

**Universidad de Matanzas
Sede Camilo Cienfuegos
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química**



TRABAJO DE DIPLOMA

*Trabajo de Diploma presentado en opción al título de
Ingeniero Químico*

TÍTULO: Evaluación termo-exergética del sistema de generación de vapor de la División Territorial de Combustible de Matanzas

Autora: Liliana Sánchez González

Tutores: Dr.C.Lourdes Yamen González Sáez

Ing. Elina Pérez Moré

Consultante: Dr.C. Lilian Curiel Lorenzo

Matanzas, Cuba (2022)

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, Liliana Sánchez González, por medio de la presente nota declaro que soy la única autora del Trabajo de Diploma que lleva por título: Evaluación termo-exergética del sistema de generación de vapor de la División Territorial de Combustible de Matanzas y, en calidad de tal, autorizo a la División Territorial de Combustible de Matanzas y a la Universidad de Matanzas para hacer uso del mismo con el fin que estime más conveniente.

Liliana Sánchez González

Nombre y Apellidos

Firma

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Tribunal

Miembro del Tribunal

Miembro del Tribunal

Pensamiento:

“Tenemos que emplear la ciencia y la técnica: no para destruir, sino para crear, para vencer la pobreza, para proteger y prolongar la vida, para llevar el bienestar al hombre.”

Fidel Castro Ruz

Dedicatoria:

A mis padres

A mi familia

Agradecimientos:

A mis padres por siempre estar a mi lado.

A toda mi familia y a mi novio, por apoyarme de una forma u otra a lo largo de mi carrera.

A mis tutoras, Lourdes y Lili por su tiempo y dedicación, sin su ayuda la realización de este trabajo no hubiera sido posible.

A Lilian y a Nelson, por la colaboración brindada durante el desarrollo de este proyecto.

A mis amigas que han emprendido este camino a mi lado.

A los que contribuyeron a mi formación como profesional.

A todos, muchas gracias

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se desarrolla en la Empresa de la División Territorial de Combustible de Matanzas con el objetivo de evaluar la eficiencia termo-exergética del sistema de generación de vapor, en dos períodos (2011 y 2020). Para ello se efectúa un análisis bibliográfico, así como la descripción del proceso tecnológico. Se realizan los balances de masa pertinentes para calcular las eficiencias energéticas y exergéticas, utilizando el método directo, y se obtienen valores para el año 2011 de 88,26 % y 54,69%, y para el 2020: 75,14 % y 42,66% respectivamente; lo que evidencia una notable disminución, causada principalmente por las pérdidas de condensado. Por otra parte, se calculan los consumos de vapor de los equipos de la instalación, para un consumo total de 47,6 t/h, lo que permite proponer opciones para la simultaneidad de las operaciones o adquirir un nuevo generador, y así suplir esta demanda. El análisis económico arroja que la DTCM en el año 2020 en relación al 2011, no obtuvo ningún ahorro. También, con respecto al análisis económico, se determinaron los costos exergético de las corrientes involucradas, cuyos resultados deducen que el mayor aporte al sistema viene dado por el combustible. Por último, se lleva a cabo, un análisis de las emisiones de los contaminantes que se expulsan a través de los gases de escape ($\text{SO}_{2(g)}$ y $\text{CO}_{(g)}$), demostrando que la calidad del aire se ve afectada mayormente por el $\text{SO}_{2(g)}$, con índices de 13 523,73 y 44 209,01.

ABSTRACT

This research work is carried out at the Matanzas Fuel Territorial Division Company with the objective of evaluating the thermo-exergetic efficiency of the steam generation system, in two periods (2011 and 2020). For this, a bibliographical analysis is carried out, as well as the description of the technological process. The pertinent mass balances are made to calculate the energy and exergetic efficiencies, using the direct method, and values for the year 2011 of 88,26% and 54,69% are obtained, and for 2020: 75,14% and 42,66% respectively; which shows a notable decrease, mainly caused by condensate losses. On the other hand, the steam consumption of the installation equipment is calculated, for a total consumption of 47,6 t/h, which makes it possible to propose options for the simultaneity of the operations or to acquire a new generator, and thus supply this demand. The economic analysis shows that the DTCM in 2020 in relation to 2011, did not obtain any savings. Also, with respect to the economic analysis, the exergetic costs of the currents involved were determined, whose results deduce that the greatest contribution to the system is given by the fuel. Finally, an analysis of the emissions of the pollutants that are expelled through the exhaust gases ($\text{SO}_2(\text{g})$ and $\text{CO}(\text{g})$) is carried out, demonstrating that the air quality is affected mainly by the $\text{SO}_2(\text{g})$, with indices of 13 523,73 and 44 209,01.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1: ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO	4
1.1 Sistema de vapor	4
1.1.1 Componentes de un sistema de vapor.....	4
1.2 Generadores de Vapor	5
1.2.1 Requerimientos para el funcionamiento de los generadores de vapor	6
1.2.2 Importancia de los generadores de vapor	6
1.2.3 Clasificación de los generadores de vapor.....	6
1.3 El agua en la generación de vapor. Estados y condiciones de uso.....	9
1.3.1 Características del agua	10
1.3.2 Tratamientos del agua	10
1.3.3 Problemas asociados al agua	11
1.3.4 Aditivos para agua de generadores de vapor	13
1.4 Tipos fundamentales de combustibles en Cuba	13
1.5 Generadores de vapor pirotubulares	14
1.6 Diseño y selección de generadores de vapor	16
1.7 Eficiencia de los generadores de vapor	17
1.7.1 Requisitos para declarar una sala de generadores de vapor eficiente	18
1.8 Generalidades sobre la exergía.....	19
1.8.1 Pérdidas exergéticas	20
1.8.2 Análisis exergético	20
1.9 Conclusiones parciales.....	22
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS	23
2.1 Descripción del área objeto de esto de estudio. Proceso de obtención de vapor en la DTCM.....	23
2.2 Metodología para el cálculo de la eficiencia térmica.....	26
2.2.1 Balance de masa en el Horno. Determinación del flujo de gases de escape.....	26
2.2.2 Eficiencia del generador de vapor	29
2.2.3 Cálculo de consumo de vapor de los intercambiadores de calor	32
2.3 Cálculo de la eficiencia exergética en el generador de vapor	32
2.4 Determinación de la factibilidad económica.....	35
2.4.1 Ahorro por cambio de combustible.....	35
2.4.2 Costo de la exergía.....	36
2.5 Determinación del Índice de Calidad del Aire (ICA)	37

2.6 Conclusiones parciales.....	39
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS	40
3.1 Análisis de los resultados de los balances de masa y energía en el generador de vapor para los años 2011 y 2020	40
3.2 Análisis del consumo de vapor para los intercambiadores de calor	44
3.3 Análisis de la eficiencia exergética del generador de vapor para los años 2011 y 2020	47
3.4 Análisis económico.....	51
3.4.1 Ahorro por concepto de cambio de combustible.....	51
3.4.2 Costos de exergía.....	55
3.5 Análisis de los resultados del Índice de Calidad del Aire (ICA) para los años 2011 y 2020	56
3.6 Conclusiones parciales.....	59
CONCLUSIONES	60
RECOMENDACIONES	62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
.....	3

INTRODUCCIÓN

Las empresas industriales necesitan energía para su funcionamiento, en su forma primaria, en calor, o como electricidad. De ahí que siempre se requiera la presencia de generadores de vapor para producir el vapor que se suministrará o que generará la energía eléctrica.

Son pocas las tecnologías que han aportado tanto el desarrollo de la humanidad como la generación y utilización del vapor en procesos tecnológicos, se dice que constituyó la chispa de la Revolución Industrial y que los antecedentes de usos se remontan a épocas antes de nuestra era.

En el mundo moderno, la energía para usos industriales tiene varias fuentes: la energía química de las sustancias combustibles, la energía potencial del agua acumulada en embalses, la energía atómica, la energía solar, la energía de las mareas y otras. Pero, a pesar de existir diversas fuentes, la mayor parte se obtiene a partir de la energía química liberada, en forma de calor, por los combustibles al quemarse en los hornos de los generadores de vapor, de aquí, que su eficiente operación sea de gran importancia teniendo en cuenta que los recursos combustibles del mundo son limitados y su mala utilización, además de contribuir a su agotamiento, significa grandes pérdidas económicas para cualquier nación.

El elemento principal en un sistema de vapor lo constituye el generador de vapor o caldera de vapor, el cual está constituido por un conjunto de superficies de calentamiento y equipos, integrados en un esquema tecnológico para generar y entregar vapor en la cantidad, calidad, con los parámetros, y en el momento requerido por los equipos de uso final, en forma continua y operación económica y segura, a partir de la energía liberada en la combustión de un combustible orgánico. Actualmente, las calderas de vapor, constituyen un elemento esencial en el funcionamiento de prácticamente todas las empresas industriales al proporcionar la potencia o el calor necesario para el proceso.

Recae, por tanto, sobre el personal de operación y supervisión del departamento de generación de vapor una gran responsabilidad, que requiere del conocimiento y actualización continua en las técnicas y procedimientos para garantizar la estabilidad

y seguridad en el suministro de vapor según los requerimientos del proceso, con el menor consumo de combustible, con el menor gasto y el mínimo impacto ambiental (Álvarez, 2018).

Para Cuba, país de limitados recursos energéticos, y en el que prácticamente la casi totalidad del vapor y la electricidad se generan a partir de la energía química de los combustibles, la explotación eficiente de sus equipos de generación de vapor tiene una importancia vital.

Cuba continúa restringido por el trascendental bloqueo económico y comercial impuesto por los Estados Unidos, logrando poner a este país subdesarrollado en una situación aún más crítica; para alcanzar grandes metas en la producción nacional mediante la industria. Cuba ha tenido que pagar precios más elevados en compras y traslado del combustible que cualquier otro país. Con el transcurso de los años se ha producido un cambio necesario en la estructura del consumo general de combustibles, importando grandes cantidades de Fuel-Oil para su explotación en la mayoría de las centrales termoeléctricas e industrias (Álvarez, 2018).

Debido al impacto económico, se afecta el comercio entre los países, sobre todo en la tecnología de punta, que da lugar al incremento de tarifas en maquinarias, piezas, y a lo más importante: combustibles, principalmente fósiles, recurso no renovable conocido por su amplia rama de explotación y su cara extracción y refinado. El combustible es el elemento clave en el trabajo de los generadores de vapor, especialmente en su economía; baste decir que el costo fundamental en la generación de vapor está dado por el costo del combustible consumido (Rubio, 2015).

En la provincia de Matanzas, se encuentra la División Territorial de Combustible de Matanzas (DTCM), cuya misión es la distribución y comercialización del petróleo crudo y sus derivados; contando para ello con cinco muelles (Pt-1, PC-2, PC-3, Bayona y Frank País), además de oleoductos capaces de trasladar el combustible a los consumidores que así lo requieran. El traslado del petróleo crudo se logra mediante un calentamiento previo gracias a un generador de vapor. El mismo permite trasladar el vapor por las líneas hacia los diferentes consumidores que lo necesitan. Es muy importante mantener todas las medidas necesarias para que el proceso

marche bien, pues de acuerdo con el desarrollo energético del país, el ahorro de energía es trascendental para su trabajo eficiente, de manera que sus indicadores cumplan con los parámetros establecidos.

Desde el año 2011, la DTCM sustituyó el petróleo crudo, que se utiliza en los generadores de vapor de la instalación (pirotubulares), por fuel-oil teniendo en cuenta la disponibilidad y precio de ambos combustibles. A partir de varias modificaciones, entre ellas, la sustitución del combustible mencionada anteriormente, se requiere comprobar si estos cambios afectaron de forma positiva o negativa al sistema de generación de vapor, por lo que se plantea como **Problema científico** de la investigación:

¿Cómo influirá en la eficiencia del sistema de generación de vapor de la DTCM las modificaciones técnicas realizadas?

Como posible solución al problema se plantea la siguiente **hipótesis** de trabajo:

Si se determina la eficiencia térmico-exergética del sistema de generación de vapor de la División Territorial de Combustible de Matanzas, se podrá definir la factibilidad técnica, económica y ambiental de las modificaciones realizadas.

Para dar cumplimiento a la hipótesis planteada anteriormente, se propone el siguiente **objetivo general**:

Evaluar la eficiencia térmico-exergética del sistema de generación de vapor de la DTCM.

Para cumplir el objetivo propuesto se plantean los siguientes **objetivos específicos**:

- Realizar el cálculo del balance de masa del generador de vapor.
- Determinar la eficiencia térmica en el generador de vapor.
- Efectuar el cálculo de la eficiencia exergética en el generador de vapor.
- Determinar la factibilidad técnica, económica y ambiental de las modificaciones realizadas.

CAPÍTULO 1: ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO

1.1 Sistema de vapor

Un sistema de vapor no es más que la circulación de vapor por una cañería o radiador como sucede en los sistemas de agua caliente. Este consiste en que la fuerza de la gravedad obliga al vapor condensado en el radiador a bajar al generador de vapor por la misma tubería por la cual sube el vapor a los radiadores (Borroto, 2010).

Borroto (2010) señaló que el vapor es utilizado de forma general como fuente de calor o para generar potencia mecánica. En las plantas térmicas el vapor se expande en una turbina, su energía es transformada en potencia mecánica, y esta a su vez en potencia eléctrica. Se utiliza además en los procesos industriales como fuente de calor. También para la producción combinada o secuencial de energía eléctrica y térmica, lo cual incrementa la eficiencia global del sistema. El elemento fundamental de un sistema de vapor lo constituye el generador de vapor, el cual tiene la función de transferir al agua la energía en forma de calor proveniente de los gases, producto de la combustión, para que esta se convierta en vapor.

1.1.1 Componentes de un sistema de vapor

Los componentes de los sistemas de vapor son (Rubio et al., 2007; Borroto, 2010; Arze et al., 2020):

1. Generador de vapor (caldera) y sus auxiliares.

El generador de vapor es un recipiente que contiene agua, la cual se transforma en vapor mediante la aplicación de calor.

Tipos:

» Piro tubulares

» Acuotubulares

Existen también generadores de vapor de agua caliente y de fluido o aceite térmico.

2. Tuberías de vapor:

Selección de la presión de operación

Diámetro de la tubería

Inclinación adecuada y drenaje de la tubería

Línea de expansión

Pérdidas de calor

3. Válvulas de regulación: entregan el vapor a la presión en que opera un equipo o un área de vapor.

4. Equipos consumidores

Motores Primarios: Máquinas de Vapor, Turbinas

Equipos de Proceso: Intercambiadores, Evaporadores, Secadores, Reactores

5. Trampas de Vapor, sellos barométricos, controles de nivel.

6. Sistema de condensado: Tuberías, Tanques, Bombas

7. Sistema de agua de alimentación: Tanques, Bomba, Calentadores

8. Sistema de tratamiento de agua

9. Instrumentación y sistemas de control

1.2 Generadores de Vapor

Un generador de vapor es un recipiente cerrado, generalmente de acero, en el que se calienta agua mediante alguna fuente de calor producido por la combustión de un combustible. El vapor producido puede suministrarse a baja presión para trabajos de procesos industriales en algodón, ingenios, industrias azucareras, etc; y para producir agua caliente que se puede utilizar para calentar instalaciones a muy baja presión (Parvez, 2017).

El generador de vapor generalmente es utilizado en las turbinas de vapor para generar vapor, habitualmente vapor de agua, con energía suficiente como para hacer funcionar una turbina en un ciclo de Rankine modificado y, en su caso, producir electricidad, aunque también tiene amplias aplicaciones en la industria, como procesos de calentamiento de materias primas productos, esterilización, lavado, etc (Arze et al., 2020).

Existen generadores de vapor que no utilizan la energía química, sino que directamente concentran la energía térmica, como es el caso de la energía termosolar de concentración.

Dicho esto, se puede concluir que un generador de vapor es un sistema de intercambio de energía que aprovecha el calor generado al quemar un combustible, transfiriéndolo a una corriente de agua.

1.2.1 Requerimientos para el funcionamiento de los generadores de vapor

Es de gran importancia controlar los parámetros de funcionamiento del generador de vapor para evitar la contaminación y planificar su mantenimiento. Un generador de vapor debe responder a los siguientes requerimientos con el objetivo de que cumpla con los requisitos necesarios (Álvarez, 2018; Borroto et al., 2007; Tanquero, 2002).

1. Satisfacer demanda de vapor: flujo, presión, temperatura, calidad (producción de potencia, calor, requerimientos de proceso).
2. Eficiencia térmica: debe ser mantenida en el rango de carga.
3. Confiabilidad: alta disponibilidad.
4. Costo: inicial, operación, mantenimiento y reparación.
5. Impacto ambiental: límite de emisiones.

1.2.2 Importancia de los generadores de vapor

Las empresas industriales necesitan energía para su funcionamiento, generalmente en su forma primaria, el calor, o como electricidad. De ahí que siempre se requiera la presencia de generadores de vapor para producir el vapor que suministrará el calor o que generará la energía eléctrica. En aquellos casos en que la industria prescindiera de tener sus propios equipos, tendrá que tomar energía eléctrica del sistema nacional, la que en una buena medida es producida en centrales termoeléctricas con potentes generadores de vapor.

Hoy en día este equipo es un elemento esencial en el funcionamiento de prácticamente todas las empresas industriales. No erróneamente, se ha llegado a plantear que el generador de vapor es el corazón de toda industria moderna (Rubio, 2015).

1.2.3 Clasificación de los generadores de vapor

Según Álvarez (2018) y Hernández (2012) la clasificación se realiza de acuerdo a:

Disposición de los fluidos en los tubos:

De tubos de fuego (pirotubulares). Son generadores de vapor pequeños. En ellos los gases calientes (fuego) circulan por dentro de los tubos, mientras que el agua está por fuera.

De tubos de agua (acuotubulares). Son generadores de vapor medianos y grandes. En ellos el agua circula por dentro de los tubos mientras que los gases están por fuera.

Uso:

Estacionarios. Son aquellos que se instalan fijos en su lugar de operación y constituyen la inmensa mayoría. Ejemplos de ellos son los generadores de vapor de termoeléctricas y centrales azucareros.

Portátiles. Son equipos pequeños que permiten ser trasladados de lugar con facilidad, necesitándose para su reinstalación un mínimo de acondicionamiento.

Móviles. Son aquellos que se instalan en medios de transporte y que operan durante su movimiento. Ejemplos de ello son los generadores de vapor de locomotoras y las marinas.

Tamaño:

Pequeños. Son generadores de vapor de pequeñas producciones y operación a bajas presiones.

Producción: $D < 20\ 000$, Presión: $P < 2,0$ MPa

Medianos. Tienen producciones de vapor intermedias al igual que sus presiones; pueden suministrar tanto vapor saturado como sobrecalentado.

Producción: $D = (20\ 000 - 100\ 000)$, Presión: $P = (1,0 - 6,0)$ MPa

Grandes. Son los de mayores producciones de vapor, lo suministran siempre sobrecalentado y en los máximos parámetros de presión y temperatura.

Producción: $D > 100\ 000$, Presión: $P > 6$ MPa

Forma y posición de los tubos.

De tubos rectos. En ellos toda la flusería está integrada por tubos rectos. Se subdividen en: horizontales y verticales, de acuerdo con la posición de los tubos. Son generadores de vapor pequeño y mediano.

De tubos curvos. La flusería está compuesta por tubos curvos con diferentes formas. Son generadores de vapor medianos y grandes.

Sistema de circulación de la sustancia de trabajo:

De circulación natural. En ellos la sustancia de trabajo se mueve por el principio del termosifón, como resultado de la diferencia de densidad entre el agua y la mezcla agua-vapor que se genera.

De circulación forzada. En ellos la sustancia de trabajo se mueve impulsada por equipos mecánicos (bombas de alta presión) pero mantienen el domo para la separación del agua y el vapor.

De circulación continua. En este caso también el agua es impulsada por una bomba, pero en un circuito continuo donde ya no existe el domo.

Tiro de los gases:

De tiro natural.

De tiro mecánico.

Presión de trabajo:

Baja $p < 20$ bar.

Media $p = 20-64$ bar.

Alta $p > 64$ bar (1)

Tipo de combustible: En los procesos de generación de vapor se emplean combustibles para su funcionamiento que poseen diversas características que determinan su estado y selección apropiada para su empleo. Una tipología de combustible se muestra a continuación:

Combustibles líquidos: Son aquellas sustancias en las que las fuerzas resultantes de los movimientos moleculares son lo suficientemente elevadas frente a las fuerzas de atracción para permitir el movimiento de las moléculas entre sí, permitiéndole fluir y adaptarse a la forma del recipiente que las contiene.

Combustibles sólidos: Son aquellas sustancias en las que sus moléculas presentan una gran cohesión entre sí, ya que las fuerzas de atracción son superiores a las que originan los movimientos moleculares. Su característica fundamental es que mantienen una forma y volumen definidos

Combustibles gaseosos: Son aquellas sustancias en las que las fuerzas resultantes de los movimientos moleculares son muy superiores a las fuerzas de atracción entre moléculas. Por ello, las moléculas de los gases se distancian ocupando todo el espacio disponible.

Modos de transmisión de calor:

conducción: Es la propagación del calor en el interior del cuerpo o entre cuerpos que están en contactos de forma que la transmisión tiene lugar sin movimiento de materia en sentido macroscópico

convección: Se puede definir como la transmisión de energía calorífica de unos puntos a otros de un fluido por el movimiento de la propia materia.

radiación: La radiación es cuando la superficie de todo el cuerpo emite energía radiante en forma de ondas electromagnéticas que se propagan en línea recta y es función de la temperatura y de las características de la superficie del cuerpo interior.

1.3 El agua en la generación de vapor. Estados y condiciones de uso

El vapor se produce a partir de agua en un generador de vapor, donde aumenta su entalpía tomando el calor liberado por una combustión o fuente térmica. Luego, en el punto de utilización, libera esta energía cediéndola al medio a calentar, o caso contrario la transforma en energía mecánica como por ejemplo en una turbina (Arze et al., 2020; Ávila, 2002).

Es importante comprender los diferentes estados en los que puede presentarse el agua confinada en una red de generación y distribución de vapor a la hora de analizar o emplear una instalación de vapor, así como las características que definen a cada uno de estos estados.

Inicialmente se pueden definir dos estados básicos: Líquido y vapor

En el estado líquido, el agua se puede encontrar por debajo del punto de ebullición -líquido subenfriado- o en el punto de ebullición, conocido como líquido saturado. A su vez el estado vapor puede encontrarse a la temperatura de ebullición -vapor saturado- o puede encontrarse por encima del punto de ebullición -vapor sobrecalentado.

El vapor saturado se presenta en un margen muy estrecho y puede encontrarse como vapor seco o húmedo, los distintos grados de humedad se definen por un parámetro denominado título del vapor y que representa el porcentaje de fase vapor frente a la mezcla vapor-agua (Arze et al., 2020; Ávila, 2002).

1.3.1 Características del agua

En la mayoría de las aplicaciones nunca el agua es absolutamente pura, ya que una de las características sobresalientes del agua es la capacidad para disolver, en mayor o menor grado, todo aquel material con el que se hace contacto.

Se denomina agua dura a aquella que contiene un alto nivel de minerales, en particular sales de magnesio y calcio, en general el agua dura no es dañina para la salud, pero provoca daños a la tubería, generadores de vapor, torres de enfriamiento, entre otros equipos.

Por tal motivo en el uso del agua para los generadores de vapor se necesita eliminar la dureza de agua, esto quiere decir que las características que debe tener el agua son (Flynn, 2009; McCoy, 1969; Weber et al., 2003):

- Cero durezas
- pH entre 10,5 y 11,5 (rango normal). Valor máximo permisible de 12,5
- Libre de oxígeno disuelto con un valor de sulfito residual superior a 50 ppm.
- Sólidos totales disueltos. Rango normal de 3000 a 6000 ppm. Límite máximo 8550 ppm.
- Hierro disuelto <1,0 ppm
- Libre de sólidos suspendidos
- Sílice 120 ppm con la alcalinidad apropiada de hidroxilos (OH⁻) para desmineralizadores <10 ppm

1.3.2 Tratamientos del agua

Es necesario tratar el agua antes de utilizarla para la generación de vapor, con el objetivo de proteger al equipo contra la corrosión e incrustaciones, algunas de las consecuencias que origina el descuido en el tratamiento de agua es en los altos costos de mantenimiento y combustible, así como en el desgaste prematuro del equipo.

El tratamiento y acondicionamiento del agua de generadores de vapor debe satisfacer los siguientes objetivos:

- Intercambio de calor continuo
- Protección contra la corrosión
- Producción de vapor de alta calidad

Tratamiento externo: Consiste en la reducción y eliminación de impurezas del agua en la parte externa del generador de vapor. Por lo general, se emplea este externo cuando la cantidad de una o varias impurezas del agua es demasiado elevada como para ser tolerada por el generador de vapor en cuestión. Hay una amplia variedad de tratamientos externos (ablandamiento, evaporación, desaireación, contactores de membrana etc.) que pueden ser empleados para adaptar el agua de alimentación a un sistema en particular (Ortiz et al., 2013; Beall, 2003; Arze et al., 2020; Buthod, 2000).

Tratamiento interno: Consiste en el acondicionamiento de impurezas dentro del sistema del generador de vapor. Las reacciones ocurren tanto en las líneas de alimentación como en el mismo generador de vapor. Puede aplicarse sólo o conjuntamente con el tratamiento externo. Su propósito es reaccionar de forma adecuada con la dureza del agua de alimentación, acondicionar los lodos, eliminar el oxígeno y evitar la formación de espumas en el agua del generador de vapor. Este tratamiento puede ser considerado como el único tratamiento necesario en los casos en los que del generador de vapor operan a presiones bajas o moderadas, cuando grandes cantidades de vapor condensado son usadas como agua de alimentación, o cuando hay disponibilidad de agua bruta de alta calidad (Ortiz et al., 2013; Beall, 2003; Arze et al., 2020; Buthod, 2000)

1.3.3 Problemas asociados al agua

El grado de solubilidad es también importante al determinar cuándo una cierta concentración de impurezas en estado disuelto puede precipitar como sólidos fuera de la solución, porque el agua está saturada de la impureza y no puede disolver más cantidad de la misma.

Estas impurezas que tienen características negativas de solubilidad son las principales productoras de depósitos de incrustación en el generador de vapor. Esto es así porque a medida que la temperatura en un generador de vapor aumenta con el aumento de presión, estas impurezas se hacen insolubles y precipitan para iniciar la incrustación sobre las superficies de transferencia de calor del generador de vapor. El otro problema con las impurezas es que, incluso si permanecen disueltas en un amplio rango de temperaturas y concentraciones, pueden producir otros efectos

nocivos, como corrosión, espumado e imprimación de impurezas (Bolma, 2005; Branan, 2000).

Incrustación

Los especialistas en el tratamiento de agua clasifican las impurezas por el efecto que producen sobre el lado de agua del generador de vapor. La incrustación se define como un depósito adherente sobre la superficie de transferencia térmica en el lado de agua del generador de vapor producida por las siguientes impurezas sedimentadas o cocidas sobre la superficie de calefacción:

Incrustación dura: Sulfato cálcico, silicato cálcico, silicato magnésico, sílice.

Incrustación blanda: Bicarbonato cálcico, carbonato cálcico, hidróxido cálcico, bicarbonato magnésico, carbonato magnésico, hidróxido magnésico, fosfato cálcico, carbonato de hierro, óxido de hierro.

Formador de incrustación o corrosión: Nitrato cálcico, cloruro cálcico, cloruro magnésico, sulfato magnésico, nitrato de magnesio, alúmina, silicato sódico.

Corrosión

Es la segunda causa de problemas del agua del generador de vapor después de la formación de incrustaciones. Mientras que hay muchas causas de corrosión por el agua del generador de vapor, incluyendo reacciones químicas provenientes de la mala dosificación de los productos químicos, las causas de corrosión pueden agruparse por su ataque sobre las superficies metálicas del generador de vapor. Las principales causas de la corrosión son:

1. La acidez relativa del agua.
2. La presencia de oxígeno disuelto en el agua.
3. La acción electrónica.

Primado, espumado y arrastre

El primado, el espumado y el arrastre son factores normalmente controlables por el ingeniero de operación. La primación es la elevación del agua del generador de vapor por el flujo de vapor. El agua puede ser transportada como spray o en un pequeño cuerpo; a medida que entra en la línea de vapor, su peso y velocidad pueden causar serios daños al equipo. Roturas de accesorios de la línea de vapor o desperfectos en turbinas o motores han sido el resultado de estos aportes de agua. A no ser que

la primación sea inducida por un diseño defectuoso del generador de vapor está causada por un nivel demasiado alto de agua para la demanda de vapor. El nivel de agua en el Calderín debería mantenerse centímetros más bajo del normal si el caudal de vapor demandando varía mucho, porque una repentina avalancha de vapor a veces tiende a lanzar agua desde la superficie directamente bajo la tobera.

1.3.4 Aditivos para agua de generadores de vapor

El agua de generadores de vapor se adiciona con productos químicos con el fin de ajustar sus características químicas para la mejor conservación del generador de vapor, sus tuberías de vapor y condensado y los equipos consumidores.

Algunos de los productos más usuales son (Mathur, 2011; Klench, 1998):

- Fosfato sódico (NaH_2PO_4).
- Fosfato trisódico (Na_2SO_3).
- Sulfito sódico (Na_3PO_4).
- Sosa cáustica o hidróxido de sodio (NaOH) (atención una dosificación excesiva puede producir fragilidad cáustica).
- La Hidracina (N_2H_4) de uso muy extendido hace años, actúa como inhibidor de corrosión al contribuir a la formación de una capa de magnetita en las superficies metálicas y a fijar el oxígeno, es sospechosa de ser un producto cancerígeno por lo que ha dejado de usarse.

1.4 Tipos fundamentales de combustibles en Cuba

El combustible es el elemento clave en el trabajo de los generadores de vapor, especialmente en su economía; baste decir que el costo fundamental en la generación de vapor está dado por el costo del combustible consumido (aproximadamente 80 % del costo de operación).

Según Rubio (2015), los combustibles pueden clasificarse, de acuerdo con su estado físico en condiciones naturales, en: sólidos, líquidos y gaseosos. De cada uno de estos tipos, en la actualidad, el hombre utiliza una buena variedad de combustibles, siendo los más importantes en Cuba los siguientes:

Sólidos: bagazo, RAC (Residuos Agrícolas Cañeros), residuos de cosechas agrícolas y forestales.

Líquidos: aceite combustible pesado (fuel oil o petróleo), aceite combustible ligero (gas oil o diésel).

Gaseosos: gas natural (incluye gas acompañante del petróleo), gas artificial y biogás. Rubio (2015), también asegura, que en el país los principales combustibles utilizados para generar vapor son: el aceite combustible pesado (conocido como fuel oil o simplemente como petróleo combustible) en la industria eléctrica, y el bagazo en la industria azucarera. En calderas pequeñas se utiliza también en aceite combustible ligero (diesel). En estos momentos ya se explotan en el país plantas generadoras de electricidad con gas natural como combustible (gas acompañante del petróleo). Algunas son plantas con turbinas de gas y tienen un ciclo combinado con caldera recuperadora de calor y turbina de vapor. Se utilizan, además, a escala industrial, aunque en cantidades pequeñas, los RAC (Residuos Agrícolas Cañeros).

En Cuba también existen algunas reservas de otros combustibles como asphaltita y turba, pero que parecen no tener mayor importancia económica debido a algunas características desfavorables.

1.5 Generadores de vapor pirotubulares

El generador de vapor pirotubular, concebida especialmente para el aprovechamiento de gases de recuperación presenta las siguientes características. Está formada por un cuerpo cilíndrico de disposición horizontal, incorpora interiormente un paquete multitubular de transmisión de calor y una cámara superior de formación y acumulación de vapor, el hogar y los tubos están completamente rodeados de agua, la llama se forma en el hogar pasando los humos por el interior de los tubos de los pasos siguientes para finalmente ser conducidos hacia la chimenea, una de sus desventajas es que presentan una elevada pérdida de carga en los humos. Este tipo de calderas se usa generalmente en distintos sectores industriales, centrales termoeléctricas, calefacción de edificios, etc (Arze et al, 2020; Aied, 2020; Hernández, 2012).

Características del generador pirotubular (Parvez, 2017):

1. En este generador de vapor los humos calientes están dentro de los tubos y el agua los rodea.
2. Son generadores de baja presión, la presión de funcionamiento es de unos 25 bar.

3. La tasa de generación de vapor en el tubo de fuego del generador es baja, es decir, 9 toneladas por hora.
4. Para una potencia determinada, la superficie necesaria para la generación de vapor es mayor, es decir, 8 m² por tonelada por hora.
5. El transporte y montaje en este tipo de generadores es difícil.
6. La eficiencia global es hasta el 75%.
7. Puede funcionar con cargas fluctuantes para período de tiempo más corto.
8. La dirección de circulación del agua no está bien definida.
9. El costo operativo es bajo.
10. Debido al estallido, existe un mayor riesgo al daño del generador.
11. Puede ser operado con menos expertos.
12. Bajo costo de mantenimiento.
13. Ellos son de peso ligero.
14. Son adecuados para pequeñas centrales eléctricas.

En este tipo de generador de vapor, el calor es transferido desde los gases de combustión, que fluyen por tubos, hacia el agua que circula por el exterior de dichos tubos. El combustible se quema en la cámara de combustión del generador de vapor y los gases son orientados para que ingresen a los tubos ubicados en el interior del tambor de agua.

El vapor egresa por la parte posterior del cilindro. Una de las limitaciones de estos equipos se da en la presión de generación, cuanto mayor sea la presión de generación demandada, mayor deberá ser el espesor de las paredes del cilindro. En consecuencia, para elevadas presiones estos generadores de vapor no son viables o antieconómicas. Por otra parte, cuando se trata de tambores de gran capacidad de agua se requiere mucho tiempo para alcanzar la presión de operación.

La principal ventaja de este tipo el generador de vapor es que puede almacenar grandes volúmenes de agua que le permiten amortiguar abruptas variaciones en el consumo. Son generadores de vapor de capacidad chica a mediana, con presiones de vapor hasta 15 bar y caudales que rondan los 15 a 30 t/h (Arze et al, 2020; Hernández, 2012).

1.6 Diseño y selección de generadores de vapor

Cuando se desea diseñar o seleccionar un generador de vapor para satisfacer determinado servicio deben tomarse en cuenta los siguientes elementos (Rubio, 2007; Romero, 2016; Cheremisinoff, 2000):

Combustible: Fuentes presentes y futuras, costo, composición, características, parámetros límites.

Demanda de vapor.

Flujo de vapor: máximo, mínimo, curvas de demanda, razón de variación.

Presión de vapor: transporte y uso.

Temperatura de vapor: nominal y rango de control.

Calidad de vapor: límites de impurezas.

Agua de alimentación.

Fuente y calidad.

Temperatura.

Regulaciones sobre emisiones al medio ambiente.

Gases de combustión: partículas, SO₂, NO₂.

Desechos sólidos.

Aguas residuales: planta de tratamiento de agua, lavado.

Personal de operación y mantenimiento.

Nivel técnico y experiencia.

Costo de la mano de obra.

Equipos auxiliares.

Interrelación con la planta.

Costo de la energía para auxiliares.

Garantías y bases de evaluación.

Para una carga y combustible dados.

Eficiencia.

Temperatura de vapor sobrecalentado (recalentado).

Caída de presión domo y salida sobrecalentador.

Resistencia total en conductos de aire y gases.

Calidad del vapor.

Capacidad.

Rangos de control de la temperatura del vapor.

Consumo de potencia en auxiliares.

Emisiones al medio.

Otras consideraciones: de localización, espacio, acceso, relación del nuevo equipamiento con otros generadores de vapor e instalaciones existentes, características del terreno, resistencia al viento, etc.

1.7 Eficiencia de los generadores de vapor

La eficiencia térmica es una forma de medir la utilización de la energía disponible en el combustible utilizado. Teniendo en cuenta la gran cantidad de energía utilizada en la producción de vapor en la industria, las mejoras en la eficiencia térmica de la caldera pueden conducir a grandes ahorros.

La eficiencia de los generadores de vapor depende, en gran medida, de la efectiva utilización del combustible, lo cual a su vez está determinado fundamentalmente por dos factores (Álvarez, 2018; Song et al., 2012; Filton, et al., 2005; Borges et al., 2016):

- Una combustión completa del combustible.
- El grado de enfriamiento de los gases producto de la combustión.

El calor entregado por los productos de la combustión llega hasta la sustancia de trabajo a través de las superficies de transferencia del generador de vapor. Este calor aprovechado es lo que se ha denominado calor útil, debido a que no todo el calor liberado en el proceso de combustión se utiliza para producir el vapor pues una parte de él se pierde por diferentes causas. La igualdad entre el calor suministrado al generador de vapor llamado calor disponible y la suma del calor útil y las pérdidas de calor, se determinan por medio del balance térmico. Este análisis cuantitativo de las cantidades de energía que se transforman en el generador de vapor, permite determinar la eficiencia térmica y el consumo necesario de combustible. La eficiencia térmica de los generadores de vapor depende de muchos factores entre los que se encuentran (Álvarez, 2018; Song et al., 2012; Filton, et al., 2005; Borges et al., 2016):

- El tipo de combustible y sus propiedades.
- La eficiencia del sistema de combustión.

- Las características de las superficies de intercambio térmico.
- El tipo de transferencia de calor que tiene lugar en los mismos.
- La velocidad de las sustancias que intercambian calor.
- La diferencia de temperaturas entre los fluidos que intercambian calor.
- La calidad del aislamiento térmico.
- Las sedimentaciones que pueden producirse en la superficie de intercambio térmico, que se comportan como una resistencia.

El método directo permite determinar la eficiencia de un generador de vapor, este relaciona la cantidad de calor que es capaz de absorber el agua (para transformarse en vapor saturado, en el recalentador y el calor de las purgas) de la cantidad de calor entregado o cedido por el combustible, aire y vapor de atomización. Además, este método posee la desventaja de que la determinación de los gastos de vapor y agua de alimentación conlleva siempre errores (Álvarez, 2018; Song et al., 2012; Filton, et al., 2005; Borges et al., 2016).

1.7.1 Requisitos para declarar una sala de generadores de vapor eficiente

El Destacamento de Calderas (2005), declara como requisitos para declarar una sala de generadores de vapor eficiente los siguientes:

- El operador del generador de vapor deberá estar recalificado y con el certificado correspondiente.
- Combustión correcta y eficiente del combustible con los siguientes parámetros:
 - a-) Índice de Bacará 3 o 4
 - b-) Contenido de CO₂ >12%
 - c-) Contenido de O₂ < 5%
 - d-) Humo gris pardo por la chimenea.
- Cumplir con el régimen de tratamiento de agua teniendo los parámetros exigidos por el fabricante.
- Tener la instrumentación completa y en buen estado (con el sello apto para su uso):

Manómetro de Vapor de presión en el generador de vapor, colector distribuidor y consumidores.

Manómetro de presión de Combustibles.

Manómetro de agua de alimentación.

Termómetro de temperatura de Combustible.

Termómetro de temperatura de gases de salida.

Termómetro de temperatura de agua de alimentación.

Termómetro de temperatura de aire caliente.

Termómetro de temperatura del vapor sobrecalentado.

- Dispositivos de seguridad en buen estado y funcionando.
- Tener instalado y funcionando el emulsor.
- Tener instalado y funcionando el magnetizador.
- No tener salideros y derrames de combustibles en todo el sistema.
- No tener salideros innecesarios de vapor y agua caliente en todos los sistemas energéticos.
- Aislamiento térmico adecuado en todas las líneas de fluidos calientes.
- Tener el sistema de recuperación de condensado en buen estado técnico y funcionando.
- Tener el libro de Control e Incidencias actualizado.
- Tener el libro de Control de Operación actualizado.
- Cumplir con las etapas de Mantenimiento, llevando el control de los mismos.
- Mantener el área limpia y libre de objetos ajenos a la operación y funcionamiento (Destacamento de Calderas, 2005)

1.8 Generalidades sobre la exergía

La exergía se utiliza para determinar la calidad de la energía y permite encontrar la ubicación, causa y valores reales de las pérdidas generadas, así como la determinación de residuos en un proceso térmico. Cuando dos sistemas con diferentes estados interactúan, tienden a alcanzar el equilibrio y, por lo tanto, realizan trabajo. Si uno de los sistemas representa el entorno y el otro el sistema termodinámico de interés, entonces el máximo trabajo posible obtenido por la interacción entre estos sistemas al alcanzar el equilibrio, es exergía, suponiendo que solo se intercambia calor. Todo sistema que no esté en equilibrio con su entorno tiene el potencial de realizar un trabajo. Cada sistema que está en equilibrio con su entorno, por definición, no tiene el potencial para realizar trabajo. La exergía se

puede tratar como la distancia del estado de un determinado sistema al estado de su entorno. La exergía se puede destruir, pero no se puede conservar (preservar). La exergía es completamente destruida si un sistema alcanza el equilibrio espontáneamente con su entorno sin realizar trabajo (Mitrovic y otros, 2018).

Un balance de exergía simultáneamente evalúa la cantidad y calidad de la energía asociada al proceso. También se puede interpretar como una medida de las irreversibilidades energéticas asociadas con este ya que las pérdidas de energía inevitables no son energéticamente equivalentes (Mojica-Cabeza et al., 2021).

1.8.1 Pérdidas exergéticas

Al igual que la eficiencia térmica, la mayor pérdida de exergía se produce en el quemador, seguido del intercambiador. La purga no se considera una pérdida, sino un producto de la exergía ya que depende de la calidad del agua y no de la eficiencia de la caldera. Dentro del mezclador de aire, no hay pérdida de energía, pero hay una pérdida de exergía asociada con mezcla y transferencia de calor. La energía cinética y potencial no se consideran en estos balances. Pérdidas por la radiación y la combustión incompleta son insignificantes para un sistema que funcione correctamente, pero deben tenerse en cuenta si se considera que el quemador o el aislamiento lo justifican. Brevemente, el balance podría reducirse a la exergía del producto, exergía, pérdidas y destrucción del combustible (Mojica-Cabeza et al., 2021).

Para obtener las pérdidas de exergía, es necesario establecer los balances de masa, energía y exergía.

1.8.2 Análisis exergético

El análisis exergético es un método que combina el balance de calor y masa con la Segunda Ley de la Termodinámica. El análisis de exergía permite determinar la ubicación, las causas y las fuentes de pérdidas. Esta información se puede utilizar para construir nuevos sistemas energéticamente eficientes, pero también para mejorar el rendimiento de los sistemas existentes. Además, el análisis de exergía proporciona una idea y permite encontrar las causas de la ineficiencia termodinámica de los sistemas (Mitrovic y otros, 2018).

Lo que realmente se necesita saber es el potencial de trabajo de la fuente, es decir, la cantidad de energía que se puede extraer como trabajo útil. El resto de la energía es finalmente descartada como energía de desecho y no debe ser considerada. Por lo tanto, es deseable tener una propiedad que permita determinar el potencial de trabajo útil de una cantidad dada de energía en algún estado especificado. Esta propiedad es la exergía, que también se denomina disponibilidad o energía disponible (Álvarez, 2018; Ohijeagbon, 2013).

El potencial de trabajo de la energía contenida en un sistema en un estado especificado es simplemente el trabajo útil máximo que puede obtenerse del sistema. El trabajo realizado durante un proceso depende de los estados inicial y final, y de la trayectoria del proceso. En un análisis de exergía se especifica el estado inicial, por lo tanto, no es una variable. La salida de trabajo se maximiza cuando el proceso entre dos estados especificados se ejecuta de una manera reversible. Por consiguiente, determinando el trabajo potencial todas las irreversibilidades se desprecian. Por último, el sistema debe estar en el estado muerto al final del proceso para maximizar la salida de trabajo. Se afirma que un sistema está en el estado muerto cuando se encuentra en equilibrio termodinámico con el ambiente. En este estado, un sistema está a la temperatura y a la presión de su ambiente (en equilibrio térmico y mecánico), no tiene energía cinética o potencial relativa a su ambiente (velocidad cero y elevación cero por arriba del nivel de referencia) y no reacciona con el ambiente (químicamente inerte). Tampoco hay efectos de desequilibrio magnético, eléctrico y tensión superficial entre el sistema y sus alrededores, si éstos son relevantes para la situación específica (Álvarez, 2018; Ohijeagbon, 2013).

Las propiedades de un sistema en el estado muerto se denotan mediante el subíndice cero. Un sistema tiene exergía cero en el estado muerto. Por consiguiente, se concluye que un sistema entrega el máximo trabajo posible cuando experimenta un proceso reversible del estado inicial especificado al estado de su ambiente, es decir, el estado muerto. Esto representa el potencial de trabajo útil del sistema en el estado especificado y se llama exergía. Es importante comprender que la exergía no representa la cantidad de trabajo que un dispositivo productor realmente entregará después de la instalación; sino que representa el límite superior en la cantidad de

trabajo que un dispositivo puede entregar sin violar cualquier ley termodinámica. Habrá siempre una diferencia, grande o pequeña, entre la exergía y el trabajo real entregado por un dispositivo.

La exergía de un sistema en un estado especificado depende de las condiciones del medio (el estado muerto) así como de las propiedades del sistema, por lo tanto, la exergía es una propiedad de la combinación entre sistema y ambiente, y no del sistema exclusivamente. La alteración del ambiente es otra manera de aumentar la exergía, pero definitivamente no es una alternativa fácil (Álvarez, 2018; Ohijeagbon, 2013).

1.9 Conclusiones parciales

- En el generador de vapor, la energía química contenida en un combustible se transforma en energía térmica, por lo que se puede concluir que un generador de vapor es un tipo de intercambiador de calor donde se realiza un cambio de fase.
- Para evitar la corrosión e incrustaciones en los generadores de vapor se utilizan el tratamiento externo que consiste en la reducción y eliminación de impurezas del agua en la parte externa y el tratamiento interno el cual tiene como propósito reaccionar de forma adecuada con la dureza del agua de alimentación, acondicionar los lodos, eliminar el oxígeno y evitar la formación de espumas en el agua.
- A la hora de seleccionar un generador de vapor se debe tener en cuenta una serie de requerimientos técnicos específicos determinados por la demanda de consumo de vapor de los equipos a instalar, el combustible, agua de alimentación, regulaciones sobre emisiones al medio ambiente, entre otros.
- El término eficiencia bruta del generador de vapor es un parámetro que caracteriza la economía del trabajo en cuanto a consumo de combustibles; la misma se puede determinar por el método directo a partir del cual se caracteriza con que efectividad el equipo absorbe la energía desprendida por la combustión para la generación de vapor.
- Mediante la exergía se puede determinar el potencial de trabajo útil de una cantidad dada de energía de un sistema en un determinado estado.

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se describe el proceso objeto de estudio. Se realiza el diseño de la metodología utilizada (Figura 2.1). Además de brindar una explicación detallada de las herramientas que se utilizan en el desarrollo del caso de estudio.

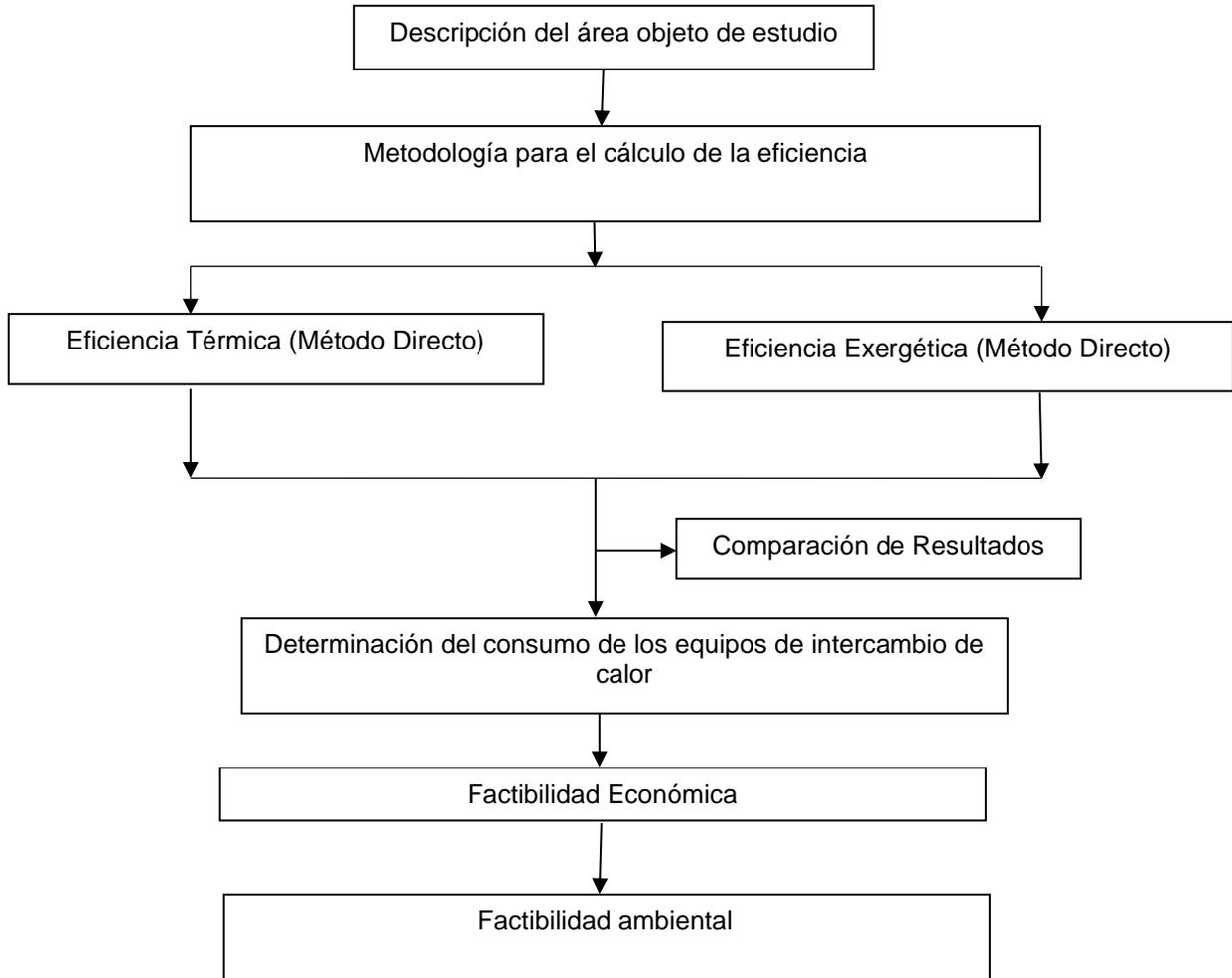


Figura 2.1. Descripción del procedimiento metodológico de la investigación

Fuente: Elaboración propia

2.1 Descripción del área objeto de estudio. Proceso de obtención de vapor en la DTCM

La División Territorial de Combustibles de Matanzas (DTCM) se encuentra ubicada en la Zona Industrial del municipio de Matanzas. La misma se encarga de la distribución y comercialización de petróleo crudo y mezclas mejoradas de este. Para ello cuenta con muelles y oleoductos, capaces estos últimos de trasladar el

combustible a los consumidores que así lo requieran. Según Ruiz (2019) esta Empresa cuenta con cuatro áreas de proceso fundamentales:

- Área 1: Base de crudo
- Área 2: Base de suministro a las Centrales Termoeléctricas
- Área 3: Base de recepción de crudo
- Área 4: Base en tierra

El Área 1 (Base de crudo), está destinada a la recepción de petróleo crudo nativo (PCN) por los oleoductos de Varadero (Centro) y Puerto Escondido (Occidente), así como al almacenamiento y entrega de PCN mejorado a Buques-Tanques con destino a diferentes puntos del país. Además, desde esta base se puede trasegar producto a la Terminal 320 (T320), Base en tierra (B.S.T), vagones de ferrocarriles, así como a las áreas 3 y 4. En esta área se preparan las mezclas de PCN mejorado. La misma está compuesta por dos subáreas fundamentales: el área de bombas (área 1-1) y el área de tanques (área 1-2).

El área de bombas se compone de:

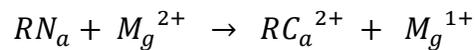
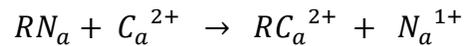
- Tres bombas de crudo de tornillo de 600 m³/h de caudal cada una (IP-201B, IP201C e IP-201D).
- Dos filtros de cesta.
- Dos intercambiadores de calor de tubos y coraza (IE-205A y IE-205B).
- Un tanque de *Slop* con capacidad de 15 m³ con su bomba de achique.
- Bombas de inyección de solvente y de dispersante de asfáltenos para las mezclas de PCN.
- Sistema de vapor.
- Tuberías y válvulas tecnológicas.

El área de tanques se compone de tres tanques (TK-27, TK-28 y TK-29) de 30 000, 20 000 y 50 000 m³ de capacidad respectivamente (Ruiz, 2019).

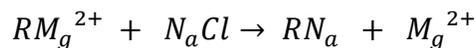
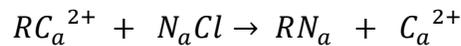
El trasiego, tratamiento y almacenamiento del combustible necesita un flujo de vapor sostenido y suficiente para garantizar las operaciones de la División.

A continuación, se muestra la descripción detallada del proceso de producción de vapor:

El agua cruda es bombeada desde una cisterna hasta los suavizadores, donde ocurre el proceso de tratamiento de agua. La instalación tiene dos suavizadores instalados, uno en funcionamiento y otro de reserva. El tratamiento se realiza en dos etapas: tratamiento externo e interno. El externo se lleva a cabo en un intercambiador con una resina catiónica Wofatit SBW; donde el objetivo fundamental es eliminar la dureza del agua causada por Ca^{2+} y Mg^{2+} , eliminar el O_2 disuelto y los sólidos en suspensión (turbidez). En este proceso el agua cruda intercambia con la resina los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} por el catión Na^+ .



Cuando la resina se agota es necesario regenerarla. La regeneración de la resina se realiza con una disolución de salmuera al 26% de $NaCl$, ocurriendo entonces el proceso inverso:



El agua que sale del suavizador tiene una dureza nula (contenido de Calcio y Magnesio) y es almacenada en un tanque de agua tratada. Mediante una bomba con control automático se envía el agua a un tanque de alimentación para ser suministrada directamente al generador de vapor. En dicho tanque se le realiza el tratamiento interno, al que se le adicionan sustancias secuestradoras de oxígeno (VAPEN 220 y 300), con el objetivo de eliminar el oxígeno disuelto que no ha sido eliminado en el tratamiento externo.

El combustible suministrado al generador de vapor es precalentado para lograr una mejor combustión, primero el combustible procedente de los tanques de almacenamiento (T-320 y T-29) se bombea a un intercambiador de calor donde se eleva la temperatura del combustible hasta $70\text{ }^\circ\text{C}$. Este se almacena en un tanque cilíndrico horizontal y posteriormente se bombea al generador de vapor, pasando por un precalentador que eleva la temperatura del combustible. Desde el 2011, se realizó la sustitución del combustible (crudo) de operación por decisión de la instalación, y desde entonces hasta la actualidad se opera en estos generadores con fuel-oil, el cual es elevado hasta una temperatura de $90\text{ }^\circ\text{C}$.

La Sala de Generadores de Vapor (Anexo 2-a) está constituida por dos generadores de vapor pirotubulares de tres pasos SMS-40, marca VALTEC. UMISA, con capacidad de diseño de 16 000 kg/h de vapor saturado a una presión de diseño de 10,2 kgf/cm² que quema combustible (actualmente solo se encuentra trabajando un solo generador). Todo el vapor producido va a un colector común para satisfacer la demanda de las operaciones de la DTCM. Ambos generadores tienen más de 20 años de explotación, ya que el primer generador, fue ingresado a la instalación, en el año 1998 y el segundo generador cuatro años más tarde.

En el interior del generador de vapor la energía química contenida en el combustible se convierte en energía calorífica se transmite a través de las paredes del hogar del generador de vapor hasta el agua. Mediante la adición de esta energía calorífica la temperatura del agua aumenta y cuando alcanza el punto de saturación hierve: generándose entonces el vapor saturado a presión absoluta de 0,90 MPa.

El vapor utilizado por los distintos consumidores de la Empresa retorna en forma de condensado a un tanque colector que alimenta al tanque de alimentación interna del generador de vapor (Ruiz, 2019).

2.2 Metodología para el cálculo de la eficiencia térmica

Para calcular la eficiencia del generador de vapor por el método directo se realiza un balance de masa y energía. Las muestras de combustibles y agua son analizadas en el laboratorio. El resto de los datos se toman de los instrumentos de medición y/o de las fichas técnicas empleadas en la DTCM de los respectivos años analizados.

2.2.1 Balance de masa en el Horno. Determinación del flujo de gases de escape

La ecuación general del balance de masa (kg) se expresa:

$$m_{entra} + m_{genera} - m_{consume} = m_{sale} \quad 2.1$$

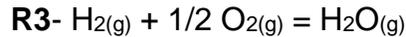
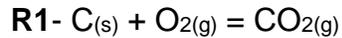
Expresada en cantidad de sustancia (moles) es:

$$n_{entra} + n_{genera} - n_{consume} = n_{sale} \quad 2.2$$

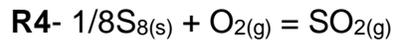
El balance de masa en el horno del generador de vapor permite determinar el flujo de los gases de escape producto de la combustión. Luego al horno se suministran el combustible y el carburante (aire), obteniéndose diferentes gases a la salida en

función de la composición y los porcentajes de conversión y rendimiento que alcancen las reacciones químicas

Las reacciones químicas fundamentales en un horno al quemar un combustible son:



Si el combustible contiene azufre entonces:



Los gases a la salida presentan los siguientes compuestos:

- El $\text{CO}_{2(g)}$, $\text{H}_2\text{O}_{(g)}$ y $\text{SO}_{2(g)}$ obtenidos en la combustión, más se incorporan el agua que entra con el aire
- $\text{CO}_{(g)}$ generado por la combustión incompleta (en función de la conversión y el rendimiento)
- $\text{N}_{2(g)}$ es inerte, por lo tanto, el que entra es igual al que sale.
- El $\text{O}_{2(g)}$ sale el que está en exceso y no reaccionó
- $\text{H}_{2(g)}$, $\text{C}_{(s)}$, $\text{S}_{8(s)}$ salen el que no se consume (en función de la conversión)

Especies que entran al Horno

Cantidades molares que entran con el combustible:

$$n_i = \frac{x_i \cdot F_c}{M_i} \quad 2.3$$

Donde:

n_i : cantidad de sustancia de cada especie (kmol)

x_i : fracción molar (OC-GC/CO614, s/a); páginas 26 (fuel-oil) y 33 (crudo).

F_c : masa del combustible (kg)

M_i : masa molar (kg/kmol)

Cantidades molares que entran con el aire.

El aire se encuentra en exceso y húmedo normalmente, por lo que equivale a cantidades de $\text{O}_{2(g)}$, $\text{N}_{2(g)}$ y agua. El aire seco es el oxígeno más el nitrógeno. El agua que entra con el aire se obtiene de la humedad absoluta (Y):

$$\text{kgH}_2\text{O}_{entra(aire)} = Y \cdot \text{kg}_{AS} \quad 2.4$$

Y- se obtiene con la humedad relativa del aire y la temperatura en carta sicrométrica (Perry, 2019)

Los kg de AS se obtienen como:

$$kg_{AS} = kmol_{AS} \cdot M_{AS} \quad 2.5$$

$$kmol_{AS} = kmol_{O_2alim} \cdot \frac{100 kmol AS}{21 kmol O_2} \quad 2.6$$

El oxígeno alimentado se calcula como:

$$O_{2alim} = \%_{real\ aire\ en\ exceso} \cdot O_{2teórico} \quad 2.7$$

$$O_{2teor} = O_{2estq} - O_{2acomp\ combustible} \quad 2.8$$

$$O_{2estq} = RL_{alim} \cdot RE \quad 2.9$$

Donde:

RL: reactivo limitante

RE: Relación estequiométrica

Como el oxígeno está en exceso no es RL. El resto de las especies si son RL, que para el caso del petróleo crudo son el $H_2(g)$, $C(s)$ y el $S_8(s)$, por lo que para este cálculo se considera 95 % de rendimiento y 94 % de conversión.

Sustituyendo en ec 2.7 para 8 % de exceso de aire se obtiene:

$$O_{2alim} = 1,08 \left[ne_C \cdot \frac{10_2}{1C} + ne_{H_2} \cdot \frac{0,5O_2}{1H_2} + ne_{S_8} \cdot \frac{8O_2}{1S_8} - ne_C \right] \quad 2.10$$

$$ne_{N_2} = kmol AS \cdot \frac{79 kmol N_2}{100 kmol AS} \quad 2.11$$

$$ne_{O_2\ total} = ne_{O_2\ aire} + ne_{O_2\ comb} \quad 2.12$$

$$ne_{H_2O\ total} = ne_{H_2O\ aire} + ne_{H_2O\ comb} \quad 2.13$$

Especies Consumidas:

Carbono

Consumo de carbono en **R1**:

$$ne_{cons\ de\ C} = \% Rend \cdot ne_{Cons\ Carbono\ Total} \quad 2.14$$

Consumo de carbono en **R2**:

$$ne_{cons\ de\ C} = (1 - \% Rend) \cdot ne_{Cons\ Carbono\ Total} \quad 2.15$$

Oxígeno

Consumo de oxígeno en **R1**:

$$ne\ O_{2cons\ en\ R1} = ne_{genera\ CO_2} \cdot RE \quad 2.16$$

Consumo de oxígeno en **R2**:

$$ne\ O_{2cons\ en\ R1} = ne_{genera\ CO} \cdot RE \quad 2.17$$

Consumo de oxígeno en **R3**:

$$ne_{O_2 \text{ cons en R1}} = ne_{\text{genera H}_2\text{O}} \cdot RE \quad 2.18$$

Consumo de oxígeno en **R4**:

$$ne_{O_2 \text{ cons en R1}} = ne_{\text{genera SO}_2} \cdot RE \quad 2.19$$

Hidrógeno

$$ne_{\text{cons H}_2} = \% \text{ conversión} \cdot ne_{\text{entran H}_2} \quad 2.20$$

Azufre

$$ne_{\text{cons S}_8} = \% \text{ conversión} \cdot ne_{\text{entran S}_8} \quad 2.21$$

Especies generadas:

Son las especies obtenidas por la reacción de combustión ($\text{CO}_{(g)}$, $\text{CO}_{2(g)}$, H_2O y $\text{SO}_{2(g)}$)

Dióxido de carbono

$$ne_{\text{CO}_2 \text{ generado}} = ne_{\text{C consumido R1}} \cdot RE \quad 2.22$$

Dióxido de azufre

$$ne_{\text{SO}_2 \text{ generado}} = ne_{\text{S consumido}} \cdot RE \quad 2.23$$

Vapor de agua

$$ne_{\text{H}_2\text{O} \text{ generada}} = ne_{\text{H}_2 \text{ consumido}} \cdot RE \quad 2.24$$

Monóxido de carbono

$$ne_{\text{CO} \text{ generado}} = ne_{\text{C consumido R2}} \cdot RE \quad 2.25$$

Especies que salen

Se obtienen de sustituir en la ecuación del balance general (ec 2.2)

2.2.2 Eficiencia del generador de vapor

Se calcula la eficiencia térmica del generador de vapor por el método directo para ambos combustibles

Método directo

$$\eta_{\text{térmica}} = \frac{Q_u}{Q_d} \cdot 100 \quad 2.26$$

Donde:

Q_u – calor útil y se calcula mediante la ecuación 2.29 (kJ)

$\eta_{\text{térmica}}$ – eficiencia térmica del generador de vapor (%)

Q_d – calor disponible (kJ)

Q útil: Se refiere al calor absorbido por el agua para transformarse en vapor (Q_u).

En su expresión más general el Q útil considera la energía consumida por:

- El agua para llegar a la condición de saturación.
- El agua para llegar a la condición de vapor sobrecalentado, si hay sobrecalentador.
- El vapor si es recalentado, si el generador tiene recalentador.
- El agua purgada si las extracciones de fondo son significativas.
- Algún calentamiento adicional

Q disponible: Se refiere a la energía que libera el combustible cuando combustiona, se puede considerar:

- Calor del combustible, es el más incidente.
- Calor físico o precalentamiento del combustible.
- Calor por precalentamiento del aire.
- Calor de vapor de atomización.

Para evaluar cada uno de estos calores se aplica la *Primera Ley de la Termodinámica*, que de forma simplificada queda:

$$Q = m \cdot \Delta H = m (H_f - H_i) \quad 2.27$$

Se evalúa el calor teniendo en cuenta la masa involucrada y la evaluación de la entalpía en la condición inicial y final, generalmente a la entrada del generador, el agua es un líquido subenfriado y se busca su entalpía en la tabla 1 de Keenan con el dato de temperatura. Las expresiones de calor se simplifican convenientemente atendiendo a las características del generador de vapor. Todas las temperaturas son tomadas como registros automáticos en el proceso.

Cálculo del Calor útil:

$$Q_u = Q_{sobrecal} + Q_{recalent} + Q_{extracc-vapor-sat} + Q_{purga} + Q_{adicional} \quad 2.28$$

Teniendo en cuenta que en estos generadores no se sobrecalienta ni se recalienta el vapor, no se considera el calor de purga ni el adicional, entonces la expresión 2.28 queda simplificada:

$$Q_u = Q_{extracc-vapor-sat} = W_v \cdot (H_{vH} - H_L) \quad 2.29$$

H_{vH} = H_{vS} (kJ/kg) (Perry, 2019)

H_{vS} - entalpía de vapor saturado (kJ/kg)

H_L – entalpía del líquido (kJ/kg)

W_v - masa de vapor generado (kg/h)

Cálculo del Calor disponible:

$$Q_d = Q_{VC} + Q_{atom} + Q_{prec} + Q_{fis} \quad 2.30$$

Donde:

Q_d – calor disponible (kJ)

Q_{atom} – calor de vapor de atomización (kJ)

Q_{vc} – calor del combustible (kJ)

Q_{prec} - calor de precalentamiento del aire (kJ)

Q_{fis} - calor físico o precalentamiento del combustible (kJ)

Teniendo en cuenta que en los generadores no se atomiza vapor, no se precalienta el aire, ni se calienta el combustible, entonces, el calor disponible queda simplificado a:

$$Q_d = W_c \cdot (VCI + C_{pc} \cdot T_c) + W_{aire} \cdot C_{p_{aire}} \cdot T_{aire} \quad 2.31$$

Donde:

W_{aire} - flujo másico del aire (kg/h)

$C_{p_{aire}}$ - capacidad calorífica del aire (kJ/kg.K)

T_{aire} - temperatura del aire (K)

VCI- Valor Calórico Inferior del combustible (kJ/kg). El VCI puede determinarse a partir de la entalpía de formación estándar y de las cantidades de sustancias de los productos y reactivos de la combustión:

$$VCI = \sum N_p \cdot h_f^0 - \sum N_R \cdot h_f^0 \quad 2.32$$

W_c -flujo másico del combustible (kg/h)

C_{pc} – calor específico del combustible (kJ)

T_c – temperatura inicial del combustible en el generador (°C)

$C_{p_{Gs}}$ – capacidad calorífica de los gases secos (kJ/kg°C)

Tanto las capacidades caloríficas de los combustibles como la de los gases secos se pueden encontrar en el Perry (2019), al igual que la humedad absoluta del aire para la cual se utilizó la carta sicométrica plasmada en dicha bibliografía.

Después de proponer la metodología para el cálculo de la eficiencia térmica del generador de vapor, se procede a calcular el consumo de vapor para cada uno de

los equipos de intercambio de calor (intercambiadores y serpentines). La metodología utilizada se expondrá a continuación.

2.2.3 Cálculo de consumo de vapor de los intercambiadores de calor

Para calcular el consumo de vapor en cada uno de los intercambiadores de calor se realiza un balance de calor en dichos equipos planteándose de la siguiente forma:

$$Q_{ced} = Q_{abs} + Q_{per} \quad 2.33$$

Considerando que no existen pérdidas de calor debido a que los intercambiadores se encuentran aislados térmicamente y que todo el calor cedido por el vapor es absorbido por el petróleo crudo, el balance de calor resulta:

$$Q_{ced} = Q_{abs} \quad 2.34$$

A partir de la ecuación anterior la masa de vapor puede calcularse como:

$$W_v(\text{intercamb}) = \frac{W_c \cdot C_p \cdot (T_f - T_i)}{\lambda} \quad 2.35$$

Donde: W_c : masa del combustible (kg/h)

C_p : calor específico del combustible (kcal/kg°C)

T_f : temperatura final del combustible en los intercambiadores (°C)

T_i : temperatura inicial del combustible en los intercambiadores (°C)

λ : calor latente de condensación del vapor (kcal/kg) (Tabla 7, Flynn (2019))

Basados en los consumos de vapor y a la capacidad de producción de vapor se define el uso racional de uno o dos generadores de vapor de acuerdo a la simultaneidad de las operaciones.

2.3 Cálculo de la eficiencia exergética en el generador de vapor

Como quiera que el balance exergético es inherente a la Segunda Ley de la Termodinámica, este es no conservativo. Es decir, la exergía de un sistema no se conserva, pues una parte se destruye en las transformaciones energéticas (Velázquez et al., 2020).

El ambiente es modelado como un sistema compresible simple, infinito y uniforme a temperatura T_o y presión P_o . Un ambiente de referencia adecuado para muchas situaciones es 1 atm y 25 °C (298,15K; 77°F) por lo que ha sido utilizado en muchos trabajos (Butcher & Reddy, 2007), y se selecciona para realizar esta investigación.

Aunque es importante destacar que, en aplicaciones reales, estos valores pueden ser especificados de forma diferente.

Al igual que para el cálculo de la eficiencia térmica, se emplea el método directo para la determinación de la eficiencia exergética.

La eficiencia exergética (ecuación 2.36) relaciona las exergías útil y disponible del sistema. En este caso particular (Maxi, 2008; Velázquez et al., 2020), se consideran como:

- Exergía útil- las exergías que salen del sistema (exergía del vapor saturado menos la exergía del agua de alimentación).
- Exergía disponible- exergías que entran al sistema (exergía del aire más la del combustible).

$$\eta_{exerg} = \frac{Ex_u}{Ex_d} \quad 2.36$$

Donde:

η_{exerg} - eficiencia exergética del generador de vapor (%)

Ex_u - exergía útil o de operación (kJ/s)

Ex_d - exergía disponible (kJ/s)

La exergía útil o de operación se determina a través de la siguiente ecuación (Mendes et al, 2017):

$$Ex_u = W_{vs} \cdot (ex_{vs} - ex_{aa}) \quad 2.37$$

Donde:

W_{vs} - flujo másico del vapor saturado (kg/s)

ex_{vs} - exergía específica del vapor saturado (kJ/kg)

ex_{aa} - exergía específica del agua de alimentación (kJ/kg)

Tanto la exergía específica del vapor saturado como la exergía específica del agua de alimentación pueden ser calculadas, y para ello se utilizan las siguientes expresiones:

$$ex_{vs} = (h_{vs} - h_{o_{aa}}) - T_o \cdot (S_{vs} - S_{o_{aa}}) \quad 2.38$$

$$ex_{aa} = (h_{aa} - h_{o_{aa}}) - T_o \cdot (S_{aa} - S_{o_{aa}}) \quad 2.39$$

Donde:

T_o - temperatura del ambiente de referencia (K)

S_{vs} - entropía específica del vapor saturado (kJ/kg.K)

S_{aa} - entropía específica del agua de alimentación (kJ/kg.K)

h_{aa} - entalpía específica del agua de alimentación (kJ/kg)

h_{oaa} - entalpía específica del agua de alimentación a las condiciones del ambiente de referencia (kJ/kg)

S_{oaa} - entropía específica del agua de alimentación a las condiciones del ambiente de referencia (kJ/kg.K)

Nota: Las entalpía y entropía del agua de alimentación y del vapor saturado se pueden encontrar en las Tablas de Keenan (Tabla 1 y 2).

Para determinar la exergía disponible se utiliza la ecuación que se presenta a continuación (Mendes et al, 2017):

$$Ex_d = W_{comb} \cdot (ex_q + ex_f) + W_{aire} \cdot ex_{aire} \quad 2.40$$

Donde:

W_{comb} - flujo másico del combustible (kg/s)

W_{aire} - flujo másico del aire (kg/s)

ex_q - exergía específica química del combustible (kJ/kg)

ex_f - exergía específica física del combustible (kJ/kg)

ex_{aire} - exergía específica física del aire(kJ/kg)

La exergía específica química del combustible, en este caso sería tanto para el fuel-oil como para el crudo, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$ex_q = \varphi \cdot VCI \quad 2.41$$

Donde:

φ - coeficiente experimental, y se determina de la siguiente manera:

$$\varphi = 1,0401 + 0,1728 \cdot \frac{x_{H_2}}{x_C} + 0,0432 \cdot \frac{x_{O_2}}{x_C} + 0,2169 \cdot \frac{x_S}{x_C} \cdot \left(1 - 2,0628 \cdot \frac{x_{H_2}}{x_C}\right) \quad 2.42$$

Donde:

x_{H_2} , x_C , x_{O_2} , x_S - fracciones másicas de hidrógeno, carbono, oxígeno y azufre en cada combustible

Ahora, la exergía específica física del combustible se deduce por la siguiente ecuación:

$$ex_f = Cp_{comb} \cdot (T_{comb} - T_o) - T_o \cdot \left[Cp_{comb} \cdot \ln \left(\frac{T_{comb}}{T_o} \right) - \frac{P_{comb} - P_o}{\rho_{comb} \cdot T_{comb}} \right] \quad 2.43$$

Donde:

$C_{p_{comb}}$ - capacidad calorífica del combustible (kJ/kg.K)

T_{comb} - temperatura del combustible (K)

P_{comb} - presión del combustible (kPa)

P_o - presión del ambiente de referencia (kPa)

ρ_{comb} - densidad del combustible (kg/m³)

Por último, la siguiente expresión muestra como calcular la exergía específica física del aire:

$$ex_{aire} = C_{p_{aire}} \cdot (T_{aire} - T_o) - T_o \cdot \left[C_{p_{aire}} \cdot \ln\left(\frac{T_{aire}}{T_o}\right) - R \cdot \ln\left(\frac{P_{aire}}{P_o}\right) \right] \quad 2.44$$

Donde:

P_{aire} - presión del aire (kPa)

R- constante de gases (8,314 kJ/kg.K)

2.4 Determinación de la factibilidad económica

2.4.1 Ahorro por cambio de combustible

La factibilidad económica de la evaluación del cambio de combustible se determina a partir los ahorros que se pudieran o no presentar entre estos dos años en la producción de vapor. Los beneficios se traducen en los costos que se ahorraría la DTCM en el año 2020 con respecto al 2011.

$$A_t = A_c + A_m + A_{VU} \quad 2.45$$

Ahorro por concepto de consumo de combustible (A_c - \$/a):

$$A_c = N_{crudo} \cdot pup_{crudo} - N_{fuel-oil} \cdot pup_{fuel-oil} \quad 2.46$$

Donde:

N – combustible consumido (t/a)

pup - precio unitario del producto (\$/t) (ficha de costo del combustible)

Si bien es conocido que el Fuel oil tiene un mayor precio en el mercado, su valor calórico comparado con el del petróleo crudo es mucho mayor, lo que debe representar un menor consumo de combustible.

Ahorro por concepto de Mantenimiento (A_m - \$/a):

El costo de un mantenimiento de los generadores de vapor (C_m) se reporta en el informe económico de la DTCM. El costo total de mantenimiento (CM) en un año de explotación para cada combustible se calcula:

$$CM = C_m \cdot n \text{ (\$/a)} \quad 2.47$$

Donde:

C_m - costo de un mantenimiento (\$/a) (Estructuras de costo años: 2010 y 2020)

n – cantidad de mantenimientos en un año (ciclos)

$$AM = CM_{\text{crudo}} - CM_{\text{fuel-oil}} \quad 2.48$$

Ahorro por concepto de Vida Útil (A_{VU} - \$/a):

Los ahorros asociados al tiempo de vida útil se reflejan en los costos por amortización de la inversión para el crudo (A_{crudo}) y el fuel oil ($A_{\text{fuel-oil}}$).

$$A_{VU} = A_{\text{crudo}} - A_{\text{fuel-oil}} \quad 2.49$$

Donde:

A – amortización (\$/a) (Estructuras de costo años: 2011 y 2020)

2.4.2 Costo de la exergía

Se determinan los costos específicos de la exergía de cada corriente energética, basado en la energía disponible que contienen las mismas y el costo de producción. Los costos son asociados a cada corriente de exergía. Así, para las corrientes de entrada y salida de materia (agua alimentación, combustible y vapor) se obtiene:

$$Cex_i = \frac{C_i}{Ex_i} \quad 2.50$$

Donde:

Cex_i -costos asociados a la exergía de cada corriente energética (\$/kJ)

Ex_i - Exergía total de cada componente (kJ/d) y se determina mediante la multiplicación de la exergía específica de cada corriente por su flujo másico.

C_i -costo de producción de cada componente (\$/d)

Este último se calcula, mediante la siguiente ecuación:

$$C_i = \sum cup_i \cdot W_i \quad 2.51$$

cup_i - precio unitario de cada componente (\$/kg)

W_i - flujo másico de cada componente (kg/d)

Una vez obtenido el precio de las corrientes se calcula el valor económico de la disponibilidad de exergía que aporta cada elemento.

2.5 Determinación del Índice de Calidad del Aire (ICA)

La situación de la calidad o grado de contaminación del aire se evalúa mediante el ICA, el cual incluye una escala de seis categorías: buena, aceptable, deficiente, mala, pésima y crítica.

El ICA se determina utilizando como criterio el valor resultante del cociente de las concentraciones reales de cada uno de los contaminantes principales, tomando como denominador las concentraciones máximas admisibles (CMA) correspondientes al período de tiempo evaluado (NC-111-2004):

$$ICA = \frac{Cxi}{CMA} \quad 2.52$$

Donde:

ICA- Índice de Calidad del Aire (adimensional)

Cxi- concentración real de cada contaminante a evaluar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

CMA- Concentración Máxima Admisible, para una hora ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Tabla 1, NC-1020-2014)

En este caso solo se evalúa el Índice de Calidad del Aire para dos contaminantes, $\text{SO}_{2(g)}$ y $\text{CO}_{(g)}$, y para determinar la concentración real de ambos se utiliza la siguiente expresión:

$$Cxi = \frac{E}{FGe} \quad 2.53$$

Donde:

E- tasa de emisión, ya sea para $\text{SO}_{2(g)}$ o $\text{CO}_{(g)}$ (kg/h)

FGe- flujo volumétrico de los gases de escape (m^3/h)

La tasa de emisión se puede determinar mediante la ecuación que se presenta a continuación (Marrero et al., 2016):

$$E = FE \cdot A \cdot \left(1 - \frac{EC}{100}\right) \quad 2.54$$

Donde:

FE- factor de emisión del contaminante a evaluar (kg/m^3) y (g/kg)

Para el $\text{SO}_{2(g)}$, el factor de emisión se puede encontrar en la Tabla 13 de Meneses-Ruiz et al., (2018) y para el $\text{CO}_{(g)}$, el factor de emisión se extrae de la Tabla 1 de Marrero et al., (2016).

A- tasa de actividad (flujo del combustible consumido) (m^3/h o kg/h)

Nota: Para el $\text{SO}_{2(g)}$, cuyo factor de emisión se expresa en g/kg, la tasa de emisión se calcula usando la tasa de actividad en kg/h y en el caso del $\text{CO}_{(g)}$ se utiliza la tasa de actividad en unidades de m^3/h .

EC- eficiencia de control de la emisión (%)

EC=0 si no hay técnicas de control operando en la fuente. Cuando se utiliza un factor de emisión “controlado” (obtenido tomando en cuenta la técnica instalada para la reducción de emisiones) la expresión queda entonces:

$$E = A \cdot FE \quad 2.55$$

Para la determinación del flujo volumétrico de los gases de escape, se puede llevar a cabo el siguiente método (Meneses-Ruiz et al., 2018):

$$FGe = VR \cdot A \quad 2.56$$

Donde:

VR- volumen real de aire que se necesita para lograr la combustión completa de la unidad de masa en condiciones normales (m^3/kg), y se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$VR = VT \cdot [21 / (21 - O_{2(GE)})] \quad 2.57$$

Donde:

VT- volumen teórico o estequiométrico (m^3/kg)

$O_{2(GE)}$ - contenido de O_2 en los gases de escape

El volumen teórico se calcula a través de la ecuación siguiente:

$$VT = 8,887 \left(\frac{x_C}{100} \right) + 3,3174 \left(\frac{x_S}{100} \right) + 20,9597 \left(\frac{x_H}{100} \right) - 2,6048 \left(\frac{x_O}{100} \right) \quad 2.58$$

Donde:

x_C , x_S , x_H , x_O - son las respectivas fracciones másicas de Carbono, Azufre, Hidrógeno y Oxígeno en el combustible %

Luego de calcular cada uno de los parámetros anteriores, se halla el ICA para cada contaminante en ambos combustibles y su resultado se evalúa mediante la NC-111-2004 y la NC-1020-2014, y se determina en cuál de las seis categorías se encuentra el aire ante la emisión de dichos contaminantes, teniendo en cuenta que la DCTM se encuentra alejada a zonas habitables o asentamientos humanos.

Se compara la concentración de $\text{SO}_{2(g)}$ con la emisión máxima admisible para generadores de vapor en fuentes puntuales reportada en la NC-803-2017, con el objetivo de valorar si ésta se encuentra en el rango establecido para su emisión.

2.6 Conclusiones parciales

- Para el cálculo de la eficiencia térmica (método directo) del generador de vapor, es necesario realizar un balance de masa previo en dicho equipo.
- El método directo también se utiliza para el cálculo de la eficiencia exergética, y se define por la relación: exergía del vapor saturado menos exergía del agua de alimentación entre la suma de las exergías del combustible y el aire de entrada al generador.
- Mediante el cálculo de los consumos de los diferentes intercambiadores de calor que existen en la DTCM, permite determinar si el vapor aportado por el generador, logra suplir esta demanda.
- El cálculo de los diferentes ahorros económicos, puede determinar si las modificaciones surgidas con el paso de los años en el generador de vapor del DTCM, contribuyen a una mejora económica de la instalación.
- Mediante el Índice de Calidad del Aire (ICA), se logra definir el nivel de contaminación que pueden provocar los gases de escape del generador de vapor.

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos del balance térmico y exergético del generador de vapor pirotubular de la DTCM, en dos años: 2011 y 2020, donde se utilizaron distintos combustibles: petróleo crudo y fuel-oil, respectivamente.

También se evalúan los resultados procedentes de la determinación de la factibilidad económica y ambiental en ambas circunstancias del sistema de generación de vapor de dicha instalación, luego de algunas modificaciones surgidas a través de los años.

3.1 Análisis de los resultados de los balances de masa y energía en el generador de vapor para los años 2011 y 2020

El análisis de la eficiencia del generador de vapor se lleva a cabo con el fin de conocer si el rendimiento de este equipo ha variado positiva o negativamente en el año 2020 en relación al año 2011, luego de varias modificaciones en el sistema, entre ellas la sustitución del combustible.

Para la realización del balance de masa y el cálculo de la eficiencia térmica en el generador se obtuvieron los siguientes datos medidos en la instalación a lo largo de estos dos años:

Tabla 3.1 Valores promedios de los parámetros reales de los combustibles, medidos en la DTCM durante los años 2011 y 2020.

Parámetros medidos para cada combustible	Crudo (2011)	Fuel-oil (2020)
Fracción másica del agua (%)	1,5	1,8
Fracción másica del carbono (%)	82,84	85,62
Fracción másica del oxígeno (%)	0,3	0,1
Fracción másica del hidrógeno (%)	10,2	10,2
Fracción másica del azufre (%)	4,86	2,18
Fracción másica de las cenizas (%)	0,3	0,1
Temperatura inicial (°C)	25	

Temperatura final (°C)	120	90
Flujo de combustible (kg/h)	750	777,42
Flujo de aire (kg/h)	3253,66	

Fuente: DTCM (2011, 2020)

En el caso del aire este presenta una temperatura de 32 °C, humedad relativa 70%, y un porcentaje en exceso del 8%, y los gases a la salida se mantienen a 195,8 °C en ambos períodos. También es importante tener en cuenta para estos cálculos que el generador de vapor de la DTCM opera a una presión de 1,0013 MPa y para su correcto funcionamiento es necesario que el agua de alimentación se introduzca al proceso a una temperatura de 90 °C.

- **Balance de masa**

En el año 2011 el flujo de vapor producido es de 11 666 kg/h, mientras que en el año 2020 desciende la producción de vapor saturado a 9750 kg/h, esta disminución puede ser provocada por distintas causas a las que próximamente se hará referencia.

Tabla 3.2 Variables tabuladas utilizadas para los balances de masa y energía.

Variables	Valores
Masa molar del carbono (kg/kmol)	12
Masa molar del hidrógeno (kg/kmol)	2
Masa molar del oxígeno (kg/kmol)	32
Masa molar del azufre (kg/kmol)	32
Masa molar agua (kg/kmol)	18
Capacidad calorífica del fuel-oil (kJ/kg. °C)	2,09
Capacidad calorífica del crudo (kJ/kg. °C)	2,008
Capacidad calorífica de los gases secos (kJ/kg. °C)	1
Humedad absoluta del aire (kg agua/kg aire seco)	0,021

A continuación, se muestran los resultados de los balances de masa en el generador de vapor durante su funcionamiento a lo largo de los dos años evaluados:

Tabla 3.3 Cantidades molares alimentadas, consumidas, generadas y de salida. Flujo molar y másico de gases de salida (Año 2011).

Especies	Moles que entran	Moles que se consumen	Moles que se generan	Moles que salen	Masa que sale (kg)
Carbono	51,77	48,66	-	3,11	37,27
Hidrógeno	38,25	35,95	-	2,29	4,59
Oxígeno	77,79	65,96	-	11,83	378,62
Azufre	0,14	0,13	-	0,008	0,27
Nitrógeno	292,39	-	-	292,39	8187,16
Dióxido de Carbono	-	-	46,23	46,23	2034,34
Monóxido de Carbono	-	-	2,43	2,43	68,13
Dióxido de Azufre	-	-	1,07	1,07	68,52
Agua	13,14	-	35,95	49,1	883,84
Totales	473,48	150,1	85,68	408,46	11 662,74

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 3.4 Cantidades molares alimentadas, consumidas, generadas y de salida. Flujo molar y másico de gases de salida (Año 2020).

Especies	Moles que entran	Moles que se consumen	Moles que se generan	Moles que salen	Masa que sale (kg)
Carbono	55,46	52,14	-	3,32	39,93
Hidrógeno	39,64	37,26	-	2,37	4,75
Oxígeno	81,88	69,72	-	12,16	389,3
Azufre	0,06	0,06	-	0,004	0,13
Nitrógeno	307,95	-	-	307,95	8622,83

Dióxido de Carbono	-	-	49,53	49,53	2179,48
Monóxido de Carbono	-	-	2,61	2,61	72,99
Dióxido de Azufre	-	-	0,49	0,49	31,86
Agua	13,96	-	37,26	51,23	922,24
Totales	498,95	159,18	89,89	429,66	12 263,51

Fuente: *Elaboración propia*

- **Eficiencia térmica**

Luego de obtenidos todos los datos mostrados en las tablas anteriores y los resultados de los cálculos de los balances de masa (Tablas 3.3 y 3.4), se procedió a realizar un balance de energía para calcular la eficiencia térmica del generador de vapor en los dos años a evaluar, cada uno con el respectivo combustible utilizado. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.5 Resultados de los cálculos de la eficiencia térmica del generador de vapor de la DTCM en los años 2011 y 2020.

Parámetros calculados	Año 2011 (crudo)	Año 2020 (fuel-oil)
Valor Calórico Inferior (kJ/kg combustible)	27 791,68	28 383,63
Calor útil (kJ)	2 795 3019,3	23 362 072,5
Calor disponible (kJ)	31 672 751,3	31 091 958,9
Eficiencia térmica (%)	88,26	75,14

Fuente: *Elaboración propia*

Como se puede observar en la Tabla 3.5, hay una disminución significativa de la eficiencia térmica del año 2020 con respecto a la calculada para el año 2011.

El agua necesita del calor brindado por el combustible en su combustión para calentarse y transformarse en vapor de agua, que es la esencia del generador de vapor, como bien su nombre lo indica. Por lo tanto; si el calor disponible, que se refiere a la energía que libera el combustible, disminuye, ya sea por déficit de combustible o por deficiencia del generador, el calor útil, que es el calor absorbido

por el agua, se verá propiamente afectado. Es decir, la disminución del calor cedido por el combustible, trae consigo que disminuya el calor absorbido por el agua; pues estos son parámetros directamente proporcionales.

La recuperación del condensado es un elemento esencial para lograr una mayor eficiencia, pues se recuperaría el agua a una temperatura de 90 °C, logrando así un menor consumo del combustible necesario para que ésta alcance su punto de saturación y entonces sea obtenido el vapor saturado.

Precisamente, esta es una de las causas que marcan una notable diferencia entre la eficiencia de ambos períodos. En el año 2011, cuando el generador aún operaba con petróleo crudo, el condensado era recuperado, logrando una mayor cantidad de vapor con un menor índice de consumo de combustible. Contrariamente, en el año 2020, este proceso de recuperación no se llevaba a cabo, puesto que los intercambiadores de vapor se encontraban en mal estado técnico, provocando una contaminación del condensado, y consigo un desperdicio de este, ya que el agua debe cumplir algunos parámetros de calidad antes de ser proporcionada al generador.

El desuso en algunas ocasiones por motivos técnicos de una de las calderas, es otra de las razones que provoca una deficiencia del generador; puesto que en este caso un solo generador de 16 t/h, no logra suplir la demanda de vapor que existe.

Maxi (2008), en su tesis de pregrado, analiza también la eficiencia térmica, utilizando el método directo, del generador de vapor de la Central Termoeléctrica de Felton, con dos combustibles (también fuel-oil y crudo). En sus resultados obtuvo también una diferencia en el cálculo de la eficiencia, aunque en cifras pequeñas. Para su análisis, los valores muestran que la mayor eficiencia se obtuvo con el uso del fuel-oil, no siendo así en el caso de estudio. Como bien fue mencionado anteriormente, en esta investigación se evaluó la eficiencia del generador de vapor para dos años distantes, y en este período han surgido otras modificaciones que han causado también la disminución de la eficiencia.

3.2 Análisis del consumo de vapor para los intercambiadores de calor

Si se tiene en cuenta que actualmente solo se encuentra funcionando un generador de vapor, de los dos instalados, el objetivo principal del análisis de los consumos de

vapor en los intercambiadores de calor involucrados, es comprobar si el vapor producido en el generador satisface la demanda actual.

Para el cálculo de estos consumos fue necesario la recopilación de los datos que se muestran en las siguientes tablas (Tabla 3.6 y 3.7):

Tabla 3.6 Datos para el cálculo de los consumos de vapor de los intercambiadores de calor (Estación 1.1).

Datos	IntercambA (1 bomba)	IntercambB (1 bomba)	IntercambA (2 bombas)	IntercambB (2 bombas)
Alimentación (kg/h)	654 984	654 984	1 290 120	1 290 120
Temperatura inicial del crudo (°C)	40	50	40	50
Temperatura final del crudo (°C)	50	60	50	60
Presión de vapor (kg/cm ²)	3,5	3,5	3,5	3,5
Calor latente (kcal/kg)	512,3	512,3	512,3	512,3

Fuente: DTCM (2011, 2020)

Nota: La capacidad calorífica del crudo se muestra en la Tabla 3.2.

Los intercambiadores A y B, de la estación 1.1, tienen como objetivo calentar el crudo para su posterior trasiego. Además, pueden operar con una o dos bombas, en dependencia de la necesidad de la demanda y la rapidez que requiera la operación.

Tabla 3.7 Datos para el cálculo de los consumos de vapor de los intercambiadores de calor (Estación 2.1 e Intercambiadores 117 y 118).

Datos	Intercamb 102B (caudal pleno)	Intercamb 102A (caudal pleno)	Intercamb 102A (caudal reducido)	IE 117	IE 118
Alimentación (kg/h)	89 316	119 088	44 658	396 960	297 720
Capacidad calorífica del crudo (kcal/kg.°C)	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
Temperatura inicial del crudo (°C)	45	42	42	40	35

Temperatura final del crudo (°C)	80	75	75	70	50
Presión de vapor (kg/cm ²)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Calor latente (kcal/kg)	512,13	512,13	512,13	512,13	512,13

Fuente: DTCM (2011, 2020)

En la estación 2.1, se encuentran los intercambiadores 102A y 102B. El 102A, es el intercambiador encargado del aumento de la temperatura del crudo que será bombeado a la Central Termoeléctrica de Santa Cruz, y puede operar a caudal pleno y caudal reducido.

Por otra parte, intercambiador 102B, está destinado a calentar el crudo para posteriormente ser bombeado hacia la Central Termoeléctrica Antonio Guiteras, ubicada también en la zona industrial.

En el caso de los intercambiadores 117 y 118, el primero, está ubicado a la salida del tanque 367, con el objetivo de aumentar la temperatura del crudo que sale de dicho tanque; y el segundo, opera calentando el crudo, antes de su entrada a los tanques.

Luego de obtener los datos recopilados en las tablas anteriores, se procedió a calcular el consumo de los intercambiadores de calor, y los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.8 Resultados del cálculo de los consumos de vapor de los intercambiadores de calor.

Equipos	Consumo de vapor (t/h)
Intercambiador A (1 bomba)	6,1
Intercambiador B (1 bomba)	6,1
Intercambiador A (2 bomba)	12,1
Intercambiador B (2 bomba)	12,1
Entrega a la CTE Guiteras (caudal pleno)	2,9
Entrega la CTE Sta Cruz (caudal pleno)	3,7
Entrega a la CTE Sta Cruz (caudal reducido)	1,4
IE-117	11,2

IE-118	4,2
Total	47,6

Fuente: Elaboración propia

El consumo de vapor en cada uno de los equipos por separado es inferior a la capacidad actual de generación que es de 16 t/h, como puede observarse. Es importante tener en cuenta que en el caso de que todas las operaciones ocurran simultáneamente, denominados “picos del sistema”, cuando el consumo de vapor se hace máximo, no se logra satisfacer la demanda (47,6 t/h). Esto ocurre cuando se combinan las operaciones de precalentamiento de combustible y entrega a las C.T.E Antonio Guiteras y Santa Cruz del Norte a caudal pleno, con la carga a buques, generalmente cuando se emplean dos bombas en esta operación, lo cual sucede siempre que los caudales de carga son grandes o el tiempo para la carga es bajo.

Al determinar la eficiencia del generador de vapor instalado se pudo valorar el estado técnico de este, con lo cual, unido a las necesidades de vapor, se hace necesario proponer alternativas técnicas-operacionales para suplir la deficiencia de vapor en este caso:

1. Reparación del segundo generador que se encuentra fuera de servicio por problemas técnicos, y así, aumentar la cantidad de vapor saturado para lograr suplir la demanda.
2. En caso de que se incorpore el generador que está fuera de servicio, trabajar la simultaneidad de operaciones en función de los requerimientos de cada estación (Anexo 3).
3. Adquisición de otro equipo generador de vapor.

3.3 Análisis de la eficiencia exergética del generador de vapor para los años 2011 y 2020

Para la determinación de la eficiencia exergética también se emplea el método directo, con el objetivo de comparar ambas eficiencias en los dos períodos evaluados. Para ello, se utilizaron los datos que se muestran a continuación:

Tabla 3.9 Valores promedio para el cálculo de la eficiencia exergética del generador de vapor en los años 2011 y 2020.

Párametros	Año 2011 (crudo)	Año 2020 (fuel-oil)
Flujo másico de vapor saturado (kg/s)	3,24	2,71
Flujo másico de combustible (kg/s)	0,21	0,22
Temperatura del combustible (K)	393	363
Presión de los combustibles (kPa)	231,32	
Presión del aire (kPa)	101,325	

Los parámetros expuestos en la tabla anterior, fueron medidos y promediados diariamente en la instalación.

Las fracciones másicas para ambos combustibles se encuentran en la Tabla 3.1.

Para el cálculo de la eficiencia también se hizo necesario utilizar los siguientes parámetros:

Tabla 3.10 Variables tabuladas para el cálculo de la eficiencia exergética en los años 2011 y 2020.

Variables	Valores
Entropía del vapor saturado (kJ/kg.K)	6,62
Entropía del agua de alimentación (kJ/kg.K)	1,19
Entropía del agua de alimentación a la temperatura del ambiente de referencia (kJ/kg.K)	0,36
Entalpía del agua de alimentación (kJ/kg)	377,76
Entalpía del agua de alimentación a la temperatura del ambiente de referencia (kJ/kg)	104,94
Entalpía del vapor saturado (kJ/kg)	2773
Capacidad calorífica del aire (kJ/kg.K)	1,0052
Densidad del crudo (kg/m ³)	990
Densidad del fuel-oil (kg/m ³)	995,9

Los valores de entropía y entalpía, tanto para el agua de alimentación como para el vapor saturado fueron extraídos de las Tablas de Keenan (Tablas 1 y 2) y la

capacidad calorífica del aire se puede localizar en el Perry (2019). En el caso de las capacidades caloríficas de los combustibles, están plasmadas en la Tabla 3.2 y las densidades en el catálogo de especificaciones (OC-GC/CO614, s/a).

Luego de la recopilación de datos necesarios y el análisis del procedimiento a seguir, se realizaron los cálculos para la eficiencia exergética, cuyos resultados se muestran a continuación:

Tabla 3.11 Parámetros calculados para la determinación de la eficiencia exergética en los años 2011 y 2020.

Parámetros calculados	Año 2011	Año 2020
Coeficiente experimental	0,79	0,8
Exergía específica del vapor saturado (kJ/kg)	804,74	
Exergía específica del agua de alimentación (kJ/kg)	27,64	
Exergía química del combustible (kJ/kg)	22 074,2	22 827,04
Exergía física del combustible (kJ/kg)	25,39	13,16
Exergía física del aire (kJ/kg)	0,08	
Exergía útil (kJ/s)	2518,23	2104,64
Exergía disponible (kJ/s)	4604,15	4932,41
Eficiencia exergética (%)	54,69	42,66

Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en los resultados expuestos en la tabla anterior, las eficiencias exergéticas, son inferiores a las eficiencias térmicas (Tabla 3.5) en ambos casos, debido a que la exergía es la capacidad de trabajo útil máxima que puede obtenerse de un sistema en un determinado estado, sin embargo, la eficiencia térmica está referida a la cantidad de trabajo que un motor puede obtener del combustible que utiliza.

La eficiencia exergética del generador de vapor de la DTCM es mayor en el año 2011, lo que es lógico, puesto que su eficiencia térmica también es mayor que la calculada con respecto a la del año 2020. Estos resultados pueden estar influenciados por las mismas razones del comportamiento de la eficiencia térmica para estos años: baja frecuencia de los ciclos de mantenimiento, desaprovechamiento del condensado, indisciplinas tecnológicas, entre otros.

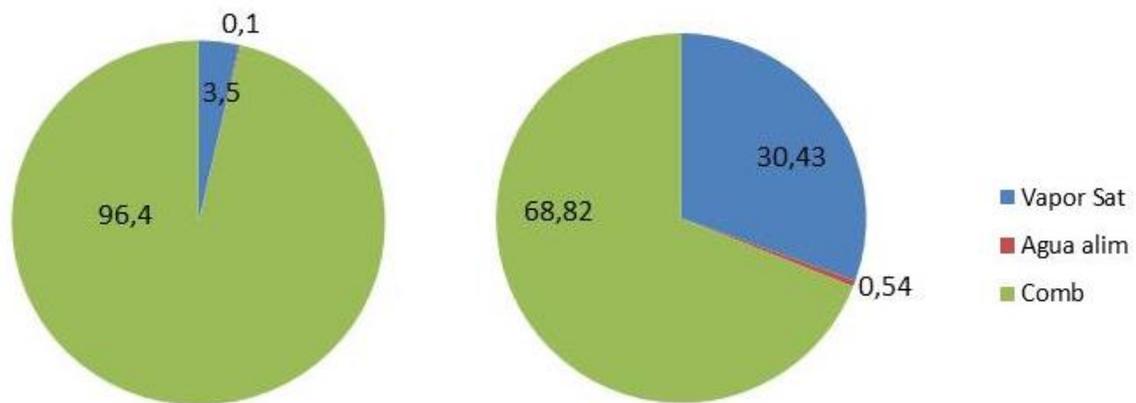
Si se comparan las eficiencias exergéticas para generadores similares (pirotubulares) se puede comprobar que los valores obtenidos son aceptables. Maxi en el 2008, evaluó un generador de vapor pirotubular y obtuvo eficiencias exergéticas de 78 y 79 % y Jiménez et al. (2016), logró un 27%, también para un generador pirotubular, Ramos (2011) por su parte obtuvo valores de 25 y 26 % y López et.al. (2021) alcanzó eficiencias de 49 % para generadores acuotubulares. Si se analiza que los generadores de vapor estudiados llevan más de 20 años de explotación y teniendo en cuenta que la disminución de la eficiencia exergética es de 12,03 %. Este decrecimiento de la eficiencia exergética entre el año 2011 al 2020 puede estar dada por las diferentes pérdidas involucradas en el proceso:

- Las pérdidas de exergía con los gases de escape no constituyen la mayor fuente de pérdidas del generador de vapor, ya que la energía que abandona el generador de vapor con estos gases tiene muy baja, no obstante pueden incrementarse a partir del ensuciamiento de las superficies de transferencia de calor, el incremento de las infiltraciones de aire, la humedad del combustible, entre otros; por tanto es necesario monitorear los valores de estas pérdidas para realizar las correcciones operacionales o las acciones de mantenimiento de forma oportuna.
- Las pérdidas por la exergía contenida en el agua proveniente del combustible son pequeñas debido al bajo contenido gravimétrico de agua en el combustible. Las pérdidas por este concepto son directamente proporcionales a la humedad en el combustible, por lo que este parámetro debe controlarse.
- Las pérdidas de exergía por el agua proveniente de la humedad del aire, que dependen de la humedad ambiente.
- También existe destrucción de exergía en los procesos de transferencia de calor en las superficies.
- Las pérdidas por irreversibilidades en los procesos que ocurren en el generador, constituyen unas de las pérdidas más representativas de este equipo.

De forma general, desde el punto de vista práctico, los aspectos que más influyen en las pérdidas por irreversibilidades son; las condiciones para la combustión, el exceso de aire y las infiltraciones, el ensuciamiento de las superficies de transferencia y los

parámetros de trabajo del generador de vapor (presión, temperatura del agua y el vapor).

La figura 3.1 muestra la contribución de cada componente a la exergía total. Como se puede observar la mayor exergía que se puede obtener del sistema la aporta el combustible, seguido por el vapor saturado. A pesar, de que el crudo tiene menos valor calórico que el fuel-oil, también su consumo es menor. En el año 2011, el combustible aporta un mayor porcentaje de exergía en comparación al año 2020, esto puede estar sucediendo debido a las pérdidas de condensado, explicadas en el epígrafe 3.1.



a)

b)

Figura 3.1. Aporte de exergía de cada componente al sistema (a- 2011, b- 2020)

3.4 Análisis económico

3.4.1 Ahorro por concepto de cambio de combustible

En relación al análisis económico en este sistema de generación de vapor, se lleva a cabo una comparación entre los dos períodos operando con distintos combustibles, en el 2011 con petróleo crudo y en el 2020 con fuel-oil, como ya había sido mencionado anteriormente. Para ello se realizan los cálculos de los ahorros que pudieran ser o no reportados a través del paso de los años, luego de varias modificaciones.

A continuación, se muestran los datos necesarios para la realización de estos cálculos:

Tabla 3.12 Datos para el cálculo de los ahorros económicos del sistema de generación de vapor de la DTCM en los años 2011 y 2020.

Parámetros	Año 2011 (crudo)	Año 2020 (fuel-oil)
Combustible consumido en un año (t/a)	3791	5594,4
Precio del combustible (\$/t)	56,9	102,8
Costo de un mantenimiento en cada año (\$/a)	7470	75 904,32
Cantidad de mantenimientos en cada año	2	1
Amortización en cada año (\$/a)	60 734	92 348

Fuente: DCTM (2011, 2020)

Los datos mostrados en la tabla anterior fueron tomados de las respectivas fichas de costos de cada año

Si bien el Fuel oil tiene un mayor precio en el mercado, su valor calórico comparado con el del petróleo crudo es mucho mayor, lo que debería representar un menor consumo de combustible. Sin embargo, como se puede observar en la tabla 3.12, el combustible consumido en el año 2020 (fuel-oil) supera en 1083,3 t/a al consumo de crudo del año 2011. Esta situación puede estar generada en gran parte por la pérdida del condensado como bien fue explicado anteriormente en el epígrafe 3.1. También el precio por tonelada del fuel-oil corresponde a casi el doble del precio del crudo, pero es válido tener en cuenta que, aunque el precio del fuel-oil es superior, su valor calórico también lo es, y esto podría beneficiar en gran medida al tiempo de vida útil del generador y junto a él a los costos por amortización, debido a que al ser mayor su valor calórico, se pueden alcanzar mayores temperaturas. Aun así, esto no es precisamente lo que ocurre en esta instalación.

Los datos recopilados de la amortización evidencian que, en el año 2020, operando con fuel- oil, los gastos por amortización superan significativamente a los gastos por amortización del 2011 donde se operaba con petróleo crudo. Esto puede deberse al decrecimiento del tiempo de vida útil del generador, ya que la situación energética del país en los últimos años se ha deteriorado, y esto trae consigo que exista una sobreexplotación del generador de vapor.

Los costos por mantenimiento del año 2020 son superiores al costo por mantenimiento del año 2011. Como bien se conoce, no solo la situación energética del país en estos últimos años se ha deteriorado, lo mismo ha sucedido con la situación económica. Debido a estas circunstancias ha disminuido la cantidad de mantenimientos por año. Se hace necesario garantizar el funcionamiento de al menos uno de los dos generadores de vapor, pues si ambos salen de servicio se vería interrumpido el trasiego de combustible y por ende el suministro a las Centrales Termoeléctricas y otras instalaciones. Es importante tener en cuenta que estos generadores tienen más de 20 años de explotación, y este es un factor que influye en su deterioro, sobre todo si no se cumple con los mantenimientos requeridos. Para hacer más clara esta comparación, se lleva a cabo la determinación de los ahorros, teniendo en cuenta tres aspectos fundamentales: ahorro por concepto de consumo de combustible, ahorro por concepto de mantenimiento y ahorro por concepto de vida útil. Los resultados de estos ahorros se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.13 Resultados obtenidos del cálculo de los ahorros del sistema de generación de vapor del DTCM para los años 2011 y 2020.

Ahorros calculados (\$/a)	Resultados
Ahorro por consumo de combustible (2011)	215 707,9
Ahorro por consumo de combustible (2020)	575 104,32
Ahorro total por consumo de combustible	-359 396,42
Ahorro por mantenimiento (2011)	14 940
Ahorro por mantenimiento (2020)	75 904,32
Ahorro total por mantenimiento	-60 964,32
Ahorro por vida útil (2011)	60 734
Ahorro por vida útil (2020)	92 348
Ahorro total por vida útil	-31 614
Ahorro Total	-451 974,74

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar, es evidente que en el año 2020 en comparación con el año 2011, la DTCM, no obtuvo ningún ahorro en relación al sistema de generación de

vapor; solo se obtuvieron pérdidas. Esta crítica situación está dada por todos aspectos mencionados anteriormente: baja frecuencia de mantenimiento, sobreexplotación del generador de vapor, situación económica y energética del país y también inciden algunas indisciplinas de los operadores.

La pérdida actual de casi 9 t/h de condensado en los equipos de la DTCM, por mal funcionamiento o desperfectos técnicos, hacen que disminuya la eficiencia de los generadores de vapor. En condiciones de diseño el 90 % del condensado es recuperado y alimentado a los generadores para aumentar su eficiencia, por concepto de aprovechamiento de su energía. La incorporación del condensado ayuda al funcionamiento de los generadores, sin embargo, actualmente esto no ocurre eficientemente, de manera que se hace necesario adicionar un flujo superior de agua de consumo previamente tratada para garantizar el funcionamiento del equipo. Esta incorporación de agua implica una disminución de la temperatura del condensado y un aumento del consumo de agua. Al no alcanzar la temperatura necesaria (90 °C), se requiere calentar el agua de alimentación hasta lograr el punto de ebullición, lo que se traduce en un aumento del consumo de combustible.

Si se comparan (Tabla 3.14) los gastos de combustibles y agua en el último año analizado (2020), cuando se trabaja con fuel-oil, teniendo en cuenta los costos unitarios, el consumo (flujo) de cada corriente, la producción de vapor, así como los índices de consumo por toneladas de vapor, se obtiene un sobreconsumo de 854,1 t/a de combustible y 19 131,84 t/a de agua, así como un gasto adicional de 87 801,48 \$/a de combustible y 207 580,46 \$/a de agua; lo que repercute no solo en las pérdidas económicas sino también en el funcionamiento y la eficiencia de los generadores de vapor.

Tabla 3.14 Análisis del gasto de combustible y agua por pérdidas de condensado

		Índice de consumo/vapor producido (t/t)*	Consumo (t/a)	Sobreconsumo (t/a)	Gastos \$/a
Combustible (fuel-oil)	Plan	0,07	5978,7	854,1	87 801,48
	Real	0,08	6832,8		
	Plan	0,126	10 761,66	19 131,84	207 580,464

Agua de alimentación	Real	0,35	29 893,5		
----------------------	------	------	----------	--	--

Fuente: Elaboración propia, *DTCM (2020)

3.4.2 Costos de exergía

El objetivo de dicho análisis, es determinar el valor económico de la energía útil aprovechada de cada corriente. Para estos cálculos, se hizo necesario la utilización de los datos que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.15 Datos recopilados para el cálculo de los costos económicos de las exergías de cada corriente.

Datos	Valores
Costo por kilogramo de agua de alimentación (\$/kg)	0,01085
Costo por kilogramo de vapor saturado (\$/kg)	0,02303
Flujo másico del agua de alimentación (kg/d)	120 000

El flujo másico de agua, es medido diariamente en la instalación, y los costos del agua de alimentación y de vapor saturado fueron tomados de la ficha de costo.

Los flujos tanto de combustible como de vapor saturado, y los precios de ambos combustibles, se encuentran en las Tablas 3.9 y 3.12, respectivamente.

Luego de obtenidos los parámetros necesarios, se procede a realizar los cálculos de los costos de las exergías de cada corriente, y los resultados se presentan en la tabla a continuación:

Tabla 3.16 Resultados de los costos de exergía de cada corriente en los años 2011 y 2020.

Parámetros	Año 2011 (crudo)	Año 2020 (fuel-oil)
Costo de exergía del agua de alimentación (\$/kJ)	$3,92 \cdot 10^{-7}$	
Costo de exergía del vapor saturado (\$/kJ)	$2,86 \cdot 10^{-5}$	
Costo de exergía del combustible(\$/kJ)	$2,57 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla anterior, los costos de exergía del agua de alimentación y del vapor saturado son iguales, para ambos años, pues el precio no varía entre los dos años evaluados.

Con respecto al costo por exergía del combustible, hay un aumento de este costo en el año 2020 en relación al 2011.

El precio del combustible lógicamente influye en este aumento, ya que el precio del fuel-oil supera en casi el doble al precio del crudo. Además, el combustible consumido en el año 2020 es mayor, pues como ya había sido explicado anteriormente, se necesita un aumento del flujo debido a que el condensado no se está recuperando.

3.5 Análisis de los resultados del Índice de Calidad del Aire (ICA) para los años 2011 y 2020

El análisis de gases de combustión realizado tiene como principal finalidad, el control de emisiones gaseosas. En este caso, se determinó el Índice de Calidad del Aire según procedimiento de la NC-111-2004, luego de la emisión de dos contaminantes ($\text{SO}_{2(g)}$ y $\text{CO}_{(g)}$) resultantes de la combustión de los combustibles con los que operaba el generador de vapor en los años 2011 y 2020. Si bien la NC-111-2004 establece la determinación del ICA para asentamientos humanos, se utiliza esta norma pues existen, aledaños a la DTCM, asentamientos urbanos ilegales que hacen de esta un punto de riesgo para la población que ahí se establece, y que pueden ser afectados por la contaminación que se genera. También se realiza una comparación con emisión máxima admisible reportada en la NC-803-2017 que se establece para contaminación de fuentes puntuales en generadores de vapor.

Para la evaluación de la calidad del aire solo se tiene en cuenta las emisiones de $\text{SO}_{2(g)}$ y $\text{CO}_{(g)}$ pues son los contaminantes primarios que salen con los gases de escape. El $\text{CO}_{2(g)}$ constituye una fracción representativa de este flujo gaseoso, aun así, este elemento no se tiene en cuenta en el análisis ambiental, aunque es uno de los gases que en excesivas cantidades contribuye al calentamiento global. Además, la NC-111-2004 no incluye el $\text{CO}_{2(g)}$, como uno de los principales contaminantes del aire.

Para la evaluación del ICA fue necesario utilizar los datos que se muestran a continuación:

Tabla 3.17 Datos necesarios para el cálculo del ICA en la DTCM en los años 2011 y 2020.

Datos	Valores
CMA para el SO ₂ (µg/m ³)	250
CMA para el CO (µg/m ³)	25 000
Factor de emisión del SO ₂ para el fuel-oil (g/kg)	39,1
Factor de emisión del CO para el fuel-oil (kg/m ³)	0,6
Factor de emisión del SO ₂ para el crudo (g/kg)	126,2
Factor de emisión del CO para el crudo (kg/m ³)	0,6

También se utilizan para estos cálculos las fracciones másicas del carbono, azufre, hidrógeno y oxígeno en los combustibles y la tasa de actividad de estos últimos (flujo másico), mostrados en la Tabla 3.1, y sus respectivas densidades, en la Tabla 3.10. Las Concentraciones Máximas Admisibles (CMA) se tomaron de la Tabla 1, NC-1020-2014.

Los factores de emisión aparecen reflejados en:

- SO₂ - Tabla 13 de Meneses-Ruiz et al., (2018)
- CO -Tabla 1 de Marrero et al., (2016).

Los resultados obtenidos del cálculo del ICA en relación a la emisión de gases producto de la combustión de ambos combustibles, se encuentran plasmados en la tabla siguiente:

Tabla 3.18 Resultados de los cálculos del Índice de Calidad del Aire en los años 2011 y 2020.

Parámetros	CO _(g)		SO _{2(g)}	
	fuel-oil	crudo	fuel-oil	crudo
Emisión del contaminante (kg/h)	0,46	0,45	30,39	94,65
Concentración real del contaminante (ug/m ³)	52 094,92	53 077,15	3 380 933,41	11 052 254,9

Flujo de los gases de escape (m ³ /h)	8990,74	8563,86	8990,74	8563,86
Volumen real (m ³ /kg)	11,56	11,41	11,56	11,41
Volumen teórico (m ³ /kg)	9,81	9,65	9,81	9,65
ICA	2,08	2,12	13 523,73	44 209,01

Fuente: Elaboración propia

El monóxido de carbono contribuye a la formación de los gases de efecto invernadero, por lo que posee consecuencias sobre el clima y también representa una amenaza para la salud, debido a su capacidad de reaccionar con la hemoglobina de la sangre, teniendo más afinidad con esta que el propio oxígeno (Téllez et al., 2006).

Los resultados de los cálculos para este contaminante muestran que su emisión en esas cantidades (0,46 para el fuel-oil y 0,45 para el crudo) prácticamente no afecta la calidad del aire y por lo tanto, no representan un peligro para la salud de los habitantes más cercanos, esto puede corroborarse en la tabla expuesta en el Anexo 4, donde cataloga el estado del aire ante las emisiones de contaminantes atmosféricos en dependencia del resultado obtenido en el cálculo del índice de calidad, relacionándolo con las afectaciones que podría presentar la población aledaña. En este caso los Índice de Calidad tanto para el fuel-oil como para el crudo, tienen un valor menor que 79, lo que está clasificado en la NC-111-2004 como buena calidad del aire.

En el caso del dióxido de azufre, el cual es un precursor de la lluvia ácida, y puede provocar la acidificación de lagos y suelos, así como acelerar el deterioro de los edificios (Núñez, et al., 2019); ocurre completamente lo contrario que con el monóxido de carbono. Debido a que la Concentración Máxima Admisible de este contaminante en el aire es menor que la del CO_(g) por la repercusión que sobre la atmósfera este representa y, sobre todo, que como muestran los resultados, las emisiones son mayores (principalmente para la combustión del crudo), se puede concluir que, el aire para los asentamientos humanos aledaños se encuentra en estado crítico para este parámetro, con un índice de calidad mayor de 500 (Anexo 4) para ambos combustibles.

No obstante, al comparar estas concentraciones con las emisiones máximas admisibles para fuentes puntales de generadores de vapor de la NC-803-2017, se puede concluir que la emisión del $\text{SO}_{2(g)}$ es inferior a la establecida según esta norma (7000 mg/m^3 para el fuel-oil y 10 000 mg/m^3 para el crudo).

3.6 Conclusiones parciales

- Se determinó la eficiencia energética del generador de vapor por el método directo y se obtuvieron como resultados: 88,26 % para el año 2011 y 75,14 % para el año 2020.
- El vapor generado no satisface la demanda de los intercambiadores de calor, si estos trabajaran simultáneamente (47,6 t/h).
- Para la determinación de la eficiencia exergética, se empleó el método directo, y los resultados fueron: 54,69% para el año 2011 y 42,66% para el 2020.
- Los resultados de los cálculos económicos demuestran, que la instalación obtiene pérdidas en lo que respecta al generador de vapor en los últimos años.
- El monóxido de carbono, en las cantidades emitidas, no representa peligro para la salud de la población aledaña a la instalación, no siendo así para el caso del dióxido de azufre, la cual constituye una afectación crítica al medio ambiente.

CONCLUSIONES

- Los cálculos de la eficiencia energética del generador de vapor, mostraron que está disminuyó en gran medida en el año 2020 (75,14 %) con respecto al año 2011 (88,26 %), debido en gran parte a las pérdidas del condensado en el proceso, que traen consigo un aumento del consumo del combustible, ya que se requiere una mayor cantidad de este para aumentar la temperatura del agua de alimentación desde 30 °C.
- Mediante el análisis de la eficiencia exergética, se evidenció que esta también tuvo una disminución, del 12,03%, lográndose ratificar que, parte de las modificaciones realizadas a través de estos años, influyen negativamente en la factibilidad técnica del generador de vapor.
- La determinación de los consumos de los intercambiadores de calor reveló que, el consumo de cada uno de estos equipos, no supera a la cantidad de vapor que ofrece el generador, pero, si todos los equipos trabajan simultáneamente, este no logra suplir esta necesidad que es de 47,6 (t/h), por lo que se hace necesario valorar las propuestas de simultaneidad presentadas o la adquisición de un nuevo generador.
- Con los resultados obtenidos de los cálculos de los diferentes ahorros (ahorro por consumo de combustible, ahorro por concepto de mantenimiento y ahorro por concepto de vida útil), se demostró que luego de las modificaciones realizadas, la DTCM solo obtuvo pérdidas económicas en los que respecta al generador de vapor, provocadas: el aumento de precio del combustible de operación debido a la sustitución de este, aumento del consumo de combustible por pérdidas de condensado en los intercambiadores y baja frecuencia de mantenimiento.
- En el análisis del ICA quedó demostrado que, el CO(g) generado en los gases de escape, no representa riesgo alguno para la población aledaña, pero en el caso del SO₂(g), sus resultados del índice de calidad para ambos años, evidencian que este podría afectar en gran medida a los habitantes cercanos, con un ICA mayor de 500, considerado calidad crítica según NC-111-2004.

No obstante, la concentración emitida no supera a la establecida por la NC-803-2017 para fuentes puntuales de generadores de vapor.

RECOMENDACIONES

1. Presentar a la Dirección de la División Territorial de Combustibles de Matanzas los resultados obtenidos, para valorar la implementación de modificaciones técnicas en el proceso de generación de vapor.
2. Reparar los intercambiadores de calor para la recuperación del condensado y el aumento de la eficiencia de los generadores de vapor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aied Ahmad, "Steam Boilers (Fire Tube Boiler) ", University of Technology, Iraq, 2020.

Álvarez, A. A. (2018). Propuestas de ajustes en el aprovechamiento energético de la Sala de caldera en la UEB Embotelladora de cerveza La Princesa, Pinar del Río [Tesis de maestría, Universidad de Pinar del Río]. <https://rc.upr.edu.cu>

Arze, C., Milone, F., Murúa, S., Olcese, I., Russillo, S., Snaider, B. G. y Sabaloy, F. (2020). Guía de Eficiencia Energética en Sistemas de Vapor. World Energy Council. Argentina.

Ávila, J. (2002). Lo esencial acerca del intercambio iónico. Agua Latinoamérica. 2(3), 1-3.

Beall, G. (2003). The use of organo-clays in water treatment. Applied Clay Science. 24, 11-20.

Bolma, A. (2005). The premature degradation of ion exchangers resins used in the water treatment for steam generators and the evaluation of its consequences. IEEE RussiaPower Tech. 1-3.

Borroto, N. A. y Rubio, G. A. (2007). Combustión y generación de vapor. Universo Sur.

Borroto, N. A. (2010). Combustión y generación de vapor. Félix Varela. La Habana.

Buthod, P. (2000) Crude Oil Properties and Condensate. Properties and Correlations. United States of America.

Branan, C. (2000). Soluciones prácticas para el ingeniero químico. 2da ed. México: McGraw-Hill.

Butcher, C. J.; Reddy, B. V. *Second law analysis of a waste heat recovery based power generation system*. International Journal HEAT and MASS TRANSFER, 2007.

Cheremisinoff, N. P. (2000) Handbook of Chemical Processing Equipment. World Wide Web Home page at: <http://www.newnespress.com>.

DCTM. (2020). Ficha de costo y ficha técnica. División Territorial de Combustible de Matanzas.

DCTM. (2011). Ficha de costo y ficha técnica. División Territorial de Combustible de Matanzas.

Parvez Mohd, "Steam Boiler" Department of Mechanical Engineering, Al-Falah University, Faridabad, India, 2017.

Flynn, D. (2009). The Nalco Water Handbook. Tercera edición. Estados Unidos: McGraw-Hill.64

Flynn, A. M., Akashige, T., y Theodore, L. (2019). *Kern's process heat transfer*. John Wiley & Sons.

Rubio, A. M. (2015). *Generadores de Vapor. Funcionamiento y Explotación*. Feijóo.

Hernández, C. E. A. (2012). Funcionamiento y mantenimiento de generadores de vapor pirotubulares. Marca Powersmaster.

Jiménez, R., Madrigal, J. A., Lapido, M. J., & Vidal, D. A. (2016). Método para la evaluación de la eficiencia e impacto ambiental de un generador de vapor. *Ingeniería Energética*, 37(2), 135-144.

León, P. N. (2011). Efecto económico de una inversión para un proyecto tecnológico de ahorro de agua en las calderas de la Empresa Comercializadora de Combustible de Matanzas, Matanzas [Tesis de pregrado, Filial Universitaria de Matanzas].

López Ripoll, N. S et. Al. (2021). Pérdidas energéticas y exergéticas del generador de vapor de la Central Termoeléctrica Antonio Guiteras. X Convención Científica Internacional de la Universidad de Matanzas, CIUM 2021. VII Taller Internacional de Ingenierías. Matanzas (Cuba), 23-25 de marzo. ISBN: 978-959-16-4547-0

Song J., Lv T, Yu L, (2012). Research of Simplified Method in Boiler Efficiency Test. Energy Procedia.

Marrero Díaz, Y., Cuesta Santos, O., Suárez Benítez, M., (2016). Inventario de emisiones atmosféricas de las principales fuentes fijas de Holguín-Cuba, 2016. Centro Meteorológico Provincial de Holguín, Instituto de Meteorología de Cuba.

Maxi Emmanuel (2008). Diagnóstico termoexergético del proceso de generación de vapor en la Central Termoeléctrica de Felton, Moa [Tesis de pregrado, Instituto Superior Minero Metalúrgico].

McCoy, J. (1969). Chemical Analysis of Industrial Water. Estados Unidos: Chemical Publishing Company, 65.

Meneses-Ruiz, E., Roig-Rassi, A., Paz, E., Alonso, D., & Alvarado, J. (2018). Factores de emisión de CO, CO₂, NO_x y SO₂ para instalaciones generadoras de electricidad en Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 24(1), 1-9.

Mitrovic, D. M., Stojanovic, B. V., Janevski, J. N., Ignjatovic, M. G., & Vuckovic, G. D. (2018). Exergy and Exergyeconomic Analysis of a Steam Boiler. *THERMAL SCIENCE*, 22(5). <https://doi.org/10.2298/TSCI18S5601M>

Mojica-Cabeza, C. D., García-Sánchez, C. E., Silva-Rodríguez, R., & García-Sánchez, L. (2021). A review of the different boiler efficiency calculation and modeling methodologies. *Informador Técnico* 86(1), 69-93.

<https://doi.org/10.23850/22565035.3697>

NC-1020-2014. Calidad del aire-Contaminantes-Concentraciones máximas admisibles y valores guías en zonas habitables. Oficina Nacional de Normalización (NC). Cuban National Bureau of Standards.

NC-111-2004. Calidad del aire-Reglas para la vigilancia de la calidad del aire en asentamientos humanos. Oficina Nacional de Normalización (NC). Cuban National Bureau of Standards.

NC-803-2017. Calidad del aire-Emissiones Máximas Admisibles de contaminantes a la atmósfera en fuentes fijas puntuales de instalaciones generadoras de electricidad y vapor. Oficina Nacional de Normalización (NC). Cuban National Bureau of Standards.

Núñez, V., Rodríguez, R., Gómez, L., Herrera, I., & Morales, M. C. (2019). Emisiones de dióxido de azufre a la atmósfera por fuentes fijas del MINAG y su influencia en la calidad del aire en la provincia de Villa Clara. *Centro Agrícola*, 46(3), 89-95.

OC-GC/CO614. Catálogo de especificaciones de productos. Rama combustibles, p(26 y 33).

Ohijeagbon, IO., Waheed, MA. O., Jekayinfa, S (2013). Methodology for the physical and chemical exergetic analysis of steam boilers. *Energy Procedia*.

Ortiz, D. A. L. y TAVERA, C. C. E (2013). Tratamiento de agua para alimentación de calderas.

Perry, R. H and Green, D (2019). Chemical Engineers Handbook. Part one. Ninth Edition. Hill Company.

Destacamento de Calderas. (2005). Requisitos para declarar una sala de calderas eficiente. Comisión de evaluación. Matanzas.

Ramos, Y. J. (2011). Estudio Termoeconómico y mejoramiento de la explotación del generador de vapor N^o.1 de la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas, Matanzas [Tesis de pregrado, Universidad de Matanzas].

Romero, F. L. (2016, 26 de septiembre). Selección de un generador de vapor (Caldera). <https://prezi.com/>

Ruiz, C. (2019). Manual de Operaciones. Área Crudos y Suministro. División Territorial de Combustibles de Matanzas.

Téllez, J., Rodríguez, A., & Fajardo, Á. (2006). Contaminación por Monóxido de Carbono: un Problema de Salud Ambiental. *Revista de Salud Pública*, 8(1), 108-117.

Velázquez González, A., Corrales Suárez, J.M., & Pérez Molina, L. R. (2020). Evaluación termoexérgica del generador de vapor del campus Lenin de la Universidad de Las Tunas. *Opuntia Brava*, 12(1), 454-468.

Tanquero, D. N. (2002). Curso de Generadores de Vapor. Puerto Ordaz, Venezuela [s.n].

Weber, W. J., Areal Guerra, R., & Besa Feixas, J. (2003). Control de la calidad del agua. Reverté.

ANEXOS

Anexo 1. Diagrama de flujo del proceso de generación de vapor

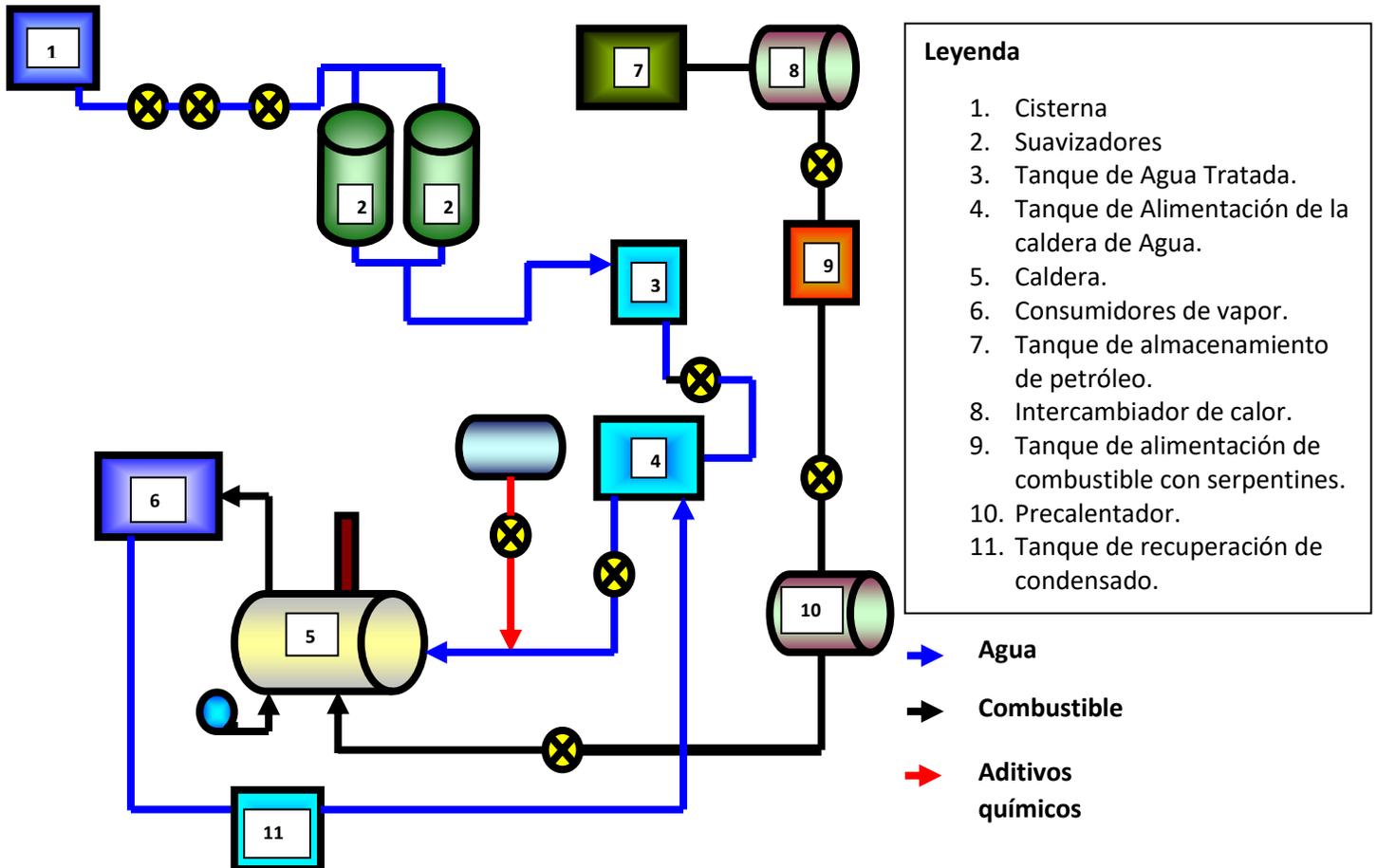


Figura A.1 Diagrama de flujo del proceso de producción de vapor de la Dirección Territorial de Combustible de Matanzas (DTCM). Fuente: (León, 2011).

Anexo 2. Imágenes de algunos equipos y accesorios ubicados en el área de generador de vapor



Figura A.2 a-) Generador de Vapor pirotubular de la Dirección Territorial de Combustible de Matanzas (DTMC). Fuente: (León, 2011)



Figura A.2 b-) Tanques de almacenamiento de agua y combustible de la Dirección Territorial de Combustible de Matanzas (DTMC). Fuente: (León, 2011)



Figura A.2 c-) Suavizadores donde se realiza el tratamiento previo al agua de calderas, para eliminar su dureza total. Fuente: (León, 2011)

Anexo 3. Propuesta de simultaneidad de operaciones de los intercambiadores

Tabla A.1 Propuesta de simultaneidad de operaciones de los intercambiadores de calor de la Dirección Territorial de Combustible de Matanzas (DTCM).

CARGA DE BUQUES TANQUES CON UNA BOMBA	12,3
ENTREGA A STA. CRUZ A CAUDAL PLENO	3,7
ENTREGA A GUIERAS A CAUDAL PLENO	2,9
TOTAL	18,9
CARGA DE BUQUES TANQUES CON DOS BOMBA	24,2
ENTREGA A STA. CRUZ A CAUDAL PLENO	3,7
ENTREGA A GUIERAS A CAUDAL PLENO	2,9
TOTAL	30,8
CARGA DE BUQUES TANQUES CON UNA BOMBA	12,3
ENTREGA A STA. CRUZ A CAUDAL REDUCIDO	1,4
ENTREGA A GUIERAS A CAUDAL PLENO	2,9
TOTAL	16,6
CARGA DE BUQUES TANQUES CON DOS BOMBA	24,2
ENTREGA A STA. CRUZ A CAUDAL REDUCIDO	1,4
ENTREGA A GUIERAS A CAUDAL PLENO	3,7
TOTAL	29,2
MAXIMA GENERACIÓN CON DOS CALDERA	32 t/h
MAXIMA GENERACIÓN CON UNA CALDERA	16 t/h

Fuente: Elaboración propia

Anexo 4. Relación entre el Índice de Calidad del Aire y posibles implicaciones sanitarias relacionadas con cada Categoría de Calidad

Tabla A.2 Categoría del Índice de Calidad del Aire

Índice	Categoría	Comentarios
0 - 79	Buena	No sobrepasa el 79 % del valor de la Cma prescrito en la NC. 39. Óptima calidad sanitaria del aire. Supuesta protección de toda la población (aunque no puede asegurarse que no sobrepase el umbral de respuesta de efectos adversos en individuos aislados).
80 - 99	Aceptable	No supera el 99 % de la Cma . Comienza el deterioro de la calidad del aire. Posible aparición de efectos leves en individuos o grupos de alta susceptibilidad (variabilidad individual de umbral de respuesta a los efectos) de muy difícil detección aún por investigaciones.
100 - 199	Deficiente	Sobrepasa entre 100 - 199 % el valor de la Cma prescrito en la NC 39. Ligero incremento en la frecuencia y severidad de los efectos adversos agudos y crónicos en la población general y principalmente en personas con enfermedades cardiovasculares, respiratorias y alérgicas y en otras de elevada susceptibilidad, solo detectables mediante investigaciones muy específicas y sensibles.
200 - 299	Mala	Supera entre 2 y 3 veces (200 – 300 %) el valor de la Cma . Aumento de la frecuencia y gravedad de los efectos adversos en grupos de alta susceptibilidad y en la población general, ya medibles mediante investigaciones específicas a escala individual y ecológica, basadas en registros morbilidad. Da lugar a una SITUACIÓN DE ATENCIÓN .
300 - 499	Pésima	Supera entre 3 y 5 veces el valor de la Cma . En dependencia del incremento de la concentración del contaminante y el tiempo de exposición continua el aumento de la frecuencia y gravedad de efectos adversos en los grupos de alta susceptibilidad y en la población general. Da lugar a una SITUACIÓN DE ALERTA .
≥ 500	Crítica	Se supera el límite de 5 veces la Cma , dando lugar a un incremento aún mayor del riesgo o probabilidad de ocurrencia de los efectos adversos sobre la salud de la población general y en grupos de riesgo, que se traduce en un evidente incremento agudo de la morbilidad y mortalidad que sobrecarga los servicios asistenciales; da lugar a una SITUACIÓN DE EMERGENCIA AMBIENTAL .

Fuente: NC-111-2004