



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

Trabajo de Diploma

En Opción al Título de Ingeniero Mecánico

Título: Análisis termoeenergético del generador de vapor
de la Planta de Asfalto de Sagua de Tánamo.

Autora: Lumis Reyes Céspedes

Tutor: M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja.

Moa - 2010

“Año 52 de la Revolución”



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

Trabajo de Diploma

En Opción al Título de Ingeniero Mecánico

Título: Análisis termoeenergético del generador de vapor
de la Planta de Asfalto de Sagua de Tánamo.

Autora: Lumis Reyes Céspedes

Tutor: M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja.

Moa - 2010

“Año 52 de la Revolución”



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: **Lumis Reyes Céspedes** autora 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 para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

Diplomante: Lumis Reyes Céspedes

M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja



PENSAMIENTOS

Para los que luchan nada es imposible.

Fidel Castro Ruz

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

Beltrólt Breeff

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

Fidel Castro Ruz

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente y de todo corazón a mi Señor y Dios por haberme guiado hasta aquí, por haber puesto en mi camino a tantas personas que me han ayudado y enseñado todo cuanto he aprendido.

A mis padres Abel Reyes Leyet y Ana Alicia Céspedes por haberme amado y guiado en la vida y por apoyarme para que mis sueños se hicieran realidad.

A mis hermanos Yoania y Abelito por su incondicional entrega sin límites.

A mis hijos que fueron el único y especial motivo que me trajeron hasta aquí.

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

A mi esposo Sinaiskí E. Castillo Cisneros por alentarme y darme fuerzas para seguir adelante y estar junto a mí con todo su amor y comprensión.

A mis amigas y compañeros de aula Iliana, Nivia, Yusmila, Guille, Pedro Vargas y todos los que a lo largo del camino me ayudaron y alentaron a seguir adelante y siempre me tuvieron presente.

A los compañeros de La Planta de Asfalto de Sagua de Tánamo, que siempre fueron muy atentos y me ayudaron para lograr la realización de este trabajo.

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

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

Muchas Gracias.

La autora



DEDICATORIA

A mi Señor y Dios por darme la oportunidad de prepararme para servir a otros en la vida.

A mis padres Abel Reyes Leyet y Ana Alicia Céspedes por haberme guiado en la vida y apoyarme para que mis sueños se hicieran realidad.

A mis hermanos Yoania y Abelito por su incondicional entrega sin límites.

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

A mi esposo Sinaiski E. Castillo Cisneros por ayudarme, alentarme y darme fuerzas para seguir adelante y estar junto a mí con todo su amor y comprensión.

A los compañeros de La Planta de Asfalto de Sagua de Tánamo, que desinteresadamente me ayudaron para lograr la realización de este trabajo.

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

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

A todos les dedico este éxito.

La autora

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el análisis termoexergético del generador de vapor de la Planta de Asfalto del municipio Sagua de Tánamo, para ello se desarrolló el marco teórico de la investigación, evidenciándose la ausencia de estudios relacionados con el equipo investigado. Se comprobó que en la instalación existe un bajo aprovechamiento de la energía térmica y del calor útil máximo disponible en el proceso, que se refleja en los rendimientos térmicos y exergéticos promedios, los cuales fueron inferiores al 72 y 20%, respectivamente.

Se determinaron los consumos promedios de combustible para los dos meses considerados, los mismos fueron superiores a 21 400 litros y generaron gastos económicos alrededor de 15 000 CUC para las condiciones de explotación analizadas. Las fuentes contaminantes más significativas en la Planta de Asfalto son los gases producto de la combustión del petróleo y de la elaboración de la mezcla asfáltica, y el polvo.

ABSTRACT

Presently work was carried out the analysis termoeconomic of the steam generator of the Plant of Asphalt of the Sagua de Tánamo, for it was developed it the theoretical mark of the investigation, being evidenced the absence of studies related with the investigated team. He was proven that in the installation a low use of the thermal energy exists and of the heat useful available maximum in the process that is reflected in the thermal yields and exergetic averages, which went inferior to the 72 and 20%, respectively.

The consumptions averages of fuel were determined for the two considered months, the same ones went superior to 21 400 liters and they generated economic expenses around 15 000 CUC for the analyzed conditions of operation. The most significant polluting sources in the Plant of Asphalt are the gases product of the combustion of the petroleum and of the elaboration of the asphaltic mixture, and the powder.

ÍNDICE

Contenido	Págs.
Introducción.	1
Capítulo 1. Marco teórico de la investigación.	4
1.1- Introducción.	4
1.2- Estado del arte relacionado con los sistemas de vapor	4
1.3- Trabajos precedentes.	8
1.4- Generalidades de los generadores de vapor de tubo de fuego.	12
1.5- Aspectos generales de la Planta de Asfalto de Sagua de Tánamo	13
1.6- Conclusiones del capítulo 1.	16
Capítulo 2. Análisis termoeenergético del generador de vapor de la Planta de Asfalto del municipio Sagua de Tánamo	17
2.1- Introducción.	17
2.2- Procedimiento de cálculo para el balance térmico y exergético del generador de vapor que opera en la instalación.	17
2.3- Datos obtenidos en la instalación para las diferentes variantes analizadas.	23
2.4- Balance térmico y exergético de la instalación.	25
2.5- Conclusiones del capítulo 2.	28
Capítulo 3. Análisis de los resultados. Valoración económica y ambiental asociada a la instalación objeto de estudio.	29
3.1- Introducción.	29
3.2- Análisis de los resultados de la evaluación termoeenergética.	29
3.3- Valoración económica asociada a la instalación.	36
3.4- Impacto ambiental relacionado con la instalaciones productoras de vapor.	38
3.5- Conclusiones del capítulo 3.	44
Conclusiones.	45
Recomendaciones.	46
Referencias bibliográficas.	47
Anexo.	-

INTRODUCCIÓN

La Planta de Asfalto del municipio Sagua de Tánamo fue fundada en septiembre del año 1973 y desde sus inicios es parte fundamental e indispensable de la localidad por los servicios que brinda para mantener en buen estado técnico las vías de comunicación terrestre del territorio.

En su desempeño social no está ajena a la problemática que ha afectado a la economía nacional referida a la eficiencia con que trabajan las instalaciones y equipos de una empresa en la elaboración de bienes y servicios, lo cual es de gran repercusión producto a la crisis energética mundial que enfrenta la humanidad, debido entre otros factores al consumo excesivo e irracional de los recursos energéticos no renovables con que cuenta el planeta.

El uso de los generadores de vapor de agua tiene un papel importante y decisivo en la industria porque a pesar de ser considerados grandes consumidores de combustibles los mismos son muy útiles por la variedad de aplicaciones a la que pueden destinarse para el beneficio de la sociedad moderna. Estos equipos desde su invención hasta la actualidad han revolucionado mucho, tanto en su diseño como en su eficiencia, en el afán de aprovechar al máximo la energía generada, hoy día se han logrado valores de eficiencias térmicas superiores al 92%, lo que significa un logro importante de la ciencia y la tecnología en función del bienestar de la sociedad.

En general, los generadores de vapor y los sistemas de distribución asociados se pueden encontrar en una amplia gama de aplicaciones, en Cuba se emplean en las instalaciones de bienes y servicios como los Hospitales, Lavanderías, Combinados Lácteos, Tintorerías y Centrales Termoeléctricas, en otras. También se utilizan en las empresas productoras de níquel, de cemento y en la elaboración de las mezclas asfálticas que se emplean en la construcción y reparación de las carreteras. Esta última aplicación es muy importante para las condiciones de Cuba y particularmente de la zona norte de la región oriental debido al mal estado en que se encuentran las vías de comunicación terrestre, las cuales son imprescindibles para el desarrollo económico del país ya que es por donde se transporta todo el níquel producido en Moa, lo cual constituye un importante reglón de exportación e ingreso de divisas al país.

El esquema tecnológico consiste en la utilización del vapor de agua para la elaboración de la mezcla asfáltica, para ello la planta cuenta con varios elementos que coadyuvan a la obtención y conservación del producto. El mantenimiento del buen estado técnico del asfalto se logra a través del suministro de vapor el cual además mantiene la temperatura adecuada para la circulación del material por el sistema de tuberías de la instalación. El combustible utilizado por el generador de vapor de la planta es el fuel oil, el mismo tiene un alto precio en el mercado internacional, por lo que se hace necesario evaluar energéticamente el generador de vapor con el propósito de proponer acciones que permitan elevar a valores racionales las eficiencias del mismo.

Fundamento de la investigación

La Planta de Asfalto del municipio Sagua de Tánamo fue concebida para la producción de la materia prima necesaria para la creación, reparación y mantenimiento de las principales vías que entrelazan las urbes enclavadas en el territorio de la provincia Holguín, proporcionando una comunicación segura y rápida del transporte terrestre.

Para la producción de la mezcla asfáltica se utiliza una tecnología obsoleta que data desde la década del 70 del siglo pasado, en su proceso tecnológico las materias primas utilizadas son la gravilla 3/8, arena, polvo de piedra y asfalto, que constituyen los elementos fundamentales de todo el proceso productivo. El asfalto es una sustancia derivada del petróleo de color negro, pegajosa, sólida o semisólida según la temperatura ambiente (Encarta, 2009), esta propiedad es aprovechada para su transportación a través de tuberías debidamente acondicionadas con un sistema de vapor que garantice la temperatura necesaria para su circulación.

Estos sistemas de vapor utilizados deben ser evaluados térmicamente de forma sistemática porque constan de calderas que son instalaciones altas consumidoras de combustible, pero en general esto no se realiza debido a la poca conciencia energética de los responsables de estos equipos y en ocasiones a la inexistencia de la instrumentación apropiada para el desarrollo de esta actividad. La instalación objeto de estudio se ha visto afectada por esta situación de manera que en la actualidad no existe evidencia de la realización de un análisis termoexergético del sistema analizado, de ahí la importancia de la presente investigación.

Por todo lo antes expuesto se declara como **problema:**

La necesidad de realizar un análisis termoeenergético del generador de vapor de la Planta de Asfalto del municipio Sagua de Tánamo, que permita calcular las eficiencias de la instalación para diferentes condiciones de trabajo.

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

El generador de vapor de la Planta de Asfalto del municipio Sagua de Tánamo.

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

Si se realiza un análisis termoeenergético al generador de vapor de la Planta de Asfalto del municipio Sagua de Tánamo, entonces es posible determinar las eficiencias de la instalación para las diferentes condiciones de operación en que se explota la misma.

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

Realizar el análisis termoeenergético al generador de vapor de la Planta de Asfalto del municipio Sagua de Tánamo para diferentes condiciones de explotación de la instalación.

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

- 1- Actualizar el estado del arte relacionado con los procesos de generación de vapor.
- 2- Confeccionar el procedimiento de cálculo apropiado para la evaluación termoeenergética del objeto de estudio.
- 3- Calcular las eficiencias térmicas y exergéticas, así como los parámetros más importantes de la instalación analizada.
- 4- Establecer los gráficos de comportamiento de los principales parámetros del proceso de producción de vapor.
- 5- Valorar los impactos económico y ambiental asociados a la instalación y la planta donde se encuentra instalada.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1- Introducción

Para que la Planta de Asfalto del municipio Sagua de Tánamo logre producir la mezcla asfáltica con la mayor eficiencia y el óptimo aprovechamiento de sus recursos energéticos debe evaluar el comportamiento del sistema de generación de vapor que interviene en su proceso productivo, debido a que el mismo consume un porcentaje significativo de los portadores energéticos disponibles en la planta, en este sentido el objetivo del presente capítulo es:

Establecer el marco teórico necesario para el análisis termoeenergético del generador de vapor objeto de estudio de la investigación.

1.2- Estado del arte relacionado con los sistemas de vapor

Con la aparición de la máquina de vapor en la Revolución Industrial la humanidad ha dado un paso de gigante liberándose así de las fuentes primarias de energía, la máquina de vapor revolucionó la forma de vivir, trabajar y de desplazarse, aquella máquina se usó para mover maquinarias de fábricas, trenes, barcos, tractores y automóviles. Sin embargo generar este vapor de forma segura y eficiente representaba todo un problema ya que los primeros tipos de caldera eran unos recipientes herméticos con tubos para la entrada del agua y la salida del vapor. A este recipiente se le suministraba la llama por el exterior. Para aumentar la muy baja eficiencia de aquellas calderas se comprendió que había que aumentar la superficie de transferencia de calor así surgieron las calderas de tubos de humo. Pero con el tiempo los generadores de tubos de humo se mostraron extremadamente peligrosos, pues la ebullición estancada, favorecía la producción de incrustaciones y los excesos de flujo térmico causaban el fallo de la chapa y el consiguiente estallido por despresurización súbita. En cualquier caso, esta configuración limitaba la capacidad de producción al no poderse superar valores de flujo de calor relativamente bajos. Esto provocó intentos de disminuir la cantidad de agua en la caldera, a fin de facilitar el enfriamiento de sus paredes. De esta

forma surgieron los generadores de tubos de agua que permitieron la convección forzada y más adelante, aprovechar el efecto termosifón. La primera patente de este tipo fue la de William Blakey en 1774, que alegando una mejora en la máquina de Savery incluye la nueva disposición del generador mostrada de Robertson. Sin embargo el primer diseño con éxito fue el de James Rumsey, un inventor americano conocido por sus primeras experiencias con la navegación a vapor, quien patentó en Inglaterra en 1788 varios tipos de generadores algunos de los cuales eran del tipo de tubo de agua, que funcionaron.

Por la misma época John Stevens, también inventó un generador de tubos de agua que consistía en un haz de pequeños tubos cerrados en un extremo y conectado por el otro a un depósito central. Este generador se patentó en 1803 en los EE UU, gracias a que el propio Stevens, había solicitado al Congreso una ley de patentes para proteger sus inventos. Tal ley se aprobó en 1790 y se puede decir que la base del sistema de patentes de los EE UU que se creó gracias a la invención de las calderas de tubos de agua. Posteriormente Stevens también hizo inventos referente a otro generador de tubos de agua patentado por John Cox Stevens en 1805.

En 1822 Jacob Perkins construyó el generador de tubos de agua que es el predecesor de los generadores de un paso actuales. Una serie de barras de fundición con unos orificios longitudinales de 1 1/4 de pulgada se disponían sobre las llamas en tres hileras conectando los extremos en el exterior del horno con una serie de codos hecho con tubos curvados. El agua se alimentaba por la hilera superior a fin de que circulase a contra corriente, mediante una bomba de alimentación y el vapor recalentado se descargaba de la hilera inferior a un colector. También Perkins patentó en 1831 los tubos dobles para favorecer la convección natural, conocidos posteriormente como Field que gozaron de gran popularidad hasta bien entrado el siglo XX.

Entre 1821 y 1825 se inventaron varios generadores de tubos de agua para vehículos, que era uno de los incentivos para los inventores, entre los que se puede destacar el de Maceroni y Squire que trabajaba a 11 bar y que recorrió 2.700 km sin reparaciones importantes.

En este grupo es de destacar por su diseño racional que favorecía la circulación natural, el generador para vehículo del Dr. Church, de 1832 en el que los tubos de agua que

jugaban el papel de tubos vaporizadores descendían verticalmente de la coronación de la cámara de combustión y hacía un codo en su parte inferior para comunicar con una cámara envolvente concéntrica que contenía agua, haciendo el papel de tubos colectores.

También para vehículos se patentó en 1833 el generador Hancock, precursor de los cambiadores de placas, se llegaron a construir hasta 1840 diez vehículos con este generador.

En 1850 Guillermo Siemens inventó el regenerador que precalienta el agua de alimentación con una extracción de vapor. En 1856 Stephen Wilcox propuso con éxito un generador de vapor que tenía una configuración racional. El diseño incorporaba unos tubos inclinados que conectaban los acumuladores de agua frontal y posterior permitiendo la circulación de la misma por efecto termosifón y una mayor superficie de calefacción que sus antecesores.

Una ventaja adicional era el reducido peligro de explosión inherente al uso de los tubos de agua, aunque el diseño tenía el inconveniente que estos eran inaccesibles para la limpieza.

En 1866 George Herman Babcock se asoció con Stephen Wilcox patentando su primer generador en 1867, con características adecuadas para facilitar el mantenimiento.

Sin embargo el primer generador con el diseño conocido como D, con los tubos evaporizadores y colectores adecuadamente dispuestos para obtener la circulación por termosifón, fue el Sochet, diseñado por el ingeniero francés del mismo nombre, sin embargo el generador fracasó, probablemente por mal diseño de la cámara de combustión y en 1859 dejó de fabricarse.

El éxito de los generadores de tubos rectos e inclinados estimuló a los inventores para encontrar nuevos diseños. Así en 1880 Allan Stirling desarrolló un diseño que conectaba los tubos de generación de vapor doblándolos, lo que les permitía absorber mucho mejor las deformaciones térmicas, directamente a un recipiente de separación consiguiendo una baja altura encima de la cámara de combustión. Así fundó la Stirling Boiler Company que produjo generadores. La compañía Stirling fue adquirida por Babcock y Wilcox en 1906 que incorporó los tubos curvos a sus diseños, resolviendo los problemas que existían para la limpieza del interior de los mismos.

Por razones evidentes de condiciones operatorias entre ellas rápidamente se establecieron dos familias de generadores de vapor, los marinos y los terrestres, estos últimos a su vez incluyendo las instalaciones fijas y las móviles (locomotoras).

El desarrollo de los generadores terrestres fijos estuvo ligado a su uso para generar electricidad, lo que se inició a finales del siglo XIX. Por ejemplo en los EE UU la planta de Brush Electric Light Company, en Philadelphia, fue la primera instalación en América que generó electricidad a partir de vapor en 1881, mediante cuatro calderas de tubos de agua de 55 kW de potencia cada una. The Fisk Street Station de la Commonwealth Edison Company, fue la primera central térmica, en 1903 en instalar turbinas exclusivamente para generación de electricidad. Esta enorme planta estaba dotada con 96 generadores cada uno 380 kW produciendo vapor a 12 bar.

Con las paredes enfriadas con el agua el uso de combustible líquido, fuel oil, permitió una reducción del tamaño de los hogares, así como la reducción del mantenimiento del hogar y del ensuciamiento de las superficies de calentamiento por convección, resultando una reducción de la superficie específica para generar vapor. Como consecuencia de todo esto los actuales generadores para vapor de alta presión (más de 85 bar), trabajan esencialmente por radiación, por lo que consisten en una cámara con paredes de tubos de agua, recalentadores y los accesorios como economizadores y precalentadores de aire. Los generadores para presiones más bajas operan por radiación y convección, por lo que contienen haces de tubos además de las paredes con tubos de agua del hogar. Una particularidad de los generadores de vapor es que dieron origen a los métodos de diseño de equipos a presión, dando lugar a normativas tan importante como la ASME Power Boiler Code, establecido en 1911 por la American Society of Mechanical Engineers. Así continuaba la mejora constante de los generadores de vapor durante casi tres siglos hasta los de hoy día donde todo se monitorea y se controla mediante el uso de computadoras.

1.2.1- Estado del arte relacionado con los generadores de vapor pirotubulares

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 más alta eficiencia en la transferencia de calor condujo a crear otros tipos de caldera. 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 150 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.

Sin embargo las calderas de tubos de fuego actuales, con juntas soldadas, han aumentado los límites, haciendo posible obtener presiones de hasta 20 atm.

Es por ello que actualmente a estas calderas se les utiliza en la industria de procesos debido a que se construyen fácilmente, son baratas y su puesta en marcha es simple y rápida.

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” y su desarrollo histórico no será abordado por no constituir objetivo del trabajo.

1.3- Trabajos precedentes

De acuerdo con la revisión bibliográfica desarrollada se encontraron numerosos trabajos relacionados con los sistemas de vapor, los más importantes de acuerdo con el criterio de la autora 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 los rendimientos térmicos y exergéticos de la instalación los cuales fueron 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.

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

Al análisis de 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 comparar ambos resultados, en ese sentido llegó a la conclusión de que existía un alto grado de confiabilidad en los valores ofrecidos por la compañía extranjera. También en su trabajo ofrece el procedimiento de cálculo adecuado a las condiciones de diseño de las calderas.

Caballero y González (2007) realizaron el diagnóstico térmico de los generadores de vapor insertados en la industria del níquel en Moa, calculando el rendimiento térmico, determinaron los consumos de combustibles asociados a 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 Regüeiferos (2007) quienes realizaron cálculos análogos para las calderas de las empresas presupuestadas del municipio de Moa, siendo objeto de estudio los generadores de vapor del ISMM, la lavandería, el combinado lácteo, los hospitales Guillermo Luís Hernández y Pedro Sotto Alba. En la investigación se detectaron numerosas deficiencias que inciden en la baja eficiencia térmica y exergética de las instalaciones estudiadas.

Fadel (2008) calculó el rendimiento térmico y exergético de los generadores de vapor 6 y 7 de la empresa Ernesto Che Guevara y estableció gráficos de comportamiento que permiten inferir la dependencia entre las eficiencias térmicas y exergéticas y los restantes parámetros de funcionamiento de estos equipos, un año más tarde Fonseca (2009) realizó una reevaluación de los generadores antes mencionados llegando a conclusiones semejantes. Estudios similares fueron desarrollados por De Armas (2008) y Góngora (2009) en los generadores de vapor de la empresa Pedro Sotto Alba.

1.4- Generalidades de los generadores de vapor de tubo de fuego

El horno donde se quema el combustible puede ser construido debajo de la caldera, o ser parte integral de la misma. El conducto que hace girar los gases para ir de un pase a otro se llama caja de humo y estos en general pueden dar más de un pase por dentro de la caldera.

Las características generales de las calderas de tubos de fuego son las siguientes:

- Son pequeñas, con producciones alrededor de 15 000 kg/h de vapor y presiones de hasta 18 kg/cm². La presión se ve limitada por la poca resistencia del casco debido a su gran diámetro.
- Suministran por lo general vapor saturado, pues es muy difícil colocarles sobrecalentadores.
- Tienen una gran capacitancia de calor debido al gran volumen de agua que almacenan, esto hace que el nivel de agua fluctúe poco con las variaciones de la carga, lo cual es conveniente, pero les da un arranque muy lento lo que es una desventaja.
- El costo de la instalación es mínimo pues se fabrican semi-instaladas o portátiles.
- Presentan una baja eficiencia debido a la alta temperatura de los gases a la salida.
- Las calderas piro-tubulares se utilizan únicamente en pequeñas empresas industriales (tintorerías, comedores, hospitales y laboratorios) a pesar de su baja eficiencia son las calderas prácticas para la generación de pequeñas cantidades de vapor. También se utilizan en aquellos casos en que resulta obligatorio que el equipo sea portátil.

1.5- Aspectos generales de la Planta de Asfalto de Sagua de Tánamo

1.5.1- Descripción del flujo tecnológico de la Planta de Asfalto

El flujo tecnológico que a continuación se expone se corresponde con el esquema mostrado en la Figura 1.1, el mismo se describe de la siguiente forma: en 3 bóvedas (1) se almacena gravilla 3/8 de diámetro, arena y polvo de piedra, una grúa (2) es la encargada de llevar estos materiales a las tolvas (3) donde se dosifican los materiales, para posteriormente a través de un transportador de banda (4) transportarlo hasta el tambor secador (5) donde se aplica un proceso de secado a estos materiales, cercano al tambor secador existe un filtro (6) que se utiliza para eliminar el polvo de la mezcla, para poder ejecutar este proceso el filtro cuenta con un extractor (7) que es el encargado de extraer el polvo, los gases y la humedad que genera el proceso de secado; estos desechos son enviados al dispositivo conocido como vía húmeda (8) para después expulsar los gases y el polvo a través de una chimenea (9).

Existe un tanque principal que contiene fuel – oil (10) que suministra combustible a otro tanque (11) al cual se le hacen varias extracciones para diferentes necesidades del proceso productivo, cercano a estos dos tanques de combustible existe un tanque de agua (12) para el suministro a la Planta de Asfalto y al dispositivo conocido como vía húmeda.

Un quemador (13) es el encargado de suministrarle calor al tambor secador y es abastecido de combustible por el tanque (11). Del tambor secador (5) la mezcla pasa al elevador en caliente (14) que contiene una zaranda donde es clasificado el material, luego pasa a una tolva pequeña donde los materiales son dosificados en dependencia del tipo de mezcla a elaborar (fina, intermedia o gruesa) después pasa al mezclador donde es vertido el asfalto.

Independiente de este proceso descrito el asfalto se encuentra almacenado en un tanque (15) donde se le aplica calor con un quemador para lograr una mayor fluidez y extraerlo con una bomba (16) hacia una tubería que está interconectada con la salida del generador de vapor (17) este tanque (15) alimenta a otros tanques (I, II y III) que son los encargados de suministrar el asfalto necesario para la realización de la mezcla, cada uno de ellos cuenta con un quemador que se encarga de mantener el asfalto a una temperatura entre los 150 a 160 °C y el generador de vapor se utiliza para

mantener la temperatura necesaria para que el asfalto circule por las tuberías. La cabina de control (19) es la encargada de intervenir en todo el proceso productivo controlando y regulando todo el proceso de producción de la mezcla de asfalto.

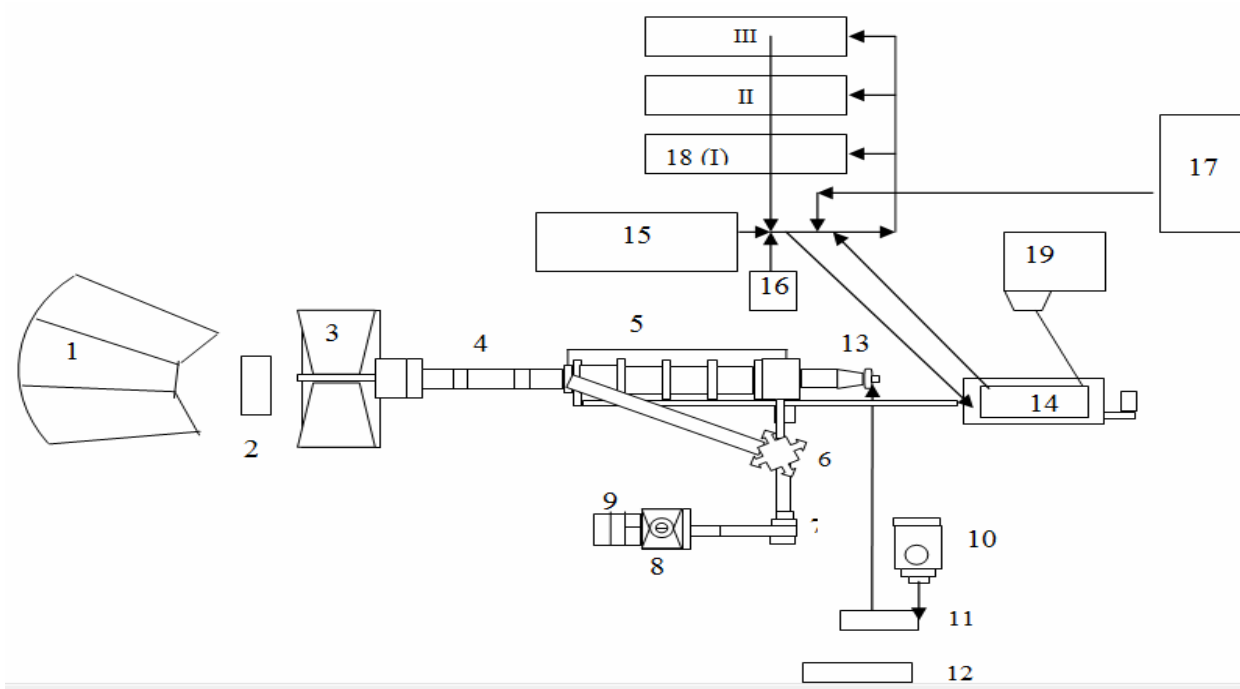


Figura 1.1. Esquema de la planta de Asfalto del municipio Sagua de Tánamo.

1.5.2- Descripción del generador de vapor utilizado

Principio de funcionamiento

El generador de vapor presente en la instalación (Figura 1.2) es de tubo de fuego, en él se libera la energía mediante la combustión del petróleo, el calor liberado en el proceso de combustión se transfiere a la sustancia de trabajo convirtiendo al agua en vapor saturado de la calidad adecuada y con los parámetros requeridos para su uso, las características técnicas de la instalación se muestra a continuación.

Características técnicas

- Serie: 45070
- Año de fabricación: 1980
- Material: Acero 20k

- Producción de vapor saturado: 700 kg/h
- Superficie de calefacción: 16,3 m²
- Presión de vapor saturado: 10 kgf/cm²
- Tipo de fluido: Agua.

Partes principales y equipos auxiliares del generador empleado

Las partes principales del equipo (Domo, Quemador, Horno, Haz de tubos, Chimenea, Ventilador de Tiro Forzado y Bombas de alimentación, entre otros), se describen ampliamente en los trabajos consultados (Del Valle, 2002; Abreu, 2003; Góngora, 2009; Fonseca, 2009).



Figura 1.2. Generador de vapor ubicado en la planta de Asfalto.

1.5.3- Importancia social de la Planta de Asfalto de Sagua de Tánamo

Es la encargada de la producción de la materia prima necesaria para el mantenimiento del buen estado técnico de las principales vías de comunicación terrestre enclavadas en

el municipio de Sagua de Tánamo y desde el municipio de Baracoa hasta el asentamiento de Cábonico perteneciente al municipio de Levisa, dentro de sus responsabilidades se encuentra la pavimentación, el bacheo, el sellado de grietas, proporcionando así una comunicación segura y rápida del transporte terrestre, es también la responsable de producir la mezcla para la venta a los diferentes municipios que la necesiten para acometer dicha tarea.

1.5.4- Sistema de instrumentación y medición

En el generador de vapor el combustible fluye por una tubería que tiene instalado un manómetro que mide la presión del mismo a la entrada del generador, su rango de medición es de 0 – 40 kgf/cm², otro manómetro mide la presión en el interior del generador el cual posee un rango de medición de 0 – 25 kgf/cm², cuenta también con un suavizador que es el encargado de darle el tratamiento al agua para que entre al generador con las condiciones adecuadas y otro manómetro con un rango de 0 – 16 kgf/cm² que es el encargado de registrar la presión con que entra el agua en el suavizador, y un flujómetro que mide el consumo de agua que utiliza el generador, la chimenea cuenta con un termómetro que controla la temperatura de salida de los gases de combustión con un rango de medición de 50 – 300 °C y a la salida del vapor existe una llave reguladora del vapor necesario para el proceso productivo.

1.6- Conclusiones del capítulo 1

- Se establecieron, a través del marco teórico, los fundamentos que permiten el análisis termoexergético del generador de vapor de la Planta de Asfalto del municipio Sagua de Tánamo.
- La revisión bibliográfica de los textos y los trabajos técnicos especializados en la temática de generación de vapor indican que es posible adecuar los procedimientos de cálculo existentes al generador de vapor estudiado.
- Se encontraron diversos trabajos relacionados con el análisis térmico y exergético de generadores de vapor, pero ninguno fue desarrollado para el generador de la planta de asfalto, en general estuvieron destinados al estudio de los generadores de las empresas de servicio y las productoras de níquel en Moa.

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS TERMOEXERGÉTICO DEL GENERADOR DE VAPOR DE LA PLANTA DE ASFALTO DEL MUNICIPIO SAGUA DE TÁNAMO

2.1- Introducción

La generación de vapor constituye un aspecto de gran importancia para la economía de cualquier empresa que tenga en su flujo productivo un sistema con estas características, es por ello, que se hace necesario evaluar térmicamente estas instalaciones para obtener valores cuantitativos que permitan establecer el comportamiento de los principales parámetros que caracterizan el proceso, en este sentido el **objetivo** del capítulo es:

Realizar el análisis termoexergético del generador de la Planta de Asfalto del municipio Sagua de Tánamo.

2.2- Procedimiento de cálculo para el balance térmico y exergético del generador de vapor que opera en la instalación

El procedimiento de cálculo que a continuación se muestra es extraído de los textos especializados en la temática de generación de vapor (Pérez, 1972; Pankratov, 1987) y adecuado al generador estudiado.

2.2.1 Poder calórico bajo del combustible (kJ / kg)

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

Según Pérez (1972) y Pankratov (1987) la determinación del volumen de los gases producto de la combustión es necesaria en el cálculo del generador de vapor, pues son estos los que transfieren el calor al agua y al aire a través de las superficies metálicas.

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

Volumen de aire teórico

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

Volumen total real de gases triatómicos

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

Volumen teórico de nitrógeno

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

Volumen teórico de los gases secos

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

Volumen teórico de los vapores de agua

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

Volumen teórico total de gases

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

Volumen real de gases

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

Volumen real de aire

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

2.2.3 Cálculo del coeficiente de exceso de aire (adimensional)

Para combustión incompleta

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

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

2.2.4 Cálculo de las entalpías de los gases de la combustión y el aire

Las entalpías de los gases son las que caracterizan la capacidad de entrega de calor a las diferentes sustancias de trabajo como el aire, el agua y el vapor (Pérez, 1972).

Entalpía teórica de los gases

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

Donde:

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

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

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

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

Tabla 2.1. Valores de entalpía para diferentes temperaturas.

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

Fuente: Pérez, 1972.

Entalpía real de los gases

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

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

Donde:

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

i_{aire} - Entalpía del aire (kJ/m³).

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 (%).

$Q_{\text{útil}}$ - Calor útil (kJ/s).

B - Consumo de combustible (kg/s).

Q_d - Calor disponible (kJ/kg).

Determinación del calor disponible

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

Donde:

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

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

Calor físico del combustible

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

Donde:

Cc: calor específico del combustible a la temperatura t (kJ/kg °C).

Determinación del calor útil

$$Q_{\text{útil}} = D_{vs} \cdot (i_{vs} - i_{aa}) \quad (2.18)$$

Donde:

D_{vs} - Flujo de vapor saturado (kg/s).

i_{vs} - Entalpía del vapor saturado (kJ/kg).

i_{aa} - Entalpía del agua de alimentación (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 dos últimos (presentes en el generador de vapor analizado) se muestran a continuación:

Exergía de un flujo

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

$$e_x = (h_1 - h_0) - T_0 \cdot (s_1 - s_0) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.19)$$

$$E_x = \dot{m} \cdot [(h_1 - h_0) - T_0 \cdot (S_1 - S_0)] \quad (\text{kJ/s}) \quad (2.20)$$

Donde:

h - Entalpía del flujo (kJ/kg).

S - Entropía (kJ/kg K)

T_0 - Temperatura del medioambiente (K)

Exergía de una fuente de calor

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

$$E_Q = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (\text{kJ}) \quad (2.21)$$

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:

$$E_q = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_M}\right) \quad (2.22)$$

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:

$$\eta_{\text{Exergético}} = \frac{\text{Exergía recuperada}}{\text{Exergía empleada}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (2.23)$$

Los conceptos de exergía recuperada y empleada varían conforme al sistema objeto de análisis, en este caso particular se consideran como exergía recuperada las exergías que se aprovechan en el sistema y exergía empleada todas las exergías que entran al sistema. La pérdida de exergía puede también expresarse por medio de la definición de grado de pérdida.

Verificándose que:

$$\gamma = 1 - \eta_{\text{Exergético}} \quad (2.24)$$

Donde.

γ - Pérdida de exergía (%)

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

Para el generador de vapor analizado se considera como exergía recuperada: la del vapor saturado, como exergía empleada: la del combustible y la exergía perdida: la de los gases de escape.

2.3- Datos obtenidos en la instalación para las diferentes variantes analizadas

Los datos necesarios para el cálculo de la instalación se muestran en las tablas 2.2 y 2.3 (solo se representan los valores promedios de los parámetros) los mismos se obtuvieron a partir de las mediciones realizadas en el equipo en producción.

Tabla 2.2. Parámetros medidos en la instalación de generación (para las variantes 1-5)

Parámetros obtenidos en la instalación	Generador de vapor				
	V - 1	V - 2	V - 3	V - 4	V - 5
Variantes calculadas					
Producción de vapor saturado (kg/h)	320	312	325	329	315
Presión del vapor saturado (atm)	1,6	2,6	1,4	1,4	1,6
Temperatura del vapor saturado (°C)	113	129	109	109	113

Temperatura del agua de alimentación (°C)	32	32	32	32	32
Temperatura del combustible (°C)	32	32	32	32	32
Temperatura de los gases de escape (°C)	209	214	184	184	207
Consumo de combustible (kg/h)	29,58	27,61	30,57	31,55	28,59
Composición química de los gases producto de la combustión (%)					
Dioxígeno (O ₂)	2,1	2,2	1,9	2,3	2,4
Dióxido de Carbono (CO ₂)	14,2	14,1	13,8	14,5	14,3
Monóxido de Carbono (CO)	0,004	0,003	0,004	0,002	0,005
Dihidrógeno (H ₂)	0	0	0	0	0
Metano (CH ₄)	0	0	0	0	0
Variantes calculadas	V - 6	V - 7	V - 8	V - 9	V - 10
Producción de vapor saturado (kg/h)	318	315	327	331	317
Presión del vapor saturado (atm)	1,6	1,8	2,0	1,6	1,4
Temperatura del vapor saturado (°C)	113	117	120	113	109
Temperatura del agua de alimentación (°C)	32	32	32	32	32
Temperatura del combustible (°C)	32	32	32	32	32
Temperatura de los gases de escape (°C)	172	204	207	184	179
Consumo de combustible (kg/h)	30,57	26,62	29,58	32,54	27,61
Composición química de los gases producto de la combustión (%)					
Dioxígeno (O ₂)	2,6	2,8	3,8	3,9	3,2
Dióxido de Carbono (CO ₂)	13,3	11,3	15,2	12,5	13,5
Monóxido de Carbono (CO)	0,001	0,006	0,004	0,007	0,003
Dihidrógeno (H ₂)	0	0	0	0	0
Metano (CH ₄)	0	0	0	0	0

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

Generador de vapor de la Planta de Asfalto variantes 1 - 5

$$C^t = 84,3 \quad H^t = 10,5 \quad S^t = 3 \quad O^t = 0,3 \quad W^t = 1,4 \quad A^t = 0,01$$

Se utilizó el mismo valor porque en el periodo analizado se empleó el mismo combustible.

Generador de vapor de la Planta de Asfalto variantes 6 - 10

$$C^t = 85,5 \quad H^t = 10,1 \quad S^t = 2 \quad O^t = 0,3 \quad W^t = 1,4 \quad A^t = 0,02$$

2.4- Balance térmico y exergético de la instalación

El balance térmico del generador de vapor se realizó en correspondencia con el método de cálculo mostrado anteriormente (epígrafe 2.2) y los datos obtenidos en la instalación (epígrafe 2.3) logrando la aplicación exitosa del método directo descrito por Pérez (1972), este método permite la determinación del rendimiento térmico con un grado de exactitud aceptable, no se determinaron los parámetros por el método indirecto porque en la instalación no se registran los parámetros del proceso que necesariamente se requieren para la aplicación del mencionado método.

El balance exergético se efectuó de acuerdo con el procedimiento de cálculo reportado por Fernández (1994). Los parámetros principales calculados para cada una de las variantes analizadas en el generador de vapor se muestran en las tablas 2.3 y 2.4.

Tabla 2.3. Valores de los parámetros fundamentales del análisis termoexergético (Variantes 1-5).

Parámetros calculados	Generador de vapor de la planta de Asfalto de Sagua						
	Variantes calculadas					Unidad	Ec.
	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5		
Qb^t	3,965x10 ⁷					J/kg	2.1

V^0_a	10,367					m ³ /kg	2.2
V_{RO_2}	1,594					m ³ /kg	2.3
$V^0_{N_2}$	8,195					m ³ /kg	2.4
V^0_{gs}	9,789					m ³ /kg	2.5
$V^0_{H_2O}$	1,35					m ³ /kg	2.6
V^0_g	11,138					m ³ /kg	2.7
V_g	12,329	12,399	12,186	12,48	12,549	m ³ /kg	2.8
V_a	11,446	11,503	11,326	11,569	11,625	m ³ /kg	2.9
α	1,104	1,11	1,092	1,116	1,121	-	2.10
I^0_g	3,198x10 ⁶	3,246x10 ⁶	2,86x10 ⁶	2,86x10 ⁶	3,179x10 ⁶	J/kg	2.12
I_g	3,248x10 ⁶	3,299x10 ⁶	2,904x10 ⁶	2,916x10 ⁶	3,238x10 ⁶	J/kg	2.13
Q_d	3,971x10 ⁷					J/kg	2.16
$Q_{\text{útil}}$	8,2x10 ⁸	8,063x10 ⁸	8,309x10 ⁸	8,411x10 ⁸	8,072x10 ⁸	J/h	2.18
η_{GV} (M.D)	69,807	73,542	68,442	67,133	71,096	%	2.15
η_{GV} (promedio)	70,004					%	-
Ex·Emp.	2,332x10 ⁵	2,176x10 ⁵	2,41x10 ⁵	2,487x10 ⁵	2,254x10 ⁵	J/s	-
Ex·Rec.	4,434x10 ⁴	4,944x10 ⁴	4,326x10 ⁴	4,379x10 ⁴	4,364x10 ⁴	J/s	-
$\eta_{\text{Exergético}}$	19,014	22,715	17,951	17,607	19,365	%	2.23
$\eta_{\text{Exergético}}$ (promedio)	19,330					%	-
γ	80,986	77,285	82,049	82,393	80,635	%	2.24
γ (promedio)	80,670					%	-

Como se aprecia en los resultados obtenidos para las primeras cinco variantes la instalación se caracteriza por tener bajos rendimientos térmicos y exergéticos, en general los primeros son inferiores al 74% y el valor promedio de este parámetro no superó el 71%. El rendimiento exergético no alcanzó el 23% y su valor promedio estuvo alrededor del 19%. El resumen de los valores obtenidos para las variantes 6-10 se exponen a continuación en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Valores de los parámetros fundamentales del análisis termoeenergético (Variantes 6-10).

Parámetros calculados	Generador de vapor de la planta de Asfalto de Sagua						
	Variantes calculadas					Unidad	Ec.
	Variante 6	Variante 7	Variante 8	Variante 9	Variante 10		
Qb^t	3,954x10 ⁷					J/kg	2.1
V^0_a	10,334					m ³ /kg	2.2
V_{RO_2}	1,609					m ³ /kg	2.3
$V^0_{N_2}$	8,17					m ³ /kg	2.4
V^0_{gs}	9,780					m ³ /kg	2.5
$V^0_{H_2O}$	1,305					m ³ /kg	2.6
V^0_g	11,085					m ³ /kg	2.7
V_g	12,622	12,728	13,77	13,47	13.123	m ³ /kg	2.8
V_a	11,693	11,776	12,546	12,53	12,078	m ³ /kg	2.9
α	1,132	1,14	1,214	1,213	1,169	-	2.10
I^0_g	2,658x10 ⁶	3,135x10 ⁶	3,141x10 ⁶	2,846x10 ⁶	2,768x10 ⁶	J/kg	2.12
I_g	2,723x10 ⁶	3,204x10 ⁶	3,255x10 ⁶	2,959x10 ⁶	2,854x10 ⁶	J/kg	2.13
Q_d	3,96x10 ⁷					J/kg	2.16
$Q_{\text{útil}}$	8,149x10 ⁸	8,089x10 ⁸	8,412x10 ⁸	8,482x10 ⁸	8,104x10 ⁸	J/h	2.18
η_{GV} (M.D)	67,318	76,736	71,82	65,828	74,128	%	2.15
η_{GV} (promedio)	71,166					%	-
$Ex_{\text{-Emp.}}$	2,445x10 ⁵	2,129x10 ⁵	2,36x10 ⁵	2,603x10 ⁵	2,209x10 ⁵	J/s	-
$Ex_{\text{-Rec.}}$	4,406x10 ⁴	4,516x10 ⁴	4,83x10 ⁴	4,586x10 ⁴	4,219x10 ⁴	J/s	-
$\eta_{\text{Exergético}}$	18,017	21,208	20,412	17,619	19,104	%	2.23

$\eta_{\text{Exergético}}$ (promedio)		19,272				%	-
γ	81,983	78,792	79,588	82,381	80,896	%	2.24
γ (promedio)		80,728				%	-

Los valores promedios de los rendimientos térmicos y exergéticos obtenidos para las variantes 6-10 son similares a los de las variantes 1-5, aunque se diferencian en un valor pequeño. En general la instalación se comporta de forma análoga para todas las variantes calculadas. Los resultados íntegros obtenidos en la evaluación térmica y exergética del generador de vapor estudiado (para la variante 1) se exponen en el anexo del trabajo.

Nota: las variantes 1-5 y 6-10 corresponden a las mediciones realizadas en los meses de abril y mayo, respectivamente.

2.5- Conclusiones del capítulo 2

- Los valores del rendimiento térmico calculados por el método directo oscilaron en el intervalo de 67,133 - 73,542% y 65,828 - 76,736% para las variantes 1-5 y 6-10, respectivamente.
- Los valores promedios de los rendimientos exergéticos calculados para las variantes analizadas (1-5 y 6-10) fueron bajos y oscilaron entre 19,330 y 19,272%. Los mismos son consecuencia de la insuficiente capacidad que tiene la instalación para recuperar la exergía generada durante el proceso de producción de vapor.
- En la instalación existe una pérdida de energía grande a través de los gases de escape que osciló entre 2,904 y 3,299 MJ/kg para las variantes 1-5. En el caso de las variantes 6-10 la pérdida varió entre 2,723 y 3,255 MJ/kg. Estos comportamientos determinan los bajos rendimientos térmicos y exergéticos obtenidos en la instalación.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS. VALORACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL ASOCIADA A LA INSTALACIÓN OBJETO DE ESTUDIO

3.1- Introducción

Las instalaciones productoras del vapor, por su importancia, deben ser evaluadas energéticamente de forma sistemática. Estas evaluaciones deben estar caracterizadas por un análisis desde el punto de vista técnico, económico y ambiental de los resultados que se obtienen. En tal sentido, se declara como objetivo del presente capítulo analizar los resultados del análisis termoexergético realizado y los impactos económico y ambiental asociados a la instalación estudiada.

3.2- Análisis de los resultados de la evaluación termoexergética

En el capítulo precedente (Tablas 2.3 y 2.4) se exponen los resultados de las eficiencias térmicas y exergéticas calculadas para el generador de vapor en diferentes condiciones de explotación (variantes 1-5 y 6-10), de los resultados antes mencionados se infieren las siguientes consideraciones:

El rendimiento térmico promedio aunque es bajo (70,004 y 71,166% para las variantes 1-5 y 6-10, respectivamente) se considera aceptable para este tipo de instalación porque la misma de acuerdo con su diseño es de baja eficiencia, otro aspecto que limita el incremento del rendimiento del generador es que el mismo tiene muchos años de explotación y los componentes se encuentran altamente deteriorados, sumado a esto existe en la planta poca disponibilidad de las piezas de repuesto necesarias para el buen funcionamiento del equipo. También atenta contra la elevación de la eficiencia el hecho de que no se midan los parámetros fundamentales del proceso con la frecuencia y exactitud requerida para estos tipos de instalaciones, lo cual limita la ejecución de medidas técnicas y organizativas.

Respecto al rendimiento exergético, sus resultados indican un bajo aprovechamiento del calor útil máximo que se genera en el proceso de producción de vapor, lo que se refleja en los valores promedios (19,330 y 19,272%) obtenidos para las variantes analizadas. La pérdida de exergía es elevada y se corresponde con el deficiente control de los parámetros del proceso y las escasas medidas técnicas que se desarrollan en función de mejorar este parámetro. A continuación se relacionan algunas de las acciones que se pueden implementar para aumentar las eficiencias térmicas y exergéticas de las instalaciones productoras de vapor.

3.2.1- Propuesta de acciones para aumentar las eficiencias térmicas y exergéticas

Generalmente en los generadores de vapor se especifican tres valores de producción, (Figura 3.1) esto se hace con el objetivo de facilitar la explotación del equipo y aumentar la seguridad de su trabajo. Estos tres valores son:

De: Producción a máxima eficiencia.

D_N: Producción nominal, a la que se recomienda la explotación continua del equipo.

D_M: Producción máxima, a la que se puede operar el equipo, solo durante breves períodos de tiempo.

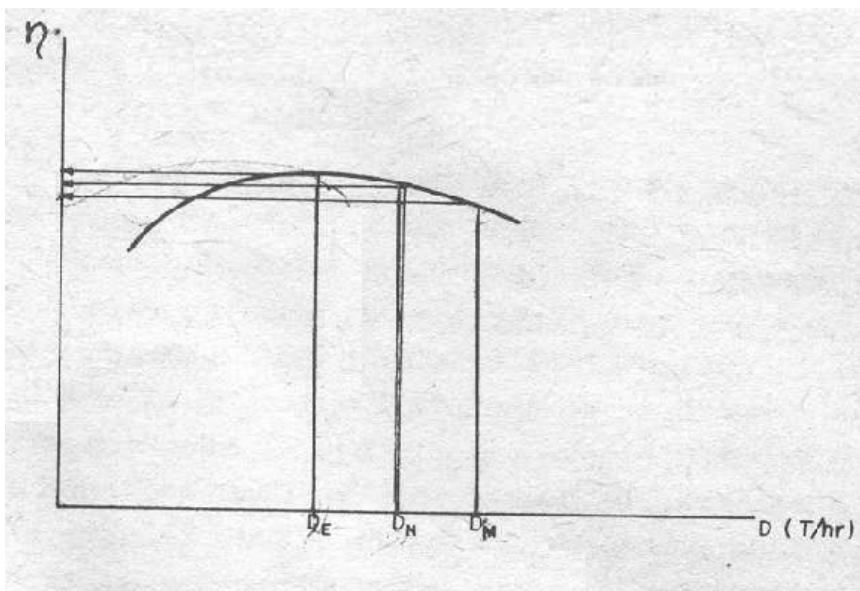


Figura 3.1 Comportamiento del rendimiento térmico respecto a la producción de vapor

Fuente: Colectivo de autores, 1970.

El equipo debe explotarse a su capacidad nominal, pues a la producción eficiente se subutiliza la capacidad, lo que implica tener que instalar otras unidades similares o unidades con capacidad superior a la necesaria; y a la máxima producción solo puede hacerse funcionar un tiempo limitado, ya que el equipo se expone a roturas de carácter grave por el fuerte trabajo a que es sometido; además la eficiencia disminuye considerablemente.

La instalación estudiada funciona bajo esta última condición por lo que se hace necesario aumentar la eficiencia de la misma. Las acciones a realizar para aumentar la eficiencia térmica se muestran a continuación:

Acciones propuestas desde el punto de vista energético

➤ Para aumentar el rendimiento térmico

a) Pérdida por calor sensible en los gases

- 1-. Disminuir todo cuanto se pueda el coeficiente de exceso de aire y mantenerlo en el valor correcto durante la operación a cada valor de demanda.
- 2-. Mantener limpias las superficies de transferencias de calor tanto por dentro como por fuera.
- 3-. Mantener una correcta hermeticidad en las paredes, los registros y las mirillas. No abrir innecesariamente los registros ni las mirillas.
- 4-. Lograr que la temperatura de los gases a la salida se haga lo más baja posible. En la operación debe mantenerse en el valor establecido como óptimo para este tipo de generador.

b) Pérdida por incombustión química

- 1-. Suministrar la cantidad necesaria de aire al horno y en los casos que sea necesario con la temperatura adecuada.
- 2-. Efectuar durante la proyección la selección y el diseño del sistema de combustión, especialmente los quemadores y el horno, para lograr un correcto mezclado del aire y el combustible.
- 3-. Operar correctamente los quemadores manteniendo los parámetros establecidos para la explotación en cuanto a:

- Temperatura de calentamiento del combustible.
- Humedad del combustible.
- Grado de preparación del combustible.

c) Pérdida por incombustión mecánica

Para lograr mantener minimizada esta pérdida, deben tenerse en cuenta las mismas recomendaciones que se dieron para la pérdida por incombustión química.

d) Pérdida por radiación de calor al ambiente

- 1-. Mantener en correcto estado el aislamiento de la caldera.
- 2-. No abrir innecesariamente las mirillas y registros.

e) Pérdida por calor sensible en los residuos

En operación muy poco se puede hacer por disminuir esta pérdida y durante la proyección, en alguna medida, puede preverse el diseño de sistemas de extracción de residuos, que lo hagan cuando estos tienen la menor temperatura posible.

➤ Para aumentar el rendimiento exergético

Las acciones más importantes que pueden realizarse para aumentar el rendimiento exergético son las que a continuación se relacionan:

- a) Disminuir la diferencia de temperatura entre la sustancia de trabajo (agua) y el agente de transformación (gases producto de la combustión) para reducir el grado de irreversibilidad en el proceso, esto se logra aumentando la temperatura del agua de alimentación utilizando el condensado de retorno, en este sentido existen experiencias prácticas para los generadores de vapor de tubo de fuego y una de ellas fue desarrollada en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- b) Disminuir la temperatura de los gases productos de la combustión con el objetivo de disminuir las pérdidas de exergía en los mismos.
- c) Precalentar el combustible a la entrada del generador para lograr una mayor exergía en la fuente de calor. Esto es posible haciendo circular los gases por dentro del

recipiente de almacenamiento del combustible antes de abandonar el generador de vapor.

- d) Calentar el aire que se suministra al generador a partir del uso de los gases producto de la combustión, esto es posible con un costo mínimo de recursos.

3.2.1- Comportamiento de los principales parámetros de la instalación

Como se aprecia en la figura 3.2, en el generador de vapor los gases producto de la combustión abandonan la instalación con una cantidad de calor superior a 2,5 MJ/kg, este calor perdido es apreciable porque determina las pérdidas de calor a través de los gases. Los comportamientos mostrados en la referida figura (3.2) reflejan el carácter oscilatorio del parámetro considerado, que está en correspondencia con las variaciones de la temperatura de los gases.

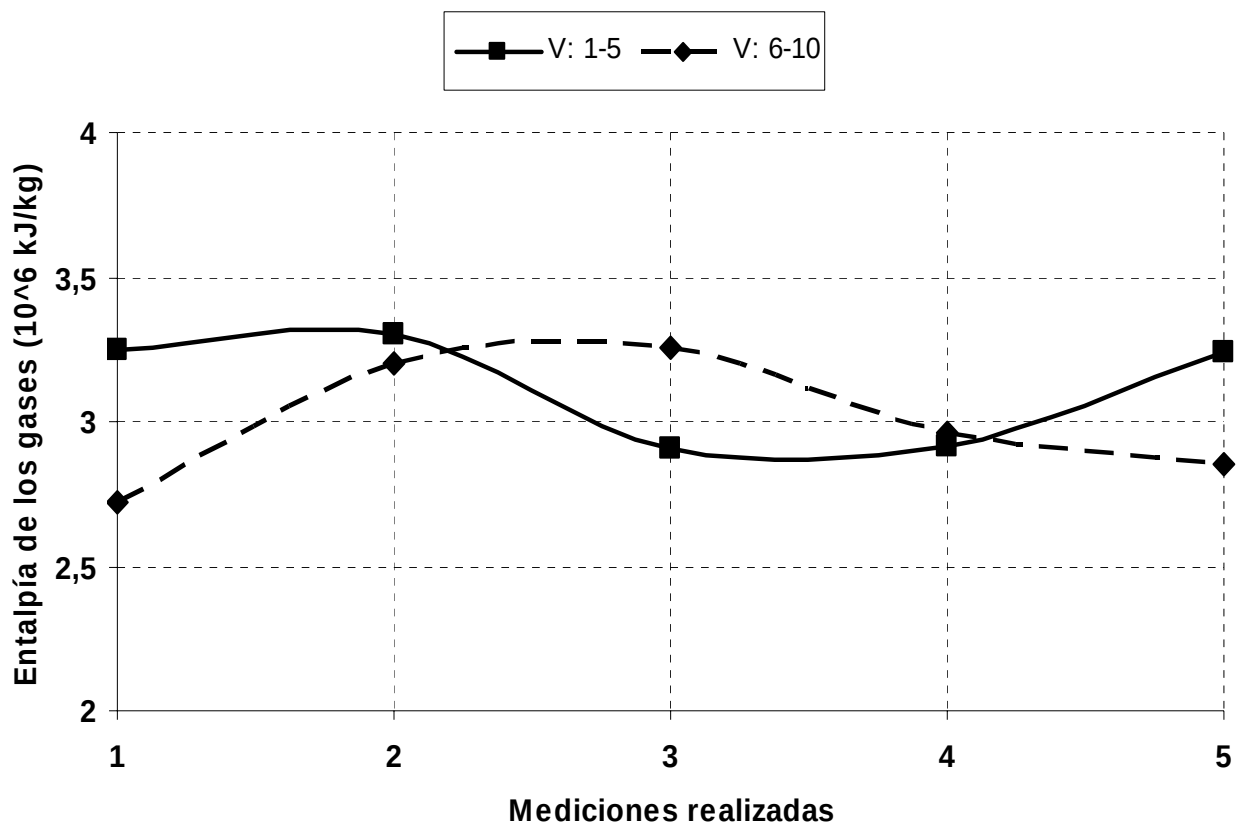


Figura 3.2. Comportamiento de la entalpía de los gases de escape.

El consumo de combustible en el generador de vapor es relativamente pequeño (figura 3.3), esto se debe a la baja productividad de vapor que demanda el calentamiento de la

mezcla asfáltica y el carácter periódico con que se explota el equipo. En general los valores promedios de consumo de combustible son superiores a 25kg/h y la tendencia de su comportamiento es creciente con algunos puntos de inflexión.

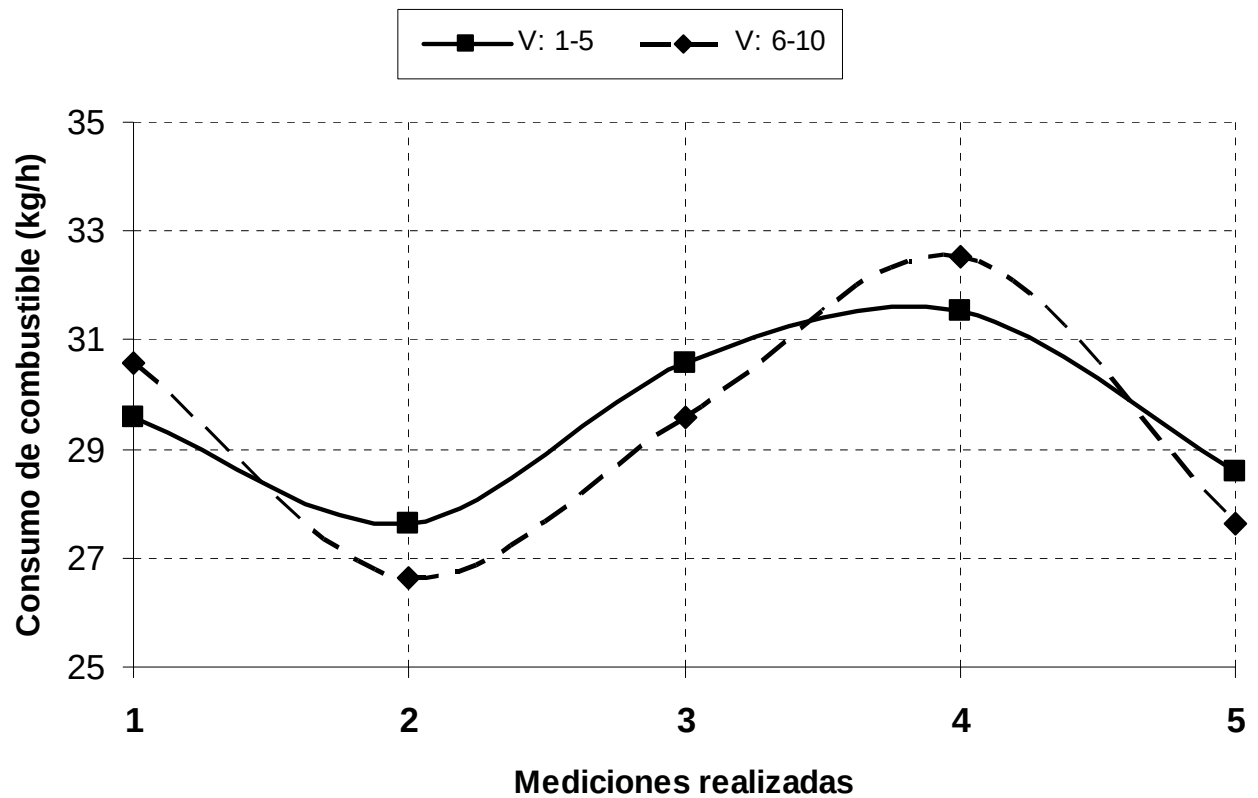


Figura 3.3. Comportamiento del consumo de combustible.

Los comportamientos mostrados por los rendimientos térmicos y exergéticos son similares en cuanto a la tendencia, pero los primeros son superiores al 66%, lo cual es indicativo del bajo aprovechamiento de la energía térmica y los segundos oscilaron entre el 17 y el 23% aproximadamente debido a la irreversibilidad existente entre el agua y los gases producto de la combustión.

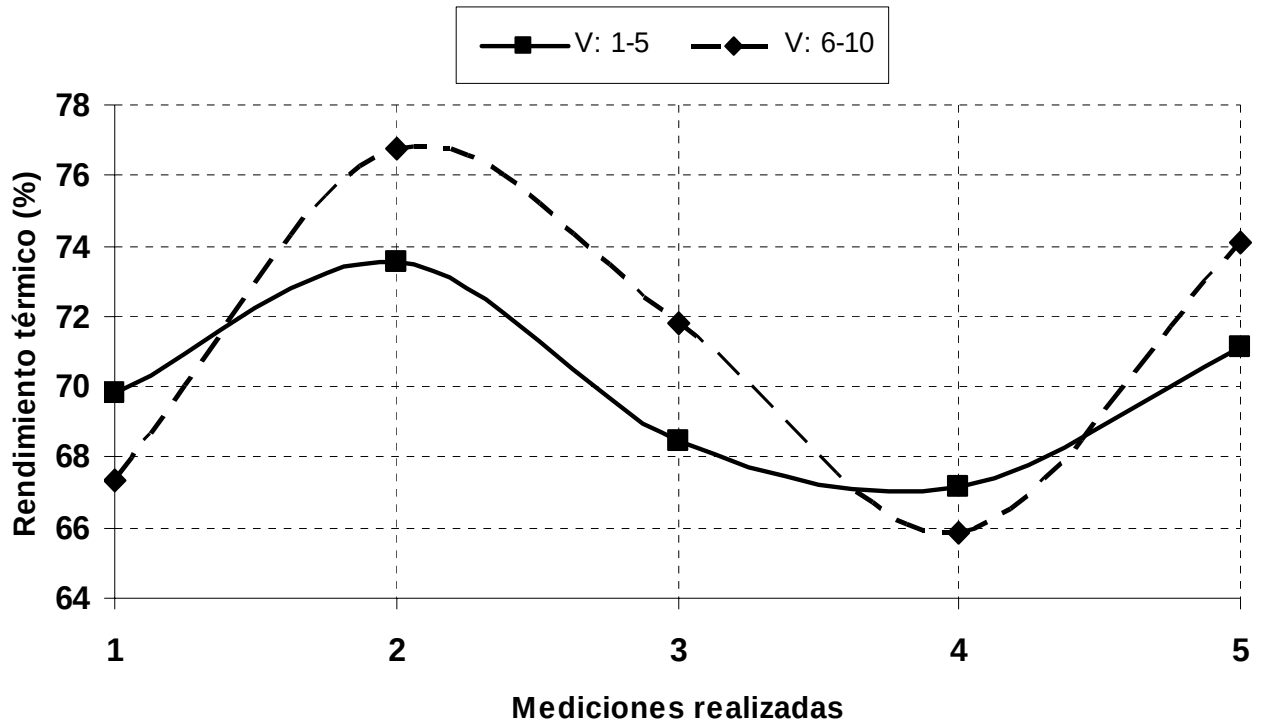


Figura 3.4. Comportamiento del rendimiento térmico.

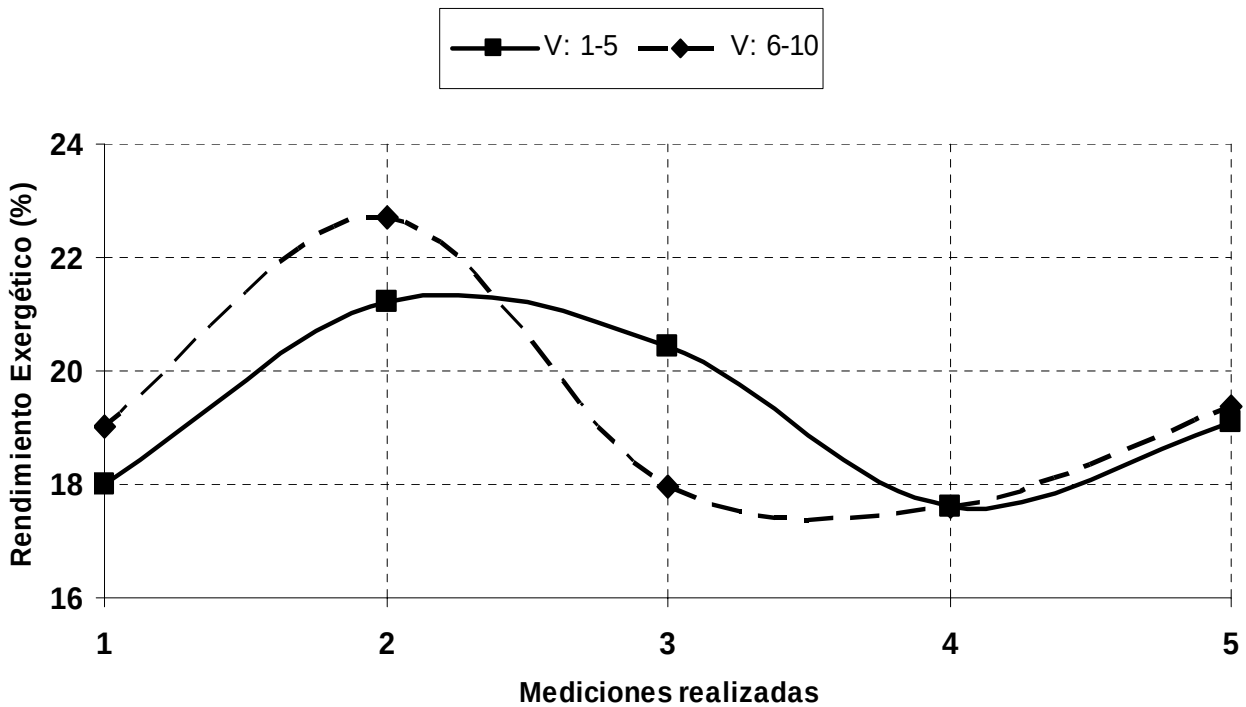


Figura 3.4. Comportamiento del rendimiento exergético.

3.3- Valoración económica asociada a la instalación

Los valores expuestos en la tabla 3.1 muestran la valoración económica referida al consumo de combustible para las 10 variantes calculadas en el trabajo. El precio utilizado en el cálculo fue 0,70 CUC/litros, el mismo se obtuvo en el departamento de economía de la empresa.

Tabla 3.1. Gasto económico horario por concepto de consumo de combustible para el generador de vapor de la Planta de Asfalto (variantes 1-5).

Generador de vapor	Rendimiento térmico del generador de vapor (%)	Consumo de Combustible (kg/h)	Consumo de Combustible (l/h)	Importe (CUC/h)
GV: V-1	69,807	29,58	30,000	21,00
GV: V-2	73,542	27,61	28,002	19,60
GV: V-3	68,442	30,57	31,004	21,70
GV: V-4	67,133	31,55	31,998	22,40
GV: V-5	71,096	28,59	28,996	20,30
Promedio	70,004	29,58	30,000	21,00

Como se aprecia en la tabla 3.1 el gasto horario por concepto de consumo de combustible en el generador de vapor osciló entre 19,60 y 22,40 CUC, siendo el valor promedio igual a 21 CUC. El gasto para el mes (abril) en que se desarrollaron las mediciones se expone en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Gasto económico por concepto de consumo de combustible para el generador de vapor de la Planta de Asfalto en el mes de abril.

Generador de vapor	Rendimiento térmico del generador de vapor (%)	Consumo de Combustible (l/día)	Consumo de Combustible (l/mes)	Importe (CUC)
GV: V-1	69,807	720,00	21600,00	15120,00
GV: V-2	73,542	672,05	20161,46	14113,02
GV: V-3	68,442	744,10	22322,92	15626,04
GV: V-4	67,133	767,95	23038,54	16126,98
GV: V-5	71,096	695,90	20877,08	14613,96
Promedio	70,004	720,00	21600,00	15120,00

Para las variantes 6-10 se realizaron cálculos análogos, los resultados obtenidos se muestran en las tablas 3.3 y 3.4.

Tabla 3.3 Gasto económico horario por concepto de consumo de combustible para el generador de vapor de la Planta de Asfalto (variantes 6-10).

Generador de vapor	Rendimiento térmico del generador de vapor (%)	Consumo de Combustible (kg/h)	Consumo de Combustible (l/h)	Importe (CUC/h)
GV: V-6	67,318	30,57	31,004	21,70
GV: V-7	76,736	26,62	26,998	18,90
GV: V-8	71,82	29,58	30,000	21,00
GV: V-9	65,8228	32,54	33,002	23,10
GV: V-10	74,128	27,61	28,002	19,60
Promedio	71,166	29,384	29,801	20,86

El gasto horario por concepto de consumo de combustible para las variantes analizadas (6-10) osciló entre 19,60 y 21,70 CUC y el valor promedio fue 20,86 CUC (tabla 3.3). El gasto para el mes (mayo) en que se desarrollaron las mediciones de estas variantes se expone en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Gasto económico por concepto de consumo de combustible para el generador de vapor de la Planta de Asfalto en el mes de mayo.

Generador de vapor	Rendimiento térmico del generador de vapor (%)	Consumo de Combustible (l/día)	Consumo de Combustible (l/mes)	Importe (CUC)
GV: V-6	67,318	744,10	22322,92	15626,04
GV: V-7	76,736	647,95	19438,54	13606,98
GV: V-8	71,82	720,00	21600,00	15120,00
GV: V-9	65,8228	792,05	23761,46	16633,02
GV: V-10	74,128	672,05	20161,46	14113,02
Promedio	71,166	715,23	21456,88	15019,81

Al comparar los gastos económicos para los meses de abril y mayo se observa un ligero incremento para el primero, que se debe a las condiciones de operación en que se

trabajó la instalación, estos gastos pueden reducirse con el calentamiento del agua de alimentación y del aire suministrado al generador.

3.4- Impacto ambiental relacionado con la instalaciones productoras de vapor

3.4.1- Principales fuentes de contaminación

- **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 (gas incoloro e inodoro) es el resultado de una combustión incompleta de los reaccionantes 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.

• **Particulados**

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

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

Las principales afectaciones que causan son:

- Alteraciones de la capacidad respiratoria de personas y animales.
- Reducción de la visibilidad.
- Alteración de las propiedades de los suelos cultivables.
- Intensificación de los efectos negativos del SO_2 .
- 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 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.

3.4.2- Situación ambiental actual de la planta de Asfalto estudiada

En la referida planta se identificaron y caracterizaron los principales focos de contaminación desde el punto de vista ambiental, posteriormente se proponen las posibles soluciones para mitigarlos.

Residuales líquidos

Se tomaron dos muestras cada una de un litro del líquido depositado en la laguna evitando su contaminación con petróleo para proceder a su caracterización.

Tabla 3.5. Valores puntuales medidos en la chimenea del tanque de mezclado del líquido asfáltico.

Gases	Número de mediciones					Promedio
	1	2	3	4	5	
CO	21	43	66	31	39	40
SO ₂	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
H ₂ S	-	-	-	-	-	-

Emisiones de gases

Fueron monitoreadas las emisiones provenientes de las chimeneas de los tanques donde es calentada la mezcla asfáltica a ras de tierra mediante un equipo para monitoreo perimetral (Multiguard II) determinando como principales gases presentes el CO, SO₂ y H₂S. Se situaron dos monitores BM 22 para realizar un monitoreo semicontínuo y determinar las concentraciones de los gases antes mencionados y agregar la medición del CO₂, NH₃ y NO que no son posibles determinar con el otro equipo. Se realizaron además mediciones puntuales a las emisiones de la chimenea de

mezclado del líquido asfáltico con los áridos secos. Los resultados de las mediciones de gases realizadas en la planta de asfalto del municipio de Sagua de Tánamo se relacionan en las tablas 3.5 y 3.6.

Tabla 3.5. Valores puntuales medidos en el entorno de las 6 chimeneas de los tanques de calentamiento de la mezcla asfáltica.

Gases	Número de mediciones							Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	
CO	31	27	26	22	11	20	9	23
SO ₂	1,6	1,3	0,3	0,7	0,8	0,7	0,5	0,8
H ₂ S	1	1	1	1	1	1	1	

También se realizaron mediciones de los gases medidos en el entorno de las 6 chimeneas de los tanques de calentamiento de la mezcla asfáltica, a 5 y 10 m. El resumen de los resultados obtenidos se expone en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Valores promedios y máximos medidos en el entorno de las 6 chimeneas de los tanques de calentamiento de la mezcla asfáltica a 5 y 10 metros.

Gases	Promedio para 15 minutos	Valores máximos obtenidos para 15 minutos
SO ₂	0,1	0,2
H ₂ S	1	2
CO ₂	0,2	0,5
NO	1	2
NH ₃	2	17

De los resultados obtenidos en la medición de los focos de contaminación en la planta de asfalto se recomiendan las siguientes acciones:

- Definir los valores promedios y máximos de los gases CO, SO₂, H₂S, CO₂, NH₃ y NO presentes en las emisiones o fugas gaseosas. Una vez obtenida una data

confiable del rango en que oscilan los gases contaminantes, comparar estos valores con los límites establecidos en las normas.

- Realizar mediciones de partículas en suspensión para determinar su fracción granulométrica y sus concentraciones en función de la dirección predominante del viento.
- Evaluar las posibles opciones de acopiar las emisiones expulsadas por las 6 chimeneas pequeñas de los tanques de calentamiento de la mezcla asfáltica considerando el análisis de las siguientes variantes:

Opciones de menos complejidad

- Unir las 6 chimeneas en un solo conducto y su descarga al último tramo de la chimenea central.
- Unir las 6 chimeneas y conducir el flujo a una chimenea de mayor altura que puede ser construida lo más cercana posible a las pequeñas.

En los dos casos anteriores no se mejora la calidad del aire solo se traslada la contaminación más lejos, mejorándose el aire a baja altura donde se encuentra ubicada la planta.

Opciones de mayor complejidad

- Unir las 6 chimeneas en un solo conducto y conducción de ese flujo hasta una cámara donde se ponga en contacto con un reactivo químico (carbonato de magnesio ó cloruro de sodio) escogido para la limpieza de los gases (SO_2 y CO). Aunque la solución puede ser más costosa esta mejora considerablemente la calidad del aire en la zona de trabajo y disminuyen las concentraciones de los gases contaminantes.
- Preparar las condiciones para realizar un muestreo a los gases que se vierten por la chimenea central mediante el método del Tubo Pitot, lo que permitirá conocer el flujo vertido al medio y su composición.

También en la planta de asfalto de Sagua de Tánamo existen afectaciones al medioambiente producidas por las emanaciones continuas de polvo y ruido, debido a las implicaciones que tienen estas dos fuentes contaminantes en la salud del ser humano a continuación se exponen algunas consideraciones al respecto.

Afectaciones causadas por el polvo al medio ambiente y el organismo humano

Las partículas suspendidas en la atmósfera absorben la luz solar, reduciendo la energía que llega a la tierra y produciendo cambios que disminuyen notablemente la luminosidad y visibilidad, además de la luz solar las partículas en suspensión absorben la luz producida por medios artificiales. Este fenómeno se encuentra ligado a la concentración (en el trabajo no se exponen los valores cuantitativos de las concentraciones porque no se han realizado mediciones recientes en las empresas). Para una misma concentración las partículas que absorben una mayor cantidad de energía son las de diámetro comprendido entre 0,1 a $1\mu\text{m}$. Entre los efectos que producen sobre los materiales se encuentran la abrasión realizada por aquella partícula de mayor diámetro y ataque químico que puede realizarse directamente por las partículas o generalmente por los gases en los que estas viajan.

Los efectos que produce sobre la vegetación pueden considerarse como muy pequeños y prácticamente inexistentes. Solo pueden cifrarse como peligrosos aquellos que se derivan para zonas muy próximas a puntos de producción de partículas en grandes cantidades.

Sin embargo cuando se habla del organismo humano, la situación se torna más preocupante, ya que lo afecta directamente en mayor o menor medida. Los contaminantes penetran en el organismo fundamentalmente por inhalación de polvos en el aire por las vías respiratorias y mediante la absorción de polvo a través de la piel.

En la primera, las partículas entran al cuerpo humano a través del sistema respiratorio y el efecto que se produce depende de su tamaño, la composición química, densidad, superficie específica entre otras características. En la segunda, las partículas de diámetro superiores a $5\mu\text{m}$ quedan retenidas en la cavidad nasal y también pueden quedar atrapadas por la mucosa que tapiza la tráquea. Las partículas con diámetros comprendidos entre 0,5 y $5\mu\text{m}$ son capaces de penetrar hasta el sistema respiratorio

inferior depositándose en los bronquios. De aquí que en la mayoría de los casos sean eliminados al cabo de algunas horas por respiración.

La situación más preocupante corresponde a las partículas menores de $0,5\mu\text{m}$, ya que se ha estimado que más del 50% de las partículas de $0,01$ a $0,1\mu\text{m}$ que penetran en los alvéolos se depositan allí, donde es difícil eliminarlos por carecer de cilios y mucosas, pudiendo permanecer durante meses e incluso durante años degradando la salud del hombre.

Efecto del ruido sobre la salud de los seres humanos

Entre los impactos negativos del ruido se encuentran los cambios y pérdida de la audición, interferencia de la comunicación oral, molestias y disminución de la capacidad de trabajo. Se ha demostrado que la exposición prolongada a altos niveles de ruido puede provocar la pérdida total de la audición. Otras alteraciones del oído producto del ruido son: el tapamiento del canal auditivo y la ruptura de la membrana timpánica.

El ruido también produce en el sistema neuro-vegetativo una serie de modificaciones funcionales que son reacciones de defensa del organismo frente a una agresión externa, por ejemplo: la elevación de la presión arterial, aceleración del ritmo cardiaco y de los movimientos respiratorios, tensión muscular, descarga de hormonas en sangre, entre otros. Esto ocurre sobre todo cuando el ruido es muy intenso, de carácter impulsivo y el que escucha no está preparado para ello. Los niveles de ruido altos, están considerados como factores de riesgo para la vida de los seres humanos ya que en la generalidad de los casos desencadenan en una enfermedad cardiovascular.

3.5- Conclusiones del capítulo 3

- Los gastos económicos asociados al consumo de combustible para el rendimiento térmico promedio fueron igual a 15 120 y 15 019,81CUC para los meses de abril y mayo.
- En la Planta de Asfalto existen diversas fuentes contaminantes del medioambiente. Entre las más peligrosas se encuentran los gases producto de la combustión del petróleo los generados en el proceso de producción de la mezcla asfáltica. También se encuentra en concentraciones significativas el polvo.

CONCLUSIONES GENERALES

- Se comprobó mediante el marco teórico la existencia de múltiples trabajos destinados al análisis termoeenergético de los generadores de vapor existentes en Moa y otras regiones, sin embargo no se reportan estudios relacionados con el generador de vapor de la Planta de Asfalto del municipio Sagua de Tánamo.
- En la instalación existe un bajo aprovechamiento de la energía térmica que se manifiesta en los rendimientos térmicos promedios, los cuales fueron iguales a 70,004 y 71,166% para las variantes 1-5 y 6-10, respectivamente.
- El generador de vapor analizado se caracteriza por la baja capacidad de aprovechamiento del calor útil máximo obtenido en el proceso de combustión. Los rendimientos exergéticos promedios fueron inferiores al 20% y los grados de pérdida de exergía fueron superiores al 80%.
- Los consumos promedios de combustible para los dos meses considerados en la investigación fueron igual a 21 600 y 21 456,88 litros. Los mismos generan gastos económicos superiores a los 15 000 CUC, para las condiciones de explotación analizadas.
- Las afectaciones ambientales más significativas en la Planta de Asfalto de Sagua de Tánamo son provocadas por las emanaciones de los gases producto de la combustión del petróleo, las emisiones de los gases que se producen en el proceso de elaboración de la mezcla asfáltica y las elevadas concentraciones de polvo que existen en la instalación.

RECOMENDACIONES

- Reducir en la medida de lo posible las emanaciones de gases y polvo en la Planta de Asfalto, lo cual mejorará sustancialmente la calidad del aire en la instalación y las áreas aledañas.
- Reparar o sustituir el generador de vapor analizado debido al elevado grado de deterioro que presenta el mismo.
- Instalar los equipos de medición necesarios para el desarrollo de futuras evaluaciones térmicas y exergéticas en el sistema de generación de vapor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Borroto, A.; A. Rubio. Combustión y Generación de vapor. Maestría en eficiencia energética. Universidad de Cienfuegos. 2007.
2. Caballero, B. 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. Fernández, E. *Termodinámica Técnica*. La Habana: Editorial "Félix Varela, 1994. Tomo I. 290 p.
6. Fernández, E. Utilización del vapor en la industria. Editorial Científico-Técnica. La Habana, 2001. 138 p.
7. Hernández, N. Diagnóstico térmico verificativo de los generadores de vapor insertados en la empresa "Ernesto Ché Guevara". Trabajo de Diploma. ISMM, 2006. 48 p.
8. Jarrosay, E. Balance energético de las calderas del hospital Guillermo Luis Fernández. Trabajo de Diploma. ISMM, 2000. 50 p.
9. Lahenz, V. *Cálculo de la eficiencia en los generadores de vapor. Trabajo de Diploma*. ISMM, 2001. 56 p.
10. *Manual de operaciones de la Planta de Asfalto, 1996.*
11. Muhica, J. Evaluación termoeconómica del ciclo de la central termoeléctrica de la empresa Ernesto Guevara. Trabajo de Diploma. ISMM, 2001. 62 p.
12. Oliva, R. Luis. Explotación y materiales constructivos de generadores de vapor. Ediciones ISPJAM. Santiago de Cuba. 1988. 320 p.
13. Pankrátov, G. Problemas de Termotecnia. Editorial MIR Moscú. URSS, 1987. 235 p.
14. Pereira, M. Balance de energía de la caldera del comedor del ISMM. Proyecto de Ingeniería Mecánica, 2001.
15. Pérez, L. Generadores de Vapor. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana. 1972. 447 p.

16. Rivera, B. Y; Y. Regueiferos. Diagnóstico térmico de los generadores de vapor de las empresas presupuestadas del municipio Moa. Trabajo de Diploma. ISMM, 2007. 50 p.
17. Rodríguez, Y. Análisis del petróleo crudo nacional empleado en la empresa Ernesto Che Guevara. Trabajo de Diploma. ISMM, 2001.
18. Rodríguez, L. Evaluación térmica y exergética de los generadores de vapor de la empresa Pedro Sotto Alba. Trabajo de Diploma. ISMM, 2008.
19. Rizhkin, Y. V. Centrales termoeléctricas. Primera y segunda parte. Editorial pueblo y educación. Ciudad de La Habana. 1987. 370 p.
20. Suárez, L. 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.
21. Suárez, V. Diagnóstico del sistema de generación de la CTE de la empresa Rene Ramos Latourt. Trabajo de Diploma. ISMM, 2005.
22. Tanquero, N. Guía metodológica para proyectos del curso de generadores de vapor. Editorial ISPJAE. La Habana. Cuba. 1997. 120 p.
23. Tuzón, E. Diagnóstico energético del generador de vapor 1 de la empresa Ernesto Che Guevara. Proyecto de Curso. ISMM, 2005. 30 p.
24. Vukalovitch, M. *Propiedades Termodinámicas del agua y el vapor*. Editorial. Revolucionaria 1978. 245 p.

ANEXO

BALANCE TÉRMICO DEL GENERADOR DE VAPOR DE LA PLANTA DE ASFALTO DE SAGUA

VARIANTE 1

Poder calórico bajo del combustible Q_b (J/kg)

Todos los elementos en masa de trabajo

$$C := 84.3 \quad H := 10.5 \quad O := 0.3 \quad S := 3 \quad W := 1.4$$

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

$$Q_b = 3.965 \times 10^7 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

Volumen de aire teórico V_a

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

$$V_a = 10.367 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen total real de gases triatómicos V_{RO2}

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

$$V_{RO2} = 1.594 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

$$N := 0.6 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

$$V_{N2} = 8.195 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen teórico de los gases secos V_{gs}

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

$$V_{gs} = 9.789 \frac{m^3}{kg}$$

Volumen teórico de los vapores de agua V_{H2O}

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

$$V_{H2O} = 1.35 \frac{m^3}{kg}$$

Volumen teórico total de gases V_{og}

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

$$V_{og} = 11.138 \frac{m^3}{kg}$$

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

$$CO_2 := 14.2 \quad O_2 := 2.1 \quad CO := 0.0040 \quad H_2 := 0 \quad CH_4 := 0$$

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

$$N_2 = 83.696$$

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

$$\alpha = 1.104$$

Volumen real de aire V_a . real

$$V_{a_{real}} := V_a \cdot \alpha$$

$$V_{a_{real}} = 11.446 \frac{m^3}{kg}$$

Volumen real de gases V_g

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

$$V_g = 12.329 \frac{m^3}{kg}$$

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

Entalpía teórica de los gases Igo Calculado para Tge=209 °C

$$I_{RO2} := 375.67 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3} \quad I_{N2} := 264.66 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3} \quad I_{H2O} := 318.62 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3}$$

$$I_{cen} := 177.65 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad A := 0.01 \quad A_{arr} := 0.5$$

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

$$I_{go} = 3.198 \times 10^6 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

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

La temperatura del aire se expresa en °C

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

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

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

$$I_{ge} = 3.248 \times 10^6 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

Balance térmico por el Método Directo

Cálculo del calor útil Qútil (J/hr)

$$D_{vs} := 320 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \quad I_{vs} := 644.12 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad I_{aa} := 32.004 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$Q_{\text{útil}} := D_{\text{vs}} \cdot (I_{\text{vs}} - I_{\text{aa}}) \quad Q_{\text{útil}} = 8.2 \times 10^8 \frac{\text{joule}}{\text{hr}}$$

Consumo de combustible B (kg/hr)

$$B := 29.58 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

Determinación del calor disponible Q_d (J/kg)

Calor físico del Combustible (J/kg)

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

$$t_c := 32 \quad f_c := 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$C_c := 1.74 + 0.0025 \cdot t_c \quad C_c = 1.82$$

$$Q_{fc} := C_c \cdot t_c \cdot f_c$$

$$Q_{fc} = 5.824 \times 10^4 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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 del generador de vapor N_{gvMD} (%)

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

$$N_{\text{gvMD}} = 69.807$$

BALANCE EXERGÉTICO DEL GENERADOR DE VAPOR ESTUDIADO

Determinación de la exergía empleada (combustible)

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

$$T_0 := (32 + 273.15) \cdot K \quad T_s := (800 + 273.15) \cdot K \quad m_{\text{comb}} := B$$

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

$$Ex_{\text{combustible}} = 2.332 \times 10^5 \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

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

Exergía del vapor

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

$$h_{\text{vapor}} = 2.696 \times 10^6 \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad h_{0v} := 32 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$S_{\text{vapor}} := 1.7190 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot K} \quad S_{0v} := 0.1050 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot K}$$

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

$$Ex_{\text{vapor}} = 4.434 \times 10^4 \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

Determinación de la rendimiento exergético (%)

Exergía empleada (J/s)

Exergía recuperada (kJ/s)

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

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

$$\mathbf{Ex_{empleada} = 2.332 \times 10^5 \frac{joule}{sec}}$$

$$\mathbf{Ex_{recuperada} = 4.434 \times 10^4 \frac{joule}{sec}}$$

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

$$\mathbf{\eta_{Ex} = 19.014}$$

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

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

$$\mathbf{\gamma = 80.986}$$