



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

Trabajo de Diploma

En Opción al Título de Ingeniero Mecánico

Título: Diagnóstico energético de los generadores de vapor del Complejo Agroindustrial Dos Ríos.

Autora: Yamilé Frómeta Carbó

Tutor: M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja.

Moa - 2010

“Año 52 de la Revolución”



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

Trabajo de Diploma

En Opción al Título de Ingeniero Mecánico

Título: Diagnóstico energético de los generadores de vapor del Complejo Agroindustrial Dos Ríos.

Autora: Yamilé Frómeta Carbó

Tutor: M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja.

Moa - 2010

“Año 52 de la Revolución”



Declaración de autoridad

Yamilé Frómeta Carbó, autora de este trabajo y los tutores M.Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja e Ing. Juan Manuel Ortuño declaramos la propiedad intelectual del mismo al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico y el CAI Dos Ríos de Palma Soriano, para que dispongan de su uso cuando estimen conveniente.

Yamilé Frómeta Carbó

M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja

Ing. Juan Manuel Ortuño



Pensamientos

Lo fundamental es que seamos capaces de hacer cada día, algo que perfeccione lo que hicimos el día anterior.

*Ernesto Guevara de la Serna
El Guerrillero Heroico*

“... La vida debe ser diaria, móvil, útil y el primer deber de un hombre de estos días, es ser un hombre de su tiempo. No aplicar teorías ajenas, sino descubrir las propias. No estorbar a su país con abstracciones, sino inquirir la manera de hacer prácticas las útiles. Si de algo serví antes de ahora, ya no me acuerdo: lo que quiero es servir más...”

*José Martí Pérez.
Apóstol Nacional de Cuba*

“El que no sea capaz de sacrificarse, que al menos tenga el pudor de callar ante el sacrificio de los demás”

*José Martí Pérez.
Apóstol Nacional de Cuba*



Agradecimientos

En la realización de este trabajo, he contado con el apoyo valioso de muchas personas, que se esforzaron para que el mismo quedara con la mayor calidad posible, es por ello que he querido dejar constancia de mi agradecimiento.

A la Revolución cubana por darme la oportunidad de ser una profesional después de tantos años.

A Blanquita por haberme localizado para la culminación de mis estudios.

A Murphys por haberme apoyado a tener confianza en mí misma y por hacerme entender de que sí podía terminar mis estudios.

A mi padrastro Gilberto Valdéz, por darme el aliento necesario para poder continuar y terminar mis estudios. A mi papá Manuel Frómeta, porque aun estando enfermo me apoyó en todo momento.

A mi tutor Yoalbys y a su esposa, por la confianza depositada y su ayuda abnegada durante la realización de la tesis. A los profesores, Marbelis y Yodelkís, por insistir en ayudarme a obtener buenos resultados, en el transcurso de mi carrera.

A mi esposo Francisco Reyes, mi mamá Migdalia Carbó y mi niño Gleiser Reyes por apoyarme en todos los momentos difíciles de mi vida.

A toda mi familia, en especial a mi hermano Roberto. A mis amigos especiales (Idálmis, Ana María, Nivia y Evaristo). A mis amistades Deisy, Maricelis, Osláida, Mariela, Ana Celia y Alexander.

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

A los nombrados hoy y a quienes imperdonablemente no he podido recordar mis agradecimientos sinceros y desde mi corazón.

A todos muchas gracias

La Autora



Dedicatoria

Dedico este trabajo en especial a mi hijo Gleiser Reyes, mi madre Migdalia Carbó y a mi esposo Francisco Reyes que siempre confiaron en mí y se que se sienten orgullosos porque he materializado este sueño.

A mi padre Manuel Frómeta y mi hermano Roberto Frómeta que desde el fondo de sus corazones se sienten satisfecho con mi resultado.

A mis tutores M. Sc. Yoalbys Retirado Mediaceja e Ing. Juan Manuel Ortuño por su dedicación durante el desarrollo de la investigación.

A Blanquita y Murphis por apoyarme en mi regreso a la universidad.

A mis vecinos que siempre me demostraron preocupación por mis estudios.

A la profesora M. Sc. Marbelis Lamorú Urzelles que lo ha dado todo porque logremos las metas propuestas.

A la Revolución Cubana por darme la posibilidad de ser una profesional. Al Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz quien siempre ha velado por el bienestar del ser humano. A Dios y a la Virgen con todo mi amor.

A todos les dedico este éxito

La autora



Resumen

En el presente trabajo se realizó un diagnóstico energético de los generadores de vapor utilizados en el Complejo Agroindustrial Dos Ríos del municipio Palma Soriano, para ello se emplearon los métodos directo e indirecto establecidos para el balance térmico de estos equipos. Se comprobó mediante la evaluación realizada que los dos generadores de vapor tienen bajos rendimientos térmicos y exergéticos, los cuales fueron igual a 69,923 y 30,890% respectivamente. El consumo de Bagazo en las instalaciones osciló entre 31,407 y 30,250 t/h y los gastos económicos asociados al mismo ascendieron a 11396972,2 y 10977301,4 USD para los seis meses considerados en la investigación. Se verificó que en la instalación existen afectaciones permanentes al medio ambiente a través de las emanaciones de los gases producto de la combustión y del vertimiento de residuos líquidos y sólidos.



Abstract

Presently work was carried out an energy diagnosis of the generators of vapor used in the Agroindustrial Complex Dos Ríos, for they were used it the established direct and indirect methods for the thermal balance of these teams. Was proven by means of the carried out evaluation that the two generators have low thermal and exergetic, which went similar to 69,923 and 30,890%. The consumption of Trash in the facilities oscillated between 31,407 and 30,250 t/h and the economic expenses associated to the same one they ascended 11396972,2 and 10977301,4 USD for the six months considered in the investigation. It was verified that in the installation permanent affectations exist to the environment through the emanations of the gases product of the combustion and of the spill of liquid residuals and solids.



Índice

Contenido	Págs.
Introducción.	1
Capítulo 1. Marco teórico de la investigación.	4
1.1- Introducción.	4
1.2- Estado del arte sobre los generadores de vapor acuotubulares.	4
1.3- Trabajos precedentes.	9
1.4- Breve reseña histórica del Complejo Agroindustrial Dos Ríos.	12
1.5- Descripción del flujo tecnológico del Complejo Agroindustrial Dos Ríos.	13
1.6- Descripción del flujo tecnológico de la CTE del CAI Dos Ríos.	15
1.7- Conclusiones del capítulo 1.	26
Capítulo 2. Diagnóstico térmico y exergético de los generadores de vapor pertenecientes al Complejo Agroindustrial Dos Ríos.	27
2.1- Introducción.	27
2.2- Materiales empleados en las mediciones de los parámetros.	27
2.3- Procedimiento de cálculo para el balance térmico y exergético de los generadores de vapor que operan en el Complejo Agroindustrial.	29
2.4- Datos obtenidos en la instalación para los diferentes generadores de vapor.	39
2.5- Balance térmico y exergético de la instalación.	40
2.6- Conclusiones del capítulo 2.	44
Capítulo 3. Análisis de los resultados de la investigación, valoración económica e impacto ambiental asociados a las instalaciones.	45
3.1- Introducción.	45
3.2- Análisis de los resultados de la investigación.	45
3.3- Valoración económica.	49
3.4- Impacto ambiental asociado a los generadores.	51
3.5- Conclusiones del capítulo 3.	58
Conclusiones.	59
Recomendaciones.	60
Referencias Bibliográficas.	61
Anexo.	-

Introducción

El vapor de agua desde la revolución industrial hasta la actualidad ha jugado un papel esencial en el transporte de energía para diferentes aplicaciones industriales, debido al impetuoso desarrollo tecnológico e industrial que ha alcanzado la sociedad moderna, se hace difícil predecir cuan importante será en lo adelante el vapor de agua, pero se vislumbra un futuro que inevitablemente estará estrechamente ligado a este agente de transporte de energía, de ahí que se haga necesario obtenerlo con la mayor eficiencia posible, máxime si se trata de Cuba que es un país bloqueado económicamente donde los recursos energéticos son limitados (Fonseca, 2009).

Incrementar la eficiencia de los generadores de vapor que componen los Complejos Agroindustriales es una prioridad de los dirigentes de dichas entidades y del estado cubano, debido entre otros factores, a que en los últimos años la industria azucarera ha tenido un retroceso en los niveles de producción y exportación, a tal punto que la dirección del país decidió demoler 70 centrales que trabajaron muchos años con baja eficiencia, lo que generó pérdidas económicas al estado con la consiguientes afectaciones sociales que esto trae consigo.

En el país existen actualmente un gran número de centrales azucareros que tienen la función de producir el azúcar para el consumo de los ciudadanos cubanos y la destinada a la exportación, así como los múltiples derivados (aromatizantes, bebidas y licores, pastas y caramelos, alimentos para los centros porcinos y las empresas ganaderas, entre otros) que se obtienen en el proceso de fabricación. Sin embargo, se conoce por los reportes técnicos y estadísticos que un por ciento elevado de estos centrales trabajan con baja eficiencia productiva haciendo que el gobierno tenga que erogar sumas millonarias para mantener en funcionamiento estas empresas.

Como regla general la tecnología de estos centrales datan del siglo pasado (antes de 1959) y aunque el estado cubano ha modernizado algunas de las empresas azucareras, en la actualidad los equipos tecnológicos utilizados tienen un periodo de explotación que excede la vida útil de los mismos, esta situación provoca una lógica disminución de la eficiencia y un incremento considerable de los gastos por concepto de mantenimiento en las diferentes plantas de proceso.

Una de las plantas fundamentales dentro el proceso tecnológico de un Complejo Agroindustrial (CAI) es la Central Termoeléctrica (CTE), la misma tiene gran importancia dentro de la entidad porque además de generar una porción de la energía eléctrica que se consume en el proceso productivo, produce el vapor necesario para los diferentes procesos que se derivan, teniendo así múltiples funciones de gran importancia para la producción de azúcar. En las CTE se encuentran los generadores de vapor, estos equipos son los más importantes de la planta y en las industrias azucareras utilizan como combustible el bagazo obtenido como un subproducto del proceso principal.

Aunque el bagazo en los CAI se obtiene de forma segura y económica, la explotación de los generadores con este combustible trae asociado una serie de problemas entre los que se destacan: la baja eficiencia térmica y exergética de estos equipos, provocada entre otras causas por el bajo poder calórico y el elevado contenido de humedad que tienen el bagazo respecto al petróleo. A lo anterior se adiciona el hecho de que en la mayoría de los centrales aunque se registran sistemáticamente los parámetros del proceso, no se realizan evaluaciones térmicas y exergéticas de los generadores. En general estos valores se desconocen en estas empresas.

El CAI Dos Ríos ubicado en el municipio Palma Soriano no está ajeno a estas problemáticas y es por ello que la autora considera importante el diagnóstico térmico y exergético de los dos generadores de vapor existentes en la CTE.

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

El desconocimiento de las eficiencias térmicas y exergéticas de los generadores de vapor que integran el sistema de generación del Complejo Agroindustrial Dos Ríos, para las condiciones actuales de explotación.

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

Los generadores de vapor del Complejo Agroindustrial Dos Ríos, ubicado en el municipio Palma Soriano.

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

Si se realiza un diagnóstico energético de los generadores de vapor estudiados y se conjuga con los métodos existentes para el balance térmico y exergético de estos equipos, entonces es posible determinar las eficiencias térmicas y exergéticas de los equipos objeto de estudio.

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

Determinar las eficiencias térmicas y exergéticas de los generadores de vapor pertenecientes al Complejo Agroindustrial Dos Ríos.

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

- 1- Actualizar el estado del arte relacionado con los generadores y los sistemas de producción de vapor.
- 2- Ajustar los procedimientos de cálculo establecidos en las literaturas científicas para la evaluación térmica de los generadores de vapor a las instalaciones estudiadas.
- 3- Realizar el diagnóstico térmico y exergético de los generadores de vapor.
- 4- Analizar los resultados obtenidos en el cálculo de las eficiencias térmicas y exergéticas de las instalaciones productoras de vapor.
- 5- Establecer los gráficos de comportamiento de los principales parámetros del proceso.
- 6- Valorar los impactos económico y ambiental asociados a los generadores de vapor del CAI Dos Ríos.

Capítulo 1

Marco teórico de la investigación

1.1- Introducción

El marco teórico constituye un aspecto importante de la investigación porque permite estudiar y sistematizar la teoría existente, los trabajos precedentes y otros aspectos de interés relacionado con el objeto de estudio. Toda investigación debe estar sustentada por un marco teórico que caracterice adecuadamente al objeto investigado, es por ello que el objetivo del capítulo es:

Desarrollar el marco teórico necesario para la evaluación térmica y exergética de los generadores de vapor del CAI Dos Ríos.

1.2- Estado del arte sobre los generadores de vapor acuotubulares

Los primeros tipos de calderas usadas para la producción de vapor a mediados del siglo XVIII fueron los generadores de tubos de fuego. Pero con estas no pudo obtenerse una capacidad evaporativa alta pues para ello se requería que el diámetro del domo fuese cada vez mayor.

Entonces comenzó a trabajarse en una segunda dirección, ensayándose un tipo de caldera en la cual el agua y el vapor circulaban por dentro de bancos de tubos, pasando los gases de combustión sobre la superficie exterior. Tales calderas se denominaron “de tubos de agua”.

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

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

países se construyeron centrales de alta presión muy limitadamente hasta fines de la Segunda Guerra Mundial.

Durante el primer periodo de la aparición de la alta presión (1925 a 1930) en las primeras calderas se confrontaron serias dificultades con la circulación, así como con la corrosión. Además las calderas de tubos de agua verticales de varios domos de aquel tiempo resultaban muy costosas a consecuencia del alto precio de los domos completamente forzados y las calderas de tubos de agua horizontales presentaban dificultades en su hermeticidad y en la propia circulación.

Todo esto en conjunto con el estudio de nuevos esquemas y concepciones, permiten el surgimiento de las calderas de circulación forzada (1930 a 1945), muy utilizadas para agregados de presión media y en la década del 50 para altas presiones (140 a 180 atm); y las calderas de circulación continua, que resultaron ventajosa no solo para presiones supercrítica sino también para altas presiones subcríticas (140 atm y superiores)

La caldera de circulación forzada es análoga en su esquema a la caldera de circulación natural y solo se diferencia en que introduce en el circuito de circulación una bomba. Sin embargo la inclusión de esta bomba provoca una serie de particularidades y cambios en la construcción y explotación de calderas.

La presencia de la bomba amplía las posibilidades de disposición de la superficie de transferencia en su conjunto la situación de los tubos evaporativos no influye en la carga de circulación necesaria para lograr la circulación natural.

Por otro lado la alta carga que provoca la bomba permite utilizar para los tubos evaporativos diámetros pequeños y considerables longitudes, además de que en algunos diseños se utiliza parte de dicha carga para lograr la separación centrifuga del vapor en el domo (ciclones), lo que permite disminuir las dimensiones del domo.

La independencia de la carga de circulación con respecto a la carga de la caldera y por consiguiente la presencia de una alta velocidad de circulación para todas las evaporaciones e incluso durante el encendido de la caldera resulta una característica muy importante que logra un calentamiento homogéneo de toda la caldera durante el encendido y además permite utilizar como superficie evaporativas no solo aquella cuyo movimiento es descendente.

Esta ventaja provocó una rápida propagación de las calderas con circulación forzada en las instalaciones energéticas de la industria y en calidad de agregado utilizando gases de escape de hornos y motores de combustión interna, donde se requería una amplia libertad de disposición de los esquemas, así como la posibilidad de sustituir el domo en cualquier lugar relativo a la superficie de transferencia.

En las estaciones potentes la utilización de la circulación forzada para presiones medias y aun para las altas presiones (80 a 100atm) no afreció mayores ventajas en composición de los esquemas evaporativos, entre otras cosas, porque estas instalaciones carecen de superficie evaporativas convectivas.

Por el contrario, la presencia de la bomba aumenta el gasto de energía además de que la bomba en si mismo resultaba costosa y su sellaje para la elevada temperatura del agua (250 a 330 °C) provocaba dificultades.

Por esta razón hasta 1950 estas calderas fueron pocos utilizadas en las estaciones potentes. Solamente cuando comenzaron a utilizarse presiones de 140 a 180 atm fue que se emplearon ampliamente cuando ya la circulación natural no garantiza un trabajo seguro de las superficies evaporativas sobre todo a cargas parciales.

La caldera con circulación continua, por otro lado, si se diferencia considerablemente de los esquemas anteriores, es decir, de las calderas con domo.

En la caldera de circulación continua no solo en el economizador y en el sobrecalentador sino también en al superficie evaporativa el agua y el vapor circulan solo una vez de manera que en la superficie evaporativa el agua circula por los tubos hasta su completa conversión en vapor.

En las calderas de circulación continua no se requiere, y por tanto no existe, el separador del agua del vapor (domo) y el agua de alimentación transcurre sucesivamente por el economizador, superficie evaporativa y sobrecalentador.

En las calderas de circulación continua también se diferencian considerablemente de las calderas con domo en lo que a calidad del agua se refiere.

En las calderas con domo se realizan las purgas que eliminan parte de la sales que en el domo se acumulan. Esto permite utilizar, para alimentar dicha caldera, agua con un contenido relativamente alto de sales.

En las calderas de circulación continua la evaporación en los tubos es total y los sólidos se depositan en las paredes de estos o son arrastrados con el vapor.

Para altas presiones las sales de sodio son muy solubles en el vapor. Es por ello que su contenido en el agua de alimentación de las calderas de circulación continua no debe ser mayor que su contenido permisible en el vapor. Además, la imposibilidad de extraer estas sales con las purgas requiere organizar su extracción del ciclo.

Todo esto encarece el tratamiento del agua en las estaciones de calderas de circulación continua, sobre todo en aquellas con grandes pérdidas de condensado cuando se requiere desmineralizar considerables cantidades de agua cruda para reponer las pérdidas.

En realidad esta diferencia entre las calderas con domo y la de circulación continua se atenúa cuando la presión aumenta pues en este caso también resulta necesario alimentar agua convenientemente desmineralizadas en las calderas con domo.

Por otro lado las calderas de circulación resultan más baratas al carecer de domo y en general los tres tipos de caldera poseen una u otra ventaja y todas se utilizan en mayor o menor grado.

Un método más efectivo de aumentar la eficiencia de las estaciones resultó la utilización del recalentamiento, de manera que desde 1955 todos los nuevos generadores de vapor que construyeron con recalentador para alcanzar en éste una temperatura del valor cercana a la inicial.

Con el crecimiento de la presión se elevó la temperatura del agua de alimentación, ya en las calderas de 100atm el calentamiento regenerativo del agua fue elevado hasta 215 °C.

Posteriormente, sin embargo, el desarrollo del calentamiento regenerativo disminuyó y actualmente, aun en instalaciones supercríticas, la temperatura del agua de alimentación no es mayor generalmente de 280 °C.

En esta condiciones aumentó bruscamente el error del sobrecalentador después de la segunda guerra mundial los combustibles aumentaron el precio en la mayoría de los países, lo que hizo conveniente disminuir la temperatura de los gases de escape entre 120 y 130 °C.

Los generadores de vapor de las instalaciones energéticas de alta potencia son agregados muy complejos.

Todos los procesos de dicha caldera se encuentran mecanizados y automatizados. La caldera posee muchos mecanismos auxiliares, instrumento y decenas de motores eléctricos algunos de los cuales de miles de kW de potencia.

Las dimensiones de este generador son: altura de 35 a 45 m, ancho y profundidad 25 a 35m. El peso metálico alcanza 3500 a 4500 toneladas. Siendo mayores los generadores de vapor que trabajan con turbinas de 500 a 1000 MW.

En 1965 el generador de vapor más potente que se construyó en Estados Unidos tenía una evaporación de 3000 t/h. En la Unión Soviética ya se han construido con evaporaciones de 1500 a 2400 t/h.

Los generadores de vapor moderno, de alta capacidad producen vapor a alta presión (140 a 240 atm) y alta temperatura (540 a 570 °C), estas calderas, como regla, recalientan el vapor hasta una temperatura cercana a la inicial, después que este ha pasado por la etapa de alta presión de la turbina cuando su presión cae, por ejemplo hasta 25 o 35 atm y temperatura hasta 350 °C.

Las calderas de menor evaporación producen vapor para turbinas de poca o media capacidad con parámetros más bajos, careciendo de recalentamiento.

Los generadores de vapor de capacidad media (160 a 640 t/h), se construyen para presiones de 140 atm sin recalentamiento o con un paso de recalentamiento.

Los generadores de vapor de 950 t/h y mayores se construyen para una presión de 255 atm con un paso de recalentamiento.

En la actualidad la generación de vapor en las calderas de tubos de agua, no se ve limitada como las de tubos de fuego por la superficie de transferencia de calor, pues colocando mayor cantidad de tubos esta puede incrementarse cuanto se desee, dentro de límites lógicos de diseño, ello permite que estas calderas logren grandes generaciones de vapor.

Las calderas de tubos de agua se utilizan ampliamente en las empresas industriales, centrales azucareros, refinerías, fábricas de papel, de fertilizantes y muchas otras, las mismas se clasifican en: de tubos rectos, de tubos curvos, así como generadores de grandes potencia.

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

1.3- Trabajos precedentes

En el desarrollo de la investigación se consultaron los trabajos científicos-técnicos relacionados con el diagnóstico térmico y exergético de los generadores de vapor empleados en las diferentes centrales termoeléctricas, los más importantes según el criterio de la autora se analizan a continuación: Carcallido (1999) demuestra que en el CAI Guatemala el 62% de la exergía total del proceso se pierde por irreversibilidad en los procesos de combustión y transferencia de calor, luego obtiene el rendimiento térmico y exergético de la instalación los cuales fueron de 75 y 38% respectivamente.

Muñoz (2001) realizó la selección del esquema térmico de cogeneración para la producción sostenida de electricidad durante todo el año en el CAI Argeo Martínez, a través de criterios técnicos y económicos se calculan los indicadores energéticos que caracterizan a las instalaciones de este tipo.

En la empresa René Ramos Latour Del Valle (2002) realiza una evaluación verificativa de la eficiencia en la planta termoeléctrica de esta empresa, a partir de la instalación de dos generadores de vapor, en este trabajo se establecen comparaciones con parámetros anteriores del mismo proceso lo que demostró que hubo un aumento considerable de la eficiencia en la producción de níquel hasta el 95%.

Abreu (2003) desarrolló una evaluación de la eficiencia del generador de vapor 10 de la CTE basándose en este trabajo el autor realizó un cálculo verificativo de la eficiencia de la instalación, teniendo en cuenta la utilización de crudo nacional mejorado y la aplicación de la tecnología aditivación–emulsión del combustible, permitiéndole llegar a las conclusiones de que la tecnología de aditivación logró incrementar la eficiencia del generador de vapor en 1,1% y que debe mejorarse en lo que respecta al ensuciamiento del calentador de aire regenerativo, con la misma se logra disminuir las emisiones de contaminantes al medio ambiente.

Suárez (2005) realizó un diagnóstico del sistema de generación de la central termoeléctrica de la empresa antes mencionada, en este trabajo el autor muestra un análisis del proceso de generación de vapor existente en la instalación y expone resultados importantes basados en el estudio detallado de los generadores de vapor presente en el proceso, este trabajo muestra además varias recomendaciones que constituyen un punto de partida para el correcto análisis térmico de las instalaciones productoras de vapor.

Suárez (1999) desarrolló el cálculo térmico del ciclo de generación de la central termoeléctrica, para ello realizó el balance térmico de la instalación, en esta investigación se demuestra que es posible disminuir el consumo de electricidad de la red nacional a partir de la explotación racional de la capacidad instalada. Al estudiar la posibilidad del autoabastecimiento de electricidad por parte de la propia empresa y en correspondencia con la propuesta estudiada en el trabajo, el autor plantea que la eficiencia de la cogeneración es de un 72% y el tiempo de recuperación de la inversión es menor de 5 años.

Muhica (2001) efectuó la evaluación termoeconómica del ciclo de la central termoeléctrica de la entidad, el trabajo está encaminado a facilitar la toma de decisiones en la modernización y expansión de la planta, para ello se determinan los principales indicadores del ciclo térmico modernizado, también la investigación expone el cálculo de las pérdidas de energía que ocurren en los equipos tecnológicos principales de la central termoeléctrica, el impacto económico y ambiental de la propuesta estudiada.

Rodríguez (2001) realiza un análisis del petróleo crudo nacional empleado en la fábrica a partir de los elementos químicos que lo componen haciendo referencia a los efectos que producen cada uno de ellos durante su almacenamiento, transportación y quema en las instalaciones de la empresa.

El trabajo muestra algunas recomendaciones prácticas para la manipulación y quema del combustible, basado en la experiencia práctica aplicada en la planta de secaderos de la fábrica antes mencionada. Algunas de las conclusiones llegadas por el autor en este tema tan importante para la economía cubana se relacionan a continuación:

- Con el tratamiento químico adecuado y operando con niveles de aire bajos en la caldera se incrementa sustancialmente la producción de CO_2 , se garantiza la

limpieza en las superficies de transferencia de calor y se reduce al mínimo la velocidad de corrosión de los metales.

- El crudo mejorado tiene influencia directa en el potencial de corrosión de los electrofiltros y tratado con aditivo organometálico de base magnesio es posible controlar el potencial de corrosión a valores similares o inferiores alcanzados por el petróleo regular.

Tuzón (2005) realiza el diagnóstico térmico del generador de vapor 1, los resultados mostrados por el mismo demuestran una baja eficiencia térmica y exergética de los generadores instalados, estando la primera en el orden del 86%. Esta situación implica la sustitución de estas calderas con el propósito de elevar la eficiencia del proceso.

Hernández (2006) realizó el diagnóstico térmico de los generadores de vapor insertados por la compañía eslovaca para los valores teóricos y nominales. Fonseca (2009) estudió energéticamente estos mismos generadores una vez que se pusieron en explotación.

Caballero y González (2007) realizaron el diagnóstico térmico de los generadores de vapor insertados en la industria del níquel en Moa, calculando el rendimiento térmico, determinaron los consumos de combustibles asociados a los generadores de vapor y el por ciento de incidencia que tenían en sus respectivas empresas, en el sector industrial y en el municipio.

Un trabajo similar fue desarrollado por Rivera y Regüíferos (2007) quienes realizaron cálculos análogos para las calderas de las empresas presupuestadas del municipio de Moa, siendo objeto de estudio los generadores de vapor del ISMM, la lavandería, el combinado lácteo, los hospitales Guillermo Luís Hernández y Pedro Sotto Alba. En la investigación se detectaron numerosas deficiencias que inciden en la baja eficiencia térmica y exergética de las instalaciones estudiadas.

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

Fonseca (2009) realiza el análisis termoexergético de los generadores de vapor de la empresa Ernesto Che Guevara concluyendo que los rendimientos térmicos promedios calculados por los métodos directo e indirecto fueron superiores al 90% para los generadores de vapor 6 y 7. Los rendimientos exergéticos calculados por el investigador ascendieron a 48,14%, y 45,97% para los equipos analizados. Finalmente expone que las diferencias obtenidas entre los rendimientos térmicos promedios y los rendimientos exergéticos fueron de 44,29% y 45,16%.

Góngora (2009) diagnóstica energéticamente los generadores de vapor, deareadores y calentadores de agua de la empresa Pedro Soto Alba. El autor al confirmar que las eficiencias térmicas de los generadores de vapor analizados es superior al 89% la considera satisfactoria. Luego recomienda una serie de medidas técnicas organizativas para aumentar los rendimientos exergéticos de los generadores, los cuales no superan el 55%. Al calcular el calor absorbido por el agua en los deareadores y calentadores fue superior a los 3 MW.

Como se aprecia existe una amplia variedad de trabajos dedicados al diagnóstico térmico y exergético de los generadores de vapor en el sector industrial, pero solo se reportan dos estudios realizados en Centrales azucareros, pero ninguno se desarrolló en la CTE del CAI Dos Ríos ubicado en el municipio Palma Soriano, por tanto se requiere la realización de la presente investigación para establecer el estado actual de los parámetros de eficiencia térmica y exergética del objeto de estudio.

1.4- Breve reseña histórica del Complejo Agroindustrial Dos Ríos

En 1914 como parte de los negocios del General Mario García Menocal, entonces presidente de la República de Cuba se comenzó a estudiar la construcción de un central azucarero en las orillas del río Cauto en Palma Soriano en el lugar conocido como Vega Sucia cercano al actual batey. A finales del mismo año, se comienza la ejecución del ferrocarril, puentes, siembra de caña y en 1915 se termina el CAI, comenzando la primera zafra el 9 de enero de 1916.

La maquinaria inicial estaba constituida por una Tanden eléctrico con una capacidad de molienda de 100 mil arrobas diarias, 500 caballerías de caña, 20 km de vía férrea, 4

locomotoras de vapor y 200 carros de jaula. En 1917 debido al crecimiento azucarero que provocó la primera Guerra Mundial se montó un segundo Tandén eléctrico.

En esa misma época y como parte del negocio se construyen panaderías, bodegas, fábricas de hielo, farmacias y una sociedad de blancos recreativos culturales, el batey tuvo gran auge en esta época.

En 1921 Menocal, principal accionista de la caña vende el central a la compañía norteamericana Dominican Sugar Company, succidiaria de la Guess Indies. Conocida por los métodos autocráticos de administración, se cambia la administración cubana por una norteamericana. Esta administración hizo gala de un total desprecio de las costumbres, cultura y forma de vida de los residentes cubanos en el batey, quitando sin ninguna explicación algunas mejoras y formas de vida existentes.

En esta época se expandió el ferrocarril hasta la colonia de Barranca y se construyeron bateyes cercanos a las grúas. En 1926 los nuevos accionistas cambian el nombre del central nuevamente denominándolo entonces “Sugar Sthey of Oriente Incorporation” nombrándose administrador a un ciudadano norteamericano. Los años siguientes que antecedieron al triunfo de la Revolución el central fue administrado continuamente por los empresarios que respondían a los intereses de Estados Unidos y a partir de 1959 el Gobierno Revolucionario confiscó esta empresa azucarera y la ha administrado hasta la actualidad bajo el nombre de Complejo Agroindustrial Dos Ríos.

1.5- Descripción del flujo tecnológico del Complejo Agroindustrial Dos Ríos

El proceso tecnológico para la obtención del azúcar en el CAI consta de varias etapas, las mismas se exponen a continuación:

1. Preparación de la caña

Es la primera operación que se realiza en la fábrica y tiene como objetivo fundamental romper su corteza exterior y llegar hasta las celdas donde se encuentra contenida la sacarosa para facilitar su extracción.

2. Extracción del jugo

Se lleva a cabo en la planta moledora, para ello es necesario sumar al alto grado de preparación obtenida la aplicación de la maceración combinada y presiones hidráulicas.

3. Purificación del jugo

Tiene como objetivo alcanzar la mayor separación posible de impurezas presentes en el jugo logrado, que en su mayoría salgan en forma de cachaza seca a partir de las siguientes operaciones:

Alcalización, se encala el guarapo por medio de la adición de lechada de Cal diluida en una porción que va desde 500 hasta 650 gramos.

Decantación, es la operación de ingeniería a la que se somete el jugo en los clarificadores después de alcalizados para completar la reacción de formación y sedimentación de los flóculos de fosfatos tricálcicos para lograr una perfecta separación de dos fases (jugo claro y cachaza).

4. Evaporación

Se lleva a cabo la evaporación del 73 al 75% del agua presente en los evaporadores a simple y múltiple efectos, lográndose con este proceso concentrar el jugo.

5. Cristalización y cocción

En los tachos y equipos auxiliares se continúa la evaporación, ahora más lenta hasta obtener el grano de azúcar cristalizado, a partir de aquí el proceso deja de ser continuo, pues la cristalización y el contenido de los granos de azúcar en los tachos es hasta hoy en la mayoría de los ingenios un proceso discontinuo

6. Centrifugación

Con esta operación se realiza la última etapa de purificación, quizás la de mayor trascendencia, toda vez que se logra separar el cristal de azúcar de su licor madre, las masas de azúcar comercial se centrifugan en máquinas a batche, con posibilidades de lavarlas a dos velocidades diferentes con un tiempo total de centrifugación que permite un secado adecuado a las especificaciones de la calidad que debe cumplir el ingenio.

7. Secado

En la producción de azúcar crudo esta operación solo se utiliza en determinados ingenios comprometidos con producciones específicas, se realiza con equipos que

extraen parte de la humedad para obtener valores que garanticen una conservación más adecuada del producto terminado (actualmente en el CAI Dos Ríos no se seca el producto)

1.6- Descripción del flujo tecnológico de la CTE del CAI Dos Ríos

La planta termoenergética es la encargada de producir y distribuir los portadores energéticos necesarios para el proceso tecnológico, tiene como equipos fundamentales 2 generadores de vapor y 2 turbogeneradores de 4MW de potencia.

Las áreas de mayor influencia en el proceso de producción de vapor se describen a continuación; las restantes se detallan en la bibliografía consultada (Manual de operaciones de la CTE del CAI Dos Ríos, 1995).

Descripción de los generadores de vapor analizados

Parámetros generales de las calderas

- Cantidad de generadores	2
- Producción de vapor nominal de caldera	60 t/h
- Presión nominal del vapor sobrecalentado	18 atm
- Temperatura nominal del vapor sobrecalentado	320°C
- Temperatura de agua de alimentación	110-115°C

Área de generación de vapor

La función principal de los generadores de vapor, es proporcionar el vapor necesario para el proceso. Los mismos están compuestos por los siguientes elementos: Horno, Quemadores, Separador de vapor, Sistema de purga, Ventiladores, Cimientos y soportes, Calentadores de aire, Economizadores, Sobrecalentadores y otros accesorios.

Agua de alimentación a los generadores de vapor

Es el agua que se introduce en las calderas para convertirse en vapor. Si se trata de condensados recuperados, presentará pocos problemas, pero si es agua cruda, habrá necesidad de liberarla del oxígeno, precipitados, sólidos en suspensión, sustancias incrustantes y otros elementos contaminantes.

La presencia de estos elementos que provocan la formación de incrustaciones, espumas o arrastres de agua en el vapor afecta desfavorablemente el funcionamiento de las calderas.

Para obtener altas eficiencias, el agua de alimentación es calentada por medio de economizadores. El agua necesaria para la alimentación de las calderas, depende directamente de la cantidad de vapor que se esté generando en ese instante, a la que se debe agregar la cantidad que se pierde por la extracción continua y los posibles puntos de fugas en válvulas y bombas, estos valores pueden estar alrededor del 10% y en algunos casos hasta el 20% del total del vapor generado.

Planta de tratamiento químico del agua

Es el conjunto de equipos utilizados para el acondicionamiento del agua, o mejorar las características físico-químicas del agua a utilizar en un determinado proceso, mediante la eliminación de impurezas.

Estas plantas están concebidas para producir alrededor del 20% del total de agua de alimentación como flujo máximo para cubrir los faltantes que se produzcan por salideros, vapor no recuperado, vapor contaminado, ente otros factores, el resto (80%) debe acoplarse de los condensados procedentes del proceso tecnológico.

La planta de tratamiento de agua típica esta compuesta por:

- ✓ Reactor clarificador
- ✓ Tanque para la preparación de coagulante
- ✓ Tanque dosificador de coagulante
- ✓ Mezcladora de cal
- ✓ Tanque de preparación de lechada de cal
- ✓ Dosificador de lechada de cal
- ✓ Filtros mecánicos
- ✓ Filtros catiónicos
- ✓ Bombas de salmuera
- ✓ Tanque de solución regeneradora de sal
- ✓ Tanque de agua para el contra lavado de los filtros mecánicos
- ✓ Tanque de agua para el contra lavado de los filtros catiónicos

La dureza total a la salida de la planta puede alcanzar 0 ppm en condiciones normales de trabajo. Flujos superiores a la capacidad de diseño originarían un empeoramiento de la calidad del agua tratada.

Características del agua de alimentación a las calderas

Esta agua procede de dos fuentes distintas:

- ❖ **Agua condensada del proceso tecnológico de la fábrica:** son las que provienen de las condensaciones del vapor en Tachos, Cuádruples, Pre- evaporadores y Calentadores, sus cantidades son suficientes para suplir el 100% de las necesidades de las calderas, siempre y cuando el manejo de los mismos sea correcto.
- ❖ **Agua procedente de la planta de tratamiento químico (en caso de que exista):** es la que se realimenta al proceso para compensar las pérdidas por evaporación del agua introducida inicialmente al proceso.

Las impurezas del agua se clasifican en cuatro grupos:

- 1) Sólidos disueltos.
- 2) Gases disueltos.
- 3) Sólidos suspendidos.
- 4) Organismos vivos.

Todos ellos provocan de forma directa o indirecta los siguientes problemas:

- ✓ Corrosión
- ✓ Incrustaciones
- ✓ Contaminación microbiológica
- ✓ Ensuciamiento.

Dentro de los sólidos disueltos se tienen,

- Sales (de calcio y magnesio causantes de incrustaciones)
- Alcalinidad
- Sílice y cloruro
- Sulfitos
- Hierro

El agua de alimentación tiene que reunir ciertas condiciones analíticas, en las cuales se determinan los valores de los parámetros medidos y los mismos serán en función de las presiones de trabajo a las cuales se opere.

❖ **Dureza**

En el caso que se presenten contaminaciones de dureza, se producen incrustaciones en distintas áreas de la caldera, debido a la disminución de la solubilidad a elevadas temperaturas de las sales de calcio y magnesio. Al alimentar calderas durante cierto tiempo con agua de alto contenido de dureza, comienzan los arrastres de sales en el vapor y con ello en el sistema de sobrecalentamiento del vapor y en los equipos primarios consumidores de este vapor con los daños correspondientes.

Para contrarrestar la dureza, se utilizan sales de sodio tales como:

- Fosfato
- Carbonato
- Hidrato

Cuando el suministro de Fosfato es excesivo, el mismo crea partículas coloidales finamente divididas que son muy difíciles de extraer y que provocan espumeo en el domo superior de las calderas.

❖ **Azúcar**

Las aguas contaminadas con azúcar, disuelven la capa protectora del metal dentro de la caldera por la formación de óxido de hierro, debilitando los tubos, colectores y domos de las mismas, creando serios problemas de corrosión.

En los casos que se produzcan contaminación de azúcar, hay que proceder a:

- Controlar de forma continuada la alcalinidad parcial en el agua de calderas, esto se logra con la adición de productos fuertemente alcalinos como el hidróxido de sodio o sosa cáustica.

Si la contaminación es muy elevada, deben sacarse de servicio las calderas, enjuagarlas y ponerlas nuevamente en marcha cuando toda el agua sea limpia y libre de azúcar.

❖ Aceite

Las contaminaciones de aceite son extremadamente nocivas para las calderas, afectan la pureza del vapor al ocasionar un gran espumeo en el interior de las mismas y además por la deposición grasosa de la superficie metálica dificulta la transferencia de calor.

El contenido de aceite no debe sobrepasar de 3mg/l, lo que puede lograrse instalando extractores de aceite o separadores de grasa a la descarga del vapor de los Tandem que tienen como equipos motrices máquinas de vapor, así como, controlando este parámetro en los tanques de condensado.

❖ Hierro

Un contenido excesivo puede provocar un gran espumeo dentro de la caldera por la formación de partículas coloidales finamente divididas. A temperaturas mayores de 120 °C en las calderas un exceso de hierro en el agua, combinado con un exceso de alcalinidad produce ácidos huminicos libres. Si por el contrario, el agua tiene poca alcalinidad se originan reacciones químicas indeseables que tienden a la formación de carbón, que a su vez produce una acción espumante.

El contenido de hierro puede controlarse de las siguientes formas:

- Limpiando todos los equipos y tuberías que intervienen en los sistemas de condensado y vapor.

- Conservando adecuadamente las calderas, deareadores y tanques en el periodo en que no se está produciendo la zafra.

Como se puede apreciar, el control del agua de alimentación de calderas es sumamente importante para el buen funcionamiento del equipo, porque la inestabilidad en la operación de las calderas provocadas por:

- Alto nivel de agua.
- Variaciones bruscas de carga.
- Fluctuaciones de nivel.
- Sobrecargas de generación.

Hacen que se genere vapor de baja calidad, lo que trae consigo arrastres de sales y por consiguiente la posibilidad de rotura de los sobrecalentadores fundamentalmente.

Es muy importante que en el área de generación de vapor, para cumplimentar el control y la supervisión de la misma se cumplan las siguientes medidas:

- ✓ Existencia de un libro de incidencias, donde se reflejen:
 - Los resultados de los análisis del agua de alimentación a las calderas.
 - Agua de alimentación de las calderas.
 - Frecuencia de los análisis.
 - Dosificaciones de productos químicos recomendados.
- ✓ No permitir la alimentación a calderas con aguas contaminadas de azúcar por encima de los parámetros permitidos, así como no permitir contenidos de aceite en el agua de alimentación.
- ✓ Mantener los valores de los parámetros de alimentación de calderas que se especifican para cada generador según sus presiones de trabajo o regulación del fabricante.

- ✓ Velar porque se creen las condiciones para el aprovechamiento máximo de las aguas condensadas.
- ✓ Velar porque se ejecute la aplicación de productos químicos.
- ✓ No usar agua cruda en la alimentación de las calderas. Esta solo se usara cuando no exista otra alternativa.
- ✓ Ejecutar el régimen de extracción de acuerdo a las orientaciones del laboratorio.

Características de las aguas de calderas de acuerdo a los rangos de operación

Presión en el Domo	Sólidos totales	Alcalinidad	Dureza	pH
10.5kg/cm ²	3500 máx.	800 ppm	0	11.5
17.5kg/cm ²	2500-3000max	300 ppm	0 – 5 ppm	11.0
28.0kg/cm ²	2500 max	280 – 300 ppm	0 – 2 ppm	10.5 – 11

Es importante la realización de análisis en el vapor generado por las calderas, lo que permite valorar la afectación que se está produciendo en los equipos consumidores. En el vapor se deben efectuar con una frecuencia de 2 horas aproximadamente determinaciones de alcalinidad parcial y total y con una frecuencia de cada 1 hora los sólidos disueltos, debiéndose obtener los siguientes valores,

Características del vapor

Parámetro	Frecuencia analítica	Valor norma
Alcalinidad parcial	Cada 2 horas	0
Alcalinidad total	Cada 2 horas	1.0 – 1.5 ppm
Sólidos disueltos	Cada 1 hora	2.0 ppm

Combustibles

Son sustancias que se queman en condiciones económicamente apropiadas para la obtención de grandes cantidades de calor. Para valorar la posible efectividad de la utilización de diversos combustibles en las calderas y de las condiciones que deben cumplirse para asegurar su correcto funcionamiento se utilizan las siguientes características termodinámicas generales:

- Humedad.
- Contenido y composición de las impurezas minerales.
- Contenido de Azufre.
- Valor calórico.

Además en la combustión de combustibles sólidos juegan un rol importante la emisión de sustancias volátiles y las propiedades del residuo carbonizado. Para la combustión de combustibles líquidos, son importantes junto con las características generales las siguientes:

- Viscosidad.
- Contenido de impurezas mecánicas.
- Temperatura de ignición.
- Temperatura de solidificación.
- Densidad.

Para ambos tipos de combustibles es común y de mucha importancia la humedad del mismo, su aumento provoca:

- 1) Disminución del calor de combustión del combustible debido al desplazamiento de las sustancias combustibles y al consumo del calor del combustible para la evaporación de la humedad.
- 2) Aumento del consumo de combustible para la misma capacidad de generación de la caldera.

- 3) Aumento del volumen de los productos de la combustión, lo que provoca aumento de la temperatura de los gases y aumento de la pérdida de calor en estos gases.
- 4) Aumento del consumo de energía en el accionamiento de los ventiladores de tiro inducido.
- 5) Empeoramiento de la combustión en el horno.
- 6) Empeoramiento de la movilidad del combustible en el conducto alimentador.

En el CAI Dos Ríos el combustible fundamental para producir el vapor, es el bagazo residuo del proceso de extracción de jugo de la caña.

Bagazo

Es un residuo ligno – celulósico fibroso, obtenido después de moler los tallos de caña a la salida del último molino, con el objetivo de extraerle el jugo. En Cuba representa aproximadamente el 33% por cada tonelada de caña procesada.

El bagazo como combustible renovable, tiene características particulares por lo que supera a otros combustibles fósiles.

Características del bagazo

El bagazo tiene una estructura básica formada por pequeñas fibras de 0.8 a 2,9mm, de longitud promedio 1,7mm, unido por un tejido llamado parénquima, que al sufrir el proceso de molienda tiende a convertirse en polvo, recibiendo el nombre de meollo o médula.

Composición física del bagazo

La composición física del bagazo depende de los siguientes factores:

- Variedad de la caña.
- Esquema de preparación y molienda de la caña en fábrica.
- Desgaste que sufren los equipos que realizan la molienda durante la zafra.

Composición aproximada del bagazo en Cuba

Parámetros	Valor aproximado (%)
Componentes fibrosos (de ellos)	40 – 46
Fibra	60 – 66
Médula	18 – 20
Componentes solubles en agua (principalmente azúcares)	6 – 8
Humedad	48 – 50

De los elementos de la composición, los más importantes son:

- La parte fibrosa, está compuesta en su generalidad por celulosa, lo que aporta la mayor cantidad de carbono y por lo tanto la mayor cantidad de calor al combustionarse el bagazo.
- La humedad determina en gran medida la eficiencia de la combustión. A valores muy altos de humedad, una gran porción del calor desprendido es utilizado para evaporar la humedad y calentar sus vapores.

Comportamiento del poder calórico del bagazo y el consumo de bagazo de una caldera en función de la humedad

Humedad (%)	Valor calórico inferior (kcal/kg)	Consumo de Bagazo (%)
44	2116	88
46	2019	92
48	1922	96
50	1855	100
52	1725	104
54	1631	108
56	1534	112

El incremento del consumo de bagazo es referido al consumo de la caldera en las condiciones de diseño (50% de humedad). En los valores mostrados se aprecia el incremento del consumo de combustible con el incremento de la humedad del bagazo, se debe señalar que la humedad afecta a todos los combustibles.

Desde el punto de vista industrial, el aumento de los azúcares en el bagazo, representa una disminución de la eficiencia en el Tandem, además de ser un elemento que ayuda a la degradación química del bagazo y puede producir autocombustión en su almacenaje.

Composición química del bagazo

La composición química del bagazo es variable, pero se pueden considerar como valores aproximados los siguientes,

Elementos	Intervalos de variación (%)
Carbono	43 – 49
Hidrógeno	5 – 7.5
Oxígeno	43 – 49
Cenizas	0.9 – 2.5 COSECHA MANUAL 2.2 – 5 COSECHA MECANIZADA

Las ventajas que posee el bagazo como combustible en comparación con otros combustibles fósiles es la casi ausencia de azufre, por lo que en los cálculos no se considera. La densidad del bagazo es otro parámetro a tener en cuenta y que influye en su almacenaje.

El bagazo sale de los molinos tiene una densidad de $100 - 140 \text{ kg/cm}^3$ y al estar almacenado en la casa de bagazo, el propio peso de la pila compacta al mismo y puede llegar a valores de 200 kg/cm^3 , todo esto considerando una humedad de 50%, esta humedad del bagazo tiene significativa importancia dada las características plásticas del bagazo, por lo que muchas veces se toma su densidad en base seca, donde los rangos de variación son más estrechos.

Otro aspecto a tener en cuenta cuando se almacena bagazo para su posterior utilización, es el crecimiento y desarrollo de microorganismos que se reflejan en pérdidas de fibras, presencia de fermentación con peligro de combustión espontánea y el consiguiente riesgo para la salud.

Calor de combustión

El calor de combustión del bagazo es bajo en comparación con los combustibles fósiles líquidos, teniendo en cuenta la humedad con que el mismo se utiliza, pero en base seca sus valores se aproximan al de algunas turbas.

Q_{Bagazo} para 50% de humedad oscila entre 1800 y 1900 kcal/kg

Q_{Bagazo} para 0% de humedad es igual a 4600 kcal/kg

1.7- Conclusiones del capítulo 1

- Quedó establecido el marco teórico que permite la evaluación térmica y exergética de los generadores de vapor analizados. El mismo contiene los aspectos teóricos, los trabajos precedentes y las particularidades más importantes relacionadas con el proceso investigado.
- No se reportan trabajos investigativos relacionados con la evaluación térmica y exergética de los generadores de vapor del CAI Dos Ríos, en general las investigaciones consultadas fueron desarrolladas en las instalaciones productoras de vapor de las empresas de servicio y de las industrias del níquel.

Capítulo 2

Diagnóstico térmico y exergético de los generadores de vapor pertenecientes al Complejo Agroindustrial Dos Ríos

2.1- Introducción

Los centrales azucareros tienen gran importancia para la economía del país por cuanto producen el azúcar que se destina al consumo de la población y a la exportación, también se genera una parte de la corriente eléctrica que requiere el CAI para su funcionamiento. Para desarrollar eficientemente estas funciones se deben explotar adecuadamente los generadores de vapor que se encuentran ubicados en las Termoeléctricas de los centrales, lo anterior es posible si se conocen las eficiencias térmicas y exergéticas con que trabajan los generadores, en este sentido el **objetivo** de este capítulo es:

Realizar el balance térmico y exergético de los generadores de vapor pertenecientes al Complejo Agroindustrial Dos Ríos ubicado en Palma Soriano.

2.2- Materiales empleados en las mediciones de los parámetros

El proceso de generación de vapor en el Complejo Agroindustrial consta de numerosos equipos que se utilizan para la medición de los parámetros, algunos de los más importantes se relacionan a continuación:

1. Presión en el Horno, se mide con un Manovacúmetro con transmisor de presión.
 - ❖ Rango de medición -10 - +10 mm col de H₂O
 - ❖ Presión nominal: ± 3 mm col de H₂O

2. Presión de vapor en el Domo, se mide con Manómetros con transmisor de presión.
 - ❖ Rango de medición: hasta 25 kgf/cm²
 - ❖ Presión nominal: 18 kgf/cm²

3. Presión de vapor en el colector general, se mide con un Manómetro con transmisor de presión:
 - ❖ Rango de medición: hasta 25 kgf/cm²
 - ❖ Presión nominal: 17 kgf/cm²

4. Presión del agua de alimentación, se mide con un Manómetro con transmisor de presión:
 - ❖ Rango de medición: 0 - 60 kgf/cm²
 - ❖ Presión nominal: 40 kgf/cm²

5. Temperatura del agua de alimentación, se mide con un Termómetro manométrico con transmisor :
 - ❖ Rango de medición: 0 - 150 °C
 - ❖ Temperatura nominal: 40 °C.

6. Temperatura del agua a la salida del economizador, se mide con un Termómetro manométrico con transmisor:
 - ❖ Rango de medición: 0 - 200 °C
 - ❖ Temperatura nominal: 115 - 120 °C.

7. Temperatura de los gases a la salida del calentador de aire, se mide con un Termómetro manométrico con transmisor:
 - ❖ Rango de medición: 0 - 400 °C
 - ❖ Temperatura nominal: 250-300 °C.

8. Temperatura del aire a la entrada del horno, se mide con un Termómetro manométrico con transmisor:

- ❖ Rango de medición: 0 - 300 °C
 - ❖ Temperatura nominal: 150-200 °C.
9. Temperatura del vapor sobrecalentado, se mide con un Termómetro manométrico con transmisor:
- ❖ Rango de medición: 0 - 500 °C
 - ❖ Temperatura nominal: 320 °C.
10. Nivel del agua en el Domo, se mide con un transmisor:
- ❖ Rango de medición: -200 - +200 mm
 - ❖ Nivel nominal: 0 (la referencia del Domo).
11. Flujo de agua de alimentación, se mide con un Flujómetro con transmisor:
- ❖ Rango de medición: 0 - 100 t/h
 - ❖ Flujo nominal: 60 t/h.
12. Flujo de vapor que entrega cada generador, se mide con un Flujómetro con transmisor:
- ❖ Rango de medición: 0 - 100 t/h
 - ❖ Flujo nominal: 60 t/h

2.3- Procedimiento de cálculo para el balance térmico y exergético de los generadores de vapor que operan en el Complejo Agroindustrial

2.3.1 Poder calórico bajo del combustible (kJ / kg)

Para el Bagazo oscila entre 4100 y 4700 kcal/kg (para la masa seca de combustible) según Pérez (1972). Este parámetro puede ser calculado a partir del empleo de la ecuación 2.1.

$$Qb^t = 17791 - 42 \cdot A_z^t - 200,8 \cdot W^t \quad (2.1)$$

Donde:

A_z^t : Contenido de Sacarosa en la masa de trabajo del Bagazo; (%).

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

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

Volumen de aire teórico

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

Volumen total real de gases triatómicos

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

Volumen teórico de nitrógeno

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

Volumen teórico de los gases secos

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

Volumen teórico de los vapores de agua

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

Volumen teórico total de gases

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

Volumen real de gases

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

Volumen real de aire

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

2.3.3 Cálculo del coeficiente de exceso de aire (adimensional)

Para combustión incompleta

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

Siendo:

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

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

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

Entalpía teórica de los gases

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

Donde:

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

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

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

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

Tabla 2.1. Valores de entalpía para diferentes temperaturas.

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

Fuente: Faires, 1991.

Entalpía real de los gases

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

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

Donde:

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

i_{aire} - Se busca a la temperatura que entra el aire (kJ/m³).

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

2.3.5 Balance térmico por el método directo

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

Donde:

η_{GV} - Eficiencia bruta del generador de vapor (%).

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

Q_d - Calor disponible (kJ/kg).

B - Consumo de Bagazo (kg/s).

Determinación del calor disponible

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

Donde:

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

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

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

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

Donde:

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

t - Temperatura del combustible (°C).

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

Donde:

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

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

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

Donde:

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

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

Determinación del calor útil

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

Donde:

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

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

2.3.6 Balance térmico por el método indirecto

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

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

Determinación de las pérdidas

Pérdida en los gases de escape (q_2)

Esta pérdida se produce al salir de la caldera los gases a una alta temperatura que arrastran una cantidad de calor hacia la atmósfera, está caracterizada por dos factores fundamentales:

- a) Coeficiente de exceso de aire.
- b) Temperatura de los gases de escape.

Además esta pérdida depende de:

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

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

Pérdida por incombustión química (q_3)

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

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

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

Los rangos de su magnitud son:

$q_3 < 0,5$ sólido en hornos de cámara

$q_3 = 0,5 - 1\%$ para Bagazo

$q_3 = 1 - 1,5\%$ líquidos y gaseosos

Pérdida por incombustión mecánica (q_4)

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

Los rangos de su magnitud son:

$q_4 = 0,5 - 5\%$ sólido en hornos de cámara

$q_4 = 2 - 15\%$ sólido en capa y pila (5-7% para los hornos de parrilla)

$q_4 = 0\%$ líquidos y gaseosos

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

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

Donde:

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

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

B_{esc} , B_{cen} : flujo de escorias y cenizas.

d - índice de generación.

Pérdida por transferencia de calor al medio ambiente (q_5)

Esta abarca todo el calor que por diferentes vías se transfiere al medio ambiente, ya sea por radiación directa a través de los registros abiertos, por conducción a través de las paredes y por convección al aire. Los rangos de estas pérdidas son:

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

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

Donde:

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

D - Producción de vapor (kg/s).

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

Es la que se produce al evacuar las cenizas a altas temperatura, depende fundamentalmente del tipo de combustible y la temperatura de extracción.

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

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

Donde:

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

Para combustibles líquidos y gaseosos $q_6 = 0$

Para el bagazo se puede despreciar $q_6 = 0$ (Manual de Operaciones, 1990)

2.3.7 Análisis exergético del sistema

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

La exergía puede ser calculada para tres casos diferentes, ellos son: para un sistema cerrado en reposo, para un flujo y para una fuente de calor, el procedimiento para los que son interés del trabajo se expone a continuación:

Exergía de un flujo

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

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

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

Donde:

h - Entalpía del flujo; kJ/kg.

Exergía de una fuente de calor

Para determinar la exergía del calor que se desprende de una fuente, se sigue el mismo principio empleado anteriormente. La capacidad de trabajo útil máxima que es posible

obtener de ese calor sería por medio del empleo de una máquina térmica de Carnot, o sea:

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

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

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

Donde:

T_M - Temperatura media calculada (K).

Rendimiento exergético de la instalación

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

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

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

Verificándose que:

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

Para los generadores de vapor del CAI Dos Ríos se considera:

- Exergía recuperada: la del vapor sobrecalentado.
- Exergía empleada: la del combustible.
- Exergía perdida: la de los gases de escape.

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

Los datos necesarios para el cálculo térmico y exergético de la instalaciones se relacionan en la tabla 2.2 (solo se representan los valores promedios de los parámetros) los mismos se obtuvieron a partir de las mediciones realizadas en los equipos en producción, donde los instrumentos realizan las mediciones y envían la señal al panel de control obteniéndose así los resultados de estas.

Tabla 2.2. Parámetros medidos en las instalaciones generadoras de vapor.

Parámetros	Generador de Vapor 1		Generador de Vapor 2	
	Variante 1	Variante 2	Variante 1	Variante 2
Variantes calculadas para cada uno	1	2	1	2
Producción de vapor sobrecalentado (tn/h)	59	56	45	56
Presión del vapor sobrecalentado (kgf/cm ²)	18	18	18	18
Temperatura del vapor sobrecalentado (°C)	332	318	327	312
Temperatura del agua de alimentación (°C)	94	97	88	97
Temperatura del combustible (°C)	32	32	32	32
Temperatura de los gases de escape (°C)	263	263	245	279
Temperatura de medio ambiente (°C)	32	32	32	32
Consumo de combustible (t/h)	Se calculará en el trabajo			
Composición química de los gases producto de la combustión (%)				
Dioxígeno (O ₂)	9	9,3	9.1	8,9
Dióxido de Carbono (CO ₂)	11,5	12	11,9	11,1
Monóxido de Carbono (CO)	3	3,2	2,9	3,4
Dihidrógeno (H ₂)	0,00	0,00	0,00	0,00

Metano (CH ₄)	0,00	0,00	0,00	0,00
---------------------------	------	------	------	------

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

Generador de vapor 1 variantes 1 y 2

$$C^t = 44 \quad H^t = 5 \quad S^t \approx 0 \quad O^t = 43 \quad A_z^t = 2,5$$

$$C^t = 49 \quad H^t = 7,5 \quad S^t = 0 \quad O^t = 42 \quad A_z^t = 5$$

Generador de vapor 2 variantes 1 y 2

$$C^t = 45 \quad H^t = 5,5 \quad S^t \approx 0 \quad O^t = 48 \quad A_z^t = 2,2$$

$$C^t = 48 \quad H^t = 7 \quad S^t \approx 0 \quad O^t = 44,5 \quad A_z^t = 4,5$$

2.5- Balance térmico y exergético de la instalación

El balance térmico y exergético de los generadores de vapor se realizó en correspondencia con el método de cálculo mostrado anteriormente (epígrafe 2.3) y los datos obtenidos en la instalación (epígrafe 2.4) logrando la aplicación de los métodos directo e indirecto descrito por Pérez (1972) y Pankratov (1987), estos métodos permiten el cálculo de los parámetros fundamentales de la instalación. El balance exergético se efectuó de acuerdo con Faire (1991) y Fernández (1994). Los parámetros principales calculados para cada generador se muestran en las tablas 2.3 y 2.4.

Tabla 2.3. Valores de los parámetros fundamentales del balance térmico y exergético.

Parámetros calculados en el generador de vapor	Generador de vapor 1		
	Variantes calculadas		Ec.
	V-1	V-2	Unidad

Poder calórico inferior (Qb^t)	$7,646 \times 10^6$	$7,139 \times 10^6$	J/kg	(2.1)
Volumen de aire teórico (V^0_a)	3,805	4,945	m ³ /kg	(2.2)
Volumen de gases triatómicos (V_{RO_2})	0,821	0,914	m ³ /kg	(2.3)
Volumen teórico de nitrógeno ($V^0_{N_2}$)	3,011	3,91	m ³ /kg	(2.4)
Volumen teórico de los gases secos (V^0_{gs})	3,832	4,824	m ³ /kg	(2.5)
Volumen teórico de los vapores de agua ($V^0_{H_2O}$)	1,236	1,557	m ³ /kg	(2.6)
Volumen teórico total de gases (V^0_g)	5,068	6,381	m ³ /kg	(2.7)
Volumen real de gases (Vg)	8,586	11,37	m ³ /kg	(2.8)
Volumen real de aire (Va)	6,026	8,021	m ³ /kg	(2.9)
Coeficiente de exceso de aire (α)	1,584	1,622	-	(2.10)
Entalpía teórica de los gases (I^0_g)	$1,778 \times 10^6$	$2,216 \times 10^6$	J/kg	(2.12)
Entalpía real de los gases (Ig)	$1,927 \times 10^6$	$2,427 \times 10^6$	J/kg	(2.13)
Calor disponible (Q_d)	$7,953 \times 10^6$	$7,446 \times 10^6$	J/kg	(2.16)
Calor útil ($Q_{\text{útil}}$)	$1,599 \times 10^{11}$	$1,493 \times 10^{11}$	J/h	(2.20)
Consumo de Bagazo (B)	30,278	32,536	t/h	(2.15)
Consumo de Bagazo promedio	31,407		t/h	-
Pérdida en los gases de escape (q_2)	17,818	23,575	%	(2.22)
Pérdida por incombustión química (q_3)	0,004	0,005	%	(2.23)
Pérdida por incombustión mecánica (q_4)	7	6,5	%	(2.24)
Pérdida por transferencia de calor (q_5)	2	2	%	(2.26)
Pérdida de calor con la ceniza (q_6)	0	0	%	(2.27)
Rendimiento bruto del generador (η_{GV}) (Calculado por el Método Indirecto)	73,178	67,92	%	(2.21)
Rendimiento térmico promedio	70,549		%	-

Rendimiento exergético ($\eta_{Exergético}$)	34,735	32,254	%	(2.33)
Rendimiento exergético promedio	33,495		%	-
Grado de pérdida de exergía (γ)	65,265	67,746	%	(2.34)
Grado de pérdida de exergía promedio	66,505		%	-

Los resultados íntegros obtenidos en la evaluación térmica y exergética del generador de vapor 1 (para la variante 1) se exponen en el anexo. Para las variantes restantes se procedió de forma análoga considerando los datos correspondientes. El resumen de los resultados obtenidos para el generador de vapor 2 se muestra en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Valores de los parámetros fundamentales del balance térmico y exergético.

Parámetros calculados en el generador de vapor	Generador de vapor 2			
	Variantes calculadas		Unidad	Ec.
	V-1	V-2		
Poder calórico inferior (Qb^t)	$7,859 \times 10^6$	$6,357 \times 10^6$	J/kg	(2.1)
Volumen de aire teórico (V^0_a)	3,860	4,640	m ³ /kg	(2.2)
Volumen de gases triatómicos (V_{RO_2})	0,840	0,896	m ³ /kg	(2.3)
Volumen teórico de nitrógeno ($V^0_{N_2}$)	3,055	3,669	m ³ /kg	(2.4)
Volumen teórico de los gases secos (V^0_{gs})	3,894	4,565	m ³ /kg	(2.5)
Volumen teórico de los vapores de agua ($V^0_{H_2O}$)	1,28	1,546	m ³ /kg	(2.6)
Volumen teórico total de gases (V^0_g)	5,175	6,111	m ³ /kg	(2.7)
Volumen real de gases (Vg)	8,945	10,034	m ³ /kg	(2.8)
Volumen real de aire (Va)	6,205	7,177	m ³ /kg	(2.9)
Coeficiente de exceso de aire (α)	1,608	1,547	-	(2.10)

Entalpía teórica de los gases (I^0_g)	$1,723 \times 10^6$	$2,231 \times 10^6$	J/kg	(2.12)
Entalpía real de los gases (I_g)	$1,882 \times 10^6$	$2,397 \times 10^6$	J/kg	(2.13)
Calor disponible (Q_d)	$8,167 \times 10^6$	$6,663 \times 10^6$	J/kg	(2.16)
Calor útil ($Q_{\text{útil}}$)	$1,226 \times 10^{11}$	$1,485 \times 10^{11}$	J/h	(2.20)
Consumo de Bagazo (B)	22,246	38,255	t/h	(2.15)
Consumo de Bagazo promedio	30,2505		t/h	-
Pérdida en los gases de escape (q_2)	16,631	26,965	%	(2.22)
Pérdida por incombustión química (q_3)	0,003	0,006	%	(2.23)
Pérdida por incombustión mecánica (q_4)	7	6,8	%	(2.24)
Pérdida por transferencia de calor (q_5)	2	2	%	(2.26)
Pérdida de calor con la ceniza (q_6)	0	0	%	(2.27)
Rendimiento bruto del generador (η_{GV}) (Calculado por el Método Indirecto)	74,365	64,229	%	(2.21)
Rendimiento térmico promedio	69,297		%	-
Rendimiento exergético ($\eta_{\text{Exergético}}$)	34,967	30,465	%	(2.33)
Rendimiento exergético promedio	32,716		%	-
Grado de pérdida de exergía (γ)	65,033	69,535	%	(2.34)
Grado de pérdida de exergía promedio	67,284		%	-

De los resultados mostrados en las tablas 2.3 y 2.4 se observa, en general, bajos rendimientos térmicos y exergéticos que no superan el 75 y 34%, respectivamente. También se aprecia que los valores obtenidos para los rendimientos en la variante 2 son inferiores a los de la primera variante en ambos generadores, este comportamiento puede ser atribuible a los parámetros de funcionamiento que registraron las instalaciones en el momento en que se desarrollaron las mediciones.

2.6- Conclusiones del capítulo 2

- Los rendimientos térmicos obtenidos para la variante 1 en los dos generadores de vapor analizados fueron 73,178 y 74,365%. Para la variante 2 se produjo una disminución del mencionado parámetro y los resultados obtenidos fueron 67,92 y 64,229%, respectivamente.
- Los rendimientos exergéticos obtenidos para las variantes calculadas en los generadores analizados en todos los casos fueron inferiores al 34% y el grado de pérdida de exergía promedio osciló entre 66,505 y 67,284% para las condiciones de explotación de las calderas.

Capítulo 3

Análisis de los resultados de la investigación, valoración económica e impacto ambiental asociados a las instalaciones

3.1- Introducción

La valoración de los resultados de una investigación, así como el análisis de los impactos económicos y ambientales de la misma es de gran importancia porque permite valorar en que medida la instalación analizada contribuye o no al mejoramiento de la empresa donde se encuentra, en este sentido el **objetivo** del presente capítulo es:

Valorar los resultados técnicos, económicos y ambientales asociados a los generadores de vapor analizados.

3.2- Análisis de los resultados de la investigación

Al analizar los resultados obtenidos en el diagnóstico térmico y exergético de los generadores de vapor se observa que para el combustible utilizado en la instalación el poder calórico inferior siempre fue menor que 8 MJ/kg, este valor es sustancialmente más pequeño que el obtenido cuando se combustiona petróleo, donde se obtienen valores en el orden de los 41 MJ/kg (Fonseca, 2009). Estas diferencias están asociadas a las características físicas propias de los combustibles analizados, en las instalaciones objeto de estudio del presente trabajo se emplea el Bagazo, mientras que en las evaluadas por Fonseca (2009) y Góngora (2009) se utiliza el petróleo. Los valores obtenidos para el poder calórico inferior determinan en gran medida el calor disponible y por consiguiente influyen en los rendimientos térmicos y exergéticos.

Otro parámetro importante a considerar es la entalpía real de los gases de escape, la misma determina la pérdida de calor a través de los gases. La entalpía promedio osciló entre 2,177 y 2,140 MJ/kg para los generadores de vapor 1 y 2, respectivamente. Los

comportamientos antes mencionados influyeron en que las pérdidas de calor a través de los gases de escape fueran superiores al 16% en todas las variantes analizadas.

En general ambos generadores tienen un bajo aprovechamiento de la energía térmica que se evidencia en el rendimiento térmico promedio, el cual fue inferior al 71% en todas las variantes calculadas, el rendimiento exergético promedio no excede el 33%, esto indica la irreversibilidad existente entre la sustancia de trabajo (el agua) y el agente de transformación (los gases producto de la combustión).

Los valores obtenidos para la pérdida de exergía indican que solo se aprovecha una cantidad relativamente pequeña del calor disponible para producir vapor en ambas instalaciones. También se aprecia una diferencia notable entre ambos rendimientos promedios (térmico y exergético) que fue de 37,054 y 36,581% para los generadores analizados, esto evidencia las diferencias notables existentes entre ambos conceptos termodinámicos.

Finalmente se calcula el consumo de combustible empleando el rendimiento térmico obtenido por el método indirecto, los resultados indican un elevado valor para este parámetro, siendo sus valores promedios igual a 31,407 y 30,250 t/h. A pesar de estos comportamientos se puede considerar que no influye significativamente en los costos de producción del vapor porque el Bagazo se obtiene como un subproducto del proceso industrial de producción de azúcar.

3.2.1- Comportamiento de los diferentes parámetros del proceso

El comportamiento mostrado en la figura 3.1 indica, en general, elevados consumos de combustible, que superan en todas las variantes las 22 t/h de Bagazo. Estos comportamientos pueden ser atribuidos al bajo poder calórico que tiene dicho combustible, también pueden ser consecuencia de la baja eficiencia térmica con que trabajan los generadores de vapor, lo cual genera el excesivo consumo de Bagazo para obtener una misma productividad de vapor (60t/h) que demanda el proceso productivo y la generación de energía eléctrica.

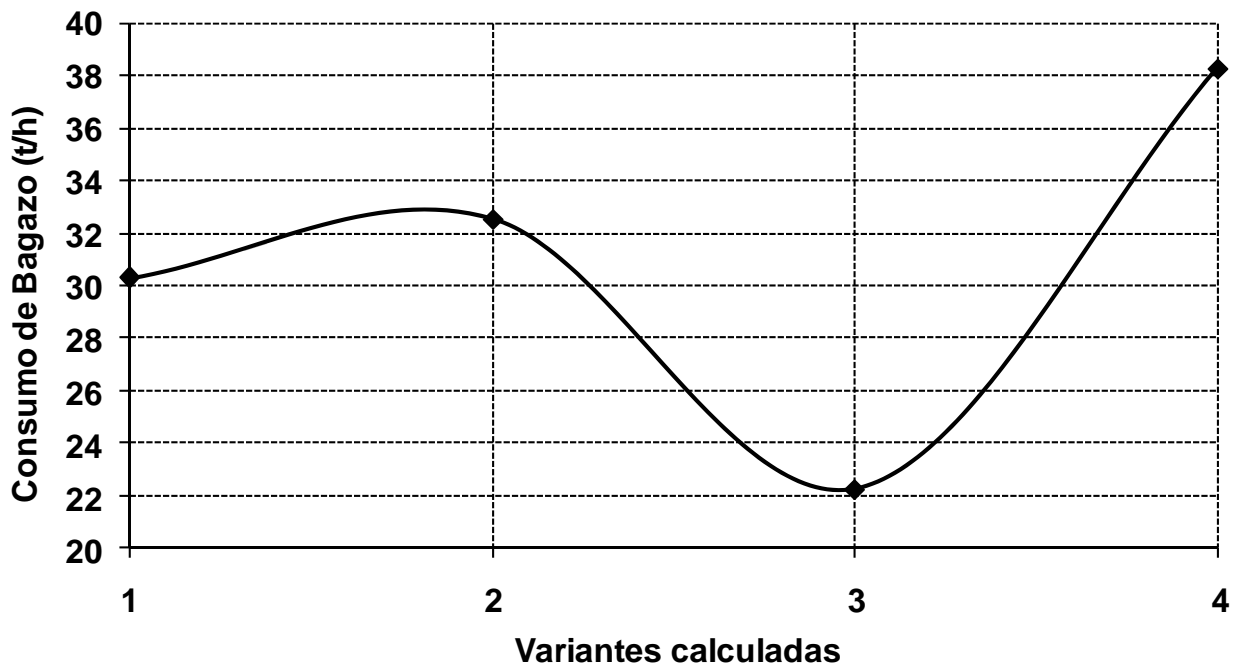


Figura 3.1. Comportamiento del consumo de bagazo para las variantes calculadas.
Observación: las variantes 1 y 2 corresponden al generador 1 y las 3 y 4 al 2.

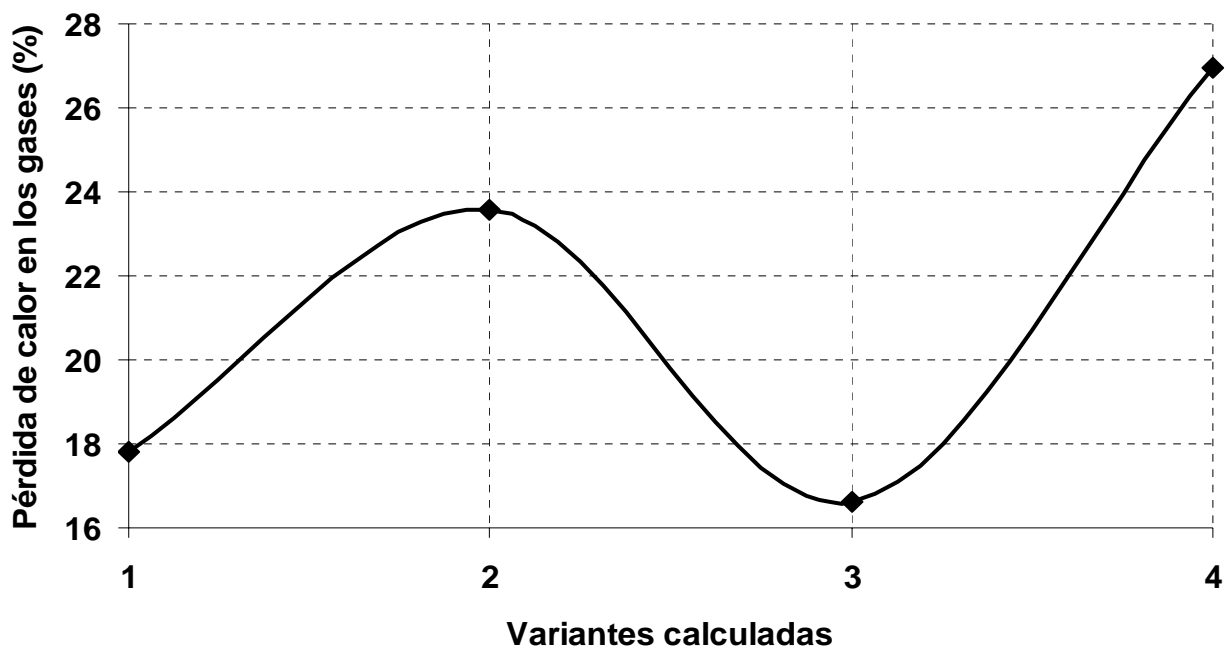


Figura 3.2. Comportamiento de la pérdida de calor a través de los gases de escape.

Las pérdidas de calor a través de los gases de escape de los generadores estudiados son elevadas (figura 3.2), las mismas son superiores al 16%, estos comportamientos determinan el rendimiento térmico obtenido por el método Indirecto (figura 3.3). Al comparar las tendencias mostradas en ambas figuras (3.2 y 3.3) se aprecia que son opuestas porque en la medida que la pérdida de calor se incrementa, la eficiencia térmica decrece en proporción aproximadamente igual. De lo anterior se infiere la importancia que tiene el control de esta pérdida de calor a partir de la reducción racional de la temperatura de los gases que se expulsan a través de la chimenea.

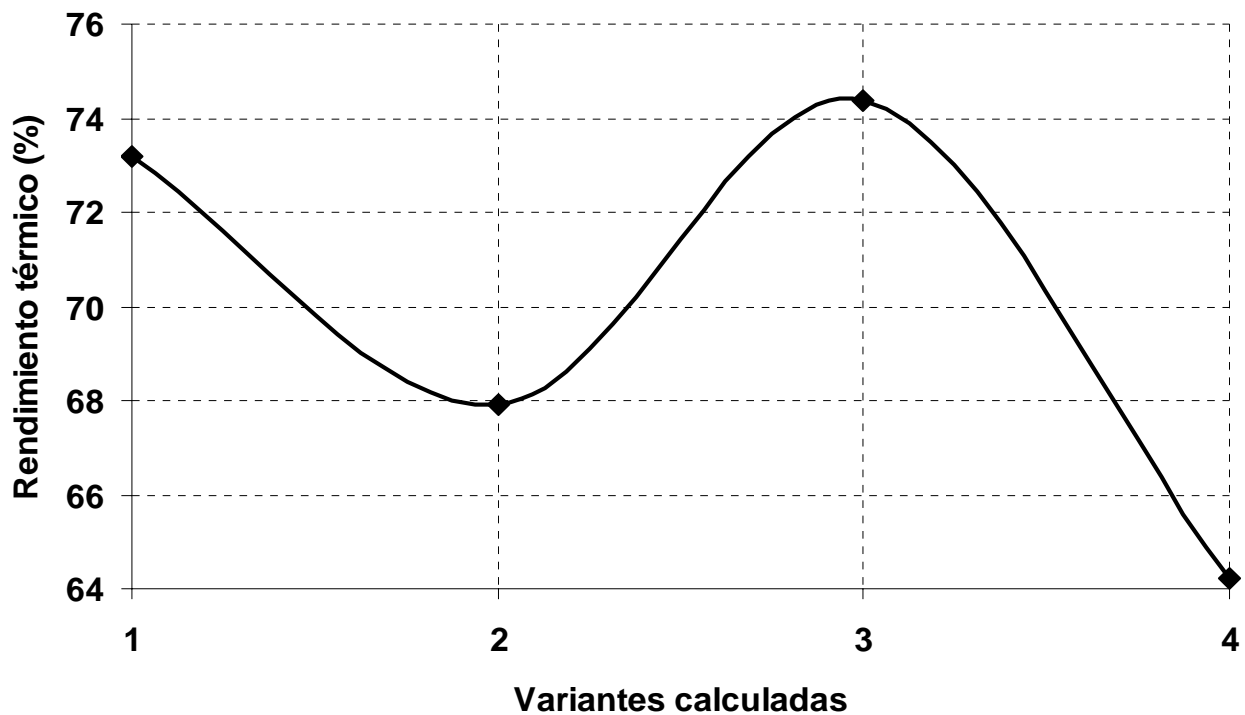


Figura 3.3. Comportamiento del rendimiento térmico.

La tendencia del comportamiento del rendimiento exergético (figura 3.4) es similar al térmico, pero el primero estuvo entre 34,735 y 30,465%, lo cual indica la baja capacidad que tienen las instalaciones productoras de vapor para aprovechar todo el calor útil disponible en el proceso, otro aspecto que incide en el rendimiento exergético es la baja temperatura que tiene el agua de alimentación a los generadores de vapor. Para aumentar los rendimientos graficados en las figuras 3.3 y 3.4 se deben poner en

práctica un conjunto de medidas técnicas y organizativas (Generadores de vapor, 1972).

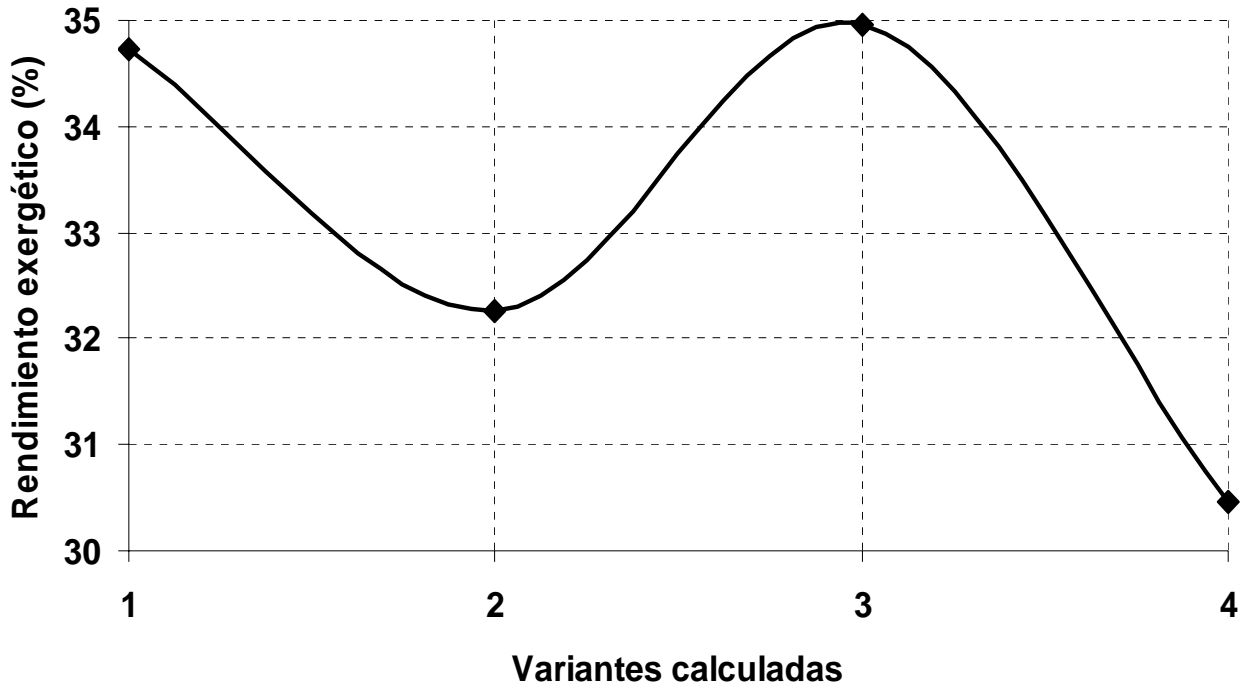


Figura 3.4. Comportamiento del rendimiento exergético.

3.3- Valoración económica

Los valores expuestos en la tabla 3.1 muestran la valoración económica referida al consumo de combustible para las condiciones de explotación existentes en el momento de las mediciones. El precio utilizado en el cálculo fue de 70 USD/barril y como en las instalaciones estudiadas se emplea como combustible el Bagazo, entonces se procedió considerando que 1 tonelada de bagazo es igual a 1,20 barriles de petróleo equivalentes de acuerdo con las recomendaciones expuestas en la literatura consultada (Manual de operaciones para la generación de vapor en los CAI, 1999).

Tabla 3.1. Gasto económico horario por concepto de consumo de combustible para el generador de vapor 1 del CAI Dos Ríos.

Generador de vapor	Rendimiento térmico del generador de vapor (%)	Consumo de Bagazo (t/h)	Consumo de petróleo equivalente (barriles/h)	Gasto (USD/h)
--------------------	--	-------------------------	--	---------------

GV-1: V-1	73,17	30,278	36,3336	2543,352
GV-1: V-2	67,92	32,536	39,0432	2733,024
Valores promedios		31,407	37,6884	2638,188

Como se aprecia en la tabla 3.1 el importe asociado al gasto horario promedio por concepto de consumo de combustible en el generador de vapor 1 asciende a **2638,188 USD**. El gasto de combustible para los meses en que se desarrolló la investigación (Diciembre-Mayo) se expone en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Gasto económico por concepto de consumo de combustible para el generador de vapor 1 del CAI Dos Ríos (periodo Diciembre-Mayo).

Generador de vapor	Rendimiento térmico del generador de vapor (%)	Consumo de Combustible (barriles/día)	Consumo de Combustible (barriles/6 meses)	Gasto (USD)
GV-1: V-1	73,17	872,0064	156961,152	10987280,6
GV-1: V-2	67,92	937,0368	168666,624	11806663,7
Valores promedios de los valores		904,5216	162813,888	11396972,2

Para el generador de vapor 2 se realizaron cálculos análogos y los resultados obtenidos se muestran en las tablas 3.3 y 3.4.

Tabla 3.3 Gasto económico horario por concepto de consumo de combustible para el generador de vapor 2 del CAI Dos Ríos.

Generador de vapor	Rendimiento térmico del generador de vapor (%)	Consumo de Bagazo (t/h)	Consumo de petróleo equivalente (barriles/h)	Gasto (USD/h)
GV-2: V-1	Rendimiento térmico = 74,36	22,246	26,6952	1868,664
GV-2: V-2	Rendimiento térmico = 64,22	38,255	45,906	3213,42
Valores promedios		30,2505	36,3006	2541,042

El gasto horario promedio por el mismo concepto en el generador de vapor 2 asciende a 2541,042 USD (tabla 3.3). El gasto para el periodo en que se desarrolló la investigación se expone en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Gasto económico por concepto de consumo de combustible para el generador de vapor 2 del CAI Dos Ríos (periodo Diciembre-Mayo).

Generador de vapor	Rendimiento del Generador de vapor (%)	Consumo de Combustible (barriles/día)	Consumo de Combustible (barriles/6 meses)	Gasto (USD)
GV-2: V-1	Rendimiento térmico = 74,36	640,6848	115323,264	8072628,48
GV-2: V-2	Rendimiento térmico = 64,22	1101,744	198313,92	13881974,4
Valores promedios		871,2144	156818,592	10977301,4

Al comparar los gastos horarios asociados al consumo de combustible promedio obtenidos para ambos generadores se observa una ligera disminución en el generador de vapor 2 igual a 97,147 USD/h lo cual genera una diferencia de 419670,8 USD para los seis meses analizados, de estos resultados se infiere la importancia económica que tiene el ahorro de combustible en estas instalaciones.

3.4- Impacto ambiental asociado a los generadores de vapor

3.4.1- Generalidades de la contaminación ambiental en la generación de vapor

En una caldera constituyen efluentes contaminantes: los gases producto de la combustión, las cenizas de parrilla y de ceniceros y las aguas de las extracciones de fondo. Podría incluirse también como elementos alteradores del medio el ruido y el calor (Generadores de vapor, 1972).

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

3.4.2- Principales fuentes de contaminación

Óxidos de azufre

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

Los efectos nocivos más importantes de estos óxidos son:

- Afectaciones en las vías respiratorias de los seres humanos y animales.
- Formación de lluvias ácidas con graves consecuencias ecológicas.

Monóxido de carbono

El monóxido de carbono (gas incoloro e inodoro) es el resultado de una combustión incompleta de los combustibles orgánicos, por ello la magnitud que se emite a la atmósfera, depende esencialmente de la calidad con que se efectúe el proceso de combustión.

Los efectos nocivos más importantes del CO son:

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

Óxidos nitrosos

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

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

Los efectos perjudiciales más relevantes de los NO_x son:

- Creación de desórdenes respiratorios en seres humanos y animales.
- Reducción de la visibilidad por adsorción del espectro visible para el hombre.
- Afectaciones a las plantas por lluvias ácidas.

- Aceleración de la corrosión y la degradación material.
- Contribución a la formación del smog sobre las ciudades.
- Se le asocia también con la formación de ozono en las zonas bajas de la atmósfera, el cual resulta tóxico para el hombre.
- Se le atribuyen también propiedades cancerígenas.

Particulados

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

Las principales afectaciones que causan son:

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

Compuestos orgánicos volátiles

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

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

3.4.3- Métodos de reducción de las emisiones contaminantes

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

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

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

- **Reducción del SO₂**

- Scrubber húmedo: lavado de los gases con spays de agua y participación de otras sustancias (Cal y Óxido de Magnesio).
- Scrubber seco: los gases son rociados con una solución acuosa de Cal apagada para eliminar el SO₂. El agua está en una cantidad tal que se evapora toda en el equipo
- Lecho fluidizado: empleo de inertes absorbedores del azufre en el lecho.
- Inyección neumática del horno: El horno es inyectado neumáticamente con sustancias tales como Cal, Dolomita o Cal hidratada.

- **Reducción del CO**

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

- **Reducción de los NO_x**

Quemadores de bajo NO_x: se trata de quemadores de sólidos, líquidos o gases, en los que mediante el diseño aerodinámico se reduce el pico de temperatura de la llama. También puede hacerse una oxidación por partes del combustible, suministrando el aire

por etapas y con un enfriamiento intermedio. Otra técnica se basa en el mezclado previo del gas y el aire.

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

Inyección de agentes químicos: la reducción de los NO_x a N_2 y H_2O , puede conseguirse inyectando Amoniaco o Urea en el horno, por encima de la zona de los quemadores a valores de temperatura de los gases entre 760 y 1093 °C.

- **Reducción de particulados**

Precipitadores electrostáticos: este dispositivo está dotado de electrodos alimentados por una fuente de potencia de alto voltaje, que atrapan las partículas sólidas, cuando por ellos pasan los gases.

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

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

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

3.4.4- Particularidades medioambientales relacionadas con el CAI Dos Ríos

La empresa azucarera Dos Ríos es una de las principales fuentes contaminantes de la cuenca del Cauto, debido a los reiterados vertimientos con alta carga contaminante

de los residuales del proceso de producción de azúcar, estas sustancias contaminantes, por lo general líquidas presentan alto contenido de materias orgánicas con propiedades físico-químicas devastadoras para el ecosistema de la cuenca del Cauto y sus alrededores, afectando el suelo, la flora, la fauna y sustancialmente a los poblados cercanos a las áreas del complejo agroindustrial.

Los residuales procedentes de la industria son:

- ✓ Residuales ácidos.
- ✓ Residuales azucarados.
- ✓ Residuales Pluviales.

Actualmente se descargan mezclados y llegan al foso de la estación de bombeo a través de una conductora, esta se encuentra en mal estado técnico facilitando el escape de estos residuales a las áreas aledañas. Por tales motivos en el CAI Dos Ríos se trabaja en la confección de un proyecto que permita la separación de los residuales anteriormente mencionados.

Plan de acciones para reducir la contaminación por residuales de la producción de azúcar

- ✓ Realizar un control técnico sobre todas las zanjas del CAI, certificándose la segregación de pluviales y residuales.
- ✓ Completamiento de la solución y el proyecto ejecutivo de la segregación de residuales químicos de los azucarados.
- ✓ Desarrollar un proceso de educación ambiental entre dirigentes, técnicos y trabajadores del CAI destinado a crear conciencia de la necesidad de cumplir las normas para evitar o reducir la contaminación.
- ✓ Establecer las normas de operación del CAI con vista a eliminar o reducir la contaminación por indisciplinas tecnológicas y negligencias, fijando la responsabilidad de cada jefe de área.
- ✓ Estudiar los métodos y técnicas necesarias para poder medir el nivel de contaminación.

Medidas para darle cumplimiento al plan de acciones

- ✓ Reparar los techos y los bajantes de pluviales para evitar que la lluvia vaya a la zanja de residuales.
- ✓ Separar las zanjas de pluviales y residuales, evitando la mezcla de ambos.
- ✓ Darle mantenimiento a todas las zanjas, tuberías, motores, válvulas y bombas del sistema.
- ✓ Reconstruir la trampa de grasa del Tandem y de los talleres de locomotoras y carros.
- ✓ Reducir el derrame de azúcar en las tolvas y construir zanjas para la evacuación en caso de ocurrencia de lluvias.
- ✓ Eliminar los derrames de agua, guarapo, meladura, mieles y azúcar en casa de calderas, mediante una reparación de calidad y una operación óptima en zafra.

Plan de acciones correctivas para el ahorro de agua en el CAI en periodos de zafra

- ✓ Eliminación de los derrames de cachaza en el área de carga.
- ✓ Recuperar las aguas dulces de los lavados periódicos de los Tachos, Tanquería de mieles, Meladuras y Centrífugas, utilizándolos y/o incorporándolos al proceso.
- ✓ Realizar la limpieza y desinfección de los tanques y equipos tecnológicos.
- ✓ Evitar derrame de jugos azucarados, mieles, cachaza y masas cocidas.
- ✓ Recuperar la Sosa empleada en la limpieza de los evaporadores y calentadores, enviando en última instancia la solución agotada para el enfriadero general.
- ✓ Evitar los derrames de bagazo y bagacillo, en los casos que se produzcan se reincorporan al proceso por vía seca, no utilizar agua para su limpieza.
- ✓ Recuperar el mayor porcentaje posible de las aguas vegetales tanto contaminadas como no contaminadas.

Efecto en el medio ambiente

Actividad industrial de producción de azúcar y derivados

- ✓ Emisión de residuales líquidos azucarados con alta carga orgánica, acidez, contenido de Ácido Clorhídrico e Hidróxido de sodio producto de la limpieza de los equipos de la producción de azúcar.

- ✓ Emisión de residuales sólidos entre lo que se destacan la cachaza (12000 toneladas) y la ceniza.
- ✓ Emisión de gases producto de la combustión.

Actividad de talleres

- ✓ Emisión de residuales de grasas y lubricantes.

Actividad agrícola cañera

- ✓ Uso de fertilizantes químicos.
- ✓ Uso de herbicidas químicos.
- ✓ Quema de residuos de cosecha.

3.5- Conclusiones del capítulo 3

- La diferencia entre los consumos de combustible promedios asociados a los generadores de vapor 1 y 2 fue de 97,147 USD para una hora de trabajo y de 419670,8 USD para los seis meses considerados.
- Existen en las instalaciones varias fuentes contaminantes, siendo los gases producto de la combustión y los residuos (líquidos y sólidos) los que más influyen negativamente en el medio ambiente.

Conclusiones generales

- No se reportan estudios destinados a la evaluación térmica y exergética de los generadores de vapor pertenecientes al Complejo Agroindustrial Dos Ríos. La explotación de las instalaciones se realiza empíricamente sin considerar los análisis energéticos necesarios para el correcto funcionamiento de estos equipos.
- Se comprobó mediante la evaluación térmica y exergética realizada que los generadores de vapor analizados tienen bajos rendimientos térmicos y exergéticos los cuales alcanzaron valores promedios igual a 79,547 y 69,297%, para los primeros y para los segundos fueron 33,495 y 32,716%.
- En las instalaciones productoras de vapor existe un alto consumo de Bagazo que osciló entre 31,407 y 30,250 t/h. El mismo aunque es elevado no genera excesivos gastos económicos porque el combustible se obtiene como un subproducto del proceso de fabricación de Azúcar.
- Los gastos económicos asociados al consumo de combustible en los dos generadores de vapor estudiados es alto, sus valores promedios ascienden a 11396972,2 y 10977301,4 USD para el periodo considerado en la investigación.
- En el Complejo Agroindustrial Dos Ríos existen afectaciones permanentes al medio ambiente a través de las emanaciones de los gases producto de la combustión y del vertimiento de residuos líquidos y sólidos, estos últimos son mitigados mediante la implementación de medidas técnicas y organizativas.



Recomendaciones

- Considerar los resultados obtenidos en el cálculo de las eficiencias térmicas y exergéticas de las instalaciones en la explotación de los generadores de vapor en la próxima zafra.
- Evaluar energéticamente y con sistematicidad los generadores de vapor en el próximo periodo de zafra, teniendo en cuenta otros aspectos no considerados en el presente trabajo.

Referencias bibliográficas

1. Abreu, J. *Evaluación de la eficiencia actual del generador de vapor 10 de la Empresa René Ramos Latour*. Trabajo de Diploma. ISMM.2003. 70p.
2. Caballero, B. A.; Y. González. *Diagnóstico energético de los generadores de vapor de las empresas productoras de níquel*. Trabajo de Diploma. ISMM 2007. 43 p.
3. Carcallido, M. *Balance energético y exergético del CAI Guatemala*. Trabajo de Diploma. ISMM 1999. 71 p.
4. Colectivo de Autores. *Generadores de Vapor*. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana, 1972. 520 p.
5. Del Valle, R. *Balance energético verificativo de la planta eléctrica de la empresa René Ramos Latour*. Trabajo de Diploma. ISMM 2002. 64 p.
6. Fadel, A. *Diagnóstico energético de los generadores de vapor de la empresa Ernesto Che Guevara*. Trabajo de Diploma. ISMM 2008. 51 p.
7. Faires, V. *Termodinámica*. La Habana: Edición Revolucionaria, 1991. 807p.
8. Fernández, E. *Termodinámica Técnica*. La Habana: Editorial "Félix Varela, 1994. Tomo I. 290 p.
9. Fernández, E. *Utilización del vapor en la industria*. Editorial Científico-Técnica. La Habana, 2001. 138 p.
10. Fonseca, A. *Diagnóstico termoexergético de los generadores de vapor de la empresa Ernesto Che Guevara*. Trabajo de Diploma. ISMM 2009. 58 p.
11. Góngora, E. *Evaluación e*
12. Hernández, N. *Diagnóstico térmico verificativo de los generadores de vapor insertados en la empresa "Ernesto Ché Guevara"*. Trabajo de Diploma. ISMM 2006. 48 p.
13. Jiménez, U. *Propuesta para el plegado de las chapas del sistema de mantenimiento de aire regenerativo de las centrales termoeléctricas*. Trabajo de Diploma. ISMM 2001. 72 p.
14. Lahenz, V. *Calculo de la eficiencia en los generadores de vapor*. Trabajo de Diploma. ISMM 2001. 56 p.

15. *Manual de operaciones de generación de vapor para el Ministerio del azúcar, 1999.*
16. *Manual de operaciones de operaciones del CAI Dos Ríos, 1995.*
17. Muñoz, C. *Aprovechamiento de la biomasa forestal para la producción sostenida de electricidad en el CAI Argeo Martínez.* Trabajo de Diploma. ISMM 2001. 69 p.
18. Muhica, J. *Evaluación termoeconómica del ciclo de la central termoeléctrica de la empresa Ernesto Guevara.* Trabajo de Diploma. ISMM, 2001. 62 p.
19. Pankratov. G. *Problemas de termotecnia.* Editorial MIR Moscú. URSS, 1987. 235p.
20. Pereira, M. *Balance de energía de la caldera del comedor del ISMM.* Proyecto de curso. 2001. 33 p.
21. Pérez, L. *Generadores de Vapor.* Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana. 1972. 447 p.
22. Rivera, B. Y; Y. *Regueiferos. Diagnóstico térmico de los generadores de vapor de las empresas presupuestadas del municipio Moa.* Trabajo de Diploma. ISMM 2007. 50 p.
23. Rizhkin, Y. V. *Centrales termoeléctricas. Primera y segunda parte.* Editorial pueblo y educación. Ciudad de La Habana. 1987. 370 p.
24. Rodríguez, Y. *Análisis del petróleo crudo nacional empleado en la empresa Ernesto Guevara.* Trabajo de Diploma. ISMM, 2001. 57 p.
25. Suárez, L; E. Rodríguez. *Propuesta de selección del esquema térmico principal para la modernización de la planta termoeléctrica de la Empresa Ernesto Che Guevara.* Trabajo de Diploma. ISMM 1999. 75 p.
26. Suárez, V. *Diagnóstico del sistema de generación de vapor de la Central Termoeléctrica perteneciente a la empresa "Comandante René Ramos Latour".* Trabajo de Diploma. ISMM, 2005. 70 p.
27. Tuzón, E. *Diagnóstico energético del generador de vapor 1 de la empresa Ernesto Che Guevara.* Proyecto de Curso. ISMM. 2005. 30 p.
28. Vukalovitch, M. *Propiedades Termodinámicas del agua y el vapor.* Editorial. Revolucionaria 1978. 245 p.

ANEXO

BALANCE TÉRMICO DE LOS GENERADORES DE VAPOR ESTUDIADOS

GENERADOR DE VAPOR 1 CAI DOS RÍOS (VARIANTE 1)

Poder calórico inferior del combustible (Q_b)

Todos los elementos en masa de trabajo

$$A_z := 2.5 \quad W := 50$$

$$Q_b := (17791 - 42 \cdot A_z - 200.8 \cdot W) \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$Q_b = 7.646 \times 10^6 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

Determinación de los volúmenes de los gases producto de la combustión

$$C := 44 \quad H := 5 \quad O := 43 \quad S := 0$$

Volumen de aire teórico (V_a)

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

$$V_a = 3.805 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen real de gases triatómicos (V_{RO2})

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

$$V_{RO2} = 0.821 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen teórico de Dinitrógeno (V_{N2})

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

$$V_{N_2} := (0.79 \cdot V_a + 0.008 \cdot N)$$

$$V_{N_2} = 3.011 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen teórico de los gases secos (V_{gs})

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

$$V_{gs} = 3.832 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen teórico de los vapores de agua (V_{H_2O})

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

$$V_{H_2O} = 1.236 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Volumen teórico total de gases (V_{og})

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

$$V_{og} = 5.068 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

$$CO_2 := 11.5 \quad O_2 := 9 \quad CO := 3 \quad H_2 := 0 \quad CH_4 := 0$$

$$N_2 := 100 - (CO_2 + O_2 + CO) \quad N_2 = 76.5$$

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

$$\alpha = 1.584$$

Volumen real de gases (Vg)

$$V_{\text{areal}} := V_a \cdot \alpha \quad V_{\text{areal}} = 6.026 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

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

$$V_g = 8.586 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Determinación de las entalpías de los gases

Entalpía teórica de los gases (Igo) Calculada para Tge = 263 °C

$$I_{\text{RO2}} := 484.42 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3} \quad I_{\text{N2}} := 292.68 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3} \quad I_{\text{H2O}} := 404.08 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3}$$

$$I_{\text{cen}} := 228.75 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad A := 0.01 \quad A_{\text{arr}} := 0.3$$

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

$$I_{\text{go}} = 1.778 \times 10^6 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

Entalpía real de los gases (Ige)

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

La temperatura del aire se expresa en °C

$$C_{\text{af}} := 1.3188 \quad t_{\text{aire}} := 32 \quad f_{\text{conv1}} := 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3}$$

$$I_{\text{oaire}} := C_{\text{af}} \cdot t_{\text{aire}} \cdot V_{\text{areal}} \cdot f_{\text{conv1}}$$

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

$$I_{ge} = 1.927 \times 10^6 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

Determinación del calor disponible (Q_d)

Calor físico del Combustible (Q_{fc})

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

$$t_c := (32 + 273.15) \quad C_{cs} := 1.047 \cdot 10^3 \quad f_c := 1 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$C_c := 0.24 \cdot W + C_{cs} \cdot (1 - 0.001 \cdot W)$$

$$C_c = 1.007 \times 10^3$$

$$Q_{fc} := C_c \cdot t_c \cdot f_c \quad Q_{fc} = 3.072 \times 10^5 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

Cálculo del calor disponible (Q_d)

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

$$Q_d = 7.953 \times 10^6 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

BALANCE TÉRMICO POR EL MÉTODO INDIRECTO

Cálculo de las pérdidas de calor (expresadas en %)

Pérdida por los gases de escape (q_2)

$$q_4 := 7 \quad \text{Para el bagazo combustionado en hornos de parrilla}$$

La temperatura del aire T_{aire} expresada en ($^{\circ}\text{C}$)

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

$$t_{af} := 32 \quad c_{paf} := 1.3199 \quad f_{conv1} := 1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3}$$

$$I_{af} := t_{af} \cdot c_{paf} \cdot V_{a_{real}} \cdot f_{conv1}$$

$$I_{af} = 2.545 \times 10^5 \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$q_2 := \frac{(I_{ge} - \alpha \cdot I_{af}) \cdot (100 - q_4)}{Q_d} \quad q_2 = 17.818$$

Pérdida de calor por incombustión química (q₃)

$$V_{gs} = 3.832 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad f_{conv2} := 1 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}^3}$$

$$q_3 := \frac{(30.2 \cdot \text{CO} + 25.8 \cdot \text{H}_2 + 85.5 \cdot \text{CH}_4) \cdot V_{gs} \cdot (100 - q_4)}{Q_d} \cdot f_{conv2}$$

$$q_3 = 4.059 \times 10^{-3}$$

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

$$q_5 := 2 \quad \text{Para generadores de vapor de } D = 10 - 100 \text{ t/h (Pérez, 1972)}$$

$$q_6 := 0 \quad \text{Para combustibles líquidos}$$

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

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

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

$$N_{gvMI} = 73.178$$

BALANCE TÉRMICO POR EL MÉTODO DIRECTO

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

$$D_{\text{vsc}} := 59 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \quad I_{\text{vsc}} := 741.29 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad I_{\text{aa}} := 94.05 \cdot 4.1863 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$Q_{\text{útil}} := D_{\text{vsc}} \cdot (I_{\text{vsc}} - I_{\text{aa}}) \quad Q_{\text{útil}} = 1.599 \times 10^{11} \frac{\text{joule}}{\text{hr}}$$

Cálculo del Consumo de combustible (B) del generador de vapor (t/h)

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

$$B = 30.278 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$$

BALANCE EXERGÉTICO DEL GENERADOR DE VAPOR

Determinación de las exergías empleadas (agua y combustible)

Exergía del agua (Ex_{agua})

$$h_{\text{agua}} := I_{\text{aa}} \quad m_{\text{agua}} := D_{\text{vsc}} \quad T_0 := 32 + 273.15$$

$$h_{\text{agua}} = 3.937 \times 10^5 \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad h_{0a} := 32.02 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$S_{\text{agua}} := 0.2958 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad S_{0a} := 0.1108 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

$$Ex_{\text{agua}} = 3.773 \times 10^5 \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

Exergía del combustible ($Ex_{\text{combustible}}$)

$$Q := Q_d \quad T_0 := 32 + 273.15 \quad T_m := 1000 + 273.15 \quad m_{\text{combustible}} := B$$

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

$$Ex_{\text{combustible}} = 4.614 \times 10^7 \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

Determinación de la exergía recuperada (Ex_{vapor})

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

$$h_{\text{vapor}} = 3.103 \times 10^6 \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad h_{0\text{v}} := 32 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

$$S_{\text{vapor}} := 1.6619 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}} \quad S_{0\text{v}} := 0.1107 \cdot 4.19 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{joule}}{\text{kg}}$$

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

$$Ex_{\text{vapor}} = 1.616 \times 10^7 \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

Determinación del rendimiento exergético (%)

Exergía empleada (Ex_{empleada})

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

$$Ex_{\text{empleada}} = 4.652 \times 10^7 \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

Exergía recuperada ($Ex_{\text{recuperada}}$)

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

$$Ex_{\text{recuperada}} = 1.616 \times 10^7 \frac{\text{joule}}{\text{sec}}$$

Rendimiento exergético (η_{Ex})

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

$$\eta_{Ex} = 34.735$$

La pérdida de exergía (γ) en % se determina por:

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

$$\gamma = 65.265$$