



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA  
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"  
FACULTAD METALURGIA-ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

## TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MASTER EN ELECTROMECAÁNICA

**Titulo:** Metodología para la evaluación del comportamiento energético del generador de vapor 11 de la Empresa Comandante "René Ramos Latour", utilizando crudo cubano.

**Autor:** Ing. Gilberto Sánchez Ferrera

**Tutores:** Dr. Alberto Turro Breff  
Dr. Luís D Rojas Purón

Moa, 2010  
"Año 52 de la Revolución"



*Tesis en opción al título de master*

**DECLARACIÓN DE AUTOR**

---

Yo: Ing. Gilberto Sánchez Ferrera

Autor de esta Tesis de Maestría, certifico su propiedad intelectual a favor del I.S.M.M. de Moa, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

-----  
Firma del Autor  
Ing. Gilberto Sánchez Ferrera

-----  
Firma del tutor  
Dr. Ing. Alberto Turro Breff

-----  
Firma del tutor  
Dr. Ing. Luís D. Rojas Purón

***Autor: Gilberto Sánchez Ferrera***



*Tesis en opción al título de master*

**DEDICATORIA.**

**A mis Padres**, por ser tan especiales en mi vida, por haberme dado el ánimo, por su amor y cariño, darme las fuerzas e inspirarme para que hoy logre mis sueños

**A mi Esposa e Hijos**, por su aliento constante, por ser guías en el empeño de ser cada día mejor.

**A mis Hermanos** por todo el esfuerzo y el empeño aquí plasmado.

**A los compañeros** de trabajo de la tarea “Álvaro Reynoso” por su contribución en el desempeño de este trabajo.

A todos ellos muchas gracias.

***Autor: Gilberto Sánchez Ferrera***



## *Tesis en opción al título de master*

### **AGRADECIMIENTO.**

**A la Revolución y a Fidel** por haberme dado la oportunidad de estudiar y formarme como profesional.

**A mis Padres y Hermanos** por haberme dado todo el apoyo, dedicación y amor durante mi carrera.

**A mi esposa e hijos** en especial, por su amor y dedicación, por ver mi sueño hecho realidad.

**A mi tutores:** Drs. Alberto Turro Breff y Luís D Rojas Purón por la ayuda que me brindaron durante la realización de mi trabajo de tesis de maestría.

**A mi compañera de trabajo** Ing. Yordanka Linet Fonseca Rodríguez por su dedicación durante el desarrollo de mi trabajo.

A todos ellos muchas gracias.

***Autor: Gilberto Sánchez Ferrera***



*Tesis en opción al título de master*

**PENSAMIENTO.**

...“ Todos y cada uno de nosotros paga puntualmente su cuota de sacrificio de recibir el premio en la satisfacción del deber cumplido, consciente de avanzar con todos hacia el hombre nuevo que se vislumbra en el hombre integral”...

Ché

*Autor: Gilberto Sánchez Ferrera*



## **RESUMEN**

En el desarrollo de la industria termo energética los generadores de vapor poseen gran importancia debido al rol que han desempeñado en los sectores productivos en el mundo.

En el presente trabajo se reporta un estudio del generador de vapor 11 de la planta eléctrica de la Empresa Comandante René Ramos Latour utilizando el crudo cubano. Se realizó una búsqueda bibliográfica y se estableció una metodología de cálculo para la determinación del balance termo energético de los generadores de vapor las mediciones necesarias de los parámetros para realizar dicho balance; así como las características y composición química del combustible utilizado por estos generadores en el año 2008; además se reflejan claramente los cálculos de las pérdidas, eficiencias, calores influyentes en el sistema, consumo de combustible y producción eléctrica.

También podemos decir que en los tres generadores de acuerdo a los cálculos, observamos que tienen una situación crítica en el consumo de combustible, temperatura alta de los gases de escape, temperatura baja del agua de alimentar, lo que implica pérdida de eficiencia en los generadores de vapor.



## SUMMARY

In the development of the water heater-energy industry the steam generators possess great importance due to the list that you/they have carried out in the productive sectors in the world.

An study of the steam generator 11 of the electric plant of René Ramos Latour using the Cuban fuel is reported, a bibliographical search and a methodology was carried out settled down in order to determine the balance energy water heater of the steam generators the necessary measurement of the parameters to carry out this balance; as well as the characteristics and chemical composition of the fuel used by these generators in the year 2008; they are also reflected clearly the calculations of the losses, efficiencies, influential heats in the system, consumption of fuel and electric production.

We can also say that the three generators, according to the calculations done, have a critical situation in the consumption of fuel and high temperature of the escape gases, low temperature of the water of feeding, what implies loss of efficiency in the steam generators.



<b>Índice</b>	<b>Pág</b>
Introducción	1
CAPITULO 1 Marco teórico –metodológico de la investigación.	6
1.1- Introducción	6
1.2-Revisión bibliográfica	6
1.3-Factores que influyen sobre el comportamiento y propiedades reológicas.	14
1.4- Petróleo y emulsiones	16
1.5- Descripción de flujo tecnológico de la central termoeléctrica.	18
1.6-Descripción de los generadores de vapor que intervienen en el proceso.	22
1.7- Lazos de atomización en los generadores de vapor.	24
1.8- Principales actividades programadas para el mantenimiento de los generadores de vapor de la termoeléctrica.	25
1.9- Conclusiones del capítulo .	26
CAPITULO II Diagnostico del sistema de generación de vapor de la Empresa Comandante René Ramos La tour.	27
2.1- Introducción	27
2.2- Material empleado en las mediciones de los parámetros del proceso.	27
2.3- Método de cálculo para el balance térmico de los generadores de Vapor que operan en la instalación.	29
2.3.1 Poder calórico bajo del combustible (kj/ kg).	29
2.3.2 Cálculo de los volúmenes de la combustión (m <sup>3</sup> /kg).	29
2.3.3 Cálculo del coeficiente de exceso de aire para combustión y completa.	30
2.3.4 Cálculo de las entalpías de los gases de la combustión y del aire.	30
2.3.5 Balance térmico por el método directo.	31
2.3.6 Balance térmico por el método indirecto.	32
2.3.7 Análisis exergético del sistema.	35
2.4- Datos obtenidos en la instalación para los diferentes generadores de vapor.	39
2.5- Balance térmico y energético de la instalación.	40
2.6 Análisis de mantenimiento en las calderas.	41
Conclusiones del Capitulo	44
CAPITULO III Comprobación técnico económica, propuestas de acciones e impacto medio ambiental de las variantes.	45
3. Introducción	45
3.1 Cálculo económico de las variantes	45
3.2 Análisis de los parámetros de trabajo del generador 11.	46
3.3 Comprobación técnico económica.	49
3.3.1 Valoración de la producción de vapor.	49
3.3.2 Análisis del consumo de petróleo.	50





<b>Índice</b>	<b>Pág</b>
3.4 Análisis de los mantenimientos.	52
3.5 Propuestas de acciones de mantenimiento, revisiones periódicas y orientaciones para la correcta explotación de los generadores de vapor.	54
3.5.1 Protección contra la corrosión en la cámara de agua.	56
3.5.2 Principales revisores del operador.	57
3.5.3 Principales averías que pueden presentarse.	57
3.5.4 Orientaciones para la correcta explotación de la caldera.	59
3.5.5 Almacenamiento y trasiego de combustible.	60
3.5.6 Preparación de la caldera para el encendido.	61
3.5.7 Encendido de las Calderas.	62
3.5.8 Conexión de la caldera al sistema	63
3.5.9 Parada de la caldera.	63
3.5.10 Parada de emergencia	64
3.5.11 Problemas, causas y soluciones, más frecuentes a realizar en el quemador.	66
3.6 Valoración económica	67
3.7 Impacto medioambiental.	70
3.8 Resultados experimentales del objeto estudiado.	76
Conclusiones del capítulo	85
Conclusiones generales	86
Recomendaciones	87
Nomenclaturas	89
Referencias bibliográficas	93
Anexos	98



## **INTRODUCCIÓN**

El transporte de combustible por oleoducto en Cuba a partir de 1999 hasta el 2005 ha aumentado de un 21 % hasta el 24 %, siendo el oleoducto Varadero- Matanzas entre las inversiones ejecutadas, un claro reflejo del desarrollo actual de la industria petrolera cubana, que elimina la transportación de crudo cubano por barco (Columbie, 2006).

En este escenario se produce un incremento de la producción de energía, principalmente crudo. Si se tiene en cuenta una mayor utilización de las fuentes nacionales de energía para el desarrollo energético dado que el papel predominante lo constituye el crudo nacional, permitirá una mayor utilización de este combustible en el sector industrial contribuyendo, a que no aumente la importación de crudo (Somoza et al, 2002). Teniendo en cuenta lo planteado; podemos decir, que el papel de la industria cubana juega un rol importante dentro de la economía nacional y que actualmente se encuentra enfrascada en un gran proyecto de eficiencia energética, con el objetivo de disminuir los costos en la producción. Es por ello que el incremento de la eficiencia de los diferentes equipos e instalaciones que lo componen inciden considerablemente en la reducción del consumo de portadores energéticos y la utilización de los recursos disponibles.

La Empresa “Comandante Rene Ramos Latour” es la pionera del níquel ubicada en Nícaro provincia Holguín. Ésta fue construida en la cuarta década del siglo pasado, específicamente en mayo de 1942 y se puso en marcha en 1943, obteniéndose su primera producción el 29 de Abril de ese mismo año con sus 65 aniversarios ya cumplidos con un equipamiento de generación de vapor de procedencia norteamericana, con tecnologías muy atrasadas, estos han ido saliendo de servicio por su ineficiencia y carencia de piezas de repuesto; que se hace difícil obtenerlas a través del gobierno de los Estados Unidos o en otros países, por el bloqueo impuesto hace más de 45 años por éste.



## *Tesis en opción al título de master*

En 1997 se hace un estudio para redimensionar la planta eléctrica por orientación del organismo superior, la concepción de 17000TN de Ni + Co por años con una máxima explotación, carencia de paros, sin la utilización del equipamiento existente, reducidos tiempos de recuperación del capital invertido y autoabastecimiento eléctricos y técnicos.

También se hace necesario hacer inversiones en la planta eléctrica hasta concebir el proyecto de construcción de la nueva termoeléctrica: se hizo reparación capital en el turbo generador japonés, y a los rusos, y a estos últimos se les modernizó el sistema automático, y además en 1999 fue construida una caldera de 90 Tn/h y entraron en operación en el 2001 dos más con la misma cantidad de producción de vapor.

La planta eléctrica además de generar energía eléctrica produce vapor para la destilación de licor y cola, además de la recuperación de amoníaco y para usos generales en el resto de las plantas como son: calentamiento de combustible, atomización, banco de quemadores, etc. teniendo así estas dos funciones de gran importancia para producir níquel.

En la planta eléctrica los generadores utilizan como combustible el petróleo crudo cubano, debido a que en los últimos años se ha elevado el precio del petróleo regular en el mercado internacional, por lo que fue necesario lograr la mayor eficiencia en la combustión del mismo en los generadores mediante la utilización de la tecnología aditivación – emulsión del combustible con el fin de garantizar un régimen racional de trabajo de estas y ahorro delpreciado líquido.



## **FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACION**

Las nuevas tendencias relacionadas con el incremento de los niveles productivos y el vertiginoso desarrollo de la Unión del Níquel, demandan que cada día se perfeccionen los procesos tecnológicos y se eleve la eficiencia metalúrgica de los mismos. Dentro de una fábrica metalúrgica concurren complejos sistemas que muestran diferentes comportamientos con dinámicas muy variadas, algunos de estos agregados ubicados en la planta eléctrica son los generadores de vapor los cuales juegan un papel esencial dentro del proceso pues en ellos se produce el vapor necesario para la realización del proceso productivo y la elaboración del níquel.

Los generadores de vapor son muy utilizados en la industria de proceso, ellos constituyen el corazón de la industria moderna (Pérez, 1972) se han realizado varios estudios sobre estos equipos de transferencia de calor pero muy pocos se han centrado en evaluar el comportamiento energético del generador de vapor de la Empresa Comandante René Ramos Latour de ahí la importancia de la presente investigación.

Los generadores de vapor de esta empresa han presentado numerosos problemas debido entre otras cosas a la carencia de piezas de repuesto y la prolongada explotación en condiciones poco apropiadas. Esto ha provocado que en la actualidad la empresa solo cuenta con cuatro generadores de vapor instalados, los cuales producen el vapor necesario para el proceso de ellas tres de 90 t trabajando y una de 87,5 t de reserva que entra en funcionamiento cuando una de las tres grandes está de mantenimiento.

La situación actual del proceso de producción de vapor de la planta eléctrica de la René Ramos Latour se caracteriza por las siguientes deficiencias:

- Dependencia del sistema energético nacional debido a la incapacidad de mantener estable la producción de vapor que demanda la empresa.
- Baja eficiencia térmica del proceso de generación de vapor.



## *Tesis en opción al título de master*

- Inestabilidad en el proceso debido al deterioro físico de la caldera.
- Deficiencias en la operación en el generador de vapor.
- Excesos de mantenimientos por encima de los planificados.

A partir de estas deficiencias se declara como situación problemática actual.

### **FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

La necesidad de realizar un estudio para evaluar el comportamiento energético del generador de vapor No 11 de la Empresa Comandante René Ramos Latour.

### **PROBLEMA CIENTÍFICO DE LA INVESTIGACIÓN**

Baja eficiencia en los generadores de vapor de la Empresa Comandante René Ramos Latour, provocado por las frecuentes averías que afectan el rendimiento y los parámetros técnicos de la caldera con la utilización del crudo nacional.

### **OBJETO DE INVESTIGACIÓN**

El generador de vapor No 11 de la empresa Comandante René Ramos Latour, utilizando el crudo cubano.

### **CAMPO DE LA INVESTIGACIÓN**

Explotación eficiente de los generadores de vapor utilizando crudo cubano.

### **HIPÓTESIS**

Con la utilización del balance termo energético en el generador de vapor No 11 de la Empresa Comandante René Ramos Latour de Nicaro es posible predecir el comportamiento de los parámetros racionales de funcionamiento y realizar un diagnóstico que permite el incremento de la eficiencia del proceso.



## *Tesis en opción al título de master*

### **OBJETIVO**

Elaborar una metodología de cálculo que permita evaluar y mejorar los parámetros técnicos de los generadores de vapor, así como el ciclo de mantenimiento para atenuar las deficiencias introducidas con el empleo del crudo cubano.

### **TAREA DE INVESTIGACIÓN**

1. Realizar la búsqueda bibliográfica sobre la eficiencia energética de los generadores de vapor utilizando el crudo nacional.
2. Realizar el diagnóstico técnico energético de la caldera
3. Realizar el estudio sobre las características, propiedades del crudo y de la mezcla para ser utilizada generalmente en los generadores de vapor.
4. Realizar un estudio técnico económico en el generador de vapor No 11 de la Empresa Comandante René Ramos Latour.
5. Evaluar el impacto medioambiental del uso del crudo cubano en los generadores de vapor.



## **CAPITULO 1 MARCO TEÓRICO–METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.**

### **1.1 Introducción.**

El marco teórico del objeto de estudio permite detectar de forma preliminar las diferentes características y deficiencias que existen entre las investigaciones realizadas, las teorías existentes y los múltiples elementos que están presentes en la investigación. En tal sentido, el objetivo del capítulo es: evaluar la factibilidad teórica y energética de la utilización del crudo cubano en el generador de vapor de la Empresa Comandante René Ramos Latour.

### **1.2 Revisión Bibliográfica.**

Una investigación científica, de acuerdo con lo planteado Arostegui (1978), en cualquier área del conocimiento debe siempre estar sustentada por una investigación teórica y empírica, de ahí que sea necesario utilizar los métodos que caracterizan a cada una de ellas para desarrollar científicamente las mismas a partir de una clara caracterización del objeto, del planteamiento del problema, la hipótesis, los objetivos y las tareas.

En el desarrollo de la investigación se consultaron diferentes trabajos y estudios, la revisión bibliográfica estuvo dirigida en dos líneas fundamentales: la formación relacionada con el enfoque teórico-metodológico, los trabajos que sobre el balance térmico del diagnóstico a instalaciones de generación de vapor. Características y propiedades del crudo cubano desde el punto de vista científico y práctico que se han efectuado en los últimos años.

Muy importante resultó la revisión del trabajo por Fernández (1994) quien plantea las leyes termodinámicas empleadas en el análisis de los procesos térmicos, los conceptos fundamentales empleados en el estudio de los mismos y se detalla con claridad la metodología empleada en la solución de problemas prácticos, otros aportes importantes de este trabajo es que se describe otra forma de analizar



## *Tesis en opción al título de master*

térmicamente los procesos industriales a partir de la inserción del concepto de exergía el cual es aplicado para realizar el balance energético de varios equipos industriales en los que figuran la turbina de gas, la bombas, y los generadores de vapor.

En el manual de operaciones de la planta eléctrica de la Empresa Comandante René Ramos Latour editado por el MINBAS (1996), se hace clara mención al proceso de generación de vapor donde se ofrecen las principales características de los equipos y agregados que lo componen. En éste también se encuentran los generadores de vapor de los cuales ofrecen los parámetros principales de operación. Los datos o valores dados a éstos difieren un tanto de los reales encontrado actualmente en el proceso.

Aportaron considerablemente los trabajos de Pérez (1972) que aborda los aspectos teóricos metodológicos para el correcto estudio de los generadores de vapor, en esta publicación se exponen los criterios técnico necesarios para la solución, evaluación y explotación adecuada de estos equipos y sus agregados, muestra además las principales leyes termodinámicas presentes en el proceso de producción de vapor y la metodología para el balance térmico fundamentado a partir de ecuaciones empíricas obtenidas mediante modelos matemáticos estadísticos y el método de regresión lineal. En este trabajo el autor logra con mucha precisión establecer la dependencia existente entre los numerosos factores involucrados en estos equipos industriales.

Generación de vapor (1970), trata de la automatización en los generadores de vapor, aspecto este poco tratado en la literatura especializada (Pérez 1972); Tanquero et al 1987; Oliva et al 1988; Rizhkin 1987), en el trabajo el autor realiza un estudio profundo sobre los lazos de control aplicado en los generadores de vapor y las múltiples ventajas proporcionadas por éstos. De igual manera se describe muy acertadamente el proceso de tratamiento químico del agua empleada en la generación de vapor y muestra la influencia de la calidad de la misma en el balance térmico de los generadores de vapor.





## *Tesis en opción al título de master*

Por su parte Tanquero et al (1987), dedica su trabajo al cálculo térmico de los diferentes equipos y agregados existentes en los generadores de vapor, recoge ecuaciones importantes para el análisis térmico de estos equipos y constituyen una guía metodológica para la realización de cálculos relacionados con la temática. Otra publicación importante en esta área del conocimiento lo constituye la realizada por Oliva et al (1988) donde se exponen aspectos sobre la explotación de los generadores de vapor y los materiales constructivos empleados en éstos, los autores exponen las características más importantes de los materiales y expresan sus valoraciones acerca de la influencia del proceso de generación de vapor en el medio ambiente.

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

Fernández (2001), expone los resultados obtenidos en relación con el uso del vapor en la industria, en este trabajo se aplican con claridad las ventajas que justifican la preferencia por la utilización del vapor en la industria en relación con otros portadores de energía, además se establecen los objetivos fundamentales para los que se utilizan el vapor y los métodos empleados en la evacuación del condensado. De acuerdo con el segundo elemento se han realizado varios estudios dedicados al balance térmico de los generadores de vapor.

Carcallido (1999) en su trabajo, proporciona respuestas a las inquietudes relacionadas con la inestabilidad energética presentes en el Complejo Agroindustrial Guatemala y para cumplimiento a las tareas propuestas en el mismo, el autor utilizó datos correspondientes a la Zafra 1998-1999, estos datos junto al método de cálculo



## *Tesis en opción al título de master*

empleado, permitieron al investigador demostrar que el 62 % de la exergía total del proceso se pierde por irreversibilidad en los procesos de combustión y transferencia de calor. También se obtienen el rendimiento energético y exergético de la instalación los cuales fueron del 75% y 38% respectivamente.

De igual forma Suárez (1999) desarrollo el cálculo térmico del ciclo de generación de la planta eléctrica de la Empresa del Níquel Comandante “Ernesto Guevara”, para ello realizó el balance energético y exergético de la instalación; en esta investigación se demuestra que es posible disminuir el consumo de electricidad de la red nacional a partir de una explotación nacional de la capacidad instalada.

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

Pereira (2001) realizó un estudio del comportamiento de la energía en el generador de vapor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa y analiza las variaciones del sistema cuando este pasa de un estado de explotación a otro. El autor comprobó, a partir de datos experimentales, la influencia del generador, lo cual para las condiciones de explotación de la instalación arrojó el resultado siguiente: para un incremento de la temperatura en los gases de escape de 4°C la pérdida en los gases de escapes aumenta.

Al diagnóstico de los generadores de vapor 1 y 2 de la Central Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez) se dedicó Lahens (2001), para ello tomó como punto de referencia la influencia de la temperatura de los gases de escape en la eficiencia y consumo de combustible de los generadores. En el trabajo se demuestra que estos equipos



## *Tesis en opción al título de master*

trabajan con valores de temperaturas por encima de lo establecido por las normas para combustibles líquidos y que existen factores que influyen en la explotación racional de la instalación citando entre otros las infiltraciones de aires, suciedad en la trampa de vapor y en las superficies de transferencia de calor así como, mala selección de los quemadores.

Un aporte importante fue dado por Muhica (2001), al efectuar una evaluación termo económica del ciclo de la planta eléctrica de la empresa Comandante “Ernesto Guevara”, el trabajo está encaminado a facilitar la toma de decisiones en la modernización de la planta, para ella se determinaron los principales indicadores del ciclo térmico modernizado, también la investigación expone el cálculo de la pérdida de energía que ocurren en los equipos tecnológicos principales de la central termoeléctrica, el impacto económico ambiental de la propuesta estudiada.

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

Otro investigador propone a la Empresa Mecánica del Níquel una variante de fabricación por conformación de las láminas para las empaquetaduras de los calentadores de aire regenerativos de la termoeléctrica de Felton, (Jiménez; 2001). En este trabajo el autor realiza un estudio de los métodos de conformado convencionales y lo ajusta a las condiciones reales de la problemática tratada, calcula la fuerza de conformado, tomando ésta como referencia para proponer un diseño de la instalación para la conformación. En el trabajo se demuestra que para las



## *Tesis en opción al título de master*

condiciones de la Empresa Mecánica del Níquel el método de conformado por rodillos plegadores es más económica que el método de matriz y punzón.

También al estudio del combustible usado en los generadores de vapor se han dedicado trabajos, Rodríguez (2001), realiza un análisis del petróleo crudo nacional empleado en la Empresa Comandante “Ernesto Guevara” a partir de los elementos químicos que la 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 demuestra algunas recomendaciones prácticas para la manipulación y quema de este combustible, basado en la experiencia práctica aplicada en la Planta de Secadero de la fábrica mencionada. Algunas de las conclusiones llegadas por el autor en este tema tan importante para la economía cubana se relacionan a continuación:

1. Con el tratamiento químico adecuado y operando con niveles de aire bajos en la caldera se incrementa sustancialmente la producción de CO<sub>2</sub>, se garantiza limpieza en la superficie de transferencia de calor y se reduce al mínimo la velocidad de corrosión de los metales.
2. El crudo mejorado tiene influencia directa en el potencial de corrosión de los electro filtros y tratados con base de magnesio es posible controlar el potencial de corrosión a valores similares o inferiores alcanzado por el petróleo regular.

Al estudio de los generadores de vapor instalados en la empresa “Rene Ramos Latour”, también se han dedicado algunos trabajos, Del Valle (2002), realiza una evaluación verificativa de la eficiencia en la planta eléctrica de esta empresa, a partir de la instalación de los generadores de vapor, en este trabajo se establecen comparaciones con parámetros anteriores del mismo proceso lo que demostró que



## *Tesis en opción al título de master*

hubo un aumento considerable de la eficiencia en la producción del níquel hasta el 95%.

Turro (2002), en su tesis doctoral estudia el hidrotransporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal, planteando a partir del sistema de correlaciones derivadas del modelo físico propuesto, su novedad para el cálculo y evaluación de las instalaciones de hidrotransporte, derivado de los resultados de la caracterización realizada y del sistema de ecuaciones producto del modelo físico matemático.

Romo (1998) en base del proyecto de “formulación de emulsiones petróleo pesado-agua”, determinó las concentraciones más efectivas del, petróleo y de sustancias tensoativas para formar emulsiones estables en agua. Dentro de las principales conclusiones consta la siguiente: se han formado emulsiones de petróleo pesado dentro del ámbito de índice de gravedad API de 15 a 20 utilizando sustancias tensoativas no-iónicas al nivel de concentración del 5%. En ese estudio se determinó que las emulsiones con un 70% de petróleo pesado y 5% de sustancias tensoativas tienen una alta fluidez, porque la viscosidad se ha reducido a menos de 1/10 de la viscosidad del petróleo. Como última fase de este proyecto se realizó el estudio de las características reológicas de las emulsiones del petróleo pesado en agua y de su comportamiento al ser transportado a través de tuberías.

En este estudio se arribaron a conclusiones importantes, en el sentido de la determinación de las propiedades reológicas y del transporte: en este proyecto no se tienen en cuenta los criterios de semejanza, importantes a la hora de extrapolar los resultados a escala industrial.

Placencia et al, (2000), dando continuidad al proyecto anterior, realiza pruebas de formulación de emulsiones de petróleo pesado en agua a nivel piloto, se realizan pruebas de reología a diferentes condiciones de concentración de tensoativos, temperatura y tiempo de almacenamiento. Finalmente para pruebas de flujo, se



## *Tesis en opción al título de master*

estudia el comportamiento de una emulsión con el 1% de peso en tensoactivo al ser transportado por una tubería de una pulgada.

El avance tecnológico en la industria del petróleo se debe en buena medida a las herramientas y metodología prevista por la física. En particular, los estudios reológicos y dieléctricos se pueden considerar como los más conocidos y eficaces para estudiar los petróleos parafínicos y asfálticos altamente viscosos, lo que recién comienza (Marusca et al, 1987). En los últimos años, en lo que se entiende como nuevas herramientas aplicadas al estudio, caracterización y control de crudos asfálticos y parafínicos, la aplicación del campo métrico y magnético, ya sea por separados o combinados sus acciones, como en el caso de plasmas, aparecen como técnicas altamente promisorias. El comportamiento electrorreológico de crudos, debido a la presencia de asfáltenos, es un campo totalmente nuevo, que puede desentrañar algunas características aún desconocidas de estos últimos. La aplicación de campos selectos en emulsiones, puede acelerar el rompimiento de los mismos.

Harms et al (1991), describe en su invención una herramienta y un método para controlar la acumulación de depósito de parafinas en las tuberías de producción y líneas de flujo. La exitosa herramienta previene de la obstrucción de la tubería utilizando fuerzas magnéticas para disipar las fuerzas electrostáticas de las parafinas.

Wamg (1991), inventó un aparato que genera una fuerte concentración del campo magnético sobre el área de flujo. En los crudos disminuye la viscosidad y suprime la acumulación de depósito de parafinas en las tuberías de producción y/o líneas de flujo. El aparato no consume energía, puede ser conectado a la tubería de producción o a las varillas en sistemas de bombeo mecánico.

La tecnología de plasma es apropiada para situaciones contra flujo, particularmente, para crudos pesados. Los crudos pesados tienen un precio bajo en el mercado. La producción y el transporte de crudo pesado tienen costos adicionales significativos si la tecnología de plasma se adapta a la cabeza de pozo y pueden incrementar el valor



## *Tesis en opción al título de master*

API del crudo, disminuir sulfuros, nitrógenos y contenidos de metales pesados, reducir parafinas en el crudo, entonces habrá aumento significativos del valor comercial para la materia sin procesar, ahorros en el transporte, y en las operaciones de la refinería.

Mechetti et al (2000) 1; Mechetti et al (2000) 2, presenta resultados inéditos en sus estudios de comportamiento reológicos de crudos asfálticos bajo la acción de campos eléctricos. Investigando en comportamiento viscosimétrico de un crudo argentino de baja viscosidad con 7 % PP de contenido de asfaltenos encuentran una dilatancia atípica para un crudo de baja viscosidad relativa y también una anomalía termorreológica (mayor viscosidad para una mayor temperatura). La dilatación se explica en la literatura por la presencia de particulares cargadas en suspensión coloidal, lo que podría adjudicarse, en este caso, a la presencia de asfaltenos. Por otro lado, Mechetti et al (2001) 4, llevaron a cabo estudios electrorreológico de emulsiones W-O de crudos analizando el comportamiento de la viscosidad en condiciones de flujo para diferentes velocidades de deformación y diferentes intensidades de campos, observando un rompimiento rápido de la emulsión, lo que resulta de gran importancia para el proceso de extracción de agua de crudo.

Chem et al (1994), investigaron el efecto de la aplicación de un campo eléctrico alterno en la estructura de una emulsión  $W/O$ , observando la formación de largas cadenas de gotas entre electrodos, que resultan de los dipolos inducidos en las gotas de aguas en presencia del campo eléctrico, similar a lo observado en fluidos electrorreológicos. Es decir que las emulsiones  $W/O$  se comportarían como fluidos electrorreológicos (Mechetti et al 2001) 4.

### **1.3 Factores que influyen sobre el comportamiento y propiedades reológicas.**



## *Tesis en opción al título de master*

La viscosidad de los líquidos a temperaturas inferiores a la normal de ebullición no está muy afectada para valores moderados de la misma; a presiones muy elevadas la viscosidad puede aumentar considerablemente.

Al parecer, este último crece con la complejidad molecular, pero no se tiene ningún método seguro de la estimación de la viscosidad y en general de las propiedades reológicas de los líquidos a bajas temperaturas y elevadas presiones, (Costo 1984).

### **Efectos de las propiedades superficiales.**

En la suspensión coloidales cuya fase dispersa posee un área superficial grande, el efecto de las propiedades de superficie desempeñan un papel muy importante. Ello se debe, fundamentalmente, a que el comportamiento reológico es afectado grandemente por la densidad de carga superficial y por la fuerza iónica del medio dispersante, ya que estas variables influyen sobre la interacción neta entre las partículas. La interacción neta es la suma de un componente repulsivo y un componente atractivo. El componente atractivo viene dado por la fuerza de atracción del Vander Waals y no es sensible a los fenómenos superficiales. El componente repulsivo eléctrico, que rodean a las partículas (Repulsión de Born). Cuando la interacción neta es repulsiva se observa un comportamiento newtoniano de la suspensión, en cambio cuando la interacción neta es atractiva la suspensión puede exhibir un comportamiento pseudo plástico o plástico, debido a la formación de agregados o flóculos, o de una estructura espacial.

En los trabajos con pulpa lateríticas de Cerpas et al (1997), Cerpas et al (1998), así como de Borger et al (1990), con suspensiones de líquidos, se ilustra la relación entre los fenómenos de la química de las superficies y la reología. No se han encontrado trabajos sobre las emulsiones de crudo cubano que traten sobre estos aspectos.





## *Tesis en opción al título de master*

Teniendo en cuenta todo lo hasta aquí aplicado, resulta evidente que los efectos de las propiedades superficiales sobre la reología de las emulsiones coloidales y petróleo es un fenómeno de carácter universal, de manera que los principios que rigen este proceso pueden ser aplicados independientemente del tipo de petróleo que forme la dispersión.

### **Efectos de la temperatura.**

En general, en la mayoría de los líquidos y suspensiones se ha observado una disminución de la viscosidad con el incremento de la temperatura. Se ha comprobado que la disminución de la viscosidad puede deberse a los efectos (Garcell, 1993).

- a) Disminución de la viscosidad del medio dispersante.
- b) Debilitamiento de las estructuras formadas por las partículas al aumentar la temperatura.

La viscosidad, se manifiesta grandemente con los fenómenos electrocinéticos y otras propiedades superficiales. En las suspensiones minerales, en la que la distribución de tamaño muestra altos volúmenes de partículas finas, se manifiesta también este fenómeno las cuales son altamente dependientes del PH de la suspensión.

Para el PH cercano al punto isoelectrico, el equilibrio atracción-repulsión entre partículas se desplaza hacia la atracción debido al procedimiento de la fuerza de Vander Waals. En estas condiciones la suspensión incrementa su inestabilidad y muestra los máximos valores de viscosidad, debido a la formación de estructuras más fuertes. A PH alejado de i.e.p, son más importantes las fuerzas de repulsión de carácter electrostática entre las partículas.

### **1.4 Petróleo y emulsiones.**



**Origen y clasificación de los hidrocarburos.**

A los hidrocarburos, se les definen como compuestos químicos de carbón (76 a 86 %) e hidrógeno (14 a 24 %). Elementos como el metano, etano, propano, butano y pentano entre otros, son hidrocarburos que forman partes de otros compuestos de hidrocarburo como gas natural y petróleo. El génesis del petróleo se ubica en el depósito y descomposición de organismos de origen vegetal y animal, que hace millones de años quedaron atrapados en rocas sedimentarias en ambientes marinos o próximos al mar que fueron sometidos a enormes fusiones y elevadas temperaturas. La palabra petroleum, proviene del latín “Petroleum” (piedra = piedra y oleum = aceite) y significa aceite de piedra. Se ha encontrado petróleo en todos los continentes excepto en el antártico, sin embargo el petróleo no se encuentra distribuido uniformemente en el suelo del planeta.

Al analizar petróleo de procedencia diversas, de manera general puede decirse que lo forman los siguientes elementos químicos de 76 a 86 % de carbono y de 10 a 14 % de hidrógeno. A veces contiene algunas impurezas mezcladas como oxígeno, azufre y nitrógeno. También se han encontrado huellas de compuestos de hierro, níquel, vanadio y otro metal. El petróleo se encuentra en el subsuelo, impregnado de formaciones de tipo arenoso y calcáreo. Asume los tres estados físicos de la materia: sólido, líquido y gaseoso, según su composición, la temperatura y presión en que se encuentra. En el subsuelo se encuentra por lo general encima de una capa de agua, hallándose en la parte superior una de gas. Dependiendo del número de átomos de carbono y de las estructuras de los hidrocarburos que integran el petróleo, se tienen diferentes propiedades que los caracterizan y determinan su comportamiento como combustibles, lubricantes, ceras o solventes.

Los yacimientos de aceite crudo están constituidos por los hidrocarburos líquidos a las condiciones de presión y temperaturas del yacimiento, con una viscosidad menor o igual a 10. 000 centipoises. Esta viscosidad es medida a la temperatura original del yacimiento y a la presión atmosférica, como un líquido estabilizado libre de gas. Es práctica común hablar de clases de aceite crudo de acuerdo con su peso específico y



## *Tesis en opción al título de master*

expresado en una escala normalizada por el instituto estadounidense del petróleo (American Petroleum Institute). Esta escala es llamada densidad APL, o comúnmente conocida como grado APL. En la tabla 1.1, se muestra una clasificación del aceite crudo en términos de su densidad aunque hay que enfatizar que la producción de diversos yacimientos productores está asociada a un solo tipo de aceite crudo.

**Tabla 1.1 Clasificación de los aceites según su densidad.**

### **Clasificación de los aceites de acuerdo con su densidad**

No	Petróleo crudo	Densidad(gr./cm <sup>3</sup> )	Densidad(grados API)
1	Extra pesado	> -1.0	< -10.0
2	Pesado	1.01 - 0.92	10.1 - 22.3
3	Mediano	0.91 - 0.87	22.4 - 31.1
4	Ligero	0.86 - 0.83	31.2 - 39
5	Superligero	< - 0.83	> - 39

#### **Fuente, Mommer (2004).**

Para propósitos comerciales y asegurar un mejor valor económico de los hidrocarburos, los aceites crudos vendidos nacional e internacionalmente son en general mezclas de aceites de diferentes densidades.

#### **Emulsiones de petróleos.**

La emulsión es un combustible líquido, en respuesta a la necesidad de explotar los yacimientos de hidrocarburos pesados y extrapesados. Consta de un 70% de bitumen natural, un 30% de agua más aditivo para estabilizar la emulsión (surfactantes). Este combustible está específicamente diseñado para uso en empresas eléctricas y sector industrial. Ha sido usado con éxitos en plantas generadoras de electricidad en Canadá, Estados Unidos, Reino Unido, China, Alemania, Japón, Dinamarca, Italia y Lituania, así en plantas de cemento (Mommer 2004).

### **1.5 Descripción de Flujo Tecnológico de la central termoeléctrica.**



## *Tesis en opción al título de master*

La termoeléctrica de Nicaro es una cogeneradora que tiene como objetivo fundamental producir 90,7 tn/h de vapor sobrecalentado (por cada generador) y a una presión de 15.82kgf/cm<sup>2</sup> para el proceso metalúrgico y como subproducto la energía eléctrica derivada del proceso de transformación de los parámetros del vapor al pasar por los turbogeneradores.

Para la producción de dicho vapor esta termoeléctrica dispone de tres generadores de igual capacidad (90.7 tn/h).

La temperatura de los gases que fluyen producto de la combustión del combustible en el hogar de la caldera prevé una transferencia de energía hacia el agua, la cual circula dentro de la caldera por convección, produciéndose el vapor que al pasar sobre el calentador alcanza una temperatura de 260- 300°C aproximadamente.

Tiene la planta eléctrica la función también de suministrar aire comprimido para instrumentación y servicios de la fábrica en general, además abastece de CO<sub>2</sub>, producto de los gases de la combustión de las calderas, al proceso metalúrgico.

Esta termoeléctrica esta formada por dos plantas principales y dos auxiliares. Las mismas son:

1. Planta de generación de vapor.
2. Planta de generación y distribución de energía eléctrica.
  - Estación de turbinas.
  - Estación central de compresores.

**Breve descripción de las plantas principales.**

***Autor: Ing. Gilberto Sánchez Ferrera***



### **Descripción de la planta de generación de vapor.**

Está compuesta por una planta de vapor con su sistema de bombeo y calentamiento de combustible, bombas de alimentación, tanque de expansión, líneas tecnológicas y cuenta con tres calderas, con capacidad de 90,72 tn/h cada una, de las cuales una fue montada en el año 1978 la (caldera 9) y las otras dos en el año 2001 (caldera 10 y 11), también cuenta con una caldera de reserva con capacidad de 81,8 tn/h (caldera 7). En su conjunto tiene una capacidad total instalada de 353,96 tn/h.

El combustible llega a la termoeléctrica a través de las líneas que alimentan al tanque almacenador, de éste es succionado por medio de bombas y se le añaden los aditivos pentomuls 3 con una proporción de 0.25 litros por tonelada o pentomag 5500 con una norma de 0.30-0.37 litros por tonelada de petróleo en forma directa; más tarde pasa por los calentadores de petróleo y finalmente por el horno de las calderas donde se produce la combustión del mismo. En esta área obtienen el vapor que al salir del sobrecalentador de las calderas a una temperatura de 260°C a 300°C es enviado a un cabezal común para alimentar los turbogeneradores con una presión de 15.82 kgf/cm<sup>2</sup> encargados de producir la energía eléctrica necesaria que consume el proceso industrial metalúrgico y el servicio de planta.

Condiciones del régimen nacional de operación de las calderas y desviación del mismo.

- Presión de vapor sobrecalentado

$$15.82 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

- Presión de vapor en el domo

$$17.8 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

- Presión del agua de alimentación

$$26.72 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$



## *Tesis en opción al título de master*

- Presión del petróleo. Salida bombas eléctricas  $14,062 - 24,608 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
- Temperatura del petróleo en los quemadores  $(111,11 - 155,55)^\circ\text{C}$
- Amperaje motor bomba de petróleo (50 – 55) amp
- Producción de vapor sobrecalentado  $90.720 \frac{\text{tn}}{\text{h}}$
- Controlar flujo de agua de alimentación -
- Revisión de la lubricación de los equipos -

**Tabla 1.1 Desviaciones del régimen normal de operación.**

<b>Tipo de alteración</b>	<b>Posibles causas</b>	<b>Alternativa</b>
Pérdidas bruscas de la presión en el domo.	Entrada excesiva de agua o aumento brusco de la carga eléctrica.	Controlar el nivel manual o automático. Aumentar el caudal de petróleo siempre que exista capacidad.
Alta temperatura de salida de los gases de la caldera.	Carga excesiva anormal. CAR sucio, Caldera sucia	Restablecer carga normal. Sopletear el CAR o parar y lavar el CAR para la caldera y lavar
Aumento brusco del tiro	Carga excesiva anormal. CAR sucio, Caldera sucia	Restablecer carga normal. Sopletear el CAR o parar y lavar el CAR para la caldera y lavar
Pérdida de carga	Quemadores sucios o en mal estado	Sacar quemador y limpiar o cambiar piezas y partes.
Averías en la bomba No.3 de alimentación de agua a caldera	Falta de lubricación Falta de enfriamiento Fallos eléctricos en el motor, fallos mecánicos	Poner en operación la bomba No. 2. Cumplir con las medidas de seguridad mientras dure la avería.



## *Tesis en opción al título de master*

Rotura de los paneles de los hornos (tubos)	Fuerte ruido en el horno, salida de gases y vapor por los registros y chimenea. Caída de nivel. Caída de presión en la caldera	Mantener la alimentación de agua normal, tratando de elevar el nivel. Cortar el suministro de combustible y abrir el aire al máximo para evacuar los gases. Reducir la alimentación de agua a medida que se enfría el hogar.
---	--	--

Fuente: Manual de operaciones de la planta eléctrica, 1996

### **Planta de generación y distribución de energía**

La planta eléctrica consta de tres turbogeneradores, uno de construcción japonesa y dos rusos. Las tres unidades de cuadro nuevo están interconectados a un juego de barra de 3.8 kv de la que parten siete alimentadores para el proceso productivo, de éstos hay dos (H1 y H4) que pueden utilizarse para sincronizar la planta a la red nacional, el cuadro viejo está constituido por tres secciones (A, B, C) de barra de 2.4 kv con interconexión, de las cuales salen 13 alimentadores para el proceso productivo. Las tres secciones están unidas a las barras de sincronización de 13.8 kv. La sección A generalmente esta alimentada por la red nacional. De los dos generadores rusos uno está conectado a la sección del breaker del antiguo generador mediante dos transformadores TIA - TIB de 6.3/ 33 kv – 33/2.4 kv y el otro esta conectado de cuatro nuevo por un transformador T2 de 6.3/13.8 kv. Todas las barras están protegidas por relays diferenciales. En el cuadro nuevo la alimentación de los equipos auxiliares se realizan a través de un transformador Delta-Delta  $\frac{13.8}{2.4kV}$  de 1500kv A de capacidad denominada como E 919.

#### **1.6 Descripción de los generadores de vapor que intervienen en el proceso.**

***Autor: Ing. Gilberto Sánchez Ferrera***



La estación de generación esta compuesta por cuatro generadores de vapor, de ellos dos se encuentran operando constantemente (tabla 1.1), o se necesite darle mantenimiento a uno de los generadores principales, la descripción de estos se muestra a continuación en correspondencia con la prioridad de los mismos.

### **Generador de vapor No 11.**

Esta caldera (**Anexo fig #. 1**) cuentan con dos domos, uno superior de 1.83 m de diámetro y una longitud de 5.3 m. Este domo esta previsto de los separadores de agua constituidos por parrillas en la que se elimina la humedad del vapor, además se encuentran las siguientes uniones:

- Salida de vapor.
- Válvulas de seguridad.
- Entrada de agua.
- Purgas de gases.
- Niveles y su regulación.
- Introducción de reactivos.
- Salida de purgas continuas.
- Manómetros.
- El domo inferior tiene un diámetro de 0.91m y una longitud de 5.2 m. Tiene conectado la válvula de extracción de fondos.

### **Características técnicas.**

Marca: Stein et Roubaix.

Tipos de hornos: Presurizado.

Producción de vapor sobrecalentado  $90.72 \frac{tn}{h}$

Presión de vapor sobrecalentado 15.82kgf/cm<sup>2</sup>





## *Tesis en opción al título de master*

Presión diferencial Pet. /vapor	$(0a1) \text{ kgf} / \text{cm}^2$
Presión de vapor en el domo	$17 \text{ kgf} / \text{cm}^2$
Temperatura de vapor sobrecalentado	$260^\circ\text{C}$
Temperatura de agua de alimentación	$110^\circ\text{C}$
Temperatura de los gases de salida	$180^\circ\text{C}$
Exceso de aire	$15\%$
Consumo de petróleo	$6.16 \text{ tn} / \text{h}$
Número de quemadores ( <b>anexo Fig 2</b> )	$4$
Viscosidad en los quemadores	$3 - 5^\circ\text{E}$

### **Parte principales y equipos auxiliares de los generadores empleados.**

Las partes principales de estos equipos (Domos, quemadores, hornos, hogar, haz de tubo tubular, sobrecalentador, conductos de gases, chimeneas, sopladores de hollín, calentador de aire regenerativo, etc.), se describen ampliamente en los trabajos consultados (Del valle, 2002, Abreu, 2003).

#### **1.7 Lazos de atomización en los generadores de vapor.**

***Autor: Ing. Gilberto Sánchez Ferrera***



## *Tesis en opción al título de master*

Se caracterizan por mantener una relación constante entre el vapor que se utiliza en la atomización (**Anexo fig 3**) y el combustible a quemar, este tiene la particularidad de poder variar la relación combustible –vapor en dependencia del tipo de combustible que se quema manteniendo una diferencia entre la presión de éste y el vapor de forma variable.

La relación está establecida de la siguiente forma.

Por cada un kilogramo de petróleo se añaden tres Kg. de vapor, este es alimentado a través de una línea de suministro de vapor sobrecalentado instalado en las salidas de las calderas. La relación se efectúa mediante un bloque matemático el cual multiplica el valor instantáneo del petróleo por una constante al controlador proporcional integral derivativo (PID). Las ejecuciones del lazo pueden ser realizadas y operadas a través de sistemas de supervisión y control.

### **1.8 Principales actividades programadas, el mantenimiento de los generadores de vapor de la termoeléctrica.**

Los servicios de mantenimiento a los generadores pueden ser de cuatro tipos, ellos son: Revisión, reparación pequeña, reparación mediana, reparación general, el ciclo de mantenimiento mediante el cual se efectúan, así como el tiempo de ejecución se muestran a continuación.

Ciclo de mantenimiento	R	P	M	G
G – 2R – P – M – 2R – P – 2R – G	2880	8640	17280	34560
	(4m)	(12m)	(24m)	(48m)



### **1.9- CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO # 1.**

En la bibliografía consultada de fuente internacional y nacional se mencionan las influencias que tienen diferentes factores y parámetros sobre el uso de los generadores de vapor y de cómo mejorar sus deficiencias a partir del mejoramiento de la calidad del combustible que se alimenta.

Existe un manejo ambiental inadecuado en el uso y explotación en los generadores de vapor que ha originado afectaciones ambientales al entorno con emisiones de gases a la atmósfera de agentes contaminantes y tóxicos afectando la salud de los trabajadores.



## **CAPÍTULO II Diagnóstico del sistema de generación de vapor de la Empresa Comandante René Ramos Latour.**

### **2.1 Introducción.**

La eficiencia con que trabaja un generador de vapor, es desde el punto de vista económico, el parámetro más importante, pues caracteriza con qué efectividad el equipo capta, para la generación de vapor, el calor liberado por el combustible. Para la determinación de su eficiencia se debe realizar un balance térmico.

El objetivo de este capítulo es realizar el diagnóstico del sistema de generación de vapor de la Empresa René Ramos Latour, a partir del balance térmico y exergético de los generadores que lo integran y los ciclos de mantenimiento realizados a los mismos.

### **2.2 Material empleado en las mediciones de los parámetros del proceso.**

Actualmente el proceso de generación de vapor en la Empresa Comandante “René Ramos Latour” se encuentra desde el punto de vista de su automatización y control, en una etapa primaria, pues solo contempla la medición y registro de varios parámetros del proceso por un autómata programable.

A continuación se muestran los instrumentos de medición. Parámetros que se registran y las correspondientes características técnicas de los instrumentos.

#### **Lazo de nivel:**

1. Captador de Nivel de agua en el domo se utiliza un SITRANS p DS4432.
2. Captador de Flujo de agua alimentar se utiliza un SITRANS p DS4432.
3. Captador de Flujo de Vapor se utiliza un SITRANS p DS4432.

#### **Mediciones de Presión: (verificación y notificación de la instrumentación utilizada.)**

1. Captador de Presión de vapor sobrecalentado se utiliza un SITRANS p DS4032.



## *Tesis en opción al título de master*

2. Captador de Presión de vapor Saturado se utiliza un SITRANS p DS4032.
3. Captador de Presión de pulverización se utiliza un SITRANS p DS4032.
4. Captador de Presión del Fuel-Oil se utiliza un SITRANS p DS4032.
5. Captador de Presión de Aire de Combustión se utiliza un SITRANS p DS4432.
6. Captador de Presión de gases de la combustión se utiliza un SITRANS p DS4432.
7. Transmisión de presión diferencial SITRANSP, modelo 4432 SMAR, se emplea para medir la presión del vapor, posee indicación digital y señal de salida de 4-20 mili amperes. Rango de medición: hasta 60 Mbar.

### **Ajuste de la Combustión.**

Como su nombre lo especifica es un ajuste fino del lazo de combustión el período evaluado no se ha logrado poner a punto, debido a que no se han creado las condiciones técnicas necesarias para el buen funcionamiento del Analizador de CO<sub>2</sub> infrarrojo, como su nombre lo indica se utiliza para determinar el % de CO<sub>2</sub> en los productos de la combustión, y es del tipo ULTRAMAR.

### **Medición de Temperatura.**

1. Termo resistencia PT100, se utiliza para medir la temperatura de los gases de salida, posee convertidor incorporado, señal de salida, standar de 4-20 miliamperes. Rango de medición de 0-500 grados centígrados.
2. Analizador de oxígeno ABB, se mide el % de oxígeno producto de la combustión. El principio de medición es empleando óxido de zirconio.
3. Termo resistencia PT100, se utiliza para medir la temperatura del Agua de alimentar, posee convertidor incorporado, señal de salida standar de 4-20 miliamperes. Rango de medición de 0-200 grados centígrados.
4. Termo resistencia PT100, se utiliza para medir la temperatura de fluel-oil, posee convertidor incorporado, señal de salida, standar de 4-20 miliamperes. Rango de medición de 0-200 grados centígrados.



5. Termo resistencia PT100, se utiliza para medir la temperatura de vapor sobrecalentado, posee convertidor incorporado, señal de salida, standar de 4-20 miliamperes. Rango de medición de 0-500 grados centígrados.
6. Termo resistencia PT100, se utiliza para medir la temperatura del Agua de alimentar, posee convertidor incorporado, señal de salida, standar de 4-20 miliamperes. Rango de medición de 0-200 grados centígrados.
7. Termo resistencia PT100, se utiliza para medir la temperatura del Aire de la combustión de alimentar, posee convertidor incorporado, señal de salida, standar de 4-20 miliamperes. Rango de medición de 0-200 grados centígrados.

**2.3 Método de cálculo para el balance térmico de los generadores de vapor que operan en la instalación.**

**2.3.1 Poder calórico bajo del combustible (kj/ kg).**

$$Qb' = 339.C^t + 10.30.H^t - 109.(O^t - S^t) - 24.W^t \text{ ----- (2.1)}$$

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

**2.3.2 Cálculo de los volúmenes de la combustión (m<sup>3</sup>/kg).**

- Volumen de aire teórico.

$$V_a^0 = 0.0889(C^t + 0.375 * S^t) + 0.265 - H^t - 0.0333 * O^t \text{ (2.2)}$$

- Volumen total real de gases triatómicos.

$$V_{RO2} = 0.01866 * (C^t + 0.375 * S^t) \text{ (2,3)}$$

- Volumen Teórico de nitrógeno

$$V_{N2}^0 = 0,79.VV_a^0 + 0,008.N^t \text{ (2,4)}$$

- Volumen teórico de los gases secos.

$$V_{gs}^0 = V_{RO2} + V_{N2}^0 \text{ (2.5)}$$



- Volumen teórico de los vapores agua

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

- Volumen de los gases producto de la combustión.

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

- Volumen teórico total de los gases.

$$V_g^0 = V_{gs}^0 + V_{H_2O}^0 \quad (2.8)$$

- Volumen real de gases.

$$V_g = V_g^0 + (\alpha - 1) * V_a \quad (2.9)$$

- Volumen real de aire.

$$V_a = V_a^0 * \alpha \quad V_a = V^0_a = V^0_a * \alpha \quad (2.10)$$

### 2.3.3 Cálculo del coeficiente de exceso de aire para combustión completa.

$$\alpha = \frac{N_2}{N_2 - 3,76 * (O_2 - 0,5 * CO - 0,5 * H_2 - 2 * CH_4)} \quad (2.11)$$

$$N_2 = 100 - (CO + CO_2 + O_2) \quad (2.12)$$

### 2.3.4 Cálculo de las entalpías de los gases de la combustión y del aire.

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

- Entalpía teórica de los gases.

$$I^0_g = V_{RO_2} * I_{RO_2} + V_{N_2} * I_{N_2} + V_{H_2O}^0 * I_{H_2O} + 0,01.A^t.A_{arr} * I_{cn} \quad (2.13)$$

Donde: Aarr = fracción de ceniza arrastrada por los gases.

A = % de ceniza arrastrada por los gases Para  $\alpha = 1$

Para  $\alpha = 1$   $ICO_2 = IRO_2$

Todos los valores se expresan en kj/m excepto

la ceniza que se expresa en (kj/kg).



**- Entalpía real de los gases.**

$$I_g = I_g^o + I_{aire}^0 (\alpha - 1) \text{ -----} \quad (2.14)$$

$$I_{aire}^0 = V^0 a.i_{aire} \text{ -----} \quad (2.15)$$

Donde:

$I_g$  cantidad de calor de los gases producto de la combustión.

$i_{aire}$  Se busca a la temperatura que entra el aire.

$I_g^0$  Se busca a la temperatura de los gases de escape.

**2.3.5 Balance térmico por el método directo.**

$$\eta_{gv} = \frac{Q_{util}}{Q_d \cdot B} \cdot 100 \text{ (%) -----} \quad (2.16)$$

Donde.

$\eta_{GV}$  = Eficiencia bruta del generador de vapor.

B= Consumo de combustible.(Kg./s)

⇒ Determinación del calor disponible (kj/kg.)

$$Q_d = Q_b^t + Q_{fc} + Q_{fa} + Q_{atm} \text{ -----} \quad (2.17)$$

Donde:

$Q_{fc}$  Calor físico del combustible.

$Q_{fa}$  Calor físico del aire.

$Q_{atm}$  Calor para atomización.

$$Q_{fc} = C_c \cdot t \text{ -----} \quad (2.18)$$

Cc Calor específico del combustible a la temperatura t.

$$Q_{fa} = \alpha \cdot V^0 a.(i_{sp} - i_{af}) \text{ -----} \quad (2.19)$$

Donde.





$i_{sp}$  Entalpía a la salida del precalentador de aire.

$I_{af}$  Entalpía del aire frío.

$$Q_{atm} = D_{atm} \cdot (i_v - i_{vge}) \text{-----} \quad (2.20)$$

Donde.

$i_v$  Entalpía del vapor de atomización (se busca a la temperatura de los gases de escape y la presión atmosférica).

⇒ Determinación del calor útil (Kj/S).

$$Q_{util} = D_{vsc} \cdot (i_{vsc} - I_{aa}) + D_{vs} \cdot (i_{vs} - i_{aa}) + DR(i_{SR} - i_{ER}) + D_p \cdot (i_{Isa} - i_{aa}) \quad (2.21)$$

Los flujos de vapor presentes en la ecuación son: El flujo de vapor sobrecalentado, saturado, para ser recalentado y flujo de la extracción, todo expresado en (kg/s).

Las entalpías presentes en la ecuación anterior son: del vapor sobrecalentado, del agua de alimentación, del vapor saturado a la salida del recalentador, a la entrada del recalentador, del líquido saturado respectivamente, todos expresados en (kj/kg).

### **2.3.6 Balance Térmico por el método indirecto.**

$$\eta_{gv} = 100 - \sum q_n \text{ (\%)} \quad (2.22)$$

$$\sum q_n = q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 \quad \text{(Sumatoria de todas las pérdidas de calor)} \quad (2.22)$$

#### **Determinación de las pérdidas**

⇒ Pérdida en los gases de escape ( $q_2$ )

Esta pérdida se produce al salir los gases de la caldera, a una temperatura y arrastrar 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-  $\Delta T$  mínima para lograr la transferencia de calor.

2- Temperatura adecuada para evitar la corrosión.

$$q_2 = \frac{(I_{gc} - \alpha \cdot I_{af})(100 - q_4)}{Q_d} \quad (2.23)$$

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, quemadores, etc.).

$$q_3 = \frac{(30.2 * CO + 25.8 * H_2 + 85.5 * CH_4) * V_{qs} * (100 - q_4)}{Q_d} \quad (2.24)$$

- Pérdida por combustión mecánica ( $q_4$ ).

La magnitud de esta pérdida depende del combustible, del tipo de horno y de su temperatura. La determinan el combustible que no reacciona en proceso de la combustión, los rangos de su magnitud son:

$$q_4 = 0.5 - 5\% \quad \text{Sólido en cámara.}$$

$$q_4 = 2 - 15\% \quad \text{Sólido en capa y pila}$$

$$q_4 = 0\% \quad \text{Líquidos y gaseosos.}$$

$$q_4 = \left[ a_{esc} * \frac{C_{esc}}{100 - C_{esc}} + a_{cen} * \frac{C_{cen}}{100 - C_{cen}} + a_{arr} * \frac{C_{arr}}{100 - C_{arr}} \right] * \frac{327.8 A^t}{Q_d} \quad (2.25)$$

$$a_{esc} = \frac{B_{esc} * A_{esc}}{B * A^t}; a_{cen} = \frac{B_{cen} * A_{cen}}{B * A^t}; a_{arr} = 1 - a_{esc} - a_{cen}; B = \frac{D}{d} \quad (2.26)$$

Donde:



## Tesis en opción al título de master

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

$C_{esc}$ ,  $C_{cen}$ ,  $C_{arr}$ : contenido del elemento en las cenizas, escoria y los gases de arrastres.

$B_{esc}$ ,  $B_{cen}$ : flujo de cenizas.

D: índice de generación.

### **Pérdida por radiación al medio ambiente ( $q_5$ ).**

Esta abarca todo el calor que por diferentes vías se transfiere al medio ambiente, ya sea por radiación directa a través de los registros abiertos, o por conducción a través de las paredes.

El calor perdido sale por conducción por las paredes. Los rangos de esta perdida son:

Caldera	$D < 10 \text{ t/h}$	$q_5 = 2 - 2.5\%$
	$D = 10 - 100 \text{ t/h}$	$q_5 = 0.5 - 2\%$
	$D = 100 - 300 \text{ t/h}$	$q_5 = 0.4 - 0.5\%$

$$q_5 = q_{5n} \frac{Dn}{D} \quad (2.27)$$

Donde.

$Dn$  = producción de vapor nominal; Kg / s.

D = producción de vapor; Kg / s.

### **Pérdida de calor con la ceniza extraída del horno ( $q_6$ ).**

$$q_6 = \frac{a_{esc} - I_{esc} * A^t}{Qd} \quad (2.28)$$

$$I_{esc} = C_{esc} * t_{esc} \quad (2.29)$$



Donde.

C y t son calores específicos y temperatura de la escoria.

Para combustible líquido  $q_6 = 0$

### **2.3.7 Análisis exergético del sistema.**

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

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

- Exergía de un sistema cerrado en reposo.

Para hallar el valor útil máximo se considera que un proceso que produzca trabajo, éste será el máximo si el proceso es termodinámicamente perfecto, es decir, totalmente reversible interna y externamente, en cuyo caso se cumple que: el cambio de entropía del sistema aislado integrado por el sistema y el medio ambiente es nulo.

En este caso la exergía es:

$$E_x = (U_1 - U_0) - T_0^*(S_1 - S_0) - P_0^*(V_0 - V_1) \text{ (kj/kg)} \quad (2.30)$$

Y por unidad de masa del sistema cerrado.

$$e_x = (\mu_1 - \mu_0) - T_0^*(S_1 - S_0) - P_0^*(V_0 - V_1) \text{ (kj/kg)} \quad (2.31)$$



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

### **Exergía de un flujo.**

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

$$e_x = (h_1 - h_0) - T_0^* (S_1 - S_0) \text{ (kj/kg)} \quad (2.32)$$

$$E_x = m^* [(h_1 - h_0) - T_0^* (S_1 - S_0)] \text{ (kj/Kg)} \quad (2.33)$$

Donde:

H= entalpía de 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 implantado anteriormente. La capacidad de trabajo útil máximo que es posible obtener de ese calor sería por medio del empleo de una máquina térmica de Carnot, o sea:

$$E_q = Q \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) \text{ (kj)} \quad (2.34)$$

Siendo Q el valor 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:

$$E_q = Q \left( 1 - \frac{T_0}{T_m} \right) \quad (2.35)$$

Donde:

T<sub>m</sub> = temperatura media calculada; k

### **Pérdida de exergía en un sistema abierto.**



En los sistemas abiertos la expresión general para calcular la pérdida de exergía es como sigue:

$$\Delta E_x = \sum_{\text{entran}} E_x - \sum_{\text{salen}} E_x \pm E_w \quad (kJ) \text{-----} \quad (2.36)$$

Siendo:

$\sum_{\text{entran}} E_x$ : La suma de la exergía que entran al sistema y deben incluir no solo las exergías de los flujos másicos  $\sum_{\text{entra}} m e_x$  sino también la exergía total  $E_q$  de una fuente de calor si este fuera el caso.

$\sum_{\text{salen}} E_x$ : La suma de la exergía que salen al sistema deben incluir la suma de la exergías de los flujos másicos  $\sum_{\text{salen}} m e_x$ .

La exergía del trabajo  $E_w$  se emplea el signo positivo si el sistema recibe trabajo y el signo negativo si el trabajo es producido por el sistema

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:

$$\eta_{\text{exergético}} = \frac{\text{Exergía recuperada}}{\text{Exergía empleada}} * 100(\%) \quad (2.37)$$

Considerando como exergía recuperada las exergías que salen del sistema y exergía, empleadas todas las exergías que entran al sistema. Las pérdidas de exergía pueden también expresarse por medio de la definición de grado de pérdida.

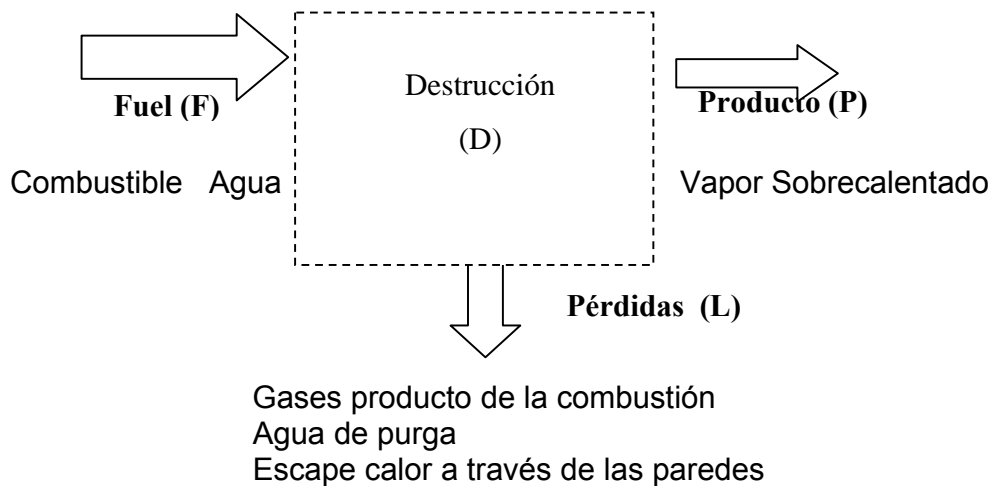
Verificándose que:

$$Y = 1 - \eta_{\text{exergético}} \quad (2.38)$$



Para el caso de los quemadores de vapor de la empresa René Ramos Latour la pérdida de exergía se corresponde con un sistema abierto por lo que es aplicable la ecuación (2.36) y para el cálculo del rendimiento exergético se considera como exergía recuperada: La exergía del combustible (2.34).

La exergía del agua de alimentación, la exergía del aire precalentado y la pérdida, la exergía de los gases de escape y de la extracciones de fondo, todo en correspondencia con la figura 2.1 y utilizando la expresión (2.32).



$$\text{Producto (P)} = \text{Fuel (F)} - \text{Pérdidas (L)} - \text{Destrucción (D)}$$

Fig.2.1 Diagrama de flujo energético.

Fuente: Ficha técnica de la CTE. 2000.

### **COSTO EXERGÉTICO UNITARIO**

$$K_b = 1 + (L + D) / P \quad (2.39)$$

Donde.

L = Pérdida.

- Gases producto de la combustión.



- Agua de purga.
- Escape de calor a través de las paredes.

D = Destrucción.

P = Producto.

- Vapor sobrecalentado.

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

Los datos necesarios para el cálculo de la instalación están reflejados en la tabla 2.2, 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 esta.

Tabla 2.2: Parámetros medidos en la instalación de generación de vapor.

<b>Parámetros</b>	<b>G.V 11</b>
Producción de vapor sobrecalentado (tn/h)	70
Presión de vapor sobrecalentado (Kgf/cm <sup>2</sup> )	15.59
Temperatura de vapor sobrecalentado (°c)	266
Temperatura del agua de alimentación (°c)	80
Temperatura del combustible (°c)	135
Temperatura de los gases de escape (°c)	282
Temperatura de medio ambiente (°c)	32.0
Temperatura a la salida del precalentador (°c)	189
Consumo de combustible (tn/h)	6.145
<b>Composición química de los gases producto de la combustión En %</b>	
Dióxigeno (O <sub>2</sub> )	3.32
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	14.20
Monóxido de carbono (CO)	0.14
Dihidrógeno	0.00





Metano(CH <sub>4</sub> )	0.00
--------------------------	------

El combustible utilizado en este período es CM-650, el mismo tiene una composición química en masa de trabajo y expresado en por ciento (%) Se utiliza para todos los generadores de vapor, y se muestra a continuación:

$C^T=81.3\%$ ,  $H^T=10.0\%$ ,  $S^T=7.0\%$ ,  $O=0.7\%$ ,  $N^T=0\%$ ,  $A^T=0.3\%$ ,  $W^T=1.3\%$

## 2.5 Balance térmico y energético de la instalación.

El balance térmico de la instalación se realizó en correspondencia con el método del cálculo mostrado anteriormente (epígrafe 2.3) y los datos obtenidos en la instalación (epígrafe 2.4), logrando la aplicación exitosa de los métodos directos e indirectos descritos en la literatura especializada (generación de vapor, 1970, Pérez, 1972). Estos métodos permiten la contraposición de los resultados obtenidos los cuales constituyen una herramienta valiosa para la toma de decisiones, el balance energético se efectuó de acuerdo con Fernández (1994). Los parámetros principales calculados para cada generador se muestran en la tabla 2.3.

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

Parámetro	GV 11	Unidad	Ecuación
$Q_b^t$	$3.8577 \times 10^4$	$\frac{kJ}{kg}$	(2.1)
$V_a^0$	10.07	$\frac{m^3}{kg}$	(2.2)
$V_{RO2}$	1.566	$\frac{m^3}{kg}$	(2.3)
$V_{N2}^0$	7.955	$\frac{m^3}{kg}$	(2.4)
$V_{gs}^0$	9.466	$\frac{m^3}{kg}$	(2.5)



$V_{H_2O}^0$	1.288	$m^3/kg$	(2.6)
$V_g^0$	10.754	$m^3/kg$	(2.8)
$V_g$	12.756	$m^3/kg$	(2.9)
$V_a$	11.781	$m^3/kg$	(2.10)
$\infty$	1.17	-	(2.11)
$I_g^0$	$3.555 \times 10^3$	$kJ/m^3$	(2.13)
$I_g$	$4.002 \times 10^3$	$kJ/m^3$	(2.14)
$Q_d$	$3.8857 \times 10^4$	$kJ/kg$	(2.17)
$Q_{util}$	$5.1570 \times 10^4$	$kJ/s$	(2.21)
$\eta_{gv} (M.D)$	77.74	%	(2.16)
$q_2$	19.650	%	(2.23)
$q_3$	0.430	%	(2.24)
$q_4$	0.000	%	(2.25)
$q_5$	2.590	%	(2.27)
$q_6$	0.000	%	(2.28)
$\eta_{gv} (M.I)$	77.33	%	(2.22)
$\eta_{exergético}$	9.21	%	(2.37)
$\gamma$	90.79	%	(2.38)
Kb	10.85		(2.39)

## 2.6 Análisis de mantenimiento en las calderas.



## *Tesis en opción al título de master*

En el período evaluado hubo un alto índice de mantenimiento de los tres generadores de vapor provocados por roturas imprevistas y mantenimientos programados lo que provocó una serie de afectaciones en la producción del níquel y en la producción de electricidad.

Tabla 2.4 Mantenimientos realizados.

Caldera	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
11	1	-	2	-	-	1	1	2	1	1	3	1	13

Los trabajos fundamentales realizados en el período evaluado en las calderas son:

1. Reparación de los quemadores.
2. Trabajos de albañilería.
3. Reparación de medidas de protección.
4. Reparación de las fluserías en las calderas.
5. Reparación del CAR.
6. Reparación de los ductos de gases.
7. Se taponaron tubos de fluserías.
8. Reparación del VTF y VTI.
9. Reparación de tuberías de agua alimentar.
10. Reparación de tuberías de agua fría.
11. Reparación de ductos de aire.
12. Reparación de tuberías de líneas de vapor.
13. Aislamiento térmico de calderas.
14. Reparación del sistema de extracciones.
15. Reparación de los niveles de caldera.
16. Reparación de los toma muestras.
17. Reparación de techo de caldera.
18. Limpieza interior de la caldera.
19. Reparación de los sopladores de hollín.



*Tesis en opción al título de master*

20. Reparación de los diafragma de caldera.
21. Reparación de forro de caldera.
22. Reparación de los sobrecalentadotes.
23. Reparación y cambio de válvula de vapor.
24. Destupir extracciones y cabezales de los colectores de caldera.
25. Reparación del sistema de petróleo en la caldera.
26. Reparación de válvulas de agua fría.
27. Reparación de válvula de agua alimentar caldera.
28. Reparación del interior del domo y sus componentes.



## **CONCLUSIONES DEL CAPITULO II**

- Los valores de rendimiento térmico obtenidos para el generador de vapor 11, a partir de la aplicación del método directo calculado por la expresión (2.16) es 77.74 % lo que representa pérdida considerable alrededor de un 23%.
- El rendimiento término calculado por el método indirecto se obtiene con el empleo de la expresión (2.22), y el resultado es 77.33% para el generador de vapor 11 lo que representa pérdidas considerables de calor, aproximadamente de 23%.
- El valor del rendimiento exergético para el generador de vapor 11, de acuerdo con la expresión (2.37) es 9.22%, lo que representa que está por debajo de la norma que es entre un 12 y un 20%.
- En período analizado año 2008, la instalación de generación mostró inestabilidad en el sistema de mantenimiento, esto evidencia en las intervenciones realizadas ya que se planificaron para el año 2008 un mantenimiento por generadores de vapor y en realidad en el generador # 11 se realizaron 13 reparaciones.



### **CAPÍTULO III Comprobación técnico económico, propuestas de acciones e impacto medio ambiental de las variantes.**

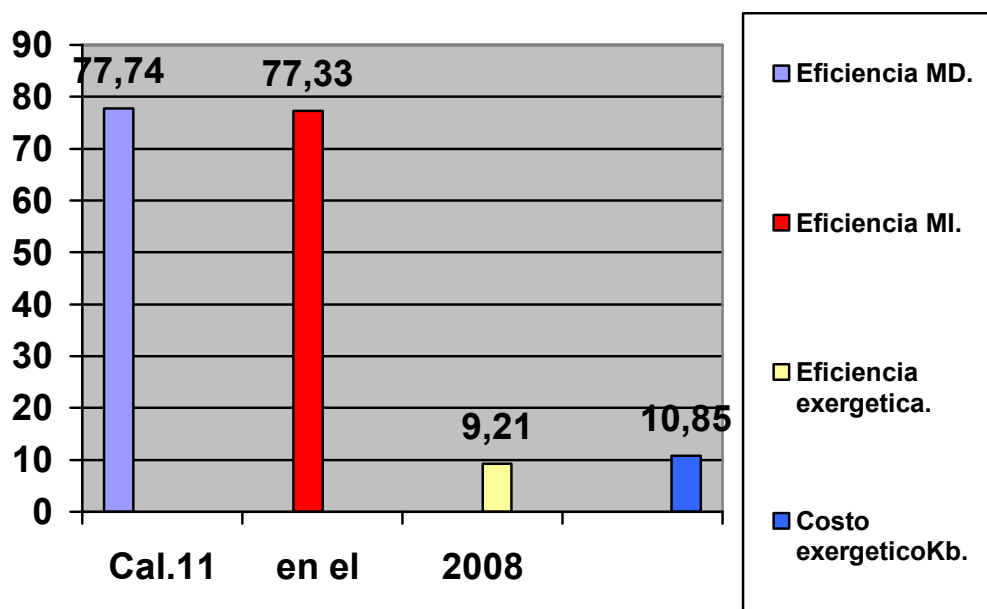
#### **3. Introducción.**

El objetivo de este capítulo es, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el diagnóstico de las medidas de los principales parámetros que rigen el funcionamiento de la generación de vapor, realizar una propuesta que solucione la inestabilidad en la eficiencia termoenergética de la planta eléctrica, además de una evaluación económica del empleo del crudo cubano a pesar de todas las implicaciones que conlleva su utilización.

#### **3.1 Cálculo económico de las variantes.**

##### **Análisis de la eficiencia.**

Haciendo un análisis de la eficiencia del generador de vapor 11 según la tabla 2.3 por el método directo (MD) y el método indirecto (MI), donde se observa que la coincidencia de los dos balances técnicos calculados da la posibilidad de demostrar los resultados obtenidos según el gráfico 3.1.



**Gráfico 3.1**



Como el generador de vapor no realiza trabajo, toda la energía suministrada a él es utilizada en variar la energía interna de las sustancias que intervienen en el proceso. Desde el punto de vista de la primera ley de la termodinámica los rendimientos de las calderas son bajos como se demuestra en el gráfico 1, debido a que no aprovecha toda la energía involucrada, desde el punto de vista de la segunda ley de la termodinámica se aprecia una disminución considerable en el rendimiento exergético de los generadores de vapor según el gráfico 1, dado que el balance no se realiza con energía, sino, con la capacidad para realizar el trabajo o exergía, ésta, a diferencia de la energía en los procesos reales se destruye cuando el sistema cumple su cometido, no toda la energía puede ser utilizada en variar la energía interna de las sustancias que intervienen por la irreversibilidades de los procesos que ocurren en los equipos y las pérdidas inevitables al medio.

Por otro lado la valoración del costo termoeconómico ( $K_b$ ) nos demuestra que se necesitan en la caldera 11 (10.85) unidades de fuel para producir una de producto. Se observa que las mayores pérdidas de energía en los generadores de vapor se producen por la baja temperatura del agua a alimentar y la temperatura alta de los gases, producto de la combustión que se escapa a través de las chimeneas, estas pérdidas podrían en peligro la vida útil de los calentadores de aire regenerativos.

### **3.2 Análisis de los parámetros de trabajo de la caldera 11.**

Haciendo un análisis de la tabla 2.2, de los parámetros fundamentales de trabajo de la caldera, se procede a la representación gráfica de los que han incidido de forma directa en la ineficiencia de la misma.

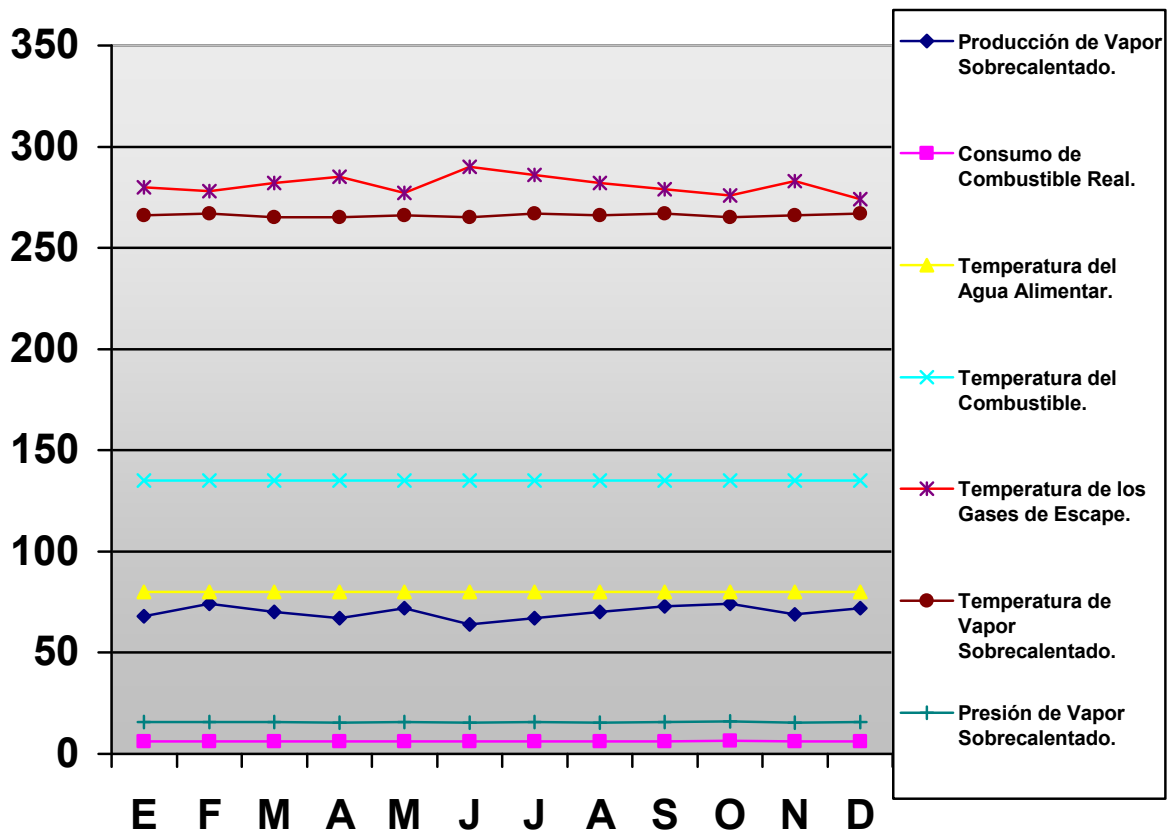
En el gráfico 3.2 de la curva de trabajo del generador número 11 se observa que las variables que han incidido de forma directa en la ineficiencia del generador son:

- Temperatura de agua a alimentar de  $110^{\circ}\text{C}$  está en  $80^{\circ}\text{C}$ .
- La temperatura de los gases de escape de  $180^{\circ}\text{C}$  está alrededor de  $282^{\circ}\text{C}$  con mucha variación.
- La producción de vapor de  $90.72 \text{ Tn/hr}$ . Está aproximadamente a  $70 \text{ Tn/hr}$ .



- El consumo del combustible para esa producción de vapor debería ser de 4.753 Tn/hr. Y está alrededor de 6.146 Tn/hr.

La variación de estos parámetros influyen de forma directa en el rendimiento del generador de vapor que es de un 77.74%.



**Gráfico 3.2. De la curva de trabajo Caldera 11.**

#### **Análisis de la producción de vapor.**

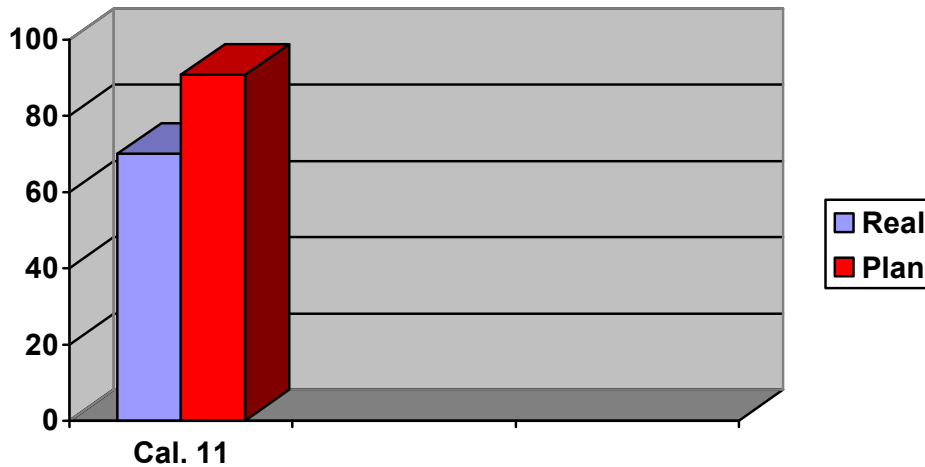
La producción de vapor real difiere de la nominal en el período evaluado (ver gráfico No 3.3). Las causas probables fueron.

- Mal estado técnico de las calderas.
- No trabajan los sopladores de hollín.
- Las temperaturas de los gases de escape están por encima de la nominal (ver gráfico No 3.5).
- Baja temperatura del agua alimentar (ver gráfico No 3.4).





- Mal ajuste de la relación aire combustible.

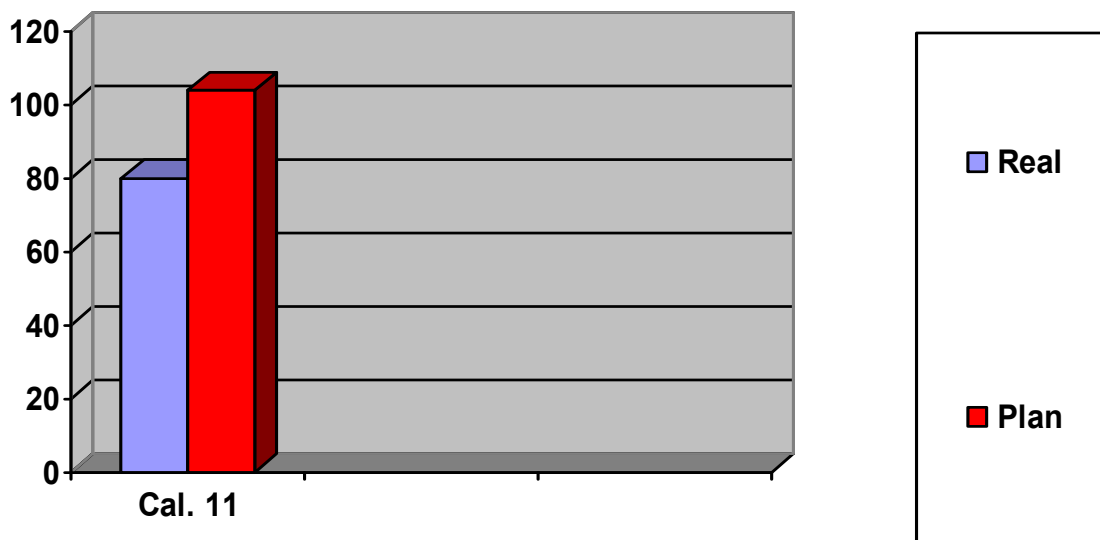


**Gráfico 3.3 Producción de Vapor.**

**Análisis de la temperatura de agua alimentar.**

Causas que provocan que la temperatura del agua a alimentar esté por debajo de la nominal. Como se puede demostrar en el gráfico # 3.4.

- No se utiliza el sistema de condensado.
- El sistema de desaireadores no utiliza el vapor de escape para aumentar la temperatura del agua a alimentar.



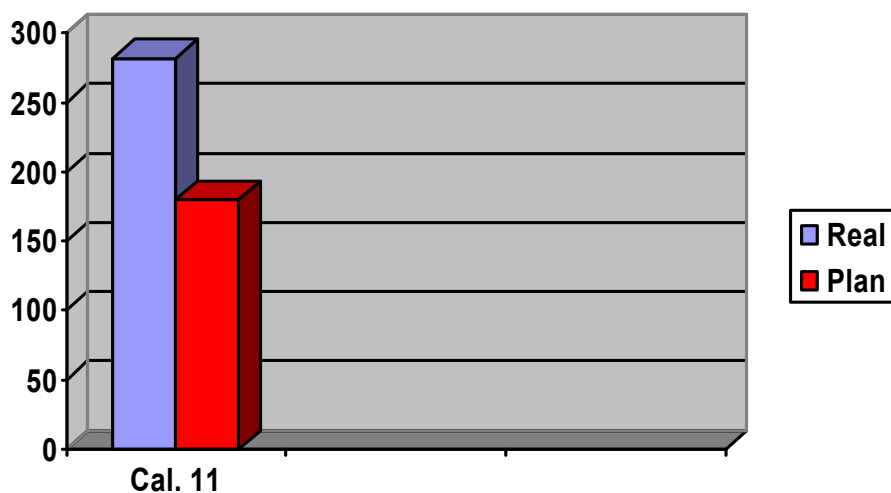
**Gráfico 3.4 Temperatura del Agua a Alimentar**



### **Análisis de la temperatura de los gases de escape.**

Causas que provocan que la temperatura de los gases de escape esté por encima de la nominal. Como se puede demostrar en el gráfico # 3.5

- Los sopladores de hollín no funcionan.
- Suciedad en la parte exterior de la flusería.
- Suciedad en el sistema regenerativo (CAR).



**Gráfico 3.5 Temperatura de los gases de escape.**

### **3.3 Comprobación Técnico Económica.**

#### **3.3.1 Valoración de la producción de vapor.**

Como se puede observar en la tabla 2.2 la producción de vapor sobrecalentado en cada caldera estuvo muy por debajo de su producción nominal y si se tiene en cuenta los días trabajados durante el período evaluado se pueden calcular la cantidad de toneladas de vapor que se dejan de producir durante esta etapa.

(Ver tabla 3.1)



**Tabla 3.1 La Producción de vapor sobrecalentado que se dejó de producir.**

	<b>Caldera 11</b>
<b>Días trabajados al año</b>	<b>266</b>
<b>Pvsc (tn/h)</b>	<b>70</b>
<b>Pvscdp (tn/h)</b>	<b>20.72</b>
<b>Pvscdp (tn/año)</b>	<b>132276.480</b>

Teniendo en cuenta que la planta eléctrica cuenta con tres turbogeneradores, uno de producción japonesa el(# 7), que para producir 1 MW necesita 12 Tn de vapor y dos turbogeneradores rusos (los No 11 y 12) que para producir 1 MW necesita 13 Tn de vapor. Para evaluar la cantidad de MW que se dejaron de producir en el año, se toma para el cálculo, que con 13 Tn de vapor se genera 1MW.

**Tabla 3.2 MW dejados de producir.**

	<b>Caldera 11</b>
<b>MW dejados de producir al año</b>	<b>10175.11</b>

En el año 2008 el precio promedio del MW fue de 119 CUC por lo que podemos decir que la planta eléctrica dejó de ingresar por este concepto 1 210 838,09 CUC.

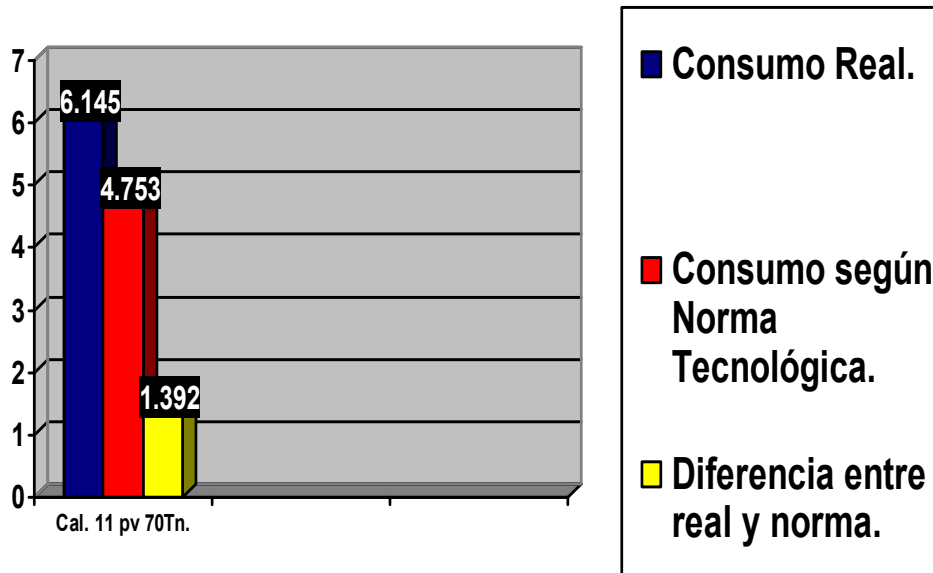
### **3.3.2 Análisis del consumo de petróleo.**

Existe un exceso de consumo de petróleo, por encima de la norma tecnológica de la caldera. (Ver gráfica a continuación). Causas que provocan en el consumo excesivo de combustible (Ver gráfico No 3.6).

- Suciedad en la parte exterior de la flusería.
- Baja temperatura en el agua a alimentar.



- Mal ajuste de la relación aire combustible.
- Incrustación en el interior de la flusería.



**Grafico No3.6 Consumo de combustible**

**Análisis del gasto en que se incurrió por exceso de consumo de combustible en el generador de vapor.**

**Tabla 3.3 Diferencia entre el consumo real y nominal de combustible en el año.**

Caldera	Diferencia entre consumo real y nominal en un año.(tonelada)	Precio promedio del combustible(CUC)	Gasto en (CUC) del consumo excedido.
11	8886,256	324.37	2882523.08

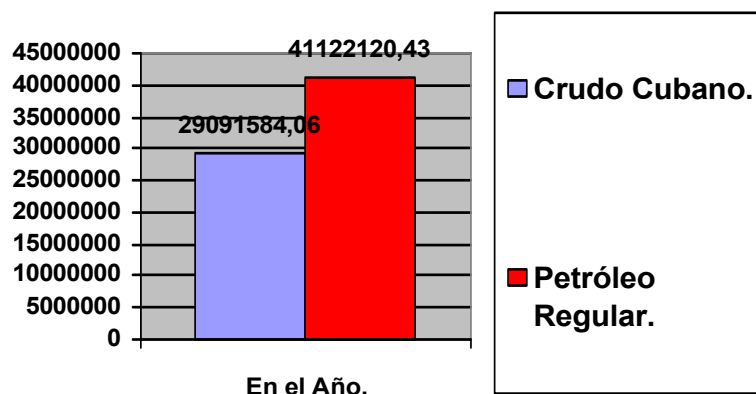
Si se lograra invertir en el generador No 11, para llevarla a sus parámetros de trabajo nominal, la planta se hubiera ahorrado en el año 2882523.08CUC.

Si se hace una comparación del gasto de combustible en CUC, en caso de haber consumido en el año el crudo cubano o el regular se obtienen los resultados que se visualizan a continuación.



**Tabla 3.4 Diferencia en el gasto de combustible entre el crudo regular y el cubano.**

Tipo de combustible	Consumo en el Tn /año	Precio del combustible(CUC)	Gasto en un año (CUC)
Petróleo regular	89686,42	458,51	41122120,43420
Crudo cubano	89686,42	324,37	29091584,05540
Diferencia de precio	89686,42	134,14	12030536,37880



**Grafico 3.7 Costo de petróleo cubano y crudo regular**

Con la utilización del crudo cubano se introducen las deficiencias técnicas que se relacionan a continuación.

1. Formación de depósito de sales de vanadio de bajo punto de fusión en flusería de la zona caliente.
2. Corrosión de la flusería de la zona caliente.
3. Corrosión en el calentador de aire regenerativo (CAR) y ducto de la zona fría.
4. Emanaciones de contaminantes a la atmósfera.
5. Incrementos de gastos de mantenimiento.

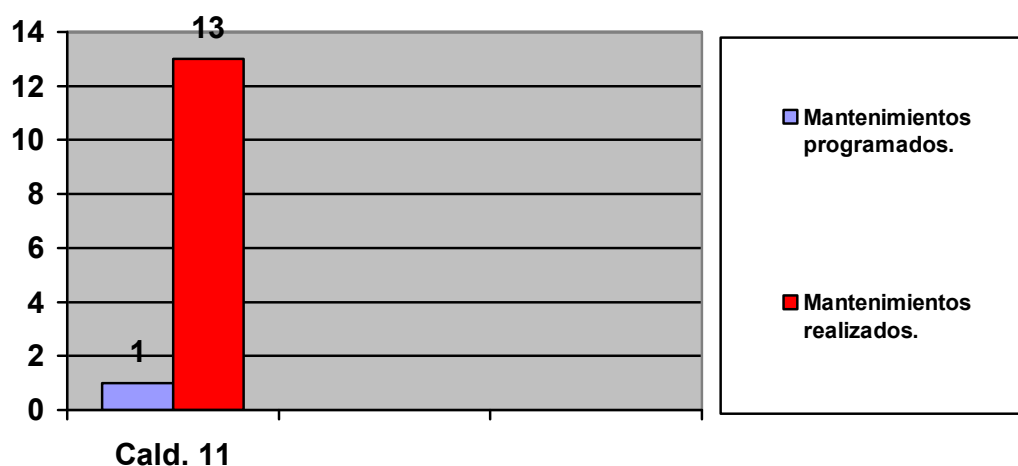


A pesar de las deficiencias enumeradas anteriormente se demuestra que el empleo del crudo cubano aventaja, con un ahorro de 12030536,3788 CUC al consumo de petróleo regular.

### 3.4 Análisis de los mantenimientos.

Las reparaciones se incumplen de acuerdo con lo planificado, según el gráfico # 3.8 debido al alto índice de roturas por los generadores de vapor.

Las reparaciones se incumplen de acuerdo con lo planificado.



**Gráfico 3.8 Mantenimientos.**

Si observamos la tabla 3.5 vemos el gasto excedido en valores del presupuesto planificado para los mantenimientos, el generador # 11 de un alto índice de roturas.



**Tabla 3.5 Diferencia entre los gastos de mantenimientos planificados y realizados.**

Calderas	Gastos planificados (\$) al año	Gastos reales(\$) al año	Diferencia
11	84000,00	104224,54	20224,54

Causa que provocaron los mantenimientos fuera del plan.

1. Mantenimientos mal planificados en número y en tiempo.
2. Mal estado técnico de la caldera.
3. La no utilización del sistema de sopladores de hollín.
4. La utilización del crudo cubano.
5. La falta de recursos por financiamiento.

### **3.5 Propuestas de acciones de mantenimiento, revisiones periódicas y orientaciones para la correcta explotación de los generadores de vapor.**

Debido a los residuales de la combustión, el exterior de los tubos de flusería, va revistiéndose de una película que va en aumento a medida que va trabajando el generador. Este recubrimiento dificulta el tiro y disminuye el rendimiento del generador, por ser muy mal conductor del calor. Se debe dar soplete una vez cada ocho horas con las máquinas sopladoras de hollín para que el interior de la caldera quede limpio y tenga buen intercambio de calor.

Es conveniente aprovechar los mantenimientos de la caldera para abrir los domos para examinar la parte interior de las fluserías, si hubiera incrustaciones calcáreas, habría que estudiar las mejoras del agua de alimentar puesto que estas incrustaciones hacen bajar notablemente la vida de los tubos, para esto se realizan revisiones con el objetivo de determinar el volumen de los trabajos y obtener distintos tipos de información antes del mantenimiento preventivo.



## ***Tesis en opción al título de master***

Con este fin se inspeccionan, detectan y anotan todos los defectos de los equipos que están trabajando y, en caso de necesidad, los equipos de reservas. Durante este trabajo se miden diferentes parámetros.

### **Resumen de revisión periódica.**

#### **Diariamente.**

- Chequeo permanente de los indicadores de (Presión, Temperatura).
- Purgar la caldera de acuerdo con las recomendaciones de los analistas de agua.
- Purgar el botellín y niveles (cada cuatro horas).
- Limpiar boquilla y copa del quemador al apagarlo.
- Chequear la temperatura del termómetro instalado en la chimenea.

#### **Periódicamente.**

- Limpiar el filtro de agua (cada quince días).
- Limpiar el filtro de combustible (cada semana).
- Limpiar electrodos y chicles (con preferencia diariamente).
- Limpiar las válvulas solenoides del quemador.

#### **Cada semana.**

- Hacer funcionar el segundo sistema de alimentación de agua para evitar que se agarrote y tenerlo siempre dispuesto (si existe).
- Limpiar filtro de combustible y de agua de alimentación.
- Drenar tanque de alimentación de agua y combustible.
- Desvalorar por las válvulas de seguridad para evitar su agarrotamiento.
- Se debe vaciar completamente la caldera, volviendo seguidamente a llenarla de agua tratada.

#### **Para estas operaciones se debe tener en cuenta.**

- No vaciar jamás la caldera estando a presión (presurizada)
- Evitar introducir agua fría cuando la caldera está todavía caliente.

***Autor: Ing. Gilberto Sánchez Ferrera***





## *Tesis en opción al título de master*

- El control preventivo de los niveles.
- Realizar una correcta extracción de fondo.

### **Cada tres meses.**

- Revisar el interior de la caldera para ver el estado de conservación de los tubos haciéndole un lavado interior y cambiándole todas las juntas.

### **Mantenimiento por un periodo largo**

#### **Conservación.**

- Debe limpiarse la caldera al fondo en el lado de fuego (para la extracción de carbonillos).
- A continuación debe realizarse esta, lo cual se recomienda hacer con lechada de cal.

#### **Importante.**

- A continuación debe secarse la cámara de la caldera totalmente, ya que toda humedad conduce a corrosiones.
- Examinarse el estado de la caldera en forma periódica.

### **3.5.1 Protección contra la corrosión en la cámara de agua**

#### **Conservación húmeda.**

- Se limpia con agua a presión la cámara de agua de la caldera. Se llena de agua hasta su nivel de trabajo.
- Se eleva la temperatura de agua hasta que hierva, manteniendo abierta una ventilación para eliminar gases disueltos.
- Cuando comienza a salir vapor por la ventilación, se detiene la hervidura, se procede a adicionar los productos químicos previamente disueltos en agua (preferiblemente por separados).  
Sosa cáustica = 0.4 Kg. / m<sup>3</sup>  
Sulfato de sodio = 0.12 Kg. / m<sup>3</sup>
- Se cierra la caldera y se eleva la presión a 2kg/cm<sup>2</sup> para homogenizar la solución.



### **3.5.2 Principales revisores del operador.**

- El operador, antes de efectuar la puesta en marcha, es conveniente comprobar las condiciones del funcionamiento de aquellos elementos que sirven para la combustión, alimentación y regulación del generador.
- Asegurarse que la altura del agua en los niveles está aproximadamente en su nivel medio.
- Purgar los niveles cerciorándose que el agua vuelva a su posición anterior.
- Comprobar que la válvula de paso, la entrada de agua al generador este abierta y llegue agua, cerrar y abrirla cuando el manómetro indique que la presión es de 2 Kg. / cm<sup>2</sup>.
- Comprobar que hay combustible en el depósito y a la temperatura requerida.
- Abrir la válvula general de paso del combustible al quemador.

### **Limpieza del quemador**

Debido a los residuos de la combustión, el exterior de los tubos de flusería va vistiéndose de una película que va aumentando a medida que va aumentando el funcionamiento de los quemadores.

- Este recubrimiento dificulta el tiro y disminuye el rendimiento de la caldera, por ser mal conductor del calor.
- Por lo menos una vez cada 8 horas deberá procederse a la limpieza mecánica a través de la máquina sopladora de hollín.

### **3.5.3 Principales averías que pueden presentarse.**

Si el quemador no arranca comprobar:

1. Presostato control de caldera, no establece contacto.
2. Control de nivel de agua.
3. Dispositivo de seguridad (abierto).
4. No hay corriente (Fusibles rotos).



## *Tesis en opción al título de master*

5. Control de corriente (células) no está en posición de marcha o está averiada.
6. Circuito de control abierto. Conexiones flojas, cables eléctricos rotos.
7. F fotocelda no hay señal.
8. Revisar boquillas.

### **El quemador arranca, pero se para debido a que el dispositivo de seguridad se desconecta.**

1. El fuel-oil.
2. Ignición defectuosa. Electrodo sucio o chicles obstruidos, corto circuito en el cable de alta tensión.
3. Fallo de las sondas fotoeléctricas.
4. La válvula magnética de cierre no abre.
5. Contacto de interruptor de entrada o fusibles defectuosos.
6. Conexiones flojas.
7. Control de falta de agua, desconectado.
8. Botón del dispositivo de seguridad en la caja de control abierta.
9. Presostato bloqueado por exceso de presión ó por averías.

### **Si el quemador no para.**

1. No hay combustible en el depósito.
2. Presostato graduado alto.

### **Si el fuego se extingue mientras funciona el quemador.**

1. Filtro sucio. Chicles sucios (boquillas).
2. Presión demasiado alta o baja.
3. Agua emulsionada en el aceite que perjudica la regulación de las válvulas (decanter el agua en los tanques y drenarlo).
4. Presión de aceite variable o nulo.
5. Polvo o partículas en suspensión en el aceite.



**Combustión defectuosa.**

1. Fuego a pulsaciones o fluctuantes. Mala regulación del quemador (aire y combustible), combustible frío, combustible demasiado caliente. Pasos de humo lleno de hollín. Agua en el aceite.
2. Carbonización. Mala regulación del quemador.

**3.5.4 Orientaciones para la correcta explotación de la caldera.**

**Condiciones a tener en cuenta.**

El personal de servicio de las calderas debe conocer y cumplir estrictamente todas las exigencias establecidas en la presente información.

- Durante el turno de trabajo el operador debe anotar en el LIBRO DE CONTROL (LC) todas las operaciones de obligatorio cumplimiento y observaciones necesarias.
- Durante los cambios de turnos, el personal entrante verificará las anotaciones hechas en el turno anterior en el LC, así como el estado de funcionamiento de las calderas y dispositivos de emergencias y la comunicación (en caso que exista).
- Los operadores de calderas no deben efectuar otras funciones que sean propias de calderas o afines a las mismas.
- Se prohíbe dejar las calderas sin vigilancia mientras haya combustión en el hogar y/o que la caldera tenga presión hasta que no disminuyan el 30% de su valor superior.
- Antes de comenzar cualquier trabajo en el interior de la caldera hay que tener las siguientes precauciones.
  - No se pueden abrir los registros de hombres y de manos y realizar reparaciones a cualquier elemento de la caldera que trabaje a presión sin comprobarse la ausencia total de presión.
  - Para abrir el registro de la caldera y demás elementos hay que extraer el agua de los mismos.
- La realización de los trabajos en el interior del hogar y conductos de gases solo se podrán realizar a temperatura por debajo de los 41<sup>0</sup>c. Las personas que realicen



## *Tesis en opción al título de master*

trabajos en el interior deben salir cada 20 o 30 minutos. Se situará un ayudante afuera.

- Para trabajar en el interior de las calderas, en la plataforma, en los conductos de gases, etc., hay que usar extensiones eléctricas con voltajes menores de 36 volt.
- Siempre operar en la caldera que tenga mejor estado técnico y el mayor rendimiento energético.
- Evitar mantener calderas de reservas, bajo presión o embotelladas.
- Evitar las variaciones bruscas de cargas.
- Reutilizar los condensados y los circuitos de agua de alimentación.
- Generar el vapor a la mínima presión posible.
- Mantener actualizado el Libro de Control de operaciones e incidencias.
- Analizar diariamente los aspectos reflejados en el Libro de Control.

### **3.5.5 Almacenamiento y trasiego de combustible.**

#### **1. Almacenamiento de Petróleo.**

El almacenamiento de petróleo combustible (fuel- oil) lleva consigo la necesidad de calentarlo o mantener una temperatura que permita ser bombeado fácilmente (temperatura de 35 a 40 °c).

#### **2. Bombeo de Petróleo Combustible.**

El bombeo de petróleo no debe realizarse a temperatura inferiores de 35 a 40 °c.

#### **3. Tanque Intermedio o Tanque Diario.**

Los tanques intermedios o diarios se mantienen, por lo que deben aislarse para evitar pérdidas térmicas.

#### **4. Tuberías de Trasiego.**

Las tuberías de trasiego deben estar aisladas en grandes distancias de trasiego, pueden ser recomendables líneas acompañadas de vapor para el calentamiento del vapor.



#### **5. Pintura de los Tanques.**

Los tanques de petróleo combustible tendrán pintado el techo de color negro metálico y el zócalo de identificación será de color blanco.

#### **6. Aforo de los Tanques.**

Todos los tanques de combustibles deben ser aforados y los medios utilizados para medir contenido serán verificados y aprobados por el organismo competente.

Tanto el combustible diesel como el fuel-oil deben ser filtrados convenientemente antes de la bomba de combustible y los tanques purgarlos de agua periódicamente (se recomienda una vez por semana).

El fuel-oil debe ser calentado a la temperatura adecuada definida por su viscosidad.

Una temperatura baja nos dará una buena atomización. La temperatura muy alta formará escorias. De acuerdo con las características del petróleo combustible en usos actuales, se debe calentar entre 100 – 130<sup>0</sup>C para la atomización mecánica y mixta.

#### **3.5.6 Preparación de la caldera para el encendido.**

Antes de comenzar el encendido de la caldera es necesario observar lo siguiente.

1. Que estén en buen estado los quemadores y los conductos de gases, los cierres y sistemas de regulación. Que no hayan personas, herramientas u objetos ajenos en el interior de la caldera.
2. Que estén en buen estado los instrumentos de medición y de control, los accesorios y el sistema de alimentación.
3. Que esté en buen estado el sistema de alimentación de combustible de la caldera.
4. Que haya agua hasta la marca del nivel mínimo.
5. Que la caldera mantenga el nivel, que no haya salideros de agua por los registros, uniones y accesorios.
6. Comprobar que no estén bloqueadas las válvulas de seguridad, las líneas conductoras de los gases y de alimentación del aire y las líneas de extracción de fondo.



7. Difusores limpios sin escorias y ajustados.
8. Ventiladores en correcto estado de funcionamiento y limpieza.
9. El refractario, sin formación de escorias y otras irregularidades.
10. Las boquillas o toberas del quemador de la capacidad y dimensiones apropiadas, sin deformaciones, golpes o ralladuras.

### **3.5.7 Encendido de las Calderas.**

1. El encendido de la caldera tiene que realizarse en el período de tiempo prescrito por el centro, con fuego lento, tiro bajo, cerrada la válvula principal de cierre de vapor y abriendo la válvula de purga de aire.
2. Cuando por la válvula de purga de aire comienza a salir el vapor, la misma se cierra.
3. El apriete de los tornillos, tuercas, así como el de los diferentes registros y tapas durante el calentamiento se efectuará cuidadosamente.
4. El control de incendio se ejecutará mediante la observación de la.
  - Atomización, dimensiones de la llama y su temperatura (verificar a través de la claraboya de observación).
  - La atomización deficiente se observa cuando hay formación de escorias en el hogar, o se observan al final de la llama puntos brillantes.
  - La temperatura de la llama para nuestras condiciones debe oscilar entre 1600 a 1800 °C y su color debe ser amarillo rojizo y azul rojizo.
5. De precalentarse el aire debe ser con calores residuales.

### **3.5.8 Conexión de la caldera al sistema**

1. Antes de conectar la caldera al sistema hay que verificar lo siguiente.
  - El buen funcionamiento de las válvulas de seguridad, indicadores de nivel de agua, manómetros, bombas y sistemas de alimentación de agua.



## *Tesis en opción al título de master*

- Que estén conectados y funcionen los dispositivos automáticos de seguridad, la señalización y funcionamiento de los sistemas automáticos de control de la caldera.
  - El correcto funcionamiento de las válvulas de extracción de fondo.
  - Se prohíbe poner en línea o explotación la caldera, si existen defectos en los equipos, accesorios y línea anteriormente mencionada.
2. La conexión de la caldera al sistema tiene que realizarse lentamente, dando tiempo a que la tubería se caliente y se dilate pareja, realizando a la vez el drenaje o purga del cabezal. Durante el calentamiento hay que estar atento al buen estado de las líneas y sistema en general, si se sienten vibraciones o golpes, hay que detener el calentamiento, e inmediatamente eliminar el motivo de las mismas.
  3. A medida que vaya incrementando la carga de la caldera, la purga del cabezal se va reduciendo y cuando alcance la mitad de la carga nominal, se cierra totalmente.
  4. A la hora que se realice el encendido de la caldera tiene que anotarse en el Libro de Control, así como las incidencias principales durante la operación.

### **3.5.9 Parada de la caldera**

1. Durante la parada de la caldera:
  - Mantener el nivel del agua por encima del nivel medio de trabajo.
  - Cerrar la alimentación del combustible quemado.
  - Desconectar la caldera de la línea de vapor en cuanto para la combustión en el hogar y cese la producción de vapor, la presión de la caldera aumenta, se permite hurgar la caldera y completar (mantener) el nivel de agua.
  - En los casos que sea indispensable extraer el agua de la caldera, esto se hará de acuerdo con las instrucciones establecidas.
2. Durante la parada de la caldera automática que trabaja con combustible líquido tiene que desconectarse el interruptor general.





## *Tesis en opción al título de master*

3. El orden para la observación de las calderas paradas tiene que corresponderse con las indicaciones de la instrucción del fabricante para el montaje y explotación de la caldera.

### **3.5.10 Parada de emergencia**

1. En el caso de averías el personal de operación está obligado a parar inmediatamente la caldera e informar a sus jefes inmediatos y a la dirección del centro. A su vez reflejarlo en el Libro de Control. Esta parada se hace en los casos siguientes.
  - a) Se dejan de funcionar más del 50% de las válvulas de seguridad y demás dispositivos de seguridad.
  - b) Se eleva la presión por encima de la autorizada más del 10% y continua aumentando, aunque se haya disminuido la entrada de aire.
  - c) Cuando el nivel de agua de la caldera desaparece (por debajo del nivel mínimo permisible).
  - d) Si el nivel de agua de la caldera desciende, aunque se esté alimentando la caldera.
  - e) Si el nivel de agua de la caldera aumenta por encima del máximo permisible y no disminuye, aunque se purgue.
  - f) Si dejan de funcionar los indicadores de agua.
  - g) Sin dejan de trabajar las bombas del sistema de alimentación de agua.
  - h) Si en los elementos fundamentales de la caldera (placas, tubos, colectores, cámaras, tubos de agua, tuberías de vapor, domos, separadores).
  - i) Si no funciona el tiro, o se daña la obra refractaria, o cualquier otro elemento de la caldera que pueda poner en peligro al equipo y/o a la vida del personal.
2. Para hacer la parada de emergencia es indispensable.
  - a) Parar el suministro de combustible, de aire y reducir bruscamente el tiro.
  - b) Apagar y extraer combustible que quede encendido en el hogar, en caso de utilizar combustible sólido.



## *Tesis en opción al título de master*

- c) Después de apagar la combustión en el hogar, hay que abrir por poco tiempo los conductos de gases.
  - d) Desconectar la caldera de la línea principal de vapor.
  - e) Descargar vapor a través de la válvula de seguridad o por la válvula de escape para averías.
3. Durante el turno de trabajo, los operadores de la caldera tienen que velar por el buen funcionamiento y estado de la caldera, y de los demás mecanismos (dos en la casa de caldera). Fundamentalmente durante el trabajo de la misma hay que observar lo siguiente:
    - a) Mantener el nivel de agua normal en la caldera y el régimen uniforme de alimentación, durante el trabajo no se permite que el nivel de agua sobrepase el nivel máximo, ni este por debajo del nivel mínimo.
    - b) Mantener la presión de trabajo normal y nunca encima de esta.
    - c) Mantener la temperatura de agua de alimentar.
    - d) Mantener la limpieza y trabajo de los quemadores.
  4. La comprobación del funcionamiento de los manómetros mediante la válvula de tres pasos o la válvula de cierre que sustituya, debe realizarse como mínimo una vez por turnos y anotarse en el Libro de Control.
  5. Debe comprobarse el buen funcionamiento de las válvulas de seguridad mediante su accionamiento directo. El resultado de esta comprobación debe recogerse en el Libro de Control.
  6. Debe comprobarse el buen funcionamiento de todas las bombas de alimentación, se prueba mediante el accionamiento en breve intervalo de cada una de ellas.
  7. Las extracciones de fondo, se tienen que hacer con la periodicidad establecida por el analista de agua o de acuerdo con el resultado del análisis químico del agua de caldera.

### **3.5.11 Problemas, causas y soluciones, más frecuentes a realizar en el quemador.**



## *Tesis en opción al título de master*

Por lo general algunos problemas, causas posibles y las soluciones que se presentan las damos a conocer en el siguiente cuadro.

**Tabla: 3.6 Problemas, causas y soluciones más frecuentes a realizar en el quemador.**

TIPO DE ALTERACION	POSIBLES CAUSAS	ALTERNATIVAS
Pérdida brusca de la presión en el domo	Entrada excesiva de agua. Aumento brusco de la carga eléctrica	Controlar el nivel manual o automático. Aumentar el caudal de petróleo siempre que exista capacidad
Alta temperatura de salida de gases de la Caldera	Carga excesiva anormal. CAR sucio Caldera sucia Exceso de caudal de aire	Restablecer carga normal. Sopletear el CAR o parar y lavar el CAR. Parar la caldera y lavar. Ajustar el damper del ventilador
Aumento brusco del tiro	Carga excesiva anormal. CAR sucio Caldera sucia Exceso de caudal de aire	Restablecer carga normal. Sopletear el CAR o parar y lavar el CAR. Parar la caldera y lavar. Ajustar el damper del ventilador
Pérdida de carga	Quemadores sucios o en mal estado CAR sucio Fusería interna sucia	Sacar quemador y limpiar o cambiar piezas y partes. Limpiar el CAR (soplado o lavado) Lavar la caldera
Avería en la bomba No 3 de alimentación de agua a calderas	Falta de lubricación. Falta de enfriamiento. Fallos eléctricos en el motor Fallos mecánicos	Poner en operación la bomba no 2 o 4. Cumplir con las medidas de seguridad mientras dure la avería.
Rotura de los paneles de los	Fuerte ruido en el horno, salida de gases y vapor por	Mantener la alimentación de agua normal, tratando de elevar el nivel.



## *Tesis en opción al título de master*

hornos ( tubos)	los registros y chimeneas. Caída del nivel. Caída de presión en la caldera Pérdida de carga en la caldera	Cortar el suministro de combustible y abrir el aire al máximo para evacuar los gases. Reducir la alimentación de agua a medida que se enfría el hogar. Vaciar la caldera cuando se encuentre fría. Apagar la caldera o algún quemador.
Extinción de la llama en los quemadores.	Cese o disminución importante de la alimentación de combustible. Soplado a muy baja carga de la caldera. Mala secuencia del soplado de la caldera. Cambio brusco de la calidad del combustible. Exceso de humo en la chimenea.	En este caso se prohíbe seguir suministrando combustible e intentar el autoencendido. Se ventilará el horno durante 5 o 10 Minutos antes de encender el quemador.

### **3.6 Valoración económica.**

La evaluación de los recursos energéticos desde el punto de vista económico constituye la parte culminante para la proposición de mejoras del proyecto térmico en estudio por lo que la cuantificación monetaria de las diferentes formas energéticas dan a conocer una formación muy valiosa.



## *Tesis en opción al título de master*

De acuerdo con los resultados obtenidos se comprobó, mediante análisis y cálculos que.

- El consumo de combustible en exceso en los generadores de vapor es de 8886,256 toneladas al año.
- El costo del crudo cubano en 2008 es de CUC 324,37 la tonelada.

Las pérdidas monetarias son de  $8886,256 \times 324,37 = 2882434,85872$  CUC al año.

Los gastos de mantenimiento se excedieron del presupuesto planificado de la siguiente forma.

Gastos por concepto de mantenimientos realizados al año de 104224,54 CUC menos el gasto planificado 84000,00 CUC da como resultado el gasto excedido de 20224,54 CUC, Teniendo en cuenta la baja producción por los generadores al año se dejó de producir 132276,480 toneladas al año y si para producir un MW se necesita 13 toneladas de vapor entonces podemos calcular los MW dejados de producir al año ascienden a 10175,11 MW.

Si en el año 2008 el precio promedio fue de CUC 119 ahora las pérdidas monetarias serían.

Pérdidas monetarias son de  $10175,11 \times 119 = 1210838,09$  CUC al año.

Si sumamos todas las pérdidas en el año por los diferentes conceptos se concluye.

- Pérdidas por exceso de combustible 2882434,85872 CUC.
- Pérdidas por exceso de gastos de mantenimiento 20224,54 CUC
- Pérdidas por los MW dejados de producir 1210838,09 CUC.
- Total de pérdidas al año 4113497,48872 CUC.

El consumo de combustible en los generadores de vapor fue de 89686,420 toneladas al año.

Si hacemos una comparación entre el costo del combustible regular y el crudo cubano se concluye.

El costo del combustible regular en el año es  $458,51 \times 89686,420 = 41122120,4342$  CUC al año.

El costo del crudo cubano en el año fue de  $324,37 \times 89686,420 = 29091584,0554$  CUC al año.



## *Tesis en opción al título de master*

El ahorro bruto en el año por diferencia de precio entre el combustible regular y el crudo cubano es de 12030536,3788 CUC al año.

La ganancia útil con el empleo de crudo cubano es de 12030536,3788 CUC al año.

### **Propuesta de inversión.**

En el período que evaluamos, La planta de generación de vapor en la Empresa Comandante René Ramos Latour se caracterizó por un mal funcionamiento provocado por la baja producción de vapor, alto índice de consumo de combustible y un alto gasto de mantenimiento excediendo al presupuesto planificado por el alto por ciento de roturas.

Se propone para el 2011 invertir en el generador No 11, teniendo en cuenta que en el año anterior se invirtió en el generador No 10 con buenos resultados.

### **Tiempo de recuperación de la inversión**

Determinación del efecto económico.

$$\mathcal{E} = \frac{G_{\text{Útil}}}{V_{\text{inversión}}}$$

Donde  $\mathcal{E}$  es efectividad económica.

$V_{\text{inversión}}$  es Valor de la inversión.

$G_{\text{Útil}}$  es Ganancia Útil.

Ganancia Útil es el valor del MW dejado de producir al año más el gasto del consumo del combustible en exceso al año en el generador No 11.

$G_{\text{Útil}} = 1210838,09 + 2882523,08 = 4093361,17$  CUC al año.

$V_{\text{inversión}} = 3200000,00$  CUC.

$$\mathcal{E} = \frac{4093361,17}{3200000,00} = 1,279$$

**Determinación del tiempo de recuperación de la inversión.**



## *Tesis en opción al título de master*

$$t = \frac{1}{\varepsilon}$$

Donde t es el tiempo de recuperación de la inversión en (años).

$$t = \frac{1}{1,279} = 0,7818 \text{ años}$$

El tiempo de recuperación es de 9 meses con 11 días lo que demuestra que es factible la inversión.

### **3.7 Impacto medioambiental.**

La protección del medio ambiente es uno de los problemas científico – técnico más complejo que enfrenta la humanidad actualmente. El desarrollo vertiginoso de la industria en los últimos años ha llevado a niveles sin precedentes, la contaminación de la atmósfera y las aguas con sustancias nocivas al hombre, los animales y plantas. Nuestro país donde desde el triunfo de la revolución se ha desarrollado notablemente la industria, no está exento de esta problemática, aunque la contaminación ambiental no alcanza aún los niveles de los países altamente industrializados. A nivel mundial las centrales termoeléctricas consumen más de la tercera parte de la cantidad total del combustible extraído, por lo que ejercen gran influencia sobre el medio ambiente. Lo anterior está condicionado por los siguientes factores.

1. La emisión a la atmósfera de gran cantidad de gases y partículas producto de la combustión, causantes de afecciones respiratorias en la población que viven en las áreas afectadas y daños al ecosistema.
2. La contaminación física, química y térmica de aguas superficiales y subterráneas de ríos, mares y lagos con los consiguientes efectos secundarios sobre los ecosistemas acuáticos y sobre el hombre.
3. La evacuación de aguas contaminadas con petróleo y otras sustancias químicas.
4. Contaminación del suelo con el consiguiente deterioro de sus propiedades destruyendo la vegetación y limitando sus posibles usos agrícolas y forestales.

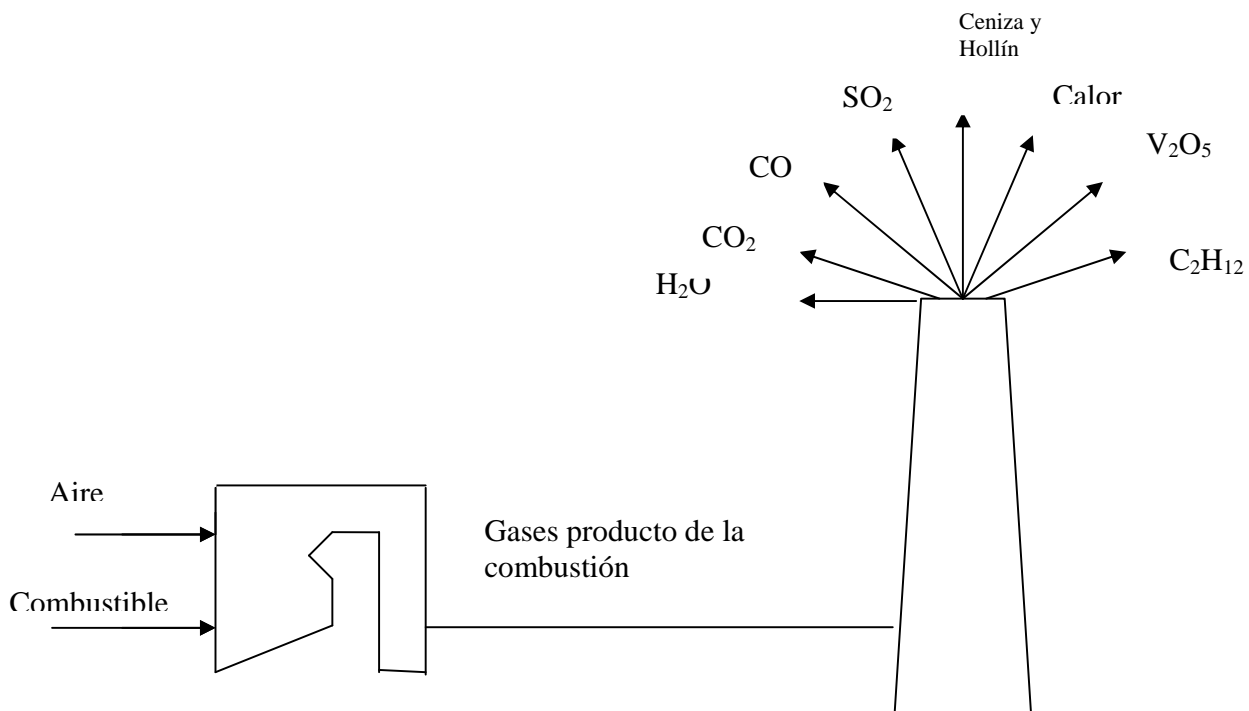


Fig. 1 El esquema de la interacción de un quemador de vapor con el medio ambiente.

Durante la combustión del petróleo en los hornos de los generadores de vapor se expulsan a la atmósfera, con los gases producto a la combustión, los siguientes compuestos ver (figura 1).

1. Óxido de azufre:  $\text{SO}_2$  y  $\text{SO}_3$ .
2. Óxido de nitrógeno:  $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$ .
3. Partícula de cenizas.
4. Pentóxido de vanadio:  $\text{V}_2\text{O}_5$ .
5. Producto de en combustión mecánica y química.





## *Tesis en opción al título de master*

- a) Monóxido de carbono: CO.
- b) Benzopireno: C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>.
- c) Hidrocarburo del tipo: CH<sub>4</sub> y C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>.

También están presentes en los gases producto de la combustión los sedimentos de la superficie de calentamiento desprendido durante su limpieza. La mayor parte de estos compuestos poseen un alto grado de toxicidad y ejercen una influencia nociva sobre el hombre y la naturaleza. La disminución de la emisión de óxidos de nitrógeno se puede lograr por medio de la desulfuración del combustible. Una disminución considerable de la emisión de óxido de nitrógeno y algunas sustancias cancerígenas es posible con la organización correcta del proceso de combustión en los hornos de los generadores de vapor.

Las sustancias contaminantes ejercen una gran influencia sobre el hombre y la naturaleza. A la atmósfera llegan sustancias contaminantes procedentes de las centrales termoeléctricas y otras industrias, así como procedentes del transporte automotor y otras fuentes de contaminación creada por la acción del hombre. Se ha podido comprobar que la contaminación ocasionada por las emisiones gaseosas y de metales pesados en suspensión, resultantes de la combustión de hidrocarburo tanto de las plantas de generación eléctrica, las industrias, automóviles y hogares, constituyen una de las causas principales de las enfermedades de las vías respiratorias, la piel y diversos tipos de cáncer. De las sustancias contaminadas en los gases producto de la combustión solo son inofensivos para el hombre los vapores de agua, el dióxido de carbono, el oxígeno, y el nitrógeno. Los otros compuestos en mayor o menor grado son nocivos.

Investigaciones realizadas confirman el hecho de que el SO<sub>2</sub> en la atmósfera se oxida hasta SO<sub>3</sub> el cual a su vez reacciona con la humedad del aire y se obtiene como resultado ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Este proceso se acelera visiblemente en presencia de radiación solar y de partículas de polvo muy pequeñas, que constituyen catalizadores de esta reacción.



De acuerdo con la influencia de las sustancias contaminantes sobre el organismo humano, las mismas pueden clasificarse de las siguientes formas.

- Sustancias de alta peligrosidad: Pentóxido de Vanadio;  $V_2O_5$ , Benzopireno;  $C_{20}H_{12}$ .
- Sustancias de mediana peligrosidad: Dióxido de Nitrógeno;  $NO_2$  y Dióxido de Azufre;  $SO_2$ .
- Sustancias de baja peligrosidad: Monóxido de nitrógeno;  $NO$  y Trióxido de Azufre;  $SO_3$ .

A continuación se exponen los efectos nocivos que provocan algunas sustancias contaminantes; las principales fuentes donde se originan (Tabla 3.8).

#### **Dióxido de Azufre.**

Su acción tóxica sobre las plantas consiste en la alteración de la fotosíntesis debido a la destrucción de la clorofila, lo que conduce a la caída de las hojas. Las plantas que cambian las hojas anualmente sufren la acción del  $SO_2$  en menor escala. Un aumento de la concentración de  $SO_2$  en el aire atmosférico está acompañado por el incremento de los índices de mortalidad y por el empeoramiento del estado de los enfermos que padecen de enfermedades respiratorias.

La naturaleza tóxica del  $SO_2$  implica que su emisión represente un impacto directo sobre la calidad del aire. Este representa un impacto continuo y de duración igual a la vida útil de los generadores de vapor. Su disposición sobre el suelo o su absorción por los animales y por el hombre puede generar efectos a largo plazo e incluso irreversibles para la salud humana. La emisión del dióxido de azufre da origen a la formación de la llamada "Lluvia ácida", que afectan a la biosfera por los daños que producen los bosques, ríos, lagos, y terrenos cultivables. Las lluvias ácidas tienen un notable efecto exfoliante y son las causas de la desaparición de extensas zonas boscosas sobre todo en el hemisferio norte. Además tienen como agravante que la acidez de los suelos es acumulativa y prácticamente no se elimina haciéndolo inservibles para el proceso de reforestación.



El impacto que esto produce sobre la biosfera en general es incalculable. Las emisiones de dióxido de azufre y la subsiguiente formación de ácido sulfúrico son también responsables de los ataques sufridos por las calizas y el mármol a grandes distancias. También se ha podido apreciar su efecto corrosivo sobre materiales de construcción, edificios, equipos industriales, monumentos y joyas arquitectónicas de la antigüedad, lo que representa una pérdida económica considerable.

### **Óxido de Nitrógeno.**

Por su parte los principales óxidos de nitrógenos que pueden formarse durante la combustión son: El óxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) los cuales comúnmente se simbolizan de forma genérica como NO<sub>x</sub>. Existen una serie de reacciones que pueden llevar a la oxidación del NO transformándolo en NO<sub>2</sub>, las cuales dependen de la temperatura y de la presencia de otros contaminantes. De los óxidos de nitrógeno sólo el NO<sub>2</sub> representa peligro para el medio ambiente dada su naturaleza tóxica. En las zonas contaminadas con NO<sub>2</sub> se incrementan la incidencia de las enfermedades respiratorias, además el NO<sub>2</sub> en concentraciones de 4 a 6 mg/m<sup>3</sup> ocasionan serios daños en las plantas. Los óxidos de nitrógenos al absorber la radiación solar, tanto en la parte ultravioleta como en las visibles del espectro disminuyen la transparencia de la atmósfera y condiciona la niebla fotoquímica ó SMOG. El lo que respecta a la emisión de partículas (cenizas, hollín y polvo), éstas tienen sus orígenes en las impurezas, partículas metálicas, sílice, y carbono sin quemar, que son arrastradas por los gases producidos por la combustión. La emisión de partículas se reduce mediante el paso de los gases a través de filtros, antes de su expulsión a la atmósfera. En nuestro país estos filtros no se emplean en los generadores de vapor. El mayor impacto directo de la ceniza expulsada por los generadores de vapor es la presencia de polvo en las áreas de influencia. Su efecto indirecto más importante es la canalización del SO<sub>2</sub> transformándolo en ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).



**Tabla 3.7 Principales fuentes de contaminación**

<b>TIPO DE CONTAMINACIÓN</b>	<b>PRINCIPALES FUENTES DE CONTAMINACIÓN</b>
Monóxido de carbono (CO)	Gases de escape de vehículo motor y algunos procesos industriales.
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ).	Instalaciones generadoras de calor y electricidad que utilizan petróleo o carbón con contenido sulfuroso y plantas de ácido sulfúrico.
Partículas en suspensión.	Gases de escape de vehículo motor, procesos industriales, incineración de residuos, generación de calor y electricidad y reacción de gases contaminantes en la atmósfera.
Plomo (Pb).	Gases de escape de vehículo motor, fundiciones de plomo y fábricas de baterías.
Óxidos de nitrógenos (NO <sub>1</sub> NO <sub>2</sub> ).	Gases de escape de vehículo motor, generación de calor y electricidad, ácido nítrico, explosivos y fábricas de fertilizantes.
Hidrocarburo no metálico, (etano, etileno, propano, butano, acetileno).	Gases de escape de vehículo motor, evaporación de solventes, procesos industriales, eliminación de residuos sólidos, y combustión de combustibles.

Todo lo anteriormente expresado permite expresar que en el mundo actual la interacción humanidad medioambiente tiene un carácter global y es de intensidad creciente. El medio ambiente afectado directa e indirectamente por la acción humana comprende la totalidad de la atmósfera y de la hidrosfera, e incluso parte cada vez más profundo de la litosfera y engloba por lo tanto la biosfera en su conjunto. De todas las formas de actividad humana, quizás la más contaminante y degradante del medio ambiente es la relativa al medio de los recursos energéticos, es decir, su extracción, conversión, transporte y consumo. Más del 80% del dióxido de azufre, del 50% de los óxidos de nitrógeno y del 30 al 40 % de las partículas en suspensión

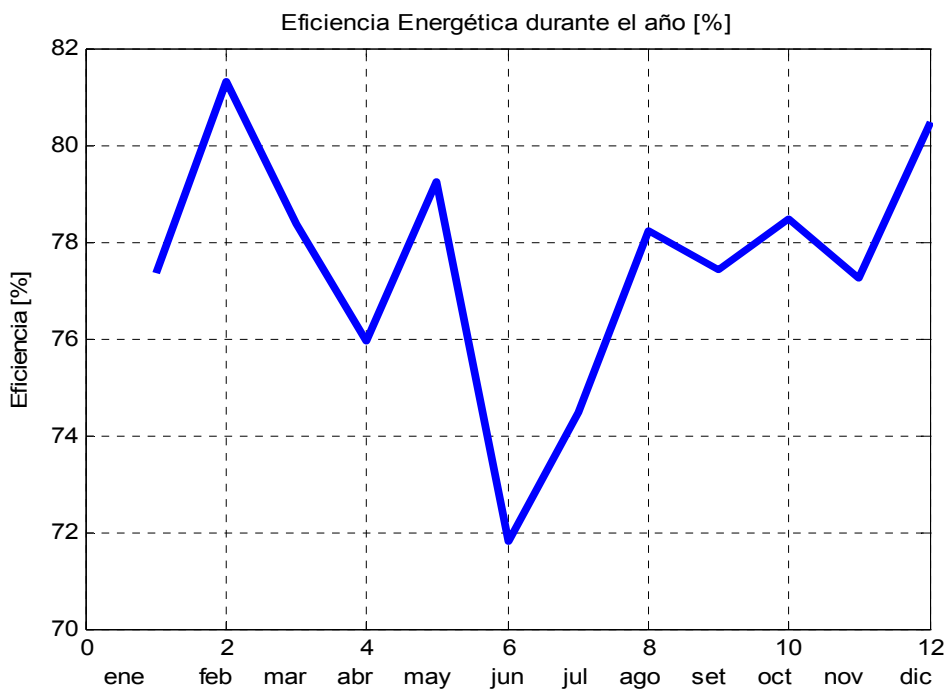


emitidas a la atmósfera proceden de las centrales eléctricas que queman combustibles fósiles, las calderas industriales y los sistemas de calefacción.

Estos contaminantes son transportados por el viento y las nubes, produciendo sus efectos adversos en áreas muy distantes del lugar de la emisión en forma de depósitos y de lluvias ácidas. En los residuos de tratamiento de agua de alimentación a las calderas donde se encuentran los valores más elevados de  $\text{ph} > 133 \text{ mg /L}$ , y la concentración de sólidos  $> 313 \text{ mg /L}$ .

### **3.8 Resultados experimentales del objeto estudiado mediante modelación y simulación en Matlab.**

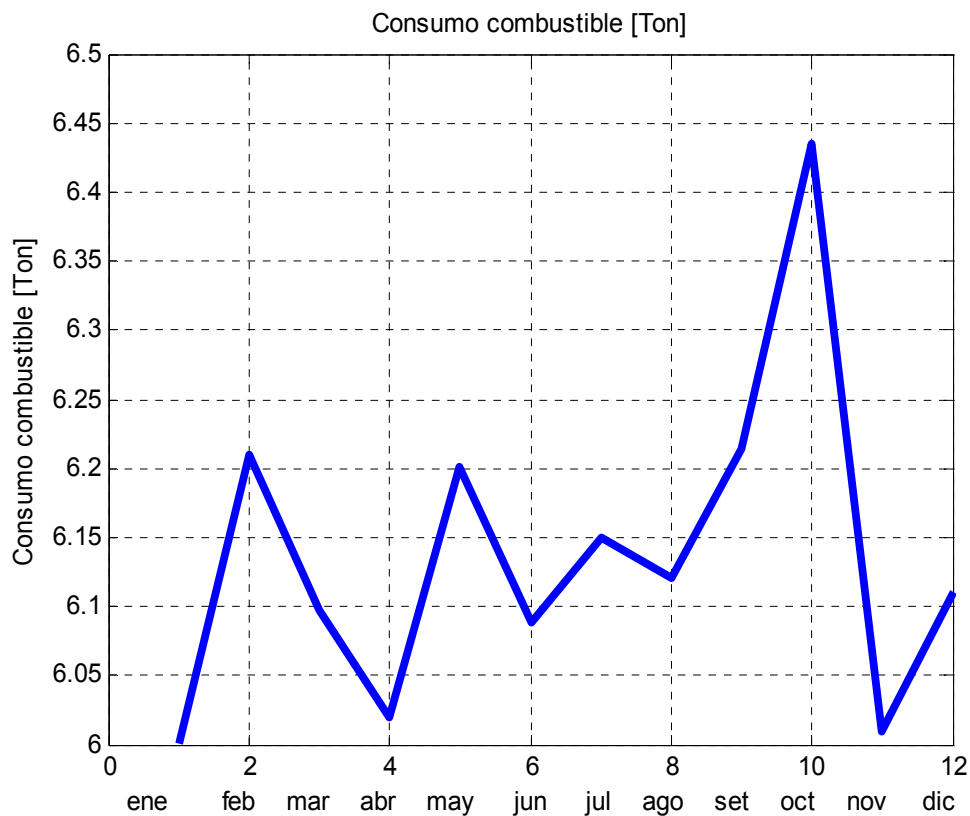
Como se puede observar en la figura 2 del comportamiento de la eficiencia energética de la caldera 11 durante el año, el rendimiento es bajo y con mucha variación debido a que no se aprovecha toda la energía involucrada en el generador.



**Figura 2. Comportamiento de la Eficiencia Energética de la caldera 11 durante el año.**



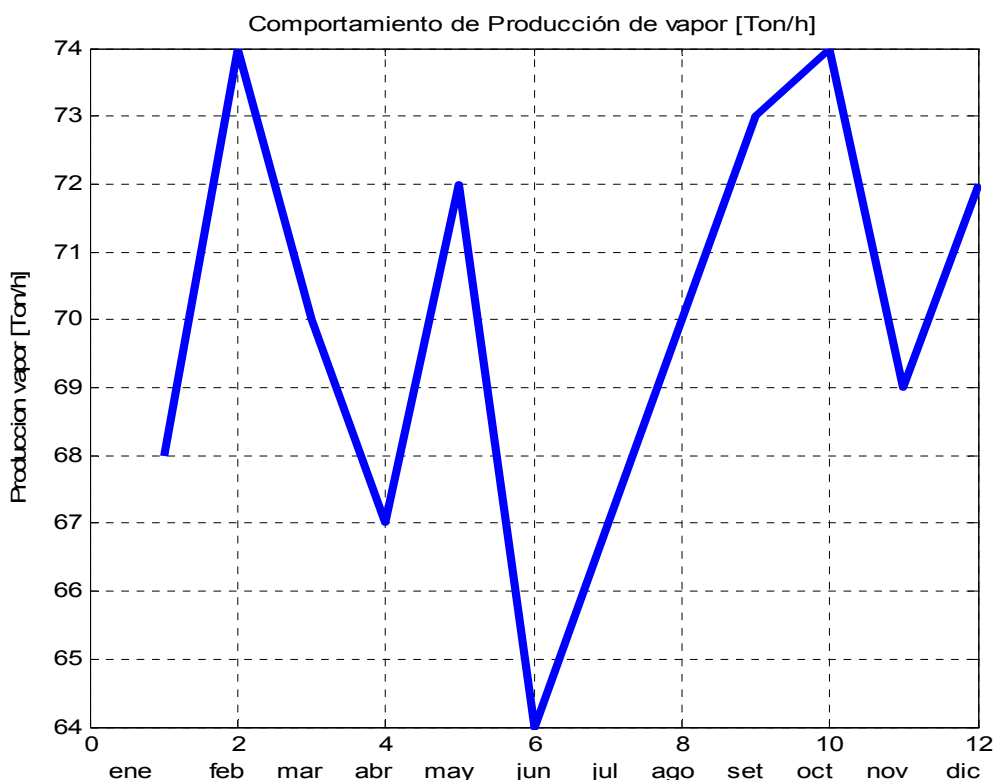
Podemos decir que en la figura 3, el comportamiento del consumo del combustible durante el año ha sido excesivo ya que no se corresponde con la producción de vapor siendo la causas fundamentales: la suciedad en la parte exterior de las fluserías, baja temperatura en el agua de alimentar, incrustaciones en el interior de las fluserías y mal ajuste en la relación aire-combustible.



**Figura 3 Comportamiento del consumo del combustible de la caldera 11 durante el año.**

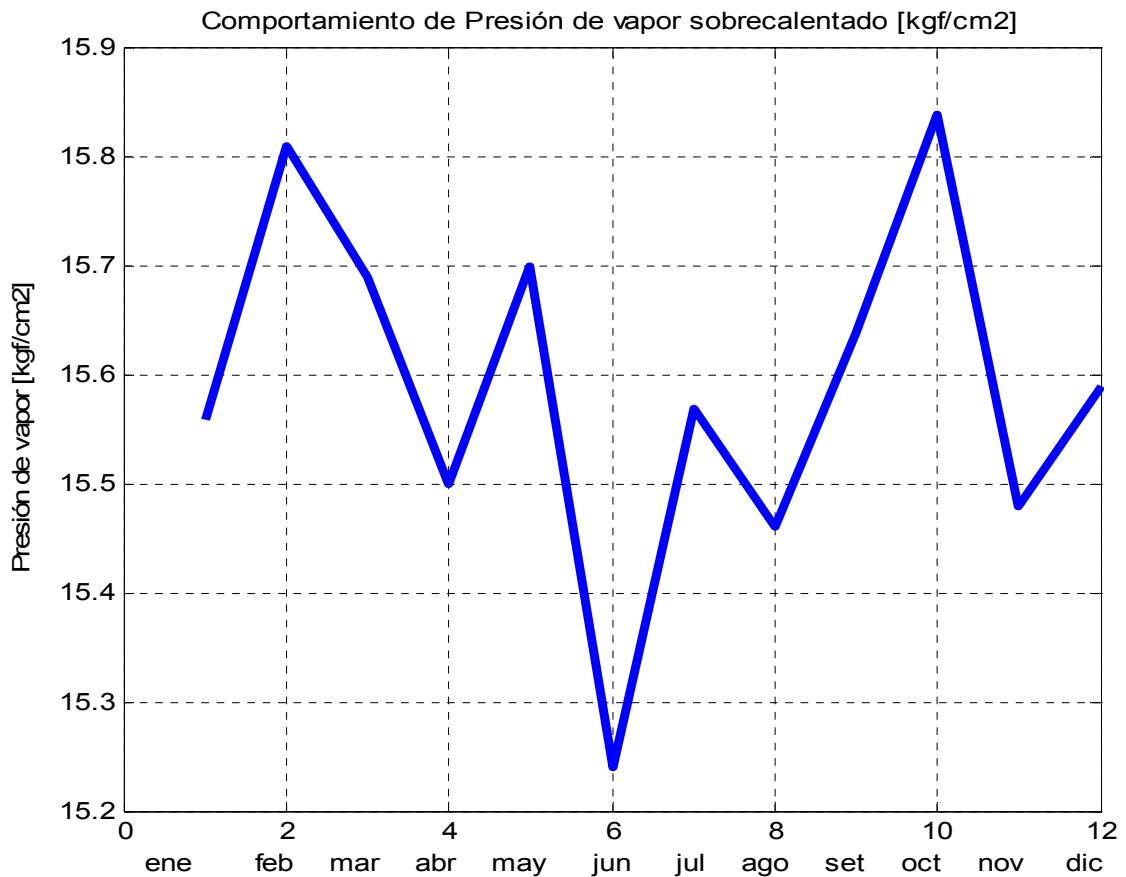


Como se observa en la figura 4, la producción de vapor durante el año ha tenido muchas variaciones y se ha quedado por debajo de la norma establecida en la caldera, las causas fundamentales han sido el mal estado técnico del generador, la temperatura de los gases de escape que están por encima de la nominal y el mal ajuste de la relación aire-combustible.



**Figura 4 Comportamiento de la producción de vapor en la caldera 11 durante el año**

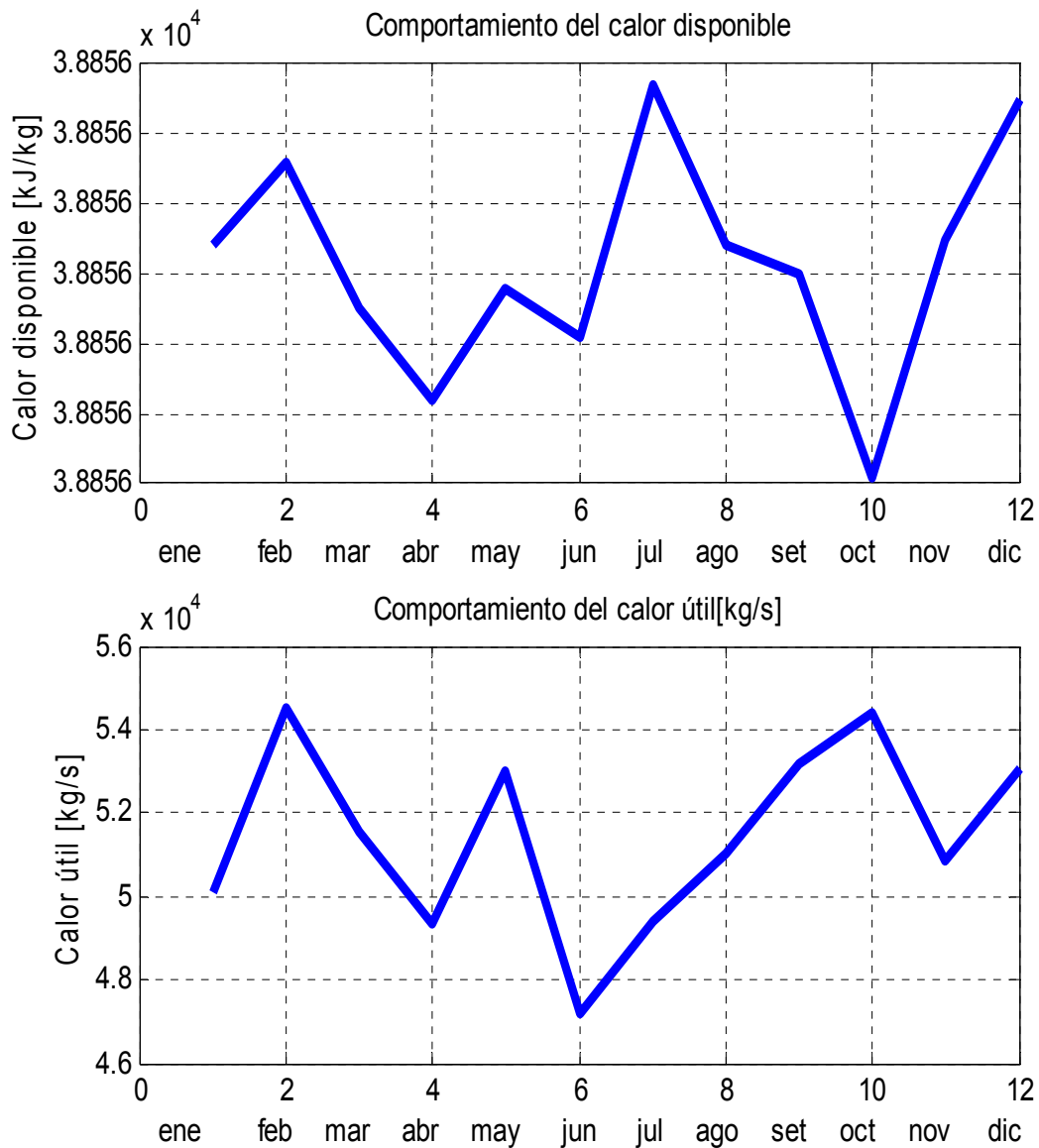
El comportamiento de la presión de vapor sobrecalentado, aunque ha tenido alguna variación, sus valores están próximo al establecido en la norma técnica del generador de vapor. Figura 5.



**Figura 5 Comportamiento de la presión de vapor sobrecalentado en la caldera 11 durante el año.**

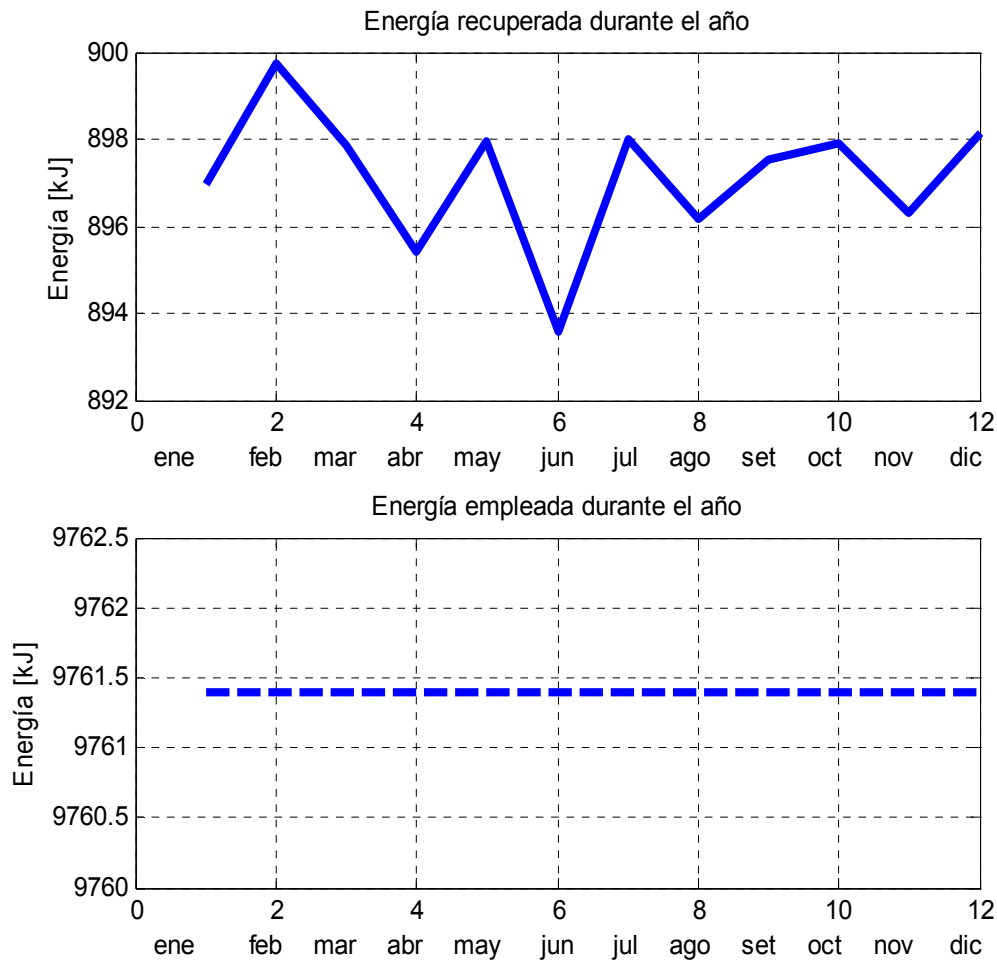
En la figura 6 se demuestra que existe una correspondencia entre el calor útil y el calor disponible durante el año que se evalúa, pero el flujo del calor útil está por debajo de la norma establecida y el calor disponible está dentro del rango establecido.





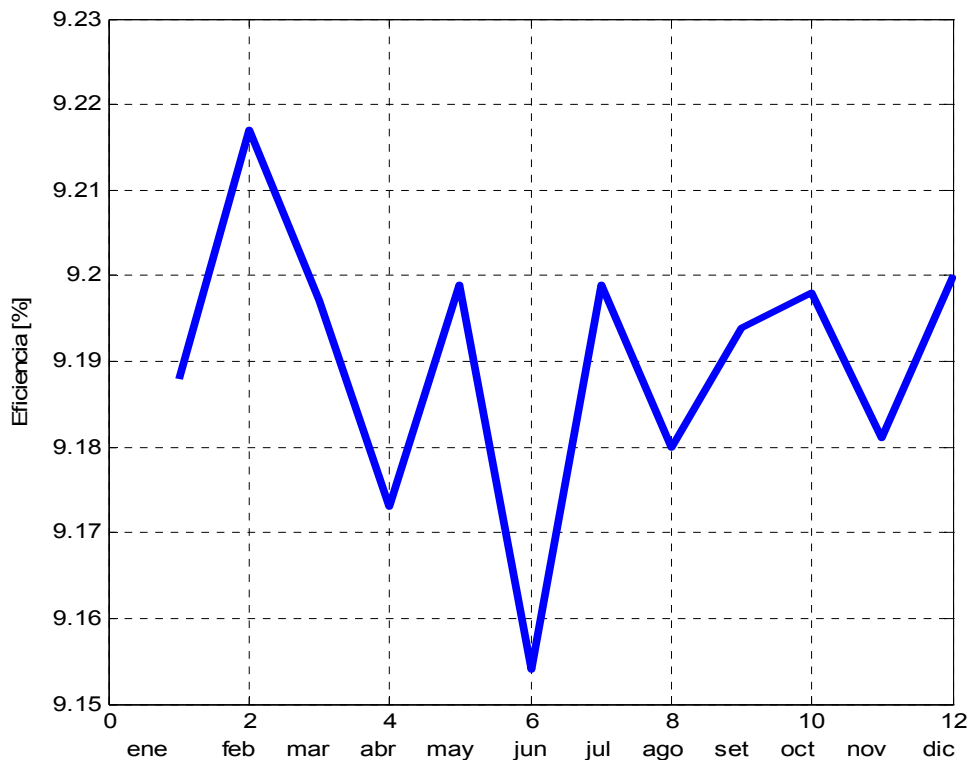
**Figura 6 Comportamiento del calor disponible vs calor útil en la caldera 11 durante el año.**

En la figura 7 se observa que el comportamiento de la energía recuperada está por debajo del valor establecido, para lograr un mejor comportamiento exergético de la caldera, es necesario aumentar estos valores en correspondencia con la energía empleada.



**Figura 7. Comportamiento de la energía empleada vs energía recuperada en la caldera 11.**

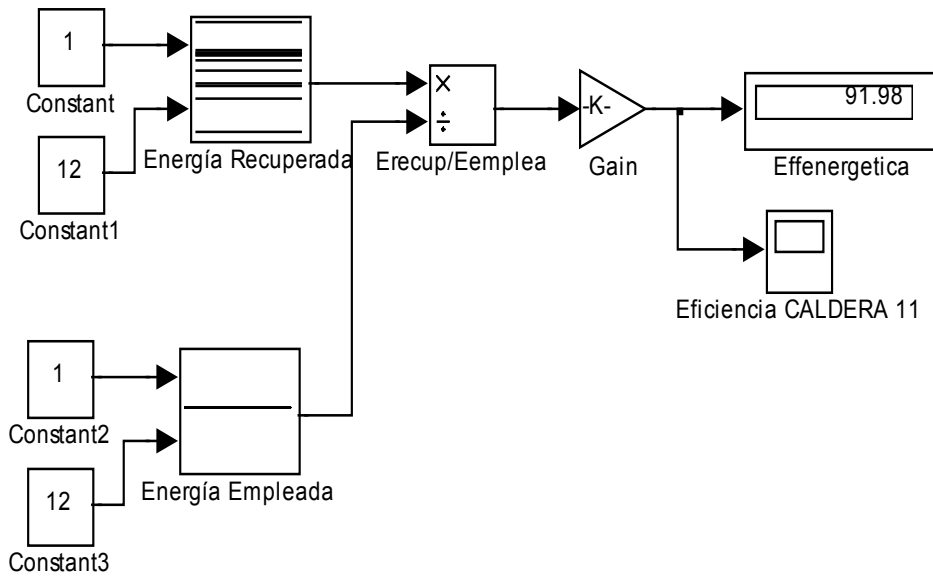
El comportamiento de la eficiencia exergética vista en la figura 8 está por debajo de las normas técnicas, debido a que la energía recuperada no logra entrar en equilibrio con lo empleada, lo que demuestra la necesidad de disminuir las pérdidas provocadas por los calores que se pierden en los gases producto de la combustión, en las extracciones y por las radiaciones al medio ambiente.



**Figura 8. Comportamiento de la eficiencia exergetica de la caldera 11 durante el año.**

### **Diagrama de bloque del generador**

El diagrama de bloque del modelo de eficiencia exergetica está construido sobre la base obtenida en los bloques de entrada de la energía recuperada y la energía empleada. A la salida se grafica la eficiencia y se obtiene sus diferentes valores para el juego de datos de la entrada que fueron tomados desde tablas que reflejan las mediciones en el objeto del generador de vapor 11 que resultó ser la más representativa del proceso



**Figura 9. Diagrama de bloques del modelo de Eficiencia para caldera 11.**

De la misma forma se procedió con el diagrama del modelo matemático para la determinación de la eficiencia energética del generador 11. Bloque de entrada son calor útil y calor disponible por el consumo de combustible; evaluándose para 12 valores por periodo de un año. Los datos son los valores promedio de cada mes.

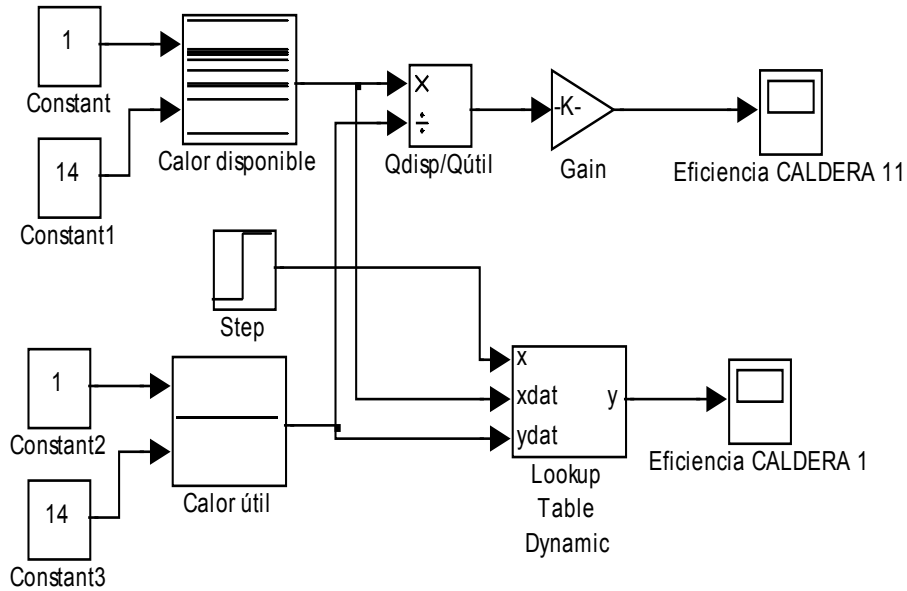


Figura 10. Diagrama de bloques del modelo de Eficiencia en base a Qútil / Qdisp para caldera 11.



**CONCLUSIONES DEL CAPITULO III**

1. El sistema de mantenimiento realizado es deficiente provocado por las altas roturas en el generador # 11 de 13 intervenciones por los cuales se excedió el presupuesto planificado por los mantenimientos en 20 224,54 \$.
2. El consumo de combustible en el generador de vapor 11 fue alto ya que hubo un exceso de consumo entre el real y el normal de 8 886,258 toneladas al año que equivale a un gasto del consumo excedido en 2 882 434,86 CUC.
3. La pérdida monetaria por concepto de generación eléctrica dejado de producir es de 1 210 838,09 CUC.
4. La utilización del crudo cubano en comparación con el regular tuvo un ahorro de 12 030 536.38 CUC por lo cual sustituye importaciones.



## **CONCLUSIONES GENERALES.**

1. Las mayores pérdidas de energía en los generadores de vapor se producen por la temperatura de escape de los gases, producto de la combustión, generador #11 – 282 °C, coeficiente de exceso de aire alto y la temperatura del agua de alimentar baja.
2. El sistema de mantenimiento realizado es deficiente provocado por las altas roturas en el generador lo cual se excedió el presupuesto planificado para los mantenimientos en 20 224,54 \$, el consumo de combustible fue alto hubo un exceso de consumo entre el real y el normal de 8 886,258 toneladas al año que equivale a un gasto del consumo excedido en 2 882 434,86 CUC, además las pérdidas monetarias por concepto de generación eléctrica dejado de producir es de 1 210 838,09 CUC.
3. La utilización del crudo cubano en comparación con el petróleo regular tuvo un ahorro de 12 030 536,38 CUC por lo cual sustituye importación.
4. En la planta eléctrica los principales agentes contaminantes son: los óxidos de azufre, los óxidos de nitrógenos, el pentóxido de vanadio y el monóxido de carbono, los cuales contribuyen a enfermedades respiratorias agudas.
5. La simulación operacional del sistema para diferentes condiciones, es una herramienta concreta para el análisis de explotación del generador. La misma permite influir sobre el rendimiento de la eficiencia energética y exergética y determinar la zona de trabajo de máxima eficiencia.



## **RECOMENDACIONES**

1. El potencial económico debe constituir uno de los aspectos rectores en la toma de decisiones para las inversiones en los generadores de vapor.
2. Tener en cuenta los factores que pueden influir negativamente en el pronóstico de la eficiencia en los generadores de vapor.
3. Hacer inversiones en la planta eléctrica en los generadores 9 y 11 para lograr los parámetros de diseño original.





## **NOMENCLATURAS**

<b>A</b>	% de cenizas arrastradas por los gases.
<b>A<sub>arr</sub></b>	Fracción de cenizas arrastradas por los gases
<b>a<sub>esc,</sub></b>	Fracción de contenido de cenizas del combustible en la escoria. residuos en los gases de arrastre.
<b>a<sub>cen</sub></b>	Fracción de contenido de cenizas de residuo en las tolvas de la zona convectiva,
<b>a<sub>arr</sub></b>	Fracción de contenido de cenizas en residuos de gases de arrastre.
<b>amp</b>	Ampere
<b>B</b>	Consumo del combustible.
<b>B<sub>cen</sub></b>	Flujo de ceniza.
<b>°C</b>	Grado centígrado.
<b>C<sup>t</sup></b>	Carbono.
<b>C<sub>arr,</sub></b>	Contenido de elementos en la ceniza y los gases de arrastre.
<b>C<sub>c</sub></b>	Calor específico del combustible.
<b>CAR</b>	Caja de aire regenerativo.
<b>C<sub>20</sub>H<sub>12</sub></b>	Benzopireno.
<b>Cm<sup>2</sup></b>	Centímetro cuadrado.
<b>CO</b>	Monóxido de carbono.
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono.
<b>CUC</b>	Pesos convertibles cubanos.
<b>d</b>	Índice de generación.
<b>D</b>	Destrucción.
<b>D<sub>vsc</sub></b>	Flujo de vapor sobrecalentado.
<b>D<sub>p</sub></b>	Flujo de las extracciones.
<b>D<sub>vr</sub></b>	Flujo de vapor regenerativo.
<b>D<sub>vs</sub></b>	Flujo de vapor saturado.
<b>DN</b>	Producción de vapor nominal.
<b>°E</b>	Grado de viscosidad en el combustible.
<b>ε</b>	Efectividad económica.



## *Tesis en opción al título de master*

<b><math>E_e</math></b>	Exergía de los flujos que entran al sistema.
<b><math>E_s</math></b>	Exergía de los flujos que salen del sistema.
<b><math>E_q</math></b>	Exergía del calor que se desprende de una fuente.
<b><math>E_w</math></b>	Exergía del trabajo.
<b><math>E_x</math></b>	Exergía de un sistema.
<b><math>e_x</math></b>	Exergía de un flujo.
<b>F</b>	Fuel.
<b>G</b>	General
<b><math>G_{\text{útil}}</math></b>	Ganancia útil.
<b>h</b>	Horas.
<b><math>h_o</math></b>	Entalpía del medio ambiente.
<b><math>h_1</math></b>	Entalpía del flujo que sale del vapor sobrecalentado.
<b><math>H_2</math></b>	Hidrógeno.
<b><math>H^t</math></b>	Hidrógeno del combustible.
<b><math>i_{aa}</math></b>	Entalpía del agua alimentar.
<b><math>i_{af}</math></b>	Entalpía del aire frío.
<b><math>i_{isa}</math></b>	Entalpía de vapor de las extracciones
<b><math>i_{sp}</math></b>	Entalpía a la salida del calentador.
<b><math>i_v</math></b>	Entalpía del vapor de atomización.
<b><math>i_{vs}</math></b>	Entalpía de vapor saturado.
<b><math>i_{vr}</math></b>	Entalpía del vapor regenerativo.
<b><math>i_{aire}</math></b>	Entalpía del aire.
<b><math>I_g^o</math></b>	Entalpía teórica de los gases.
<b><math>I_g</math></b>	Entalpía de los gases.
<b><math>I_{RO2}</math></b>	Entalpía de los gases triatómicos
<b><math>^oK</math></b>	Grados kelvin.
<b>Kb</b>	Costo exergético.
<b>Kg</b>	Kilogramos
<b>Kgf</b>	Kilogramos fuerza.
<b>Kj</b>	Kilo joules.



## *Tesis en opción al título de master*

<b>Kj/s</b>	Kilo joules por segundos.
<b>Kg/s</b>	Kilogramos por segundos.
<b>KV</b>	Kilo voltios.
<b>L</b>	Pérdidas.
<b>M</b>	Mediana.
<b>m</b>	metros
<b>MD</b>	Método directo.
<b>MI</b>	Método indirecto.
<b>MW</b>	Mega watt.
<b>Mg/L</b>	Miligramos por litros.
<b>N<sub>2</sub></b>	Nitrógeno.
<b><math>\eta_{gv}</math></b>	Eficiencia bruta del generador.
<b><math>\eta_{\text{exergético}}</math></b>	Eficiencia exergética.
<b>NO</b>	Monóxido de nitrógeno.
<b>NO<sub>2</sub></b>	Dióxido de nitrógeno.
<b>O<sub>2</sub></b>	Oxígeno.
<b>O<sup>t</sup></b>	Oxígeno del combustible.
<b>p</b>	Pequeña
<b>P</b>	Producto.
<b><i>p</i></b>	Presión.
<b><i>p</i><sub>vsc</sub></b>	Presión de vapor sobrecalentado.
<b>P<sub>vsc</sub> tn/h</b>	Producción de vapor sobrecalentado tonelada -hora.
<b>P<sub>VSCDP</sub> (tn/h)</b>	Producción de vapor sobrecalentado dejado de producir en una hora.
<b>P<sub>VSCDP</sub> (tn/año)</b>	Producción de vapor sobrecalentado dejado de producir en el año.
<b>Q</b>	Calor
<b>Q<sub>atm</sub></b>	Calor de atomización.
<b>Q<sub>b</sub><sup>t</sup></b>	Poder calórico bajo del combustible.
<b>Qd</b>	Calor disponible.
<b>Q<sub>fc</sub></b>	Calor físico del combustible.
<b>Q<sub>útil</sub></b>	Calor útil.



## *Tesis en opción al título de master*

$q_2$	Pérdida de los gases de escape.
$q_3$	Pérdida de calor por in combustión química.
$q_4$	Pérdida de calor por in combustión mecánica.
$q_5$	Pérdida de calor por radiación al medio ambiente.
$Q_6$	Pérdida de calor por la ceniza extraída del horno.
<b>R</b>	Revisión.
$S^t$	Azufre
$S_o$	Entropía del medio ambiente.
$S_1$	Entropía del vapor sobrecalentado.
$SO_2$	Oxido de azufre
$SO_3$	tritóxido de azufre
<b>t</b>	Período de recuperación.
$T_o$	Temperatura del medio ambiente.
$tn$	Toneladas.
$tm$	Temperatura media.
$tn/año$	Toneladas por año.
$tn/h$	Toneladas por hora.
$U_o$	Energía interna inicial.
$U_1$	Energía interna final.
$V_o$	Volumen inicial.
$V_1$	Volumen final.
$V_a$	Volumen real del aire.
$V_a^0$	Volumen del aire teórico.
$V_g$	Volumen real de los gases.
$V_{n_2}$	Volumen total real de los gases triatómicos.
$V_{H_2O}$	Volumen teórico de los vapores del agua.
$V_{Inversión}$	Valor de la inversión.
$V_{gpc}$	Volumen de los gases producto de la combustión.
$V_{gs}^o$	Volumen teórico de los gases secos.
$V_2O_5$	Pentóxido de vanadio.
$V_{tf}$	Ventilador de tiro forzado.



## *Tesis en opción al título de master*

<b>V<sub>ti</sub></b>	Ventilador de tiro inducido.
<b>W<sup>t</sup></b>	Humedad.
<b>γ</b>	Grados de pérdidas.
<b>Σq<sub>n</sub></b>	Sumatorias de las pérdidas.
<b>α</b>	Coefficiente de exceso de la combustión completa.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- Abreu, J. Evaluación de la eficiencia del generador de vapor 10 de la central termoeléctrica de la empresa René Ramos Latour. Ramón. Trabajo de diploma ISMM 2003.
- 2- Arostegui, J, M. Metodología del conocimiento científico. La Habana: Editorial ciencias sociales, 1978. 445 p.
- 3- Burmeister, L, C, convective Heat transfe, Wiley Interscience, New Cork, 1983.
- 4- Cabrera, R. Ficha técnica. Empresa René Ramos Latour. Nícaro, 2000.
- 5- Cantillo, R. Autoabastecimiento de electricidad. Proyecto Empresa René Ramos Latour. Nícaro, 2004.
- 6- Carcallido, M, Balance energético y exergetico del CAI Guatemala. Trabajo de diploma. ISMM 1999.
- 7- Chang, A. una visión sobre la reserva estratégica de eficiencia metalúrgica en la tecnología carbonato amoniaco. Minería y Geología 16(1): 13-19, 1999.
- 8- Contaminación por ruido. [http:// www.conam.Gob.pe/iducomb/cont ruido. htm.](http://www.conam.Gob.pe/iducomb/cont_ruido.htm) junio 2004.
- 9- Contaminación por ruido.  
[http://members.fortunecity.es/robertexto/archivo4/contamruidohtm.junio 2004.](http://members.fortunecity.es/robertexto/archivo4/contamruidohtm.junio.2004)
- 11- Del valle, R. Balance energético verificativo de la planta eléctrica de la Empresa René Ramos Latour. Nícaro. Trabajo de diploma. ISMM 2002.
- 12- Elizarov,D.P. Instalaciones termoenergética de la centrales eléctricas, editorial pueblo y educación. Ciudad de la Habana. 1985.
- 13- F.P Silva. Generador de vapor. Mantenimiento periodico. Edita departamento de energia Universidad de Oviedo, 1993.
- 14- F.P Silva. Generador de vapor. Transferencia de calor . Edita departamento de energia Universidad de Oviedo, 1995.
- 15- Faires V. Termodinámica. La Habana: Edición revolucionaria, 1991,807 p.
- 16- Farrel, G: E. Egaña: F Fernández. Investigación científica y nueva tecnología. La Habana: Editorial científica, 2003. 132 p.



## *Tesis en opción al título de master*

- 17- Fernández, E. Termodinámica Técnica. La Habana, Editorial "Félix Varela, 1984. tomo I.
- 18- Fundamento teórico de calderas y tratamiento de agua. La Habana. Ministerio de la industria, 1965
- 19- Gómez, A. Mantenimiento de la bomba de alimentación de la caldera. Proyecto. ISMM 1992.
- 20- Guzman, D. Modelación, simulación y control del tanque de contacto y los enfriadores de licuas en el proceso de lexicación carbonato amoniaca. Tesis doctoral. ISMM AÑJ, Moa, Cuba.2001p. 124 p.
- 21- Rouge,O:M,Watson; R, A Ragatz. Principio de los procesos químicos. T.I. La Habana: Editorial pueblo y educación, 1978
- 22- Hurtado, F. G. Estudio de la influencia en el medio ambiente del sistema de generación de la empresa del níquel Ernesto Che Guevara y el sistema de transmisión eléctrica adyacente. Tesis doctoral ISMM, Moa.1999. 120 p
- 23- Incropera, F. Fundamentals of and mass transfer. Terceras edición. La Habana. Editorial pueblo y educación,2003 tomo I, II,III.
- 24- Isacheko.V;V. Osipova; A. Sokomel. Transmisión del calor. La Habana: Editorial pueblo y educación, 1979, pp 556 p
- 25- Jorrosay, E. Balance energético de secciones de mantenimiento de las calderas del hospital "Guillermo Luís Fernández" trabajo de diploma ISMM 2000.
- 26- Jiménez, B. Propuesta para el plegado de las chapas del sistema de mantenimiento de aire regenerativo de la central termoeléctrica. Trabajo de diploma ISMM 2001.
- 27- Kart Gieck, Manual de Formulas Técnicas, XXVII Edición, 1977
- 28- Lago, M; H, Lucena. Fenómenos de transferencia de mas, calor y momentum. <http://web.tampabay.rr.com/ig/transferencia.htm>.abril,2004.
- 29- Lahenz, V. Cálculos en la eficiencia en los generadores de vapor. Trabajo de diploma. ISMM 2001.
- 30- Legislación sobre ruido. <http://www.Ruidos.Org/normas.html>.2004
- 31- Manual de operaciones de la CTE "René Ramos Latuor Nícaro, 1996
- 32- Manual de operaciones de la CTE "René Ramos Latuor Nícaro, 1999



## *Tesis en opción al título de master*

- 33- Martín. M. Bombeo de los residuos de la planta eléctrica y tanques de petróleo. Nícaro 2004
- 34- Magueira, R; C. Rodonda informativa sobre el desarrollo de la ciencia y la técnica en Cuba. Ciudad Habana, Enero 30del 2001
- 35- Masavich. M. Fundamentación de la teoría general de los sistemas. Editorial. MIR. URSS, pp.422-436, 1996
- 36- Mijiev, Mijjeiva. Fundamentos de termo transferencia. Editorial Mir. 1979
- 37- Ministerio de Educación Superior. Generadores de Vapor. Departamento de Textos y Materiales Didácticos, 1982.
- 38- Muñoz, C. Aprovechamiento de la biomasa forestal para la producción sostenida de electricidad en el CAI. "Argeo Martínez", Guantánamo. Trabajo de diploma. ISMM 2001
- 39- Oliva, R. Luis y otros. Explotación y materiales constructivos de generadores de vapor. Ediciones ISPJAM. Santiago de Cuba. 1988
- 40- Pankrotov. G. Problemas de termotecnia. Editorial MIR. Moscú. URSS.1987
- 41- Pereira, M. Balance de energía de la caldera del comedor del ISMM. Proyecto 2001
- 42- Pérez, Garay. L: Generadores de vapor: Editorial pueblo y educación. Ciudad de la Habana 1972
- 43- Perry, C; J, perry. Chemical engenier hand book. University of Oklahoma. La Habana, 1967
- 44- Quintana, R. Conferencia sobre la industria cubana del níquel. Il seminario de perfeccionamiento de cuadros, ISMM, octubre 1999
- 45- Razkin, Y, V. Centrales termoeléctricas, primera y segunda parte. Editorial pueblo y educación. Ciudad de la Habana: 1985
- 46- Sánchez, Y. Factores que intervienen en la contaminación ambiental de la zona de Nícaro. Nícaro 1997
- 47- Santos. L, J. Campos. Metodología para una evaluación termoeconómica. Estudio de un caso. Energético. Volume4n XXI, No/1999



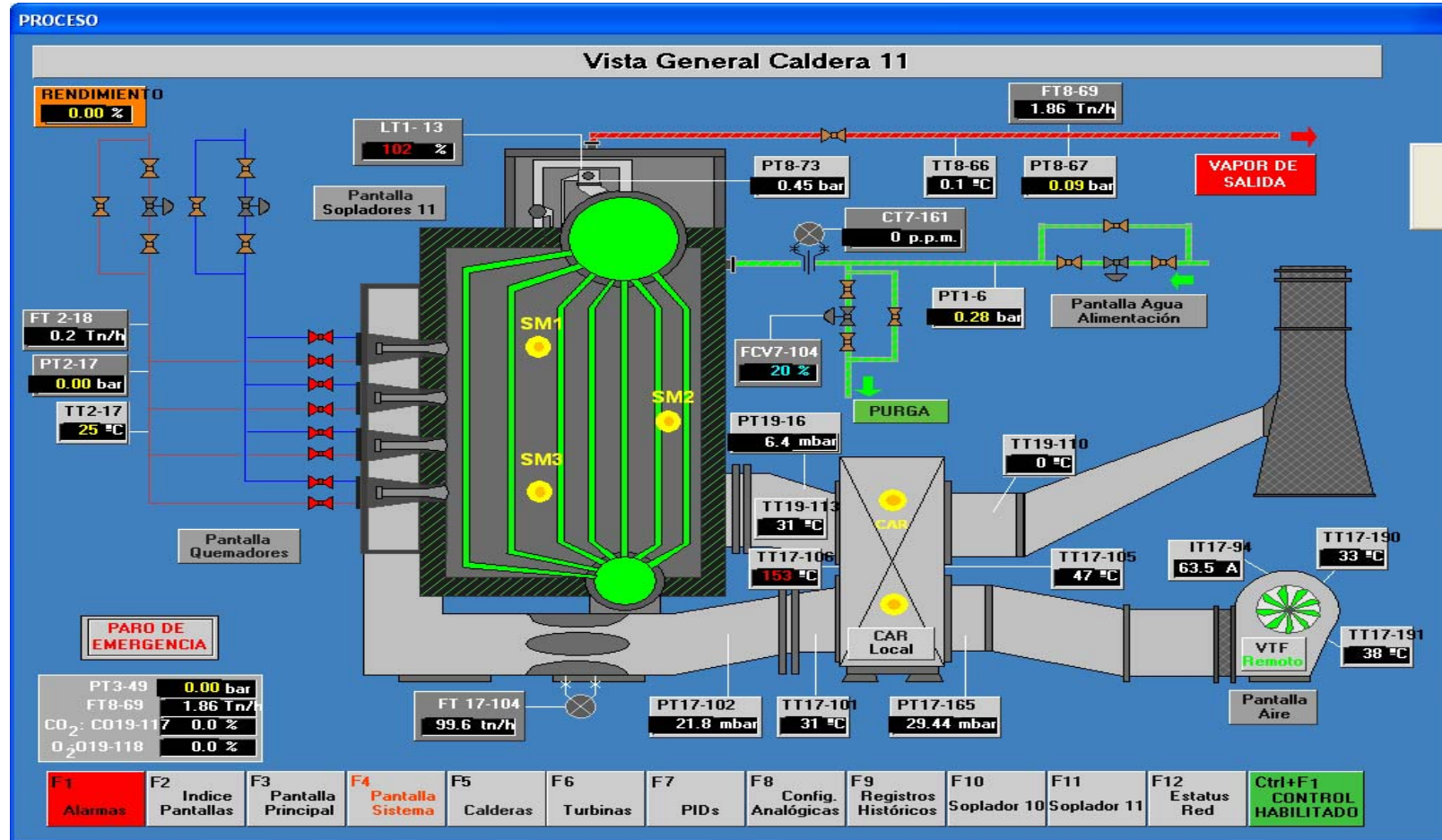


## *Tesis en opción al título de master*

- 48- 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
- 49- Tanquero. N. Guía metodológica para proyectos del curso de generadores de vapor. Editorial ISPJAE. La Habana. Cuba. 1997
- 50- Torres, E. Modelación matemática del transporte neumáticos del mineral laterítico. Tesis doctoral. ISMMANJ. Moa. 2003.105p
- 51- Vukalovitch. Propiedades termodinámicas del agua y el vapor. Editorial revolución 1958.

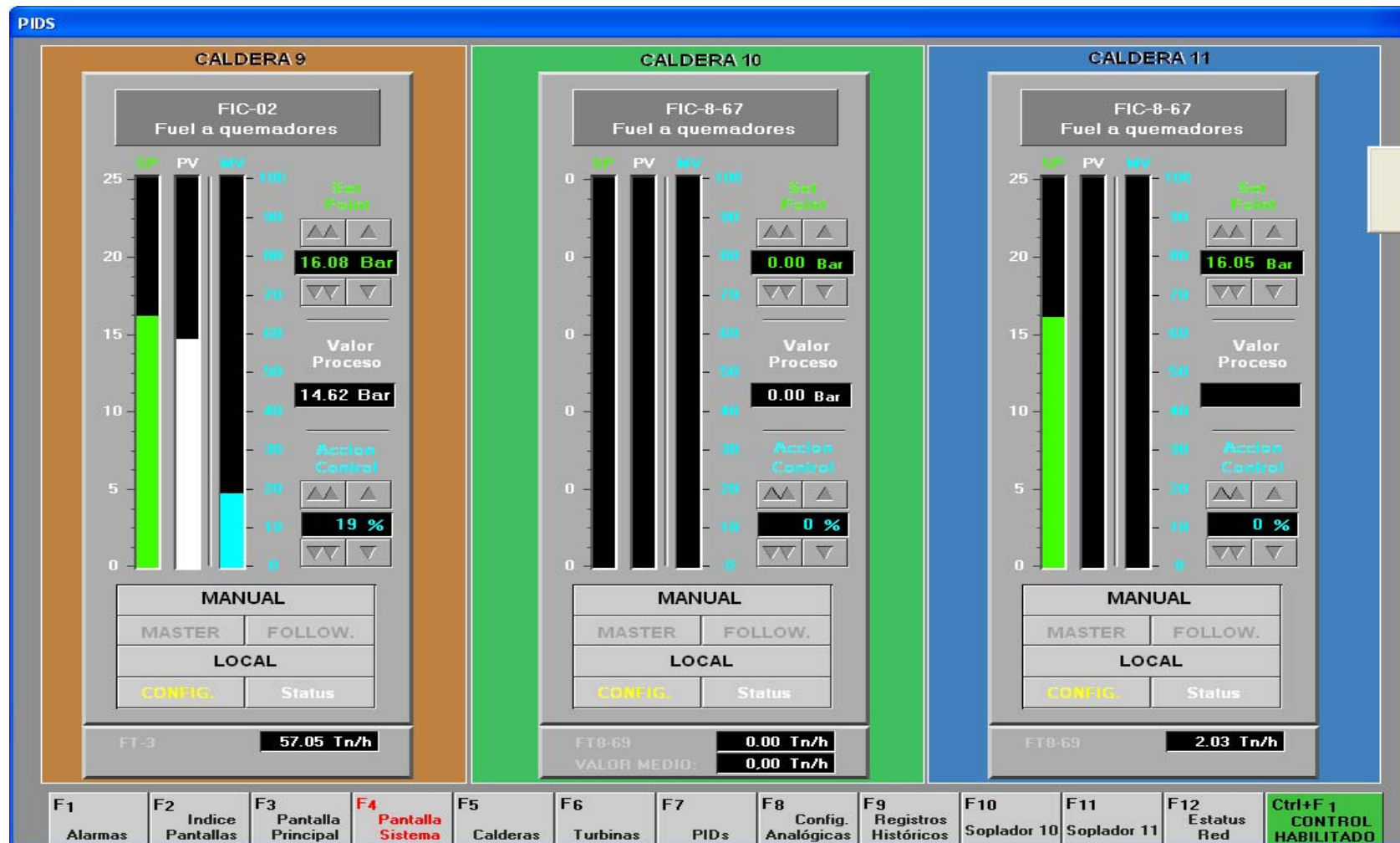


Anexo 1.



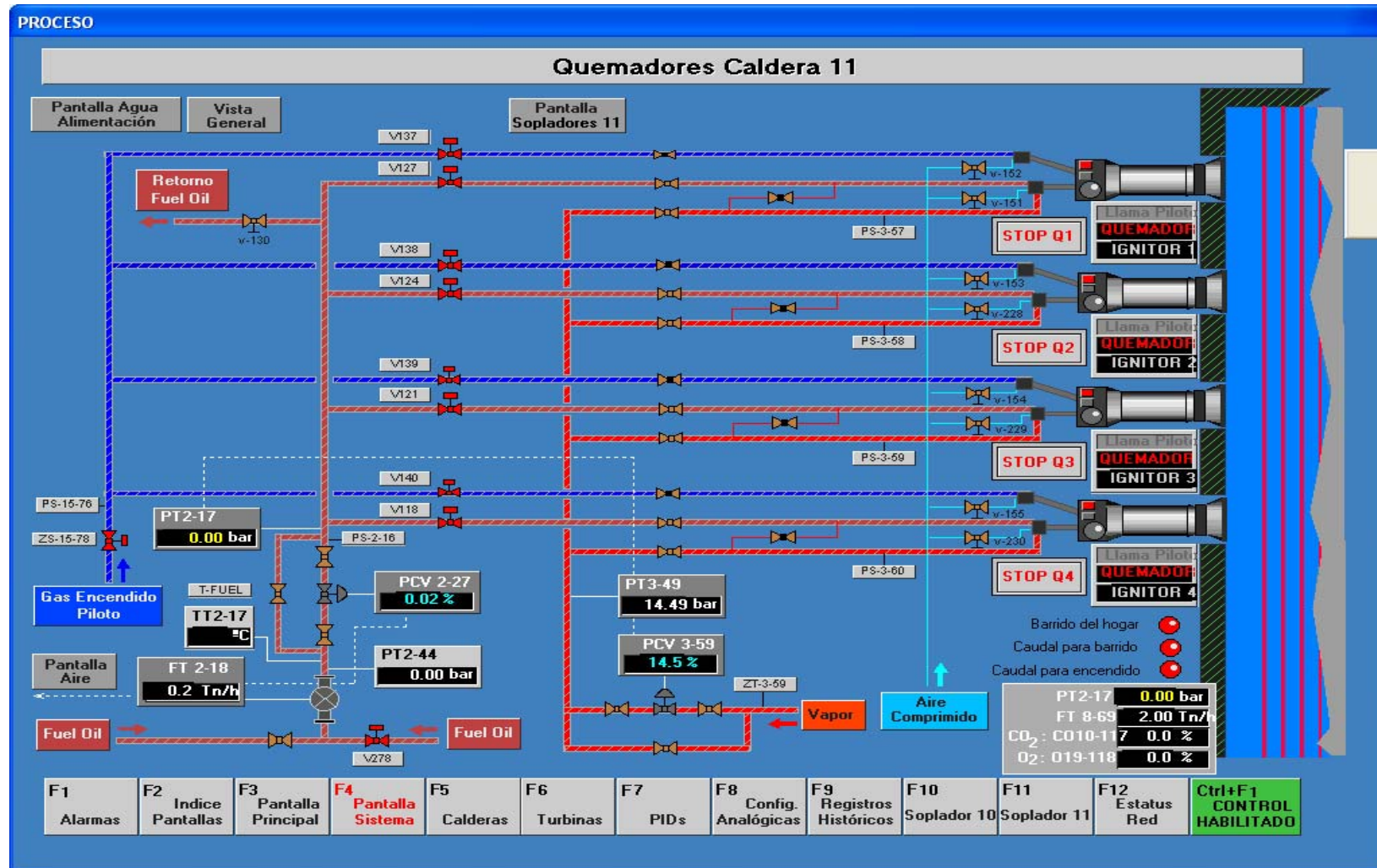


Anexo 2





Anexo 3





*Tesis en opción al título de master*