agua de mala calidad			Con agua de buena calidad			U/M
	V- 1	V- 2	V- 3	V-1	V- 2	V- 3	
Qb^t	$4,019 \times 10^7$	$4,019 \times 10^7$	$4,019 \times 10^7$	$4,017 \times 10^7$	$4,017 \times 10^7$	$4,017 \times 10^7$	(J/kg)
V_a^0	10,495	10,495	10,495	10,489	10,489	10,489	(m ³ /kg)
V_{RO_2}	1,623	1,623	1,623	1,622	1,622	1,622	(m ³ /kg)
$V_{N_2}^0$	8,293	8,293	8,293	8,289	8,289	8,289	(m ³ /kg)
V_{gs}^0	9,917	9,917	9,917	9,911	9,911	9,911	(m ³ /kg)
$V_{H_2O}^0$	1,347	1,347	1,347	1,347	1,347	1,347	(m ³ /kg)
V_g^0	11,264	11,264	11,264	11,258	11,258	11,258	(m ³ /kg)
V_g	13,258	13,106	13,185	13,645	13,736	14,92	(m ³ /kg)
V_a	12,209	12,094	12,154	12,493	12,559	13,364	(m ³ /kg)
α	1,163	1,152	1,158	1,191	1,197	1,274	----
Q_d	$4,074 \times 10^7$	$4,073 \times 10^7$	$4,049 \times 10^7$	$4,384 \times 10^7$	$4,073 \times 10^7$	$4,073 \times 10^7$	(J/kg)
$Q_{\text{útil}}$	$2,316 \times 10^{11}$	$1,547 \times 10^{11}$	$1,493 \times 10^{11}$	$2,271 \times 10^{11}$	$2,289 \times 10^{11}$	$2,312 \times 10^{11}$	(J/h)
η_{GV} M.D	82,381	82,63	85,897	87,15	82,639	84,381	(%)
$\eta_{\text{Exergético}}$	48,064	48,313	49,801	50,199	49,978	48,849	(%)

γ	51,936	51,687	50,199	49,801	52,022	51,151	(%)
----------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	-----

Los cálculos obtenidos demuestran que la eficiencia térmica de los generadores de vapor analizados se comporta en los rangos permisibles para estas industrias, sin embargo se aprecian fluctuaciones en los valores calculados, las mismas están determinadas por la compleja interrelación que existe entre todos los parámetros característicos del proceso de obtención de vapor.

El procedimiento de cálculo empleado se resolvió con la ayuda del software Mathcad Professional 2001. Los resultados íntegros para el generador de vapor 1 (variante 1) considerando el agua de mala calidad se exponen en el Anexo del trabajo.

2.5- Conclusiones del capítulo 2

- ❖ Quedó establecido el procedimiento de cálculo para la evaluación de los generadores de vapor de la empresa Pedro Sotto Alba, el mismo considera el Método Directo para el cálculo de la eficiencia térmica y el método de la exergía para el cálculo del rendimiento exergético, los cuales se exponen en investigaciones precedentes.
- ❖ Las eficiencias térmicas promedio para las variantes donde se empleó el agua de mala calidad fueron 77,86; 79,58; 78,93 y 83,64% para los generadores de vapor 1; 2; 3 y 5, respectivamente. Cuando se empleó agua de buena calidad los resultados fueron ligeramente superiores y ascendieron a 79,93; 83,69; 80,45 y 84,72%.
- ❖ Los rendimientos exergéticos promedios obtenidos considerando las dos condiciones de explotación analizadas fueron 48,53; 49,53; 48,74 y 49,20% para los generadores de vapor 1; 2; 3 y 5 de la empresa Pedro Sotto Alba.

Capítulo 3

Análisis de los resultados. Valoración económica e impacto ambiental

3.1- Introducción

La valoración de los resultados de la investigación es importante porque permite determinar la interrelación entre los principales parámetros que inciden en el proceso de producción de vapor. También es fundamental en las instalaciones productoras de vapor el análisis de los impactos económicos y ambientales. En correspondencia con lo anterior se define como objetivo para el presente capítulo:

Analizar los resultados de la evaluación térmica y exergética realizadas valorando los impactos económicos y ambientales asociados a los generadores de vapor.

3.2- Análisis de los resultados del balance térmico y exergético

Los resultados obtenidos en el diagnóstico térmico y exergético realizados a los generadores de vapor de la Central Termoeléctrica de la empresa Pedro Sotto Alba demuestran una aceptable capacidad de aprovechamiento de la energía térmica en estos equipos, en ellos el rendimiento térmico promedio obtenido mediante el método directo supera el 77% cuando se alimentó a los equipos agua de mala calidad y fueron superiores al 79% durante el empleo de agua de buena calidad, sin embargo, el parámetro considerado tuvo un comportamiento similar en ambas condiciones de explotación, pero en la segunda (con agua de buena calidad) mostró un ligero incremento que ascendió a 2,07; 4,11; 1,52 y 1,08% para los generadores de vapor 1, 2, 3 y 5, respectivamente.

Al valorar los resultados promedios obtenidos para el rendimiento exergético se observan fluctuaciones en los mismos que pueden ser atribuibles a la compleja interrelación que existe entre los parámetros del proceso, también debe destacarse la aceptable capacidad que tienen las instalaciones para aprovechar el calor útil máximo disponible en el proceso, en general cuando se explotaron las calderas con agua de mala calidad los rendimientos exergéticos promedios fueron igual a 48,34% y al mejorar la calidad del agua de alimentación el valor de la eficiencia exergética

promedio (49,66) se incrementó en 1,32%. Los rendimientos exergéticos promedios obtenidos para cada uno de los generadores considerando las dos condiciones de explotación (en conjunto) fueron 48,53; 49,53; 48,74 y 49,20%. De los valores relacionados se infiere que están en correspondencia con los valores de este parámetro recomendados por las literaturas especializadas en la temática (Generadores de vapor, 1972; Pankratov, 1987).

3.2.1- Comportamiento de los parámetros más importantes del proceso

El comportamiento de la producción de vapor (figura 3.1) indica un incremento de la productividad de los equipos cuando se explotan los mismos con agua de buena calidad, en general, los incrementos mostrados por las calderas 1, 2 y 3 son apreciables. Para agua de mala calidad el valor promedio del parámetro se mantiene cercano a las 60 t/h, mientras que para el agua de buena calidad está en el orden de las 70 t/h. En el caso del generador 5 las productividades son cercanas a las 100 t/h porque tiene características constructivas diferentes, los valores promedios en esta caldera prácticamente son iguales porque el equipo no sufrió graves daños producto a la contaminación del agua de alimentación.

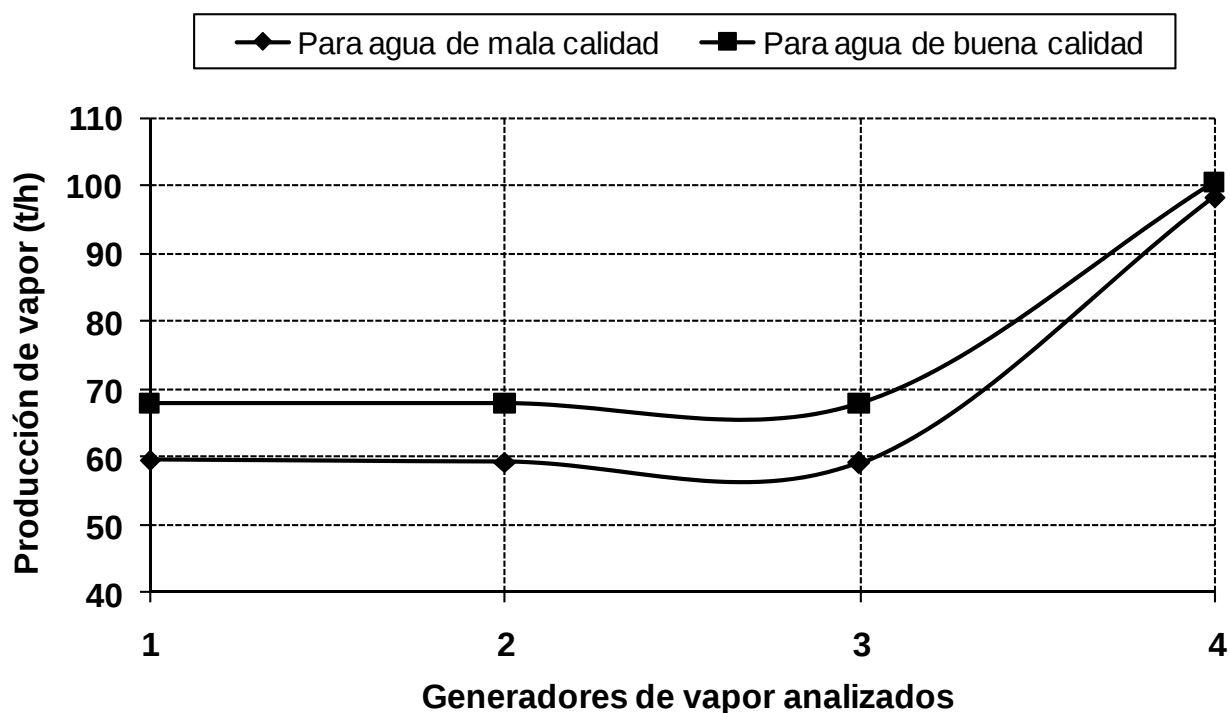


Figura 3.1. Comportamiento de la producción de vapor sobrecalentado promedio respecto a la calidad del agua de alimentación.

Observación: Los números 1, 2, 3 y 4 mostrados en la figura representan a los generadores de vapor 1, 2, 3 y 5, respectivamente.

Los consumos de combustibles mostraron comportamientos semejantes a la productividad (figura 3.2), en los generadores 1, 2 y 3 se consumió más combustible cuando se trabajó con agua de buena calidad, esta tendencia se corresponde con el incremento de las productividades mostradas por las instalaciones. El generador 5 mantuvo el consumo prácticamente constante porque se producción de vapor varió muy poco.

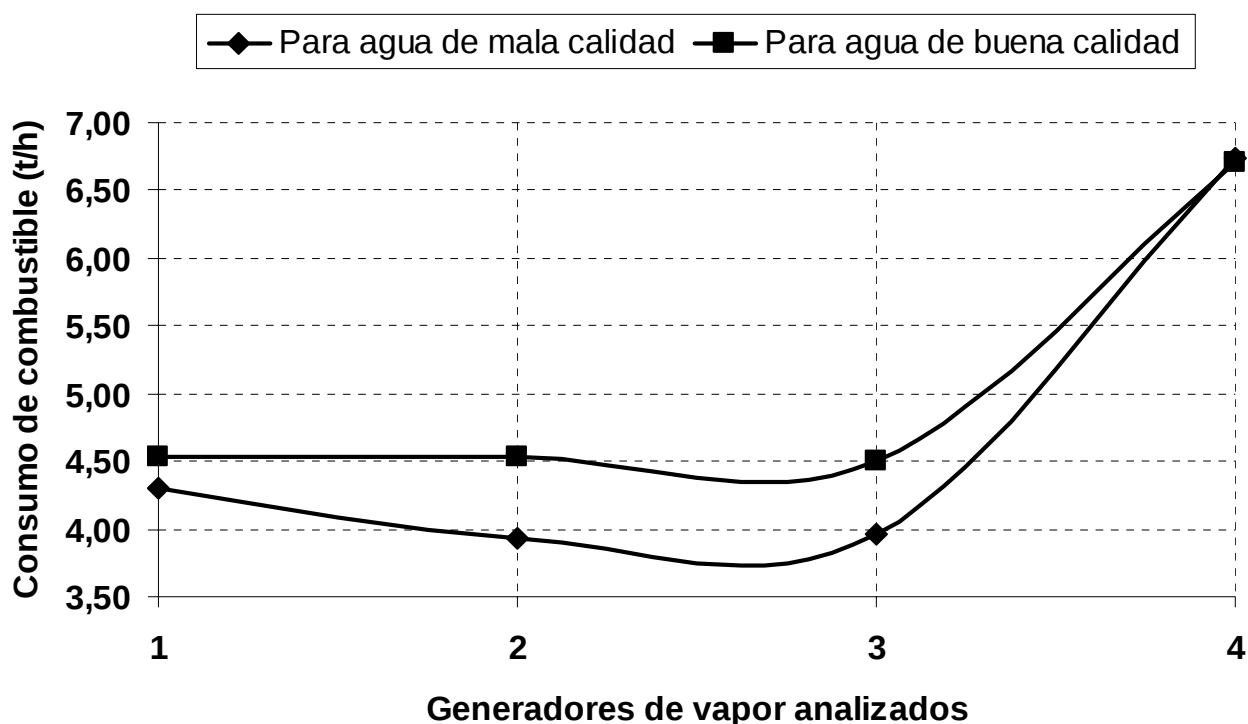


Figura 3.2. Comportamiento del consumo de combustible promedio respecto a la calidad del agua de alimentación.

En el caso de los rendimientos térmicos y exergéticos (figura 3.3 y 3.4) se aprecia la notable influencia que tiene la calidad del agua de alimentación, en ellos se demostró que no solo es importante la temperatura del agua, sino que las impurezas presentes en ella determinan el grado de aprovechamiento del calor y la exergía en el sistema. Las diferencias entre los valores promedios obtenidos para las dos variantes analizadas (agua de mala y buena calidad) son apreciables en todos los generadores, siendo mayores los valores correspondientes a la explotación de los equipos con agua de buena calidad.

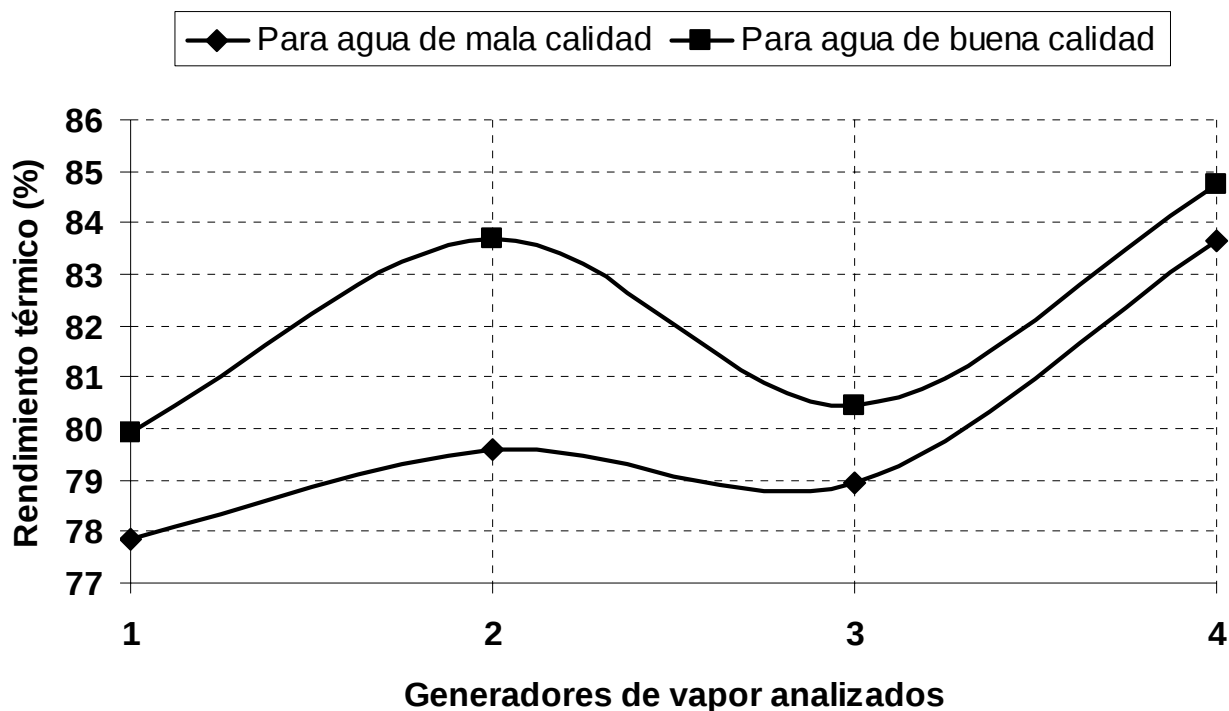


Figura 3.3. Comportamiento del rendimiento térmico promedio respecto a la calidad del agua de alimentación.

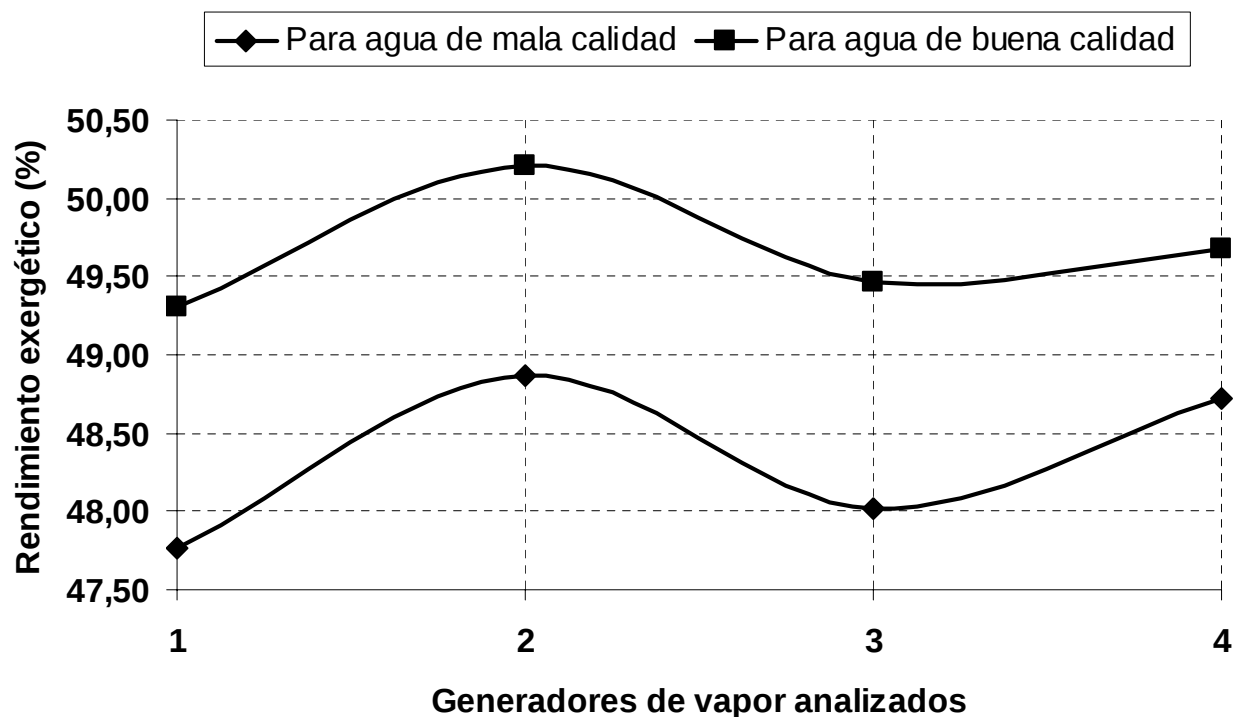


Figura 3.4. Comportamiento del rendimiento exergético promedio respecto a la calidad del agua de alimentación.

3.3- Valoración económica

En la actualidad la empresa Pedro Sotto Alba compra el combustible a un costo de 473,23 USD/tonelada, considerando este valor se procede a determinar el gasto por concepto de consumo de combustible en que se incurre en los 4 generadores de vapor estudiados.

Considerando que los generadores de vapor trabajan 24 horas, en el período de Diciembre/2009-Junio/2010 se determina los gastos totales promedios por consumo de combustible para cada generador utilizando agua de mala y buena calidad, los mismos se muestran en las Tablas 3.1 y 3.2.

Tabla 3.1. Consumo de combustible para los diferentes generadores de vapor utilizando agua de mala calidad.

Generadores de vapor	Consumos de combustible para diferentes períodos			
	t/h	t/día	t/mes	t/7meses
Generador de vapor 1	4,30	103,20	3096	21672
Generador de vapor 2	4,00	96,00	2880	20160
Generador de vapor 3	3,97	95,20	2856	19992
Generador de vapor 5	6,75	162,00	4860	34020
Total de consumos	19,02	456,40	13692	95844
Importe total para el consumo calculado (USD)				45 356 256,1

Los resultados mostrados indican la incidencia económica que tienen los generadores de vapor en la empresa debido a que estos son altos consumidores de combustible y por ende la entidad tiene que invertir grandes sumas de dólares a la compra del combustible que consumen estos equipos.

Del análisis de los resultados anteriores se obtiene que el gasto total por consumo de combustible en el proceso de generación de vapor durante los meses de Diciembre/2009-Junio/2010 asciende a 45 356 256,1 USD. Los resultados anteriormente mostrados (tabla 3.1) se obtuvieron para la explotación de los generadores de vapor con agua de mala calidad. Se hicieron cálculos análogos utilizando agua de buena calidad y los resultados obtenidos se exponen en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Consumo de combustible para los diferentes generadores de vapor utilizando agua de buena calidad.

Generadores de vapor	Consumos de combustible para diferentes períodos			
	t/h	t/día	t/mes	t/7meses
Generador de vapor 1	4,53	108,80	3264	22848
Generador de vapor 2	4,53	108,80	3264	22848
Generador de vapor 3	4,50	108,00	3240	22680
Generador de vapor 5	6,70	160,80	4824	33768
Total de consumos	20,27	486,40	14592,00	102 144,00
Importe total para el consumo calculado (USD)				48 337 605,12

Como se aprecia existe un incremento en el consumo de combustible (para el periodo analizado) igual a 6300 toneladas entre las variantes consideradas, dicho incremento generó una erogación por parte de la empresa de 2 981 349 USD adicionales. Este comportamiento se debe a que cuando los generadores trabajaron con agua de buena calidad aunque su rendimiento promedio fue ligeramente superior los consumos de combustibles aumentaron conforme al aumento de la producción de vapor que tuvo lugar en las instalaciones.

También durante la afectación ocurrida producto a la contaminación del agua de alimentación a las calderas hubo una reducción de la productividad de los generadores 2 y 5. Además colapsaron los generadores 1 y 3. Esta problemática trajo consigo que se dejaran de producir una gran cantidad de vapor en la empresa, lo que obligó a la disminución de la capacidad de producción de la entidad. También influyó en la cantidad de energía eléctrica que se generó durante el periodo analizado, en general la empresa fue más dependiente del Sistema Electroenergético Nacional. Las cantidades de vapor no producidas por cada generador se exponen en la tabla 3.3, los resultados que se muestran en la referida tabla fueron obtenidos del reporte de producción diario de la central termoeléctrica de la empresa Pedro Sotto Alba.

Tabla 3.2. Cantidad de vapor no producido producto a la utilización del agua de alimentación de mala calidad.

Generadores de vapor	Cantidad de vapor no producida en la CTE	
	Tiempo de afectación	Vapor no producido

	(h)	(t)
Generador de vapor 1	43,30	1274,93
Generador de vapor 2	Disminuyó capacidad	26,36
Generador de vapor 3	24,00	687,77
Generador de vapor 5	Disminuyó capacidad	24,00
Total	67,30	2013,06

Se debe destacar que durante el periodo de afectación del agua de alimentación a los generadores de vapor se incrementaron la emanaciones de agua contaminada producto del aumento de las extracciones continuas, esto provocó grandes pérdidas de energía y de productos químicos por cuanto el líquido drenado ya había sido calentado y tratado químicamente con anterioridad.

3.4- Impacto ambiental de los generadores de vapor

A nivel mundial las centrales termoeléctricas consumen más de la tercera parte de la cantidad total de combustible extraído, por lo que ejercen gran influencia sobre el medio ambiente debido a la emisión a la atmósfera de gran cantidad de gases producto de la combustión y a la contaminación de los ríos, mares y lagos con sustancias tóxicas como restos de petróleo y otras.

En Cuba a pesar del desarrollo de las industrias, el gobierno revolucionario ha adoptado las medidas necesarias para garantizar la conservación del medio ambiente. Las plantas termoeléctricas son consideradas fuentes importantes de emisiones atmosféricas debido a que afectan la calidad del aire en el área local. La combustión que ocurre en los procesos termoeléctricos emite dióxido de azufre(SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), entre otras sustancias que resultan perjudiciales para el hombre, los animales y las plantas.

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

- **Óxidos de azufre**

Los óxidos de azufre que se forman durante el proceso de quemado de un combustible son el SO_2 y, en menor medida, el SO_3 . Sus cantidades dependen del contenido de azufre en el combustible. Los carbones, en términos generales, son los más contaminantes y en orden descendente, le siguen el aceite combustible pesado

(fuel-oil), el aceite combustible ligero (gas oil) y el gas. 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 es el resultado de una combustión incompleta de los reactantes de los combustibles orgánicos, por ello la magnitud que se emite a la atmósfera, depende esencialmente de la calidad con que se efectúe el proceso de combustión.

Los efectos nocivos más importantes del CO son:

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

• **Óxidos nitrosos**

Los óxidos nitrosos (NO_x) son el resultado de la combustión del nitrógeno del combustible y del aire. Este término incluye un alto número de especies gaseosas, pero las más significativas, según las cantidades emitidas son: el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el óxido nitroso (NO). De acuerdo al nivel de nocividad el más peligroso de los dos resulta el NO_2 .

La cantidad de NO_x formada, depende de la cantidad de oxígeno y nitrógeno disponibles durante la combustión, la temperatura, el nivel de mezclado que se alcance y el tiempo de la reacción química.

Los efectos perjudiciales más relevantes de los NO_x son:

- Creación de desórdenes respiratorios en seres humanos y animales.
- Reducción de la visibilidad por adsorción del espectro visible para el hombre.
- Afectaciones a las plantas por lluvias ácidas.
- Aceleración de la corrosión y la degradación material.
- Contribución a la formación del smog sobre las ciudades.

- Se le asocia también con la formación de ozono en las zonas bajas de la atmósfera, el cual resulta un tóxico para el hombre.
- Se le atribuyen también propiedades cancerígenas.

Hollín

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

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

Pentóxido de Vanadio

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

• Particulados

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

Las principales afectaciones que causan son:

- Alteraciones de la capacidad respiratoria de personas y animales.
- Reducción de la visibilidad.
- Alteración de las propiedades de los suelos cultivables.
- Intensificación de los efectos negativos del SO₂.
- Contribución a la formación del smog.

- **Compuestos orgánicos volátiles**

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

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

3.4.1 Métodos de reducción de las emisiones contaminantes

La selección de las vías para la reducción de las emisiones contaminantes tiene en cuenta cuatro factores fundamentales:

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

Reducción del SO₂

- Scrubber húmedo: consiste en el lavado de los gases con spays de agua y participación de otras sustancias (Cal y Óxido de magnesio).
- Scrubber seco: los gases son rociados con una solución acuosa de cal apagada para eliminar el SO₂.
- Lecho fluidizado: empleo de inertes absorbedores del azufre en el lecho.
- Inyección neumática del horno: el horno es inyectado neumáticamente con sustancias como Cal, Dolomita o Cal hidratada.

Reducción del CO

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

Reducción de los NO_x

- Quemadores de bajo NO_x

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

- Lecho fluidizado.

El empleo del lecho fluidizado con superficies de enfriamiento sumergidas, permite el mantenimiento de la temperatura en valores tan bajos, que logra una significativa reducción de los NO_x.

- Inyección de agentes químicos.

La reducción de los NO_x a N₂ y H₂O, 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.

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

- Colectores mecánicos.

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

3.5- Conclusiones del capítulo 3

- ❖ Los cálculos económicos realizados indican que existe un incremento en el consumo de combustible igual a 6300 toneladas entre las variantes consideradas, lo cual genera una erogación por parte de la empresa de 2 981 349 USD adicionales.
- ❖ La afectación de la calidad del agua de alimentación suministrada a los generadores de vapor provocó una reducción de la productividad en 50,36 toneladas para los generadores 2 y 5. También determinó el colapso de los generadores 1 y 3, los cuales dejaron de producir 1962,7 toneladas de vapor en el periodo considerado.
- ❖ En los generadores de vapor analizados las principales fuentes contaminantes detectadas durante la investigación fueron las emisiones de gases nocivos y las emanaciones de agua caliente contaminada.

Conclusiones generales

- Se comprobó que la calidad del agua de alimentación a los generadores de vapor puede afectarse por múltiples elementos contaminantes. La influencia que tiene la misma en las eficiencias térmicas y exergéticas no ha sido estudiada en las investigaciones precedentes consultadas.
- Los rendimientos térmicos promedios obtenidos para los generadores oscilaron entre 77,86 y 83,64% cuando se utilizó agua de mala calidad. Para el agua de buena calidad fueron superiores y el intervalo de variación estuvo entre 79,93 y 84,72%.
- Las eficiencias exergéticas determinadas para los generadores de vapor 1, 2, 3 y 5 son satisfactorias, sus valores promedios considerando la variación de la calidad del agua fueron superiores al 48,5%.
- Los gastos económicos asociados a la explotación de los generadores de vapor de la empresa Pedro Sotto Alba fueron igual a 45 356 256, 1 y 48 337 605, 12 USD para el agua de alimentación con mala y buena calidad, respectivamente.
- En los generadores de vapor estudiados existen múltiples fuentes contaminantes del medio ambiente. Las más influyentes son los gases producto de la combustión del petróleo, el agua caliente contaminada que se drena en las extracciones continuas, el ruido y las altas temperaturas.

Recomendaciones

- Instalar el equipamiento necesario para la medición del pH y la conductividad del agua de alimentación a la entrada de la caldera, esto permitiría identificar los problemas asociados al agua antes de entrar al sistema.
- Instalar un flujómetro para la medición y el control del vapor de atomización en correspondencia con la productividad de los generadores de vapor.
- Evaluar los generadores de vapor estudiados considerando otros aspectos no analizados en la presente investigación.

Bibliografía

1. Borroto, A.; Ángel. R. Combustión y Generación de vapor. Maestría en eficiencia energética. Universidad de Cienfuegos. 2007.
2. Caballero, A; Y. González. *Diagnóstico energético de los Generadores de Vapor de las empresas productoras de níquel*. Trabajo de Diploma. ISMM 2007. 43 p.
3. Colectivo de Autores. Generadores de Vapor. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana, 1970. 520 p.
4. Del Valle, R. *Balance energético verificativo de la planta eléctrica de la empresa René Ramos Latour*. Trabajo de Diploma. ISMM 2002. 64 p.
5. Faires, V. *Termodinámica*. La Habana: Edición Revolucionaria, 1991. 807p.
6. Fernández, E. *Termodinámica Técnica*. La Habana: Editorial "Félix Varela, 1994. Tomo I. 290 p.
7. Fernández, E. Utilización del vapor en la industria. Editorial Científico-Técnica. La Habana, 2001. 138 p.
8. Fonseca, A. Análisis termoexergético de los generadores de vapor de la empresa Ernesto Che Guevara. Trabajo de Diploma. ISMM 2009. 55 p.
9. Góngora, E. Evaluación energética de los generadores de vapor, deareadores y calentadores de agua de la empresa Pedro Sotto Alba. Trabajo de Diploma. ISMM 2009. 60 p.
10. Hernández, 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.
11. Hurtado, G. Estudio de la influencia en el medio ambiente del sistema de generación de la empresa de níquel Ernesto Che Guevara y el sistema de transmisión eléctrico adyacente. Tesis doctoral. ISMM. 1999.
12. Jarrosay, E. Balance energético de las calderas del hospital Guillermo Luis Fernández. Trabajo de Diploma. ISMM. 2000. 70 p.
13. Lahenz, V. *Calculo de la eficiencia en los generadores de vapor. Trabajo de Diploma*. ISMM 2001. 56 p.
14. *Manual de operaciones de la Central Termoeléctrica Empresa "Pedro Sotto Alba"*. Moa, 2006.

15. Muhica, J. Evaluación termoeconómica del ciclo de la central termoeléctrica de la empresa Ernesto Guevara. Trabajo de Diploma. ISMM, 2001. 62 p.
16. Oliva, R. Luis. Explotación y materiales constructivos de generadores de vapor. Ediciones ISPJAM. Santiago de Cuba. 1988. 320 p.
17. Pankrátov, G. Problemas de Termotecnia. Editorial MIR Moscú. URSS, 1987. 235p.
18. Pereira, M. Balance de energía de la caldera del comedor del ISMM. Proyecto de curso. 2001.
19. Pérez, L. Generadores de Vapor. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana. 1972. 447 p.
20. Proyecto de modernización de la Central Termoeléctrica. Moa. 2005.
21. Rivera, Y.; Y. Regueiferos. Diagnóstico térmico de los Generadores de Vapor de las empresas presupuestadas del municipio Moa. Trabajo de Diploma. ISMM 2007. 50 p.
22. Rodríguez, Y. Análisis del petróleo crudo nacional empleado en la empresa Ernesto Che Guevara. Trabajo de Diploma. ISMM. 2001. 80 p.
23. Rodríguez, L. Evaluación térmica y exergética de los generadores de vapor de la empresa Pedro Sotto Alba. Trabajo de Diploma. ISMM 2008. 53 p.
24. Rizhkin, Y. V. Centrales termoeléctricas. Primera y segunda parte. Editorial pueblo y educación. Ciudad de La Habana. 1987. 370 p.
25. 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. 71 p.
26. Suárez, V. Diagnóstico del sistema de generación de la CTE de la empresa Rene Ramos Latourt. Trabajo de Diploma. ISMM 2005. 62 p.
27. Tanquero, N. Guía metodológica para proyectos del curso de generadores de vapor. Editorial ISPJAE. La Habana. Cuba. 1997. 120 p.
28. Tuzón, E. Diagnóstico energético del generador de vapor 1 de la empresa Ernesto Che Guevara. Proyecto de Curso. ISMM. 2005. 30 p.
29. Vukalovitch, M. *Propiedades Termodinámicas del agua y el vapor*. Editorial. Revolucionaria 1978. 245 p.

ANEXO

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

VARIANTE 1 PARA AGUA DE MALA CALIDAD

Poder calórico bajo del combustible Q_b (J/kg)

Todos los elementos en masa de trabajo

$$C := 86.5 \quad H := 10.5 \quad O := 0.6 \quad S := 1.28 \quad W := 1.03$$

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

$$Q_b = 4.019 \times 10^7 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

Volumen de aire teórico V_a

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

$$V_a = 10.495 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen total real de gases triatómicos V_{RO2}

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

$$V_{RO2} = 1.623 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

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

$$V_{N2} := (0.79 \cdot V_a + 0.008 \cdot N) \quad V_{N2} = 8.293 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen teórico de los gases secos V_{gs}

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

$$V_{gs} = 9.917 \frac{m^3}{kg}$$

Volumen teórico de los vapores de agua V_{H2O}

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

$$V_{H2O} = 1.347 \frac{m^3}{kg}$$

Volumen teórico total de gases V_{og}

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

$$V_{og} = 11.264 \frac{m^3}{kg}$$

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

$$CO_2 := 10.85 \quad O_2 := 3.23 \quad CO := 0.45 \quad H_2 := 0 \quad CH_4 := 0$$

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

$$N_2 = 85.47$$

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

$$\alpha = 1.152$$

$$\alpha := 1.4$$

Volumen real de gases V_g

$$V_{a_{real}} := V_a \cdot \alpha \quad V_{a_{real}} = 14.693 \frac{m^3}{kg}$$

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

$$V_g = 17.141 \frac{m^3}{kg}$$

Balance térmico por el método Directo

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

$$D_{vsc} := 61.818 \cdot 10^3 \cdot \frac{kg}{hr} \quad I_{vsc} := 752.39 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{joule}{kg} \quad I_{aa} := 171 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{joule}{kg}$$

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

$$Q_{\text{útil}} = 1.505 \times 10^{11} \frac{joule}{hr}$$

Consumo de combustible B (kg/hr)

$$B := 4.5 \times 10^3 \cdot \frac{kg}{hr}$$

Determinación del calor disponible Q_d (J/kg)

Calor físico del combustible (J/kg)

La temperatura de combustible t_c expresada en (°C)

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

$$C_c := 1.74 + 0.0025 \cdot t_c \quad Q_{fc} := C_c \cdot t_c \cdot f_{\text{conversión}} \quad Q_{fc} = 2.262 \times 10^5 \frac{joule}{kg}$$

Calor físico del aire (J/kg)

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

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

$$T_{\text{aire}} := 214 \quad C_{p\text{aire}} := 1.33 \quad f_{\text{conversión1}} := 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3}$$

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

$$I_{p\text{aire}} := C_{p\text{aire}} \cdot T_{\text{aire}} \quad I_{e\text{aire}} := C_{e\text{aire}} \cdot T_{\text{aire}}$$

$$Q_{\text{aire}} := \alpha \cdot V_a \cdot (I_{p\text{aire}} - I_{e\text{aire}}) \cdot f_{\text{conversión1}}$$

$$Q_{\text{aire}} = 3.561 \times 10^6 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

Cálculo del calor disponible Q_d (J/kg)

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

$$Q_d = 4.398 \times 10^7 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

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

$$N_{\text{gvMD}} = 76.031$$

BALANCE EXERGÉTICO DEL GENERADOR DE VAPOR

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

Exergía del agua (J/s)

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

$$h_{\text{agua}} = 7.159 \times 10^5 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$h_{0a} := 32.02 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$T_0 := 32 + 273$$

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

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

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

$$Ex_{\text{agua}} = 7.566 \times 10^5 \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

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

$$Q := Q_b \quad T_1 := 1200 + 273 \quad T_2 := 1300 + 273 \quad T_m := \frac{T_1 + T_2}{2} \quad m_{\text{combustible}} := B$$

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

$$Ex_{\text{combustible}} = 4.017 \times 10^7 \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

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

Exergía del vapor

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

$$h_{\text{vapor}} = 3.15 \times 10^6 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$h_{0v} := 32 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

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

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

$$Ex_{\text{vapor}} = 1.925 \times 10^7 \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

Determinación de la rendimiento exergético (%)

Exergía empleada (J/s)

Exergía recuperada (kJ/s)

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

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

$$Ex_{\text{empleada}} = 4.093 \times 10^7 \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

$$Ex_{\text{recuperada}} = 1.925 \times 10^7 \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

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

$$\eta_{Ex} = 47.027$$

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

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

$$\gamma = 52.973$$