



FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE CONTROL AUTOMÁTICO

Tesis presentada en opción del título de Ingeniero en Automática

**Sistema asistente para la caracterización del desempeño de la
operación de la caldera de la unidad IV de la CTE “Antonio Maceo”.**

Autor: Alain Leonardo Rodríguez Acosta.

Tutor: Dr. C. PA. Luis Vázquez Seisdedos

MSc .Ing. David Díaz Martínez

Ing. Alexis Quintana Sánchez.

Santiago de Cuba

2016

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia, gracias por su apoyo y ayuda para convertirme en lo que soy. Y, en general, a todos los que de una manera u otra me han acompañado en el trayecto por alcanzar mis sueños.

Agradecimientos

A mi familia, por su inmenso amor y estar siempre a mi lado, guiándome y trazando el camino por donde debo andar.

A mis padres y a mi familia por amarme y apoyarme en todo, los cuales con sus ejemplos y dedicación motivaron en mí el interés por la búsqueda del conocimiento constante para el logro de mis objetivos.

A mis profesores, en especial a mis tutores, que con sus enseñanzas me transmitieron el conocimiento y el amor por la profesión. De igual manera me inculcaron los valores imprescindibles para el desarrollo exitoso de la misma.

A mi novia Rocío por comprenderme y darme el apoyo necesario para sobreponerme a todas las dificultades.

A mis amigos, en los cuales siempre confié para comentarles mis inquietudes y recibir de ellos la fe, el apoyo incondicional y las sugerencias aportadas en cada etapa de mi formación.

Al comando de guerra, Orleans, Pozo y Gola por ayudarme y darme el impulso para vencer todas las batallas de estos 5 años.

A todos los compañeros que se desempeñan en el contexto laboral donde realicé la investigación, por su contribución en la búsqueda y aporte de información, en especial para Alexis y Pereira del departamento de Régimen y Explotación de la CTE Renté.

A todas aquellas personas que de una manera u otra han contribuido no solo con la realización de este trabajo sino en mi formación y crecimiento espiritual.

A todos desde lo más sincero de mi corazón, muchas gracias.

Resumen

El proceso de combustión ocupa un lugar importante dentro de la problemática de disponibilidad y eficiencia en las Centrales Termoeléctricas (CTE), ya que de este se derivan buena parte de los problemas de ensuciamiento y deterioro de los agregados de la caldera integrado por los sobrecalentadores de techo en el eje horizontal, recalentador y economizador en el eje convectivo y Calentadores de Aire Regenerativos (CAR), principalmente utilizados para la transferencia de la energía de los gases hacia la sustancia de trabajo (agua, vapor, aire). Al utilizar estos equipos se evidencia un incremento de la velocidad en que se ensucian las superficies de intercambio de calor. Por esta razón, en el presente trabajo se realizó la propuesta, el diseño y la implementación de un programa utilizando el Toolbox GUIDE del Matlab® que sirva de Sistema Asistente con el fin de detectar a largo plazo los efectos de ensuciamiento de los agregados de la caldera, evitando así paradas inesperadas y solo atenderlos con un Mantenimiento Preventivo Planificado (MPP).

Abstract

The combustion process occupies an important place in the problems of availability and efficiency in Power Plants since of this is derived the problems of contamination and deterioration of boiler aggregates integrated by ceiling super-heaters on the horizontal axis, re-heater and economizer on the convective axis and regenerative air heaters, mainly used for power transfer from gas to the working fluid (water, steam, air). By using these instruments, an increment of the speed at which the heat exchange surfaces become dirty is evident. For this reason, in this study, the design and implementation of a tool using Matlab to serve as assistant system in order to detect long-term effects of soiling of boiler aggregates was made, thus avoiding unexpected stops and only attend them with planned preventive maintenance.

Contenido

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. GENERACIÓN DE VAPOR: PROCESO, CONTROL Y MONITORIZACIÓN DE LA OPERACIÓN AUTOMATIZADA.	6
Introducción.....	6
1.1. Descripción del proceso industrial.....	6
1.2. Descripción del flujo tecnológico de la CTE “Antonio Maceo”.....	7
1.2.1. Obtención y tratamiento del petróleo para su empleo.	8
1.2.2. Calentamiento del aire para la combustión.....	8
1.2.3. Producción de vapor.....	9
1.2.4. Generación de electricidad.	9
1.2.5. Condensado del vapor para la recirculación del agua.	10
1.3. Descripción técnica de la Caldera de Vapor de la CTE “Antonio Maceo”.11	
1.4.1. Características constructivas.	12
1.4. Elementos principales de una Caldera de Vapor.	14
1.5. Caldera de vapor: un sistema dinámico con control de planta completa. 17	
1.5.1. Caracterización del nivel de regulación en el control de planta completa del proceso de experimentación.	18
1.5.2. Principales lazos de control en la generación de vapor.....	19
1.6. Monitorización del desempeño de Generadores de Vapor en Centrales Termoeléctricas con fines de diagnóstico.	21
1.6.1. Necesidad de la monitorización de los efectos de las degradaciones en Centrales Termoeléctricas.	23
1.6.2. Método exoenergético y termoeconómico para el diagnóstico de sistemas de energía.	25

1.6.3. Monitorización del ensuciamiento de superficies de intercambiadores de calor. 26

Conclusiones parciales.....	31
CAPÍTULO 2: HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO DE LOS NIVELES DE ENSUCIAMIENTO DE LOS AGREGADOS DE LA CALDERA PARA LA CTE ANTONIO MACEO.....	32
Introducción.....	32
2.1. Realización de pruebas de balance y ajuste de régimen en generadores de vapor.....	32
2.2. Descripción de variables del sistema. Análisis de las manifestaciones de estas variables en el ensuciamiento de los agregados de la caldera.....	35
2.3. Herramienta de Diagnóstico.....	41
2.4. Resultados experimentales en la CTE Antonio Maceo “Rente”.....	44
Conclusiones parciales.....	51
Valoración Económica.....	52
Impacto Medioambiental.....	53
Conclusiones Generales.....	55
Recomendaciones.....	56
Bibliografía.....	57
Anexos.....	61

INTRODUCCIÓN

La inmensa mayoría de las plantas de generación de potencia eléctrica de hoy en día se basan en ciclos térmicos en los cuales, la producción de vapor de agua es parte clave para la conversión electromecánica mediante el grupo turbina generador.

El proceso de generación de vapor con combustibles fósiles depende de los precios deslizantes del mercado internacional de petróleo y gas. Para satisfacer la demanda de un país, se requiere de niveles de gastos sensibles de su presupuesto nacional. En el caso de Cuba, la necesidad de aprovechar el crudo nacional a conllevado consecuencias negativas derivadas del alto nivel de azufre contenido en los gases de combustión.

La Central Termoeléctrica (CTE) “Antonio Maceo” construida en la bahía de la ciudad de Santiago de Cuba hace más de 30 años por la antigua Unión Soviética consta actualmente con cuatro Unidades de Generación (UG) de 100 MW cada una. El ciclo térmico es de Rankine Regenerativo Recalentado y el horno de su caldera es de vacío.

Debido a la caída del campo socialista en la década del 90's con la consecuente imposibilidad de sostener la importación del tipo de combustible para el cual fue diseñada su caldera BKZ-340-140/29M se decidió someterla a una repotenciación, una de las acciones fue la modificación de sus quemadores para el empleo de crudo nacional y mezclas con otros. Asimismo fue renovado el sistema de automatización por otro basado en autómatas programables y reguladores compactos. Han transcurrido 25 años de este proceso de modernización y nuevamente la obsolescencia de esa tecnología hace que ya no se cuenten con piezas y partes en el mercado internacional.

La solución de la automatización de las UG es similar en todas ellas, tanto en su concepción como en la tecnología empleada. La estructura y programación actual del sistema de regulación automática presenta insuficiencias en responder correctamente ante:

(i) Las variaciones de las propiedades del combustible.

(ii) Aumento de las incrustaciones de la ceniza y el hollín sobre las superficies de intercambio de calor de los sobrecalentadores de techo, recalentador, economizador, CAR, etc.

(iii) Falta de información para la implementación de acciones de control capaces de adaptarse a la variabilidad indicada anteriormente por ausencia de puntos de mediciones de la composición química de los gases de la combustión, de temperatura y presión de gases en el eje convectivo.

Como solución a la problemática anterior, los expertos que supervisan permanentemente la operación desde su cuarto de supervisión y control se ven obligados sistemáticamente a tomar decisiones manuales, a realizar mediciones visuales y asincrónicas con instrumentos externos, con lo cual, en ocasiones, someten al proceso esfuerzos inadecuados.

Una de las líneas de investigación que está teniendo mayor auge en el sector eléctrico es la de aumentar la fiabilidad, disponibilidad y seguridad de los procesos industriales a partir del desarrollo de aplicaciones que apoyen una operación más eficiente y oportuna del personal de explotación.

Para apoyar esto, en esta investigación se ha realizado una caracterización del sistema en estado estacionario a partir de aproximar las mediciones de las diversas variables, que intervienen en las pruebas para evaluar el estado de limpieza de los agregados de la caldera en los diferentes puntos de operación en potencia, a sus valores medios. Para esto es necesario caracterizar la relación entre valores medios de cada variable seleccionada con las potencias con que opera la unidad, en diferentes estadios en referencia al último mantenimiento corrector y delimitar con los expertos cuales deberían de ser los valores óptimos de esas variables a partir de su experiencia, para poder determinar cuando comienzan a degradarse las superficies de intercambio de calor producto de la suciedad.

Por esta situación se plantea como **problema de la investigación**: el insuficiente desempeño del sistema de control de planta completa en mantener los valores de las diferentes variables en las magnitudes prescritas de buen comportamiento relativo

ante variabilidad del cambio de combustible y niveles de suciedad en los agregados en la caldera de la unidad IV de la CTE “Antonio Maceo”.

Para ello definimos como **objeto de estudio**: Los registros históricos y bases de datos de las variables del proceso, obtenidas del sistema supervisión de la unidad de generación y mediciones manuales realizadas por los especialistas en Régimen y Explotación. Donde el **objetivo fundamental** es: Desarrollar un software que constituya un sistema asistente que sea capaz de inferir los niveles de suciedad en las superficies exteriores de los intercambiadores de calor de los agregados de la caldera por su efecto en las desviaciones por variable seleccionada respecto a los valores de buen desempeño relativo bajo la operación automatizada de la caldera de la unidad IV de la Termoeléctrica “Antonio Maceo”.

Se establece como **campo de acción**: El diseño de métodos que permitan detectar los niveles de suciedad en los agregados de la caldera bajo el desarrollo de una interfaz gráfica.

Por tanto, se plantea la siguiente **hipótesis**: Si se desarrolla una aplicación que sea capaz de determinar las desviaciones de cada variable del proceso que se producen por efecto de la suciedad de las superficies en la transferencia de calor se tendrá la información necesaria para repotenciar al sistema de control de modo que pueda responder adecuadamente ante variabilidad del cambio de combustible y niveles de suciedad en los agregados y así mantener los valores de operación de las variables de la caldera como debe corresponder para las diferentes potencias.

Para el cumplimiento de los objetivos propuesto se han asumido las siguientes **tareas de investigación**:

- 1) Caracterizar el proceso tecnológico y analizar la influencia de los agregados de la caldera (sobrecalentador, recalentador y Calentador de Aire Regenerativo (CAR)) en el mismo, teniendo en cuenta las consecuencias de su ensuciamiento en la eficiencia del bloque.

- 2) Realizar el levantamiento de las variables instrumentadas que permitirán caracterizar el proceso de transferencia de energía en los agregados de la caldera.
- 3) Bajo conceptos de pensamiento computacional, documentar el cómo trasladar las características esenciales de los parámetros registrados ininterrumpidamente a las posibilidades de transformación de datos que brindan los comandos Matlab®.
- 4) Realizar salva de los históricos para el procesamiento y elaboración de los algoritmos de diagnóstico utilizando como herramienta básica el Toolbox GUIDE del Matlab®.
- 5) Diseñar un programa que permita el análisis y la evaluación de las principales variables que contribuyen al ensuciamiento de los agregados de la caldera.

Las cuales han sido desarrolladas utilizando como base los siguientes **métodos y técnicas de trabajo:**

1. Técnicas empíricas.
2. Análisis de fuentes documentales.
3. Observación.
4. Método histórico – lógico.
5. Método de análisis – síntesis.

Significación práctica de la investigación:

La presente investigación permite mostrar las potencialidades que brinda la realización de una ingeniería específica basada en estándares internacionales de diseño lo que posibilita el reconocimiento de los mismos en amplia escala, además de contar con una aplicación en Matlab® que procesa los registros históricos de las variables seleccionadas con el fin de detectar a largo plazo los efectos de ensuciamiento de los agregados de la caldera, integrados por el sobrecalentador de techo, recalentador, economizador y calentador de aire regenerativo.

Para la entidad esta investigación le servirá de Sistema Asistente para evaluar el estado actual de la degradación de las superficies de intercambio de calor,

posibilitando la ocurrencia de una parada planificada, por lo cual es válido el uso de un Mantenimiento Preventivo Planificado (MPP) y no inesperado, contribuyendo de esta forma con las orientaciones y economía del país.

Estructura del trabajo.

Este trabajo de diploma consta de 2 capítulos, los cuales se encuentran organizados por epígrafes para una mayor facilidad en su comprensión.

En el **capítulo 1** se presenta una descripción del flujo tecnológico de una CTE, haciendo énfasis en la caldera como principal protagonista en la producción de vapor. Además se caracterizan los agregados de la caldera y su progresivo ensuciamiento para, de esa forma, dar paso a la solución de una problemática dada a partir de lo encontrado en el estudio de la misma.

En el **capítulo 2** se expone como se realiza la prueba de balance y ajuste de régimen en generadores de vapor, norma establecida para determinar el ensuciamiento de los agregados de la caldera, así como las principales variables que contribuyen a esto, en la unidad 4 de la CTE Antonio Maceo. Además se realiza la propuesta de una herramienta informática mediante el Toolbox GUIDE del Matlab®, con la cual se logran analizar y procesar los datos obtenidos de los registros históricos del supervisorio, detectando, en un período determinado, los niveles de ensuciamiento de los agregados de la caldera convirtiéndose, de esta manera, en un programa de mantenimiento, el cual posibilita que la caldera funcione con un mínimo de paradas en producción, minimizando costos de operación y permitiendo un funcionamiento seguro.

Por último, se presenta las conclusiones, recomendaciones, bibliografías utilizadas y anexos correspondientes.

CAPÍTULO 1. GENERACIÓN DE VAPOR: PROCESO, CONTROL Y MONITORIZACIÓN DE LA OPERACIÓN AUTOMATIZADA.

Introducción.

En este capítulo se realiza una explicación del flujo productivo de la CTE “Antonio Maceo”, además se describen las características de la caldera de vapor instalada en la planta. Se aborda el control de planta completa como estructura jerárquica de control utilizado en procesos químicos debido a la complejidad de las grandes plantas de procesamiento. Se expone la necesidad de la monitorización del funcionamiento de Generadores de Vapor en Centrales Termoeléctricas para realizar diagnóstico y se incluyen en el capítulo los diferentes estudios que se han realizado con el objetivo de optimizar el proceso en estudio.

1.1. Descripción del proceso industrial.

En su forma clásica, las Centrales Termoeléctricas consisten en una caldera en la que se quema el combustible para generar calor que se transfiere a unos tubos por donde circula agua, la cual se evapora. El vapor obtenido, a alta presión y temperatura, mueve una turbina y este movimiento, es empleado por un generador para producir energía eléctrica (Flynn, 2003). En su paso por la turbina, parte del vapor se extrae y estas extracciones de vapor se utilizan en los diferentes procesos auxiliares de calentamiento (combustible, agua, aire, tuberías de fuel-oil, otros). Luego el vapor es enfriado en un condensador cuya función es mejorar la eficiencia de la turbina, además de recuperar el vapor de agua para reingresarlo a la caldera, es necesario un flujo constante de agua refrigerante a baja temperatura en las tuberías del condensador para mantener la presión adecuada en la carcasa (receptora de vapor) y así garantizar la eficiencia de la generación de energía, (Ver la Figura 1. 1)

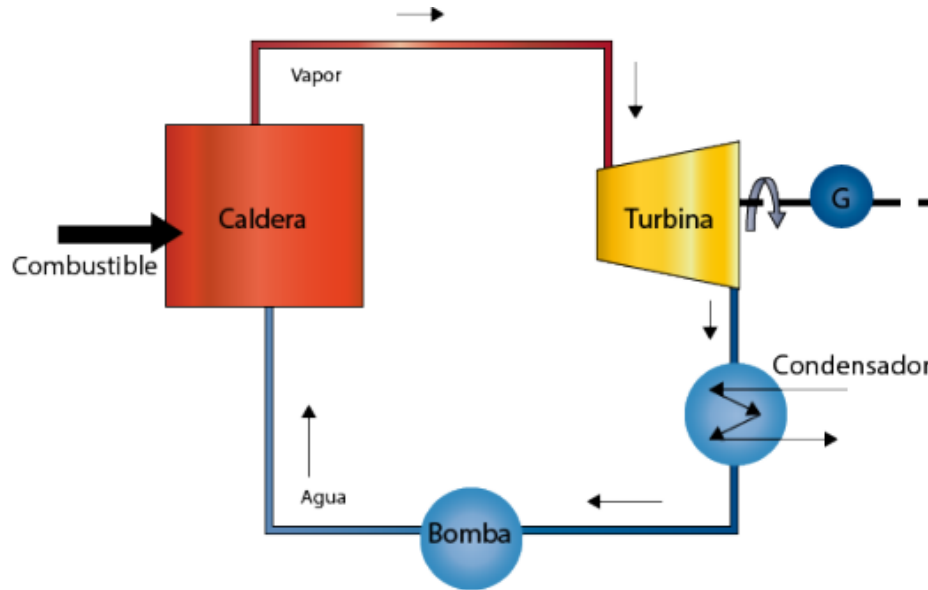


Figura 1. 1: Diagrama de funcionamiento de una central de ciclo convencional.

1.2. Descripción del flujo tecnológico de la CTE “Antonio Maceo”.

Para una mejor comprensión del flujo tecnológico se dividirá el mismo de acuerdo al recorrido de las materias primas fundamentales y al fluido más importante que se maneja en su interior (el vapor). En la Figura 1. 2 se puede apreciar el circuito por el cual circulan tanto el agua como el vapor que se emplean para la generación de electricidad en la CTE (Rodríguez M. A., 2014).

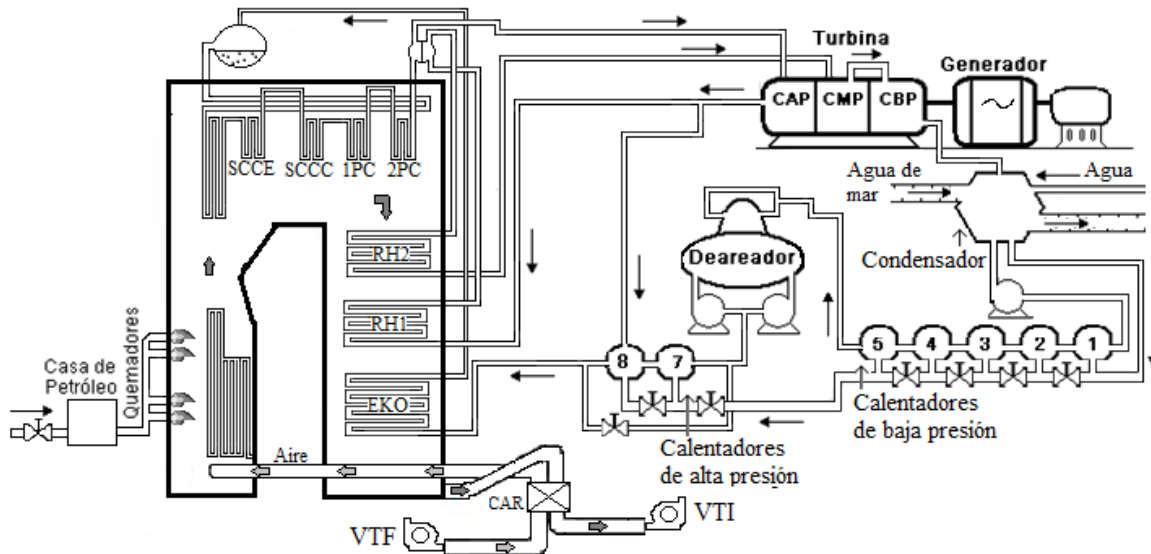


Figura 1. 2: Esquema de flujo de producción.

1.2.1. Obtención y tratamiento del petróleo para su empleo.

El camino de todo el combustible que se consume en la CTE “Antonio Maceo” comienza en la Refinería “Hermanos Díaz” desde donde es enviado hasta la casa de petróleo mediante tuberías. La casa de petróleo es el sitio donde se almacena, se acondiciona y se bombea el combustible para ser quemado.

De este lugar el combustible es sometido a un primer tratamiento fundamentalmente de temperatura; saliendo con una temperatura de 130 °C y una presión de 40 bar.

Las bombas que suministran petróleo impulsan el mismo hacia el horno de la caldera, donde tendrá lugar la combustión. Al combustible se le realiza un análisis químico diario para determinar su composición y la temperatura a la que debe precalentarse antes de llegar al quemador, su viscosidad, para lograr un menor consumo de energía en el bombeo y mejorar las condiciones para mezclarse con el aire, permitiendo una mejor combustión.

En la central se utiliza combustible importado (fuel-oil) y el producido en Cuba. Es incuestionable la calidad del fuel-oil frente al crudo nacional (FC 900), ya que este último tiene, entre otras propiedades, mayor concentración de azufre (6 %). Por lo tanto el tratamiento que se les da es diferenciado, necesitando el fuel-oil precalentarse menos.

- Combustible Fuel-oil: 100 °C a 140 °C.
- Combustible Nacional: 130 °C a 180 °C

1.2.2. Calentamiento del aire para la combustión.

Para que se produzca la combustión en las condiciones ideales es necesaria la presencia de los tres elementos del triángulo de fuego: el petróleo, oxígeno y una chispa. Para lograr esto son necesarios los Ventiladores de Tiro Forzado (VTF) cuya función es extraer aire de la atmósfera, el cual, antes de llegar a los quemadores, pasa por una etapa de calentamiento en el llamado Calentador de Aire Regenerativo (CAR), que no es más que un intercambiador de calor donde se calienta el aire con la energía térmica que poseen los gases de la combustión. Este calentamiento tiene la ventaja

de mejorar la combustión debido a que el mezclado con el combustible es más eficiente y aumenta la eficiencia térmica de la caldera, ya que la temperatura del aire influye directamente en la temperatura de la llama. Para lograr una combustión adecuada se debe lograr una correcta relación combustible-aire.

El aire precalentado llega a la entrada del horno con una temperatura aproximadamente igual a 360 °C donde se mezcla con el petróleo y se produce una chispa para dar lugar a la combustión.

1.2.3. Producción de vapor.

Durante el proceso de la combustión del petróleo en el horno, éste llega a alcanzar una temperatura de 1600 °C, los gases calientes que se producen tienen como función principal transmitir calor por el fenómeno de convección al agua que se encuentra dentro del domo. El domo no es más que un tanque situado en la parte superior del horno, contiene agua y debido al aumento de su temperatura una parte de esa agua se convierte en vapor, como este no sale del domo con temperatura suficiente necesita pasar a los sobrecalentadores que son intercambiadores de calor situados en la parte superior del horno, allí su temperatura sigue aumentando gracias a los gases calientes de la combustión. De los sobrecalentadores el vapor debe salir con una temperatura de 545 °C y una presión de 130 bar, estos valores son suficientes por lo que el vapor pasa a la válvula de cuello que es la que permite la entrada al Cilindro de Alta Presión (CAP). Esta válvula solo permite el paso del vapor si este ha alcanzado la temperatura y presión establecidas para ello.

1.2.4. Generación de electricidad.

Cuando el vapor alcanza las condiciones óptimas, la válvula de cuello y las válvulas de admisión se abren para permitir el paso de vapor hacia la turbina, donde primero realiza trabajo en el CAP.

El Cilindro de Alta Presión es semejante a un ventilador de aspas muy grandes que está acoplado tanto al Cilindro de Media Presión (CMP) como al Cilindro de Baja Presión (CBP) a través de un eje conectado directamente al generador.

Gracias a la presión del vapor que llega al CAP comienza a producirse un movimiento de rotación que hace girar al eje y esto provoca que comience a funcionar el generador. La energía que se produce no es suficiente por lo que se hace necesario entonces realizar la primera extracción del CAP, en la cual el vapor sale con una temperatura de 340 °C y una presión de 29 bar y se dirige a los recalentadores que se encuentran en la parte superior del eje convectivo de la caldera.

De los recalentadores sale el vapor al cual se le ha aumentado la temperatura pero no la presión, debido que a su paso por las tuberías ocurren pérdidas de presión saliendo con aproximadamente 27 bar y 545 °C. Por esta razón se pasa al CMP el cual tiene aspas más grandes que el de alta presión, esto se hace para lograr que con menos presión se transmita movimiento al eje del generador produciéndose la energía eléctrica. El vapor utilizado por el CMP pierde presión y temperatura pero todavía tiene energía para realizar trabajo en el CBP, el cual tiene grandes aspas que permite realizar el movimiento de rotación con menor presión y transmitir su energía al eje del generador (Rodríguez M. A., 2014).

1.2.5. Condensado del vapor para la recirculación del agua.

En la parte inferior del CBP se encuentran ubicados los pozos calientes, estos constituyen el condensador. La eficiencia en la generación de la central está dada por el vacío (presión negativa) que debe existir dentro del condensador. En este ocurre la condensación del vapor, se utiliza para esto el agua de mar. La central consta de dos canales que son su fuente de agua (de mar). El agua llega a un pozo donde es succionada por una bomba hasta el condensador, realizando su función en un ciclo cerrado.

Los gases no condensables son extraídos por los eyectores (extractores de gases), ya que la concentración de estos provoca que aumente la presión dentro del condensador. La variación de la temperatura del agua que sale del condensador debe estar entre 6 °C a 7 °C después de la transferencia de calor. El agua condensada llega a través de las bombas de condensado hasta los calentadores de baja presión y de ahí va al deareador. En este último se elimina el oxígeno del agua proveniente de los

calentadores de baja. Después de haber eliminado el oxígeno al agua, esta pasa a través de las bombas de alimentar hacia el economizador donde se eleva su temperatura y desde allí pasa nuevamente al domo incorporándose al proceso y dando lugar de esta forma a un ciclo ininterrumpido.

Como se puede apreciar el proceso forma un lazo cerrado en el que se aprovecha al máximo el calor de los gases producidos por la combustión del petróleo. Es necesario aclarar que estos gases luego de transitar por el horno a través de todo el eje convectivo llegan a los ventiladores de tiro inducido que los conducen a la chimenea y los expulsan a través de esta a la atmósfera (Rodríguez M. A., 2014).

1.3. Descripción técnica de la Caldera de Vapor de la CTE “Antonio Maceo”.

En la sala de calderas de la CTE “Antonio Maceo” están instaladas cuatro calderas BKZ-340-140/29M, cada una con una capacidad de generación de vapor de 340 t/h las cuales trabajan en bloque con una turbina tipo K-100-130-3600/2T. Estas calderas fueron fabricadas en la extinta Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas por la fábrica Barnaulsk BKZ. Está diseñada para quemar fuel-oil pero en 1998 fue modernizada por los franceses para permitir que dicha unidad una vez rehabilitada opere utilizando como combustible el petróleo crudo cubano y el fuel-oil con los siguientes indicadores (Benítez, 2010):

- i). Factor de disponibilidad por encima del 80% promedio anual entre mantenimiento capitales.
- ii). Recuperación de la potencia nominal 100 MW.
- iii). Consumo específico bruto no mayor de 260 g/kWh a 100 MW.
- iv). Insumo eléctrico por debajo de 6.5 %.
- v). Plazos entre capitales no menor de 5 años y no más de 45 días de duración en los mantenimientos anuales.
- vi). Mejoramiento de las condiciones de operación con el petróleo crudo cubano y aumento de la seguridad del personal de la planta.
- vii). Aumento de la maniobrabilidad y seguridad de al automática de los bloques.

1.4.1. Características constructivas.

La disposición de esta caldera es en forma de P rusa "II" (Figura 1. 3) y está compuesta por:

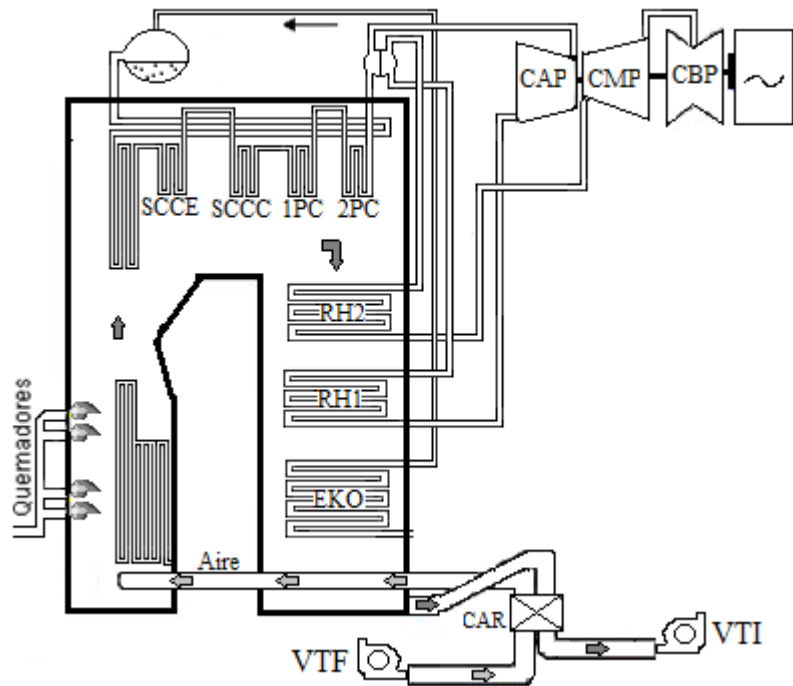


Figura 1. 3: Esquema de la caldera de vapor.

- i). Un domo superior.
- ii). Horno al vacío con paredes de agua.
- iii). Circulación natural.
- iv). Un sobrecalentador radiante.
- v). Dos sobrecalentadores convectivos.
- vi). Recalentador de vapor.
- vii). Economizador.
- viii). Calentador de aire regenerativo.
- ix). Precalentadores.
- x). Tiro balanceado.

La caldera está proyectada para trabajar bajo las condiciones que se muestran la tabla 1.1 (Quintana, 2012):

Tabla 1. 1: Parámetros de diseño de la caldera.

Nº	Parámetro	Valor
1.	Capacidad de Producción de vapor	340000 kg/h
2.	Presión de vapor del domo	16212 kPa
3.	Presión en el cabezal de salida del vapor sobrecalentado	14185,5 kPa
4.	Temperatura Nominal del vapor sobrecalentado	545 °C
5.	Presión del vapor a la entrada del recalentador	2938,425 kPa
6.	Temperatura del vapor a la entrada del recalentador I	340 °C
7.	Temperatura del vapor a la salida del recalentador II	545 °C
8.	Flujo del vapor recalentado	303000 kg/h
9.	Temperatura nominal del agua de alimentar	230 °C
10.	Volumen del agua de la caldera	96.6 m ³
11.	Volumen de agua del circuito primario	35 m ³
12.	Volumen de agua del circuito secundario	40 m ³
13.	Superficie de evaporación	692.5 m ²
14.	Volumen total del horno	960 m ³
15.	Superficie de sobrecalentamiento	1 960.6 m ²
16.	Superficie de calentamiento de agua	3 710 m ²
17.	Superficie de recalentamiento	2 996 m ²
18.	Cantidad de quemadores	8

Nº	Parámetro	Valor
19.	Tipo de atomización	vapor
20.	Flujo de combustible	26000 kg/h
21.	Etapas de sobrecalentamiento	4
22.	Etapas de recalentamiento	2
23.	Etapas de calentamiento del agua(etapas del economizador)	3
24.	Cantidad de ventiladores de tiro forzado	2
25.	Cantidad de ventiladores de tiro inducido	2
26.	Cantidad de recirculadores de gases	2
27.	Cantidad de precalentadores	2
28.	Cantidad de calentadores de aire regenerativos	2

1.4. Elementos principales de una Caldera de Vapor.

Hogar: Recinto al interior de la caldera en donde se realiza la máxima transferencia de calor radiante entre el proceso de combustión y los tubos conductores de agua que recubren las paredes refractarias.

Para el desarrollo de una combustión adecuada y completa, el hogar debe conservar la temperatura de la llama y de los gases generados, lo más alta posible durante el tiempo necesario, a fin de garantizar una correcta transferencia de calor. Del mismo modo, debe proveer el espacio necesario para evitar el contacto entre la llama y los tubos de agua, pues de no impedirse, se corre el riesgo de la extinción anticipada de los extremos de la llama.

Domo: es un cilindro colector de un solo sector (puro) y a él entra el agua que se utiliza para alimentar las paredes de agua del horno. En él se encuentran unos dispositivos denominados ciclones, que separan la mezcla agua-vapor proveniente de las paredes

de agua del horno, donde el agua retorna por los tubos alimentadores a los cabezales inferiores de las paredes de agua.

Economizador: es un intercambiador de superficie formado por 3 pasos, encargado de aumentar la temperatura del agua de alimentar hasta un valor cercano a la de saturación, a expensas de la temperatura de los gases de escape, aumentando así la eficiencia de la caldera.

En él se debe evitar lo siguiente:

- i). Que la temperatura del agua alcance la temperatura de saturación.
- ii). Que la temperatura del metal de los tubos alcance los 420 °C.
- iii). Que se produzcan enfriamientos bruscos.

Sobrecalentador: Es un tipo de intercambiador de calor conformado por un banco de tuberías en forma de serpentin, que tienen como función incrementar por encima del punto de saturación la temperatura del vapor procedente del domo superior.

El paso por el Sobrecalentador, le proporciona al fluido un incremento calórico aproximado de 545 °C, con el que se logra garantizar un vapor seco, apropiado para el ingreso en los diferentes equipos térmicos de fábrica, atenuando con ello los efectos corrosivos del condensado originado por la humedad presente en el vapor.

Atemperador: Su función principal es la de disminuir la temperatura del vapor, con el fin de adaptarlo a las necesidades térmicas de los equipos y procesos ejecutados en la planta; conservando de manera estricta en este caso, la característica de vapor seco obtenida con el sobrecalentamiento.

Chimenea: Corresponde al conducto de salida hacia la atmosfera de los gases de combustión, señalando que es aquí, en donde se presenta la mayor cantidad de pérdida de calor, pues la temperatura de los gases alcanza fácilmente los 220°C en los puntos cercanos a la base.

Ventilador de tiro forzado (VTF): Tiene como función abastecer de aire a baja presión al proceso de combustión realizado dentro del Hogar. El aire producido, es precalentado a partir del remanente energético de los gases de combustión que se

dirigen hacia la chimenea para su descarga, obteniendo con ello una ganancia térmica aproximada de 201 °C. El uso de aire precalentado como comburente, acelera la ignición y fomenta una combustión rápida y completa del combustible en el hogar (Mezu, 2012).

Ventilador de tiro inducido (VTI): Se emplea para extraer los gases producto de la combustión con una temperatura en la succión no mayor de 200 °C. Otra función adyacente, es la de conservar la presión del hogar cercana a la presión atmosférica, manteniéndola siempre sutilmente negativa.

Ventilador de recirculación de gases (VRG): Se utiliza para transportar al fondo del horno los gases de la combustión que extraen de la salida de los economizadores, con el fin de regular la temperatura del vapor recalentado.

Calentador de aire regenerativo (CAR): Intercambiador de calor cuyo objetivo es incrementar el rendimiento del ciclo térmico global (Ver Figura 1. 4). Cuenta con dos funciones principales: el calentamiento del aire primario (aire VTF) con los gases de escape, retornando parte del calor al Hogar para su aprovechamiento en el proceso y la disminución de la temperatura de los gases a la salida de la caldera de vapor logrando con esto una reducción considerable de las pérdidas y un aumento en la eficiencia térmica.

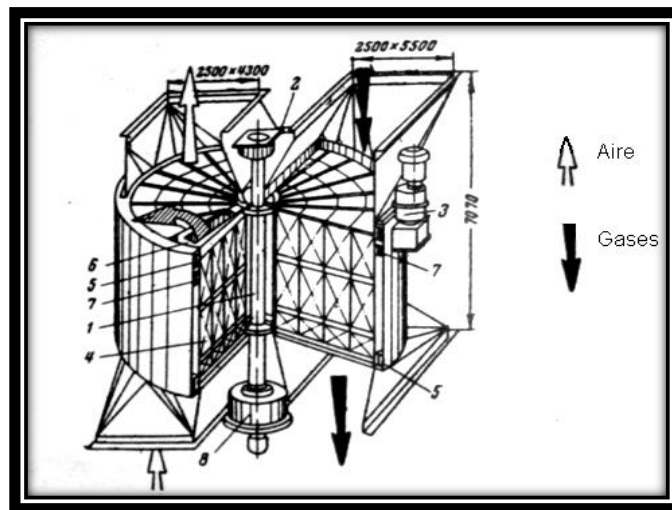


Figura 1. 4: Vista Calentador de Aire Regenerativo.

1.5. Caldera de vapor: un sistema dinámico con control de planta completa.

Los procesos industriales sobre los cuales se aplica la detección de estado estacionario (DEE) están enmarcados por el contexto que bajo el término control de planta completa se indica en (Skogestad, 2012). Éste es sinónimo de estructura jerárquica de control (véase Figura 1. 5) y se utiliza en el campo de control de procesos químicos debido a la complejidad de las grandes plantas de procesamiento.

Con esta precisión se significa que las series de tiempo sobre las cuales se aplicarán los métodos, corresponden a procesos dinámicos que por la acción de los controladores están estabilizados en torno a los puntos de operación. Esta estructura es extensible a todas las aplicaciones de control, entre ellas, vehículos y aeronaves, la robótica, los sistemas de energía, sistemas biológicos y los sistemas sociales.

El diseño de un sistema de control debe cumplir con los dos objetivos operacionales siguientes:

- (i) Operación económica a largo plazo.
- (ii) Estabilidad y control de regulación a corto plazo.

El primer objetivo tiene que ver con hacer que el sistema funcione como se pretende, donde la evaluación económica es lo importante. El segundo objetivo tiene que ver con hacer que el sistema se mantenga en funcionamiento, donde la estabilidad y la robustez son temas importantes. La monitorización y la optimización son técnicas orientadas al primer objetivo (Vazquez, 2015).

A su vez, en la implementación tecnológica para cumplimentar los dos objetivos planteados, la capa de control se divide jerárquicamente en dos (véase Figura 1. 5a):

- (i) Una capa lenta de supervisión (económico)
- (ii) Una capa rápida de regulación (estabilización)

La Figura 1. 5b representa una estructura jerárquica en el aprovechamiento de las mediciones ininterrumpidas con fines de monitorización de una planta con procesos

estabilizados. Esta estructura es la que aplica a la instalación de experimentación de esta investigación (Vazquez, 2015).

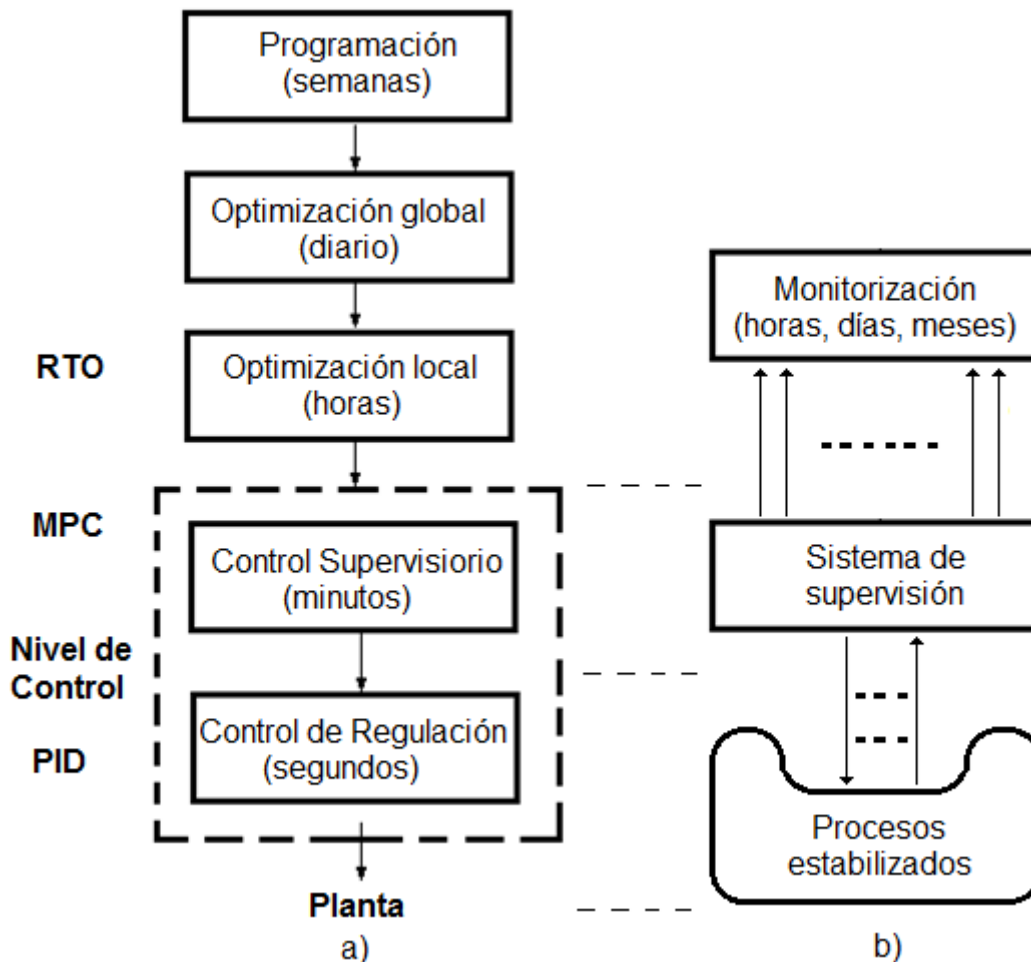


Figura 1. 5: Control de planta completa: a) Con optimización para planta de procesos químicos, b) Con supervisión de datos y monitorización.

1.5.1. Caracterización del nivel de regulación en el control de planta completa del proceso de experimentación.

Para enfrentar los retos científicos indicados anteriormente se requiere de un conocimiento preliminar del proceso de experimentación. En este caso es la generación de vapor (GV) formando parte de la unidad de generación eléctrica (UGE) que a su vez constituye un componente del sistema eléctrico (SE). Para dar las debidas respuestas que constituyen el marco conceptual de esta investigación se hace necesario:

(i) delimitar cómo se lleva a cabo los regímenes de manipulación entre niveles operación en potencia de las UGE.

(ii) caracterizar el ciclo térmico que se implementa en la UGE a través de las variables que son instrumentadas y controladas: los tiempos de respuestas, la variabilidad de la sucesión de magnitudes en el tiempo dada por la naturaleza física de la variable de que se trate (por ejemplo; la lenta variabilidad de las temperaturas respecto a las mediciones de flujos de fluidos) y las propiedades del ruido que esencialmente las contaminan.

(iii) caracterizar los tipos de lazos de control que se insertan de modo combinado en el ciclo térmico y en la conversión electromecánica de energía.

(iv) caracterizar las mediciones que se procesarán.

1.5.2. Principales lazos de control en la generación de vapor.

Los lazos principales en un sistema de control de la caldera, (Smuts, 2010) se sintetizan en la Tabla 1. 2.

Los primeros tres lazos listados en la tabla tienen que ver con la reacción de la unidad a los cambios en la demanda de potencia del sistema eléctrico. Son lazos que operan con valores de consigna variables en el nivel secundario cuando el centro de despacho decide aumentar o disminuir el aporte de esa UGE al sistema eléctrico.

El resto de los lazos regulan los valores de las variables de temperatura y presión (Lindsley, 2005) en un rango estrecho tal y como demanda la operación en ciclo térmico.

Para fines de monitorización del desempeño de la operación de los generadores de vapor de las termoeléctricas el seguimiento de los valores de las mediciones en los elementos de acción final tales como: el % de apertura de las compuertas que controlan flujos de aire y de gases, los % de apertura de válvulas de agua, de vapor y de combustible, es muy importante. Esta afirmación se fundamenta en el hecho de que los efectos de las acciones perturbadoras se contrarrestan por el sistema de control, siempre y cuando cumpla su rol y modifique los valores de estados estacionarios de

las magnitudes de las variables anteriormente mencionadas. Bajo su buen desempeño hará que se cumplan las relaciones que demanda el ciclo térmico y de este modo, el cumplimiento en estado estacionario: del balance de materiales, del balance de energía; los mecanismos de transferencias de calor de cada tipo de intercambiador, de movimiento de los fluidos de diferentes tipos y estados, el comportamiento mecánico de los materiales de construcción, entre otros. Esta reacción del sistema de control en su rol corrector se manifiesta a estado estacionario mediante las desviaciones que se deberán detectar sobre las cuales se observa el desempeño de la operación (Vazquez, 2015).

Tabla 1. 2: Variables de los lazos esenciales y típicos del generador de vapor.

Mediciones que intervienen en los lazos	Variable manipulada
Carga del generador, N_p	Válvula de control del flujo de vapor, \dot{m}_s
Presión del vapor principal, P_s tomada en la primera etapa de turbina.	Posición de la válvula del flujo de combustible, \dot{V}_f Posición de la válvula del flujo de aire comburente, \dot{V}_a mediante la posición de las compuertas de salida de gases.
Flujo de combustible, \dot{V}_f	Flujo de combustible, \dot{V}_f Flujo de aire comburente, \dot{V}_a , (compensado por la temperatura del mismo).
Presión del horno, P_h	Posición de las compuertas de tiro forzado, X_{VTF}
Nivel del domo.	Flujo de agua de alimentación, \dot{m}_w .

Presión de la primera etapa, P_s compensada con la temperatura del vapor, T_{SH} . Flujo de agua de alimentación, \dot{m}_w , compensada por la temperatura del agua, T_w	
Temperatura del vapor antes del Cilindro de Alta Presión de la Turbina, T_{SH}	Flujos de atemperamiento.
Temperatura del vapor antes del Cilindro de Baja Presión de la Turbina, T_{RC}	Posición de las compuertas de recirculación de gases, X_{VRG}

Esta caracterización de los tipos de lazos de control que estabilizan en torno a cada punto de operación en potencia las variables de proceso del ciclo térmico y de la conversión electromecánica de energía, además de asegurar las condiciones que justifican la clasificación de tipos de variables, permite conocer preliminarmente de las variables de proceso que se seleccionen para monitorizarlas, cuál es su rol en cuanto a: (i) si es regulada directamente, (ii) si es manipulada o (iii) si no está directamente regulada pero en el diseño del control de planta completa está previsto que su valor se mantenga en unos límites estrechos de tolerancia mediante la regulación de otras variables con las cuales tiene una relación de causalidad.

1.6. Monitorización del desempeño de Generadores de Vapor en Centrales Termoeléctricas con fines de diagnóstico.

La implementación de los Sistemas de Control Distribuidos (DCS del inglés **D**istributed **C**ontrol **S**ystem) en los sistemas de automatización de centrales eléctricas provoca la generación de enormes volúmenes de datos que deben ser manipulados correctamente para optimizar la operación de estas.

La supervisión del proceso implica el monitoreo continuo de la operación, con el objetivo de observar las medidas actuales a una o varias variables, y respecto a sus

magnitudes esperadas de buen desempeño relativo determinar sus desviaciones respectivas. El propósito final de esta etapa, es crear las bases para detectar las causas que modifican la correcta operación en equipos e intercambiadores de calor y que en algunos casos pudiera conducir a sus fallos.

El diagnóstico de los problemas que ocurren durante la operación de un sistema energético consiste en descubrir e interpretar los signos de un mal funcionamiento en los equipos y cuantificar sus efectos en términos de consumo adicional de recursos; es decir, saber dónde, cómo y qué parte del consumo de recursos puede ser ahorrado, manteniendo constantes la cantidad y especificaciones de los productos del sistema, así como las condiciones que afectan el comportamiento del sistema y que no pueden ser manipuladas por el operador (Díaz, 2014).

La implantación de sistemas para la monitorización empleando los datos de estado estacionario de la planta puede tener dos criterios, el rendimiento global y la degradación del equipamiento. La monitorización del rendimiento es para la evaluación continua a lo largo del tiempo de la capacidad de producción y eficiencia de una Unidad de Generación Eléctrica (UGE). Las evaluaciones son repetidas a intervalos regulares. Involucra dos cálculos: la producción actual y la esperada.

La selección de variables se hace sobre la base de un criterio que permita evaluar los efectos de acciones degradantes. Éste puede estar orientado a observar los efectos de la desviación de las variables sobre el rendimiento actual de un subproceso o bien sobre un nivel global de la unidad de generación eléctrica. Para esto es preciso conocer, de la termotecnia, el rol de cada una de ellas en el ciclo térmico.

La observación de la forma de las series de tiempo adquiridas en la unidad de generación eléctrica como parte de un sistema de suministro eléctrico coloca la operación en niveles discretos de potencia de un amplio rango de operación de las variables. Para seleccionar las variables hay que distinguir entre cuales permiten reconocer el punto de operación de la UGE y cuáles no. Para encontrar una respuesta, es imprescindible conocer los principios de la conversión electromecánica de energía, especialmente aquellos que rigen el ciclo térmico.

El desarrollo en el área de supervisión de procesos durante los últimos 15 años, es abundante y el número de aplicaciones en la industria también ha ido creciendo. Aun cuando no existe una única clasificación, los métodos existentes se tienden a agrupar como:

- (i) Estrategias basadas en modelos cuantitativos,
- (ii) Estrategias basadas en modelos cualitativos,
- (iii) Estrategias basadas en los datos históricos del proceso.

1.6.1. Necesidad de la monitorización de los efectos de las degradaciones en Centrales Termoeléctricas.

La monitorización de las desviaciones es la vía de observar los efectos de la degradación de equipos e intercambiadores de calor pues éstas son reflejo de la reducción de la capacidad del rendimiento en el equipo que ha ocurrido en el tiempo. El grado de degradación es un parámetro relativo pues se sustenta en el cálculo de las desviaciones a variables seleccionadas respecto a una condición relativa de referencia. Las degradaciones son debidas a modificaciones externas al subproceso (tales como variables ambientales, cambios de la calidad del combustible), inducidas sobre el subproceso (por ejemplo debidas al incorrecto funcionamiento del sistema de control en mantener las relaciones y calidad de la combustión) e intrínsecas del subproceso y provocadas por desgastes de partes, variación del espesor de paredes por ensuciamiento, etc. Los mecanismos esenciales que causan la degradación son los siguientes:

- (i) El ensuciamiento: se debe a la adherencia de partículas a los planos aerodinámicos y superficies anulares.
- (ii) La corrosión en caliente es la pérdida o el deterioro de material de los componentes expuestos a los gases de combustión calientes, causado por las reacciones químicas entre los componentes y ciertos contaminantes.
- (iii) La corrosión es causada tanto por los contaminantes en la entrada de aire como en la entrada de combustible y los derivados de la combustión.

- (iv) La erosión es el levantamiento abrasivo de material que está en el paso de la trayectoria de partículas duras e incompresibles que portan los flujos al chocar con la superficie.
- (v) La abrasión es causada cuando una superficie rotativa roza en una superficie estacionaria. El daño también puede deberse a los objetos extraños que golpean los componentes del camino de flujo.

Mientras algunos de estos efectos pueden ser eliminados o atenuados mediante limpieza o lavado, otros requieren del ajuste, la reparación, o reemplazo de componentes. La monitorización a largo plazo de los procesos químicos y de unidades de generación eléctrica, así como el manejo de situaciones anormales tiene justificadas razones económicas. A escala internacional esta afirmación se ejemplifica con los siguientes casos:

- (i) La deposición de partículas de cenizas sobre las superficies de transferencia de calor provoca pérdidas cuantiosas pues afectan la disponibilidad y la eficiencia en plantas termoeléctricas. Estas razones promueven investigaciones para la monitorización inteligente de procesos, de la llama de los quemadores con la aplicación de técnicas espectroscópicas, combinación de técnicas de análisis de respuestas transitorias y aplicaciones de software para asistir la evaluación a corto plazo de la operación, entre otras.
- (ii) Además de los efectos de la corrosión y el ensuciamiento de superficies de intercambio se deteriora la instrumentación, se producen perturbaciones inusuales por cambiar las normas del combustible y las características constructivas.
- (iii) La corrosión y el ensuciamiento son las causas de alrededor del 90 % de los fallos en sobrecalentadores, recalentadores y economizadores. En la instrumentación las causas se localizan en el rozamiento o trabas en la válvula de control y la inexactitud de los sensores y como perturbaciones la mala atomización y los cambios de propiedades físico química de los carburantes.

1.6.2. Método exoenergético y termoeconómico para el diagnóstico de sistemas de energía.

El uso del análisis exoenergético y termoeconómico para el diagnóstico de la reducción de la eficiencia en los sistemas de energía, ha sido ampliamente discutido en la literatura. Varios procedimientos basados en este análisis, se ha propuesto y aplicado en plantas en explotación con el objetivo de localizar y cuantificar fallas.

El objetivo general del diagnóstico termoeconómico es la detección de la desviación de la eficiencia, su valor económico y la ubicación de sus principales causas; es decir, la evaluación de cuanto afecta el costo, la desviación de rendimiento en un parámetro. (Valero A. , y otros, 2004)

En este sentido, con el fin de aplicar y comparar los diversos enfoques de diagnóstico termoeconómico, un método de trabajo común se ha establecido sobre la base de:

- (i) la definición de un caso de trabajo, con el fin de construir un modelo de confianza para el diseño, así como el rendimiento fuera de diseño,
- (ii) la declaración de los atributos que un buen algoritmo diagnóstico debe cumplir,
- (iii) definir diferentes conjuntos de fallos simultáneos que el algoritmo debe detectar.

Con este método se pretende analizar los efectos producidos por fallas producto del ensuciamiento, la corrosión, la erosión, etc., en los resultados del diagnóstico, en particular, si el procedimiento todavía permite identificar los componentes que funcionan mal. La ubicación correcta de las anomalías se hace difícil por los efectos que éstas inducen en todo el sistema, no sólo en los componentes en las que tienen lugar, (Verda & Borchiellini, 2007).

El diagnóstico de las plantas de energía consiste en detectar anomalías que se producen en los componentes mientras el sistema está operativo y la comprensión de sus causas. Ésta es una relevante tarea debido al alto impacto económico de las deficiencias y la disminución de la eficiencia en la gestión global.

Los fallos que generalmente se evitan son:

- (i) Condiciones de operación fuera de un rango seguro.
- (ii) Verificación periódica de las cantidades tales como vibraciones, temperaturas del metal, presiones de aceite, temperatura del fluido de enfriamiento, etc.
- (iii) Variación en la carga de la planta operada.

La disminución en el desempeño puede ser evaluado a través de procedimientos deductivos. Varios de ellos han sido propuestos en las últimas décadas y se aplican a turbinas de gas y vapor. Algunos ejemplos son: la matriz de fallo (Saravanamuttoo & Maclsaac, 1983) y el análisis de la ruta del gas (Stamatis, Mathioudakis, & Papailiou, 1990).

Esta herramienta presenta varias ventajas: (1) se puede utilizar no sólo para detectar y localizar anomalías, sino también para la cuantificación de sus efectos; es decir, para el cálculo de los posibles ahorros de energía técnicos obtenidos mediante la eliminación de cada una de las anomalías; (2) se puede aplicar a cualquier planta, tales como turbinas de vapor [(Valero, Torres, Lerch, Royo, & Serra, 2002), (Reini & Tacani, 2005)], turbinas de gas [(Stoppato & Lazzaretto, 1996), (Verda, Serra, & Valero, 2004)], los ciclos combinados [(Valero A. , Correas, Zaleta, Lazzaretto, Verda, & Reini, 2004), (Correas, 2001)], plantas de desalinización (Uche, 2000), etc., sin previo conocimiento de las influencias que éstas tienen en el sistema.

La localización de los componentes de mal funcionamiento se obtiene mediante el cálculo de uno o más indicadores para todos los componentes. Estos indicadores se obtienen mediante la comparación de algunas cantidades termodinámicas calculadas en el estado de funcionamiento actual y una condición de referencia adecuada.

1.6.3. Monitorización del ensuciamiento de superficies de intercambiadores de calor.

La suciedad de las superficies de transferencia de calor siempre ha sido uno de los principales problemas operacionales en las calderas de las centrales eléctricas. Se ha estimado que son una fuente importante de pérdidas de la disponibilidad y la eficiencia

energética en centrales térmicas, que equivalen a 1% en condiciones normales de funcionamiento.

El ensuciamiento es la terminología generalmente usada para describir la acumulación y formación de material no deseado en superficies intercambiadoras de calor, que es la causa del deterioro de la capacidad de transferencia de calor. El ensuciamiento es uno de los problemas más importantes de equipos como intercambiadores de calor, calderas y generadores de vapor. Existe un considerable interés en este tema debido al impacto negativo sobre la economía en diversas industrias. Entre las deficiencias producto del ensuciamiento se encuentran:

- (i) Ineficiencia en la operación de la Caldera de Vapor y parámetros no establecidos.
- (ii) Deterioro de las superficies de intercambio no prevista.
- (iii) Rotura inesperada.

Ejemplo de estos problemas lo podemos observar en la Figura 1. 6 que a continuación se muestra:



Figura 1. 6: Residuos de cenizas en tubos que conforman el Recalentador.

El proceso de ensuciamiento es el resultado de una deposición de contaminación sobre las paredes del tubo. La velocidad de crecimiento del ensuciamiento por deposición (resistencia de ensuciamiento o factor de ensuciamiento, R_f) se puede

calcular como la diferencia entre las velocidades de deposición y de eliminación como se muestra en la ecuación (1).

$$R_f = \Phi_d - \Phi_r \quad (1)$$

El comportamiento de ensuciamiento se clasifica en cuatro categorías (Epstein, 1988), como se indica en la Figura 1. 7. El tiempo de retardo (t_d) es el periodo de tiempo inicial en la que no se produce ningún ensuciamiento. Sin embargo, (t_d) es generalmente más corto después que se limpia por primera vez una superficie sucia. Las curvas en la Figura 1. 7 representan cuatro tipos diferentes de mecanismos de ensuciamiento.

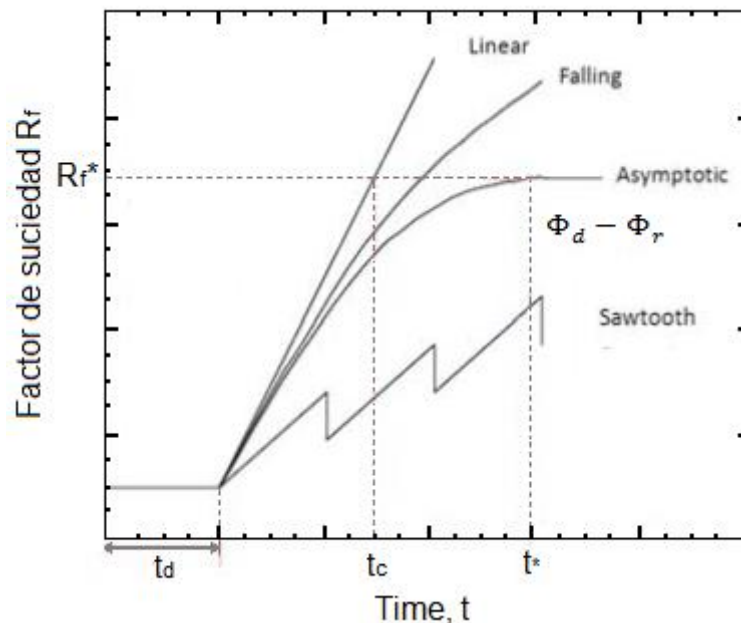


Figura 1. 7: Curva de ensuciamiento.

- (i) Ensuciamiento lineal, indica las tasas de deposición constante.
- (ii) La caída de la curva, indica el aumento del depósito con el tiempo, pero no linealmente y no alcanza el estado estacionario.
- (iii) Curva asintótica, es la más común en el proceso industrial, indica el ensuciamiento gradualmente en el tiempo y alcanza un estado estable con el tiempo.

- (iv) Diente de sierra, indica una tendencia marcada por períodos cortos de degradación debido a la diseminación periódica de los depósitos de suciedad.

La progresión de las incrustaciones es un proceso complicado en donde influyen muchos parámetros y los modelos matemáticos disponibles no cubren todas las formas de mecanismos de ensuciamiento, varios métodos para predecir esta situación quedan reflejados en las publicaciones (Lingfang, 2008), (Upadhyaya & Hines, 2004), (Ingimundardóttir & Lalot, 2009). Entre los métodos desarrollados se encuentran:

- (i) Métodos de modelaje empíricos, tales como la Red Neuronal Artificial (RNA).
- (ii) Máquinas de Soporte de Vectores (MSV).
- (iii) Otras técnicas estadísticas aplicadas a otros procesos industriales.

Según (Yuanhao & Jingcheng, 2011), el monitoreo de las incrustaciones de ceniza en la caldera de carbón de la Central Eléctrica de Guizhou, China se puede lograr por medio de cálculos en línea y la instalación de instrumentación especial en la planta de energía. Los cálculos en línea se necesitan para calcular la absorción de calor de las superficies de transferencia de calor, a través de la evaluación de la tasa de absorción de calor. Mientras, con una instalación de instrumentación especial en la planta de energía se puede reflejar el estado de absorción de calor de las superficies de transferencia de calor, proporcionando una señal continua, esto influye en un aumento significativo del coste de los sensores, la instalación y mantenimiento.

Los resultados muestran que el método de balance de masa y energía dinámica bien puede reflejar el proceso de absorción de calor de la caldera, puesto que los coeficientes de transferencia de calor se reducen durante el funcionamiento de la caldera, la comparación entre ellos y los valores obtenidos con superficies limpias permite evaluar el ensuciamiento. Se hace uso de las redes neuronales artificiales, para llevar a cabo el análisis de las variables claves, para estudiar el comportamiento interno del sistema ante el aumento del ensuciamiento.

En (Heins, Veiga, Ruiz, & Riera, 2007) se presenta un procedimiento para supervisar el rendimiento de la red de intercambiadores de calor (RIC) y para optimizar la limpieza, en REPSOL YPF Refinería Luján de Cuyo, Argentina.

El procedimiento se basa en una simulación rigurosa de la RIC utilizando Hysys (de Aspen Technology). La simulación se utiliza para estimar el coeficiente global de transferencia de calor de servicio, con los datos operativos reales adquiridos de Sistema de Información de Planta de la unidad. El coeficiente global de transferencia de calor limpio se calcula para cada uno de los intercambiadores de calor individuales con una simulación rigurosa usando TASC (simulador de intercambiador de calor riguroso también de Aspen Technology), incluido en Hysys. Con estos dos coeficientes se realiza una comparación que proporciona el rendimiento real de cada intercambiador de calor y de la RIC en general.

Conclusiones parciales.

Del análisis riguroso del comportamiento de una Caldera de Vapor y la influencia de las variables en el deterioro de la misma, principalmente en sus agregados de la caldera, se ha demostrado la necesidad de implementar una herramienta informática que detecte los niveles de ensuciamiento y de esta manera se puede prevenir las roturas de los componentes de la Caldera, contribuyendo con la economía de nuestro país. Para ello se utilizan las herramientas del Matlab® creando algoritmos que den solución a nuestra problemática, que se explican en el próximo capítulo.

CAPÍTULO 2: HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO DE LOS NIVELES DE ENSUCIAMIENTO DE LOS AGREGADOS DE LA CALDERA PARA LA CTE ANTONIO MACEO.

Introducción.

En la última década un considerable esfuerzo se ha realizado para mejorar la eficiencia y disponibilidad de las centrales termoeléctricas de tal forma que los procesos operen de forma segura y eficiente, asegurando una mayor calidad en la producción, manteniendo la viabilidad económica y reduciendo el impacto ambiental de sus actividades. Lo anterior ha llevado a la necesidad de lograr una mejor interacción hombre-máquina, a través de una adecuada interfaz que le brinde al usuario tanto comodidad como eficiencia. En los procesos de Generación de Vapor, la utilización de estas herramientas, unidas con la experiencia del operador es de gran utilidad para mejorar el diseño y la operación de las plantas.

Con este propósito, en este capítulo se realiza el análisis de las principales variables que contribuyen al ensuciamiento de los agregados de la caldera (sobrecalentadores de techo, recalentador, economizador y CAR), localizando las posibles anomalías que puedan afectar su correcto funcionamiento. Para ello se diseña una herramienta informática empleando el Toolbox GUIDE del Matlab®, con la cual se puede analizar y evaluar los datos de las variables del proceso obtenidos de los registros históricos del SCADA (por las siglas en inglés de Supervisory Control And Data Acquisition) detectando en un período de tiempo determinado, los niveles de suciedad en los agregados de la caldera.

2.1. Realización de pruebas de balance y ajuste de régimen en generadores de vapor.

Las pruebas de balance y ajuste de régimen abarcan la realización de un conjunto de trabajos con el objetivo final de alcanzar la máxima eficiencia en el generador de vapor (Borroto Nordelo & Rubio González, 2010).

Estos procedimientos permiten evaluar la magnitud de la suciedad (incrustaciones o disposiciones) en los sobrecalentadores convectivos, conducto horizontal, agregado

del eje convectivo vertical (recalentadores, economizador), cestos de los CAR, caída de paredes y posición de las compuertas de los quemadores, CAR, VTI y la eficiencia de la caldera.

El técnico que ejecuta la prueba realiza las siguientes operaciones:

- (i) Realizar un bosquejo integral de los parámetros de operación de la unidad.
- (ii) Exigir que durante la prueba la carga se mantenga estable exceptuando en casos de incidencias inevitable del sistema electroenergético sobre la operación.
- (iii) Tomar lectura con la columna de agua en:
 - Salida del horno (igual al tiro o presión en el horno en el control de unidad).
 - Entrada del eje convectivo.
 - Punto de régimen (zona de las calderas donde los gases no sobrepasan los 600 °C, ubicado entre el recalentador y el 3er paso del economizador).
 - Salida del eje convectivo.
 - Entrada y salida de aire y gases de los CAR.
 - Salida de los VTI.

Los valores obtenidos de la lectura con la columna de agua se utilizan para calcular la caída de presión en las diferentes secciones de la caldera por la parte de los gases:

1. Sección entrada eje convectivo vertical - salida del horno, evalúa el conducto horizontal y sobrecalentadores convectivo.

$$\Delta P (P_{eje} - P_h) = P_{eje} - P_h \quad (2.1)$$

2. Sección punto de régimen entrada - eje convectivo, evalúa los paquetes de los recalentadores.

$$\Delta P (P_{pto\ reg} - P_{eje}) = P_{pto\ reg} - P_{eje} \quad (2.2)$$

3. Sección salida del eje convectivo vertical - punto de régimen, evalúa el economizador.

$$\Delta P (P_{CAR} - P_{pto\ reg}) = P_{CAR} - P_{pto\ reg} \quad (2.3)$$

4. Sección CAR, evalúa la suciedad en el CAR.

$$\Delta P_{CAR} = P_{Ent\ CAR} - P_{Desp\ CAR} \quad (2.4)$$

- (iv) Realizar el análisis de la combustión en el punto de régimen utilizando el analizador de gases, tomando los valores de oxígeno (O₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NOX) y coeficiente de exceso de aire.
- (v) Tomar las propiedades físico-químicas del combustible.

Además de tomar estos valores, en su mayoría de manera manual, es necesario adquirir del sistema de supervisión implementado en la planta, los estados en que se encuentran algunos de los subprocesos que se ven afectados por el aumento de los niveles de suciedad de los agregados de la caldera, tales como: Domo, Turbina, Deareador, Condensador, Quemadores.

Entre los parámetros que afectan la eficiencia de una caldera se encuentran:

- (i) Nivel de exceso de aire.

El operar una caldera con los valores de exceso de aire recomendados por el fabricante de la misma, traerá consigo beneficios adicionales como la reducción en la temperatura de los gases de chimenea, reducción en el consumo de potencia del ventilador de tiro forzado o inducido que inyecta el aire secundario de combustión.

- (ii) Temperatura de los gases de chimenea.

Los gases de combustión deben salir al mínimo de temperatura, como indicación de que se extrajo el máximo de la energía liberada durante la combustión. Este parámetro está relacionado intrínsecamente con el exceso de aire recomendado. A mayor exceso de aire, mayor temperatura.

- (iii) Temperatura de agua de alimentación.

La eficiencia de la caldera aumenta con la elevación de la temperatura del agua de alimentación al necesitarse menos energía para producir el vapor.

- (iv) Suciedad de las superficies de transmisión de calor.

La suciedad de las superficies de los tubos, del lado del fuego se traducirá en un aumento de las temperaturas de los gases de combustión y la suciedad en la superficie de los tubos en contacto con el agua, retardará la transmisión de calor y aumentará la temperatura de los tubos, debido al efecto aislante de las incrustaciones.

Si en el lado del fuego, los tubos se encuentran sucios, por cada 22 °C de incremento en la temperatura de salida de los gases de combustión, implica una pérdida cercana de eficiencia de un 1%.

Si en el lado de agua se llegara a dar una incrustación de 2.5 mm, se tendría una pérdida de combustible de 15 % adicional al necesario. A mayor incrustación, mayor consumo de combustible.

(v) Presión de Vapor.

(vi) Pérdidas de calor en las carcaza de la caldera.

Las pérdidas por radiación y convección en el exterior de una caldera pueden causar una gran pérdida de eficiencia en una caldera, si no se le da un buen mantenimiento al refractario y aislamiento de la caldera.

En el caso de operar la caldera a un bajo factor de carga, las pérdidas en eficiencia debido a la radiación y convección podrían alcanzar un 7 %.

(vii) Combustible.

Los cambios de combustible pueden afectar el costo de generar vapor, dado que exhiben características químicas diferentes que provienen principalmente de la variación en el contenido de hidrógeno del combustible.

2.2. Descripción de variables del sistema. Análisis de las manifestaciones de estas variables en el ensuciamiento de los agregados de la caldera.

Al iniciar una investigación es necesario saber cuáles son las variables que se desean medir y la manera en que se hará. A partir de un estudio de expertos, análisis de documentos y manuales de operación de las Calderas, se escogieron las variables que por su nivel de importancia intervienen directamente en el ensuciamiento de los agregados de la caldera afectando de esta la eficiencia de la caldera. En la Tabla 2. 1

se muestran las principales características de dichas variables y los problemas que se pueden detectar a partir de las desviaciones de las mismas.

Tabla 2. 1: Variables utilizadas para la detección de problemas en los agregados de la caldera en la unidad 4 de la CTE Antonio Maceo.

Etiqueta	Nomenclatura	Descripción	Unidad	Rango
ION7650	N_p	Carga Eléctrica Promedio	MW	0-100
PT633	P_h	Vacío dentro del Horno	kg/cm ²	-5-0
PM1A	P_{1A}	Vacío entre el eje A.	mmCA	0-25
PM2B	P_{2B}	Vacío entre el eje B.	mmCA	0-25
PM3A	P_{3A}	Presión en Quemadores 1/5	mmCA	0-100
PM3B	P_{3B}	Presión en Quemadores 2/6	mmCA	0-100
PM4A	P_{4A}	Presión en Quemadores 3/7	mmCA	0-100
PM4B	P_{4B}	Presión en Quemadores 4/8	mmCA	0-100
PM5A	P_{5A}	Vacío antes CAR A	mmCA	0-100
PM5B	P_{5B}	Vacío antes CAR B	mmCA	0-100
PM6A	P_{6A}	Vacío Después CAR A	mmCA	0-300
PM6B	P_{6B}	Vacío Después CAR B	mmCA	0-300
TEK001	T_{SH}	Temperatura Vapor Sobrecalentado	°C	0-600
PT026	P_s	Presión Vapor Sobrecalentado	kg/cm ²	0-250
TEM012	T_{RcA}	Temperatura Vapor Recalentado Caliente Lado A	°C	0-600
TEM013	T_{RcB}	Temperatura Vapor Recalentado Caliente Lado B	°C	0-600
TEK004A	T_w	Temperatura Agua Alimentar	°C	0-300
TEK004B	T_{gs}	Temperatura de los Gases de Salida de Caldera	°C	0-400
TEK011C	T_{aA}	Temperatura Aire Salida CAR Lado A	°C	0-400
TEK011D	T_{aB}	Temperatura Aire Salida CAR Lado B	°C	0-400

- **Vacío en el Horno.**

La acción de mantener el vacío en el horno, a través de las compuertas de admisión de los VTI, que son controladas por un regulador con una consigna interna, garantiza el funcionamiento correcto de todo el proceso y garantizar la eficiencia. Debido el aumento de ensuciamiento en los agregados de la caldera, en este parámetro se registra un aumento debido al incremento de coeficiente de exceso de aire ya que para

prevenir este efecto es necesario aumentar el vapor de atomización y el flujo de petróleo.

- **Caída de presión en el CAR.**

Las caídas de presión, en el lado de los gases y en el lado del aire, son la diferencia entre las presiones estáticas manométricas de entrada y salida. Debido a las posibles desviaciones de flujo y temperatura respecto a las de diseño, hay que corregir las caídas de presión medidas, antes de proceder a su comparación con los valores de diseño.

En la medida que se van depositando más cenizas en las láminas de los cestos (ver Figura 2. 1), se incrementa la resistencia al paso del aire y de los gases, manifestándose tanto por el lado de gases como por el lado de aire, y por consiguiente crea un aumento en el diferencial de presión (Rodríguez J. M., 2010).

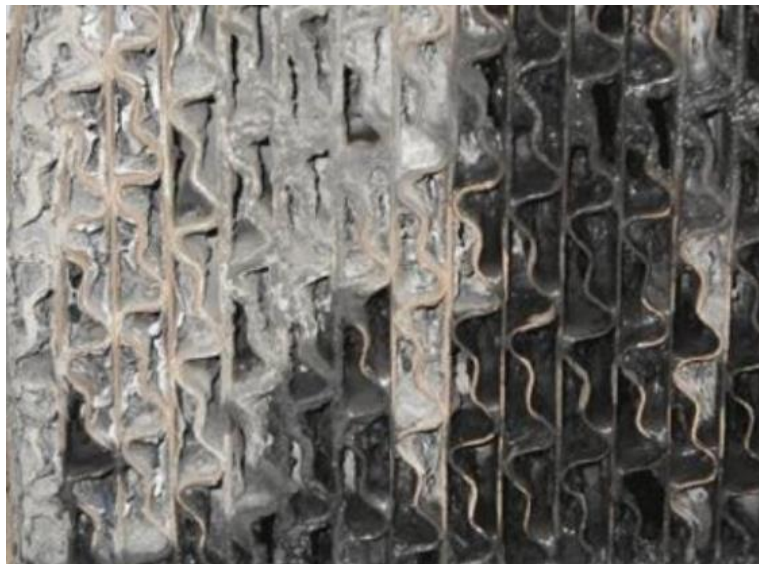


Figura 2. 1: Residuos de cenizas en una cesta de un CAR.

- **Medición de la temperatura del vapor sobrecalentado.**

Tiene como objetivo mantener la temperatura del vapor sobrecalentado constante a un valor determinado, a través de la combinación de dos acciones tales como: la recirculación de los gases de la combustión y el atemperamiento por inyección de agua. Esta variable se ve afectada por la deposición de cenizas y materiales no deseados producto de la combustión con una disminución de sus valores debido a un deficiente intercambio de calor hacia el vapor, lo cual provoca un aumento en el consumo de petróleo para obtener los valores preestablecidos en el lazo de control.

Estimar la temperatura de la superficie del metal es importante porque permite conocer a priori los valores para los cuales determinados sulfatos, vanadatos, silicatos u otros compuestos se mantendrían en estado líquido antes que en sólido. La Figura 2. 2 muestra esquemáticamente el efecto que tienen los depósitos del lado del fuego sobre la temperatura.

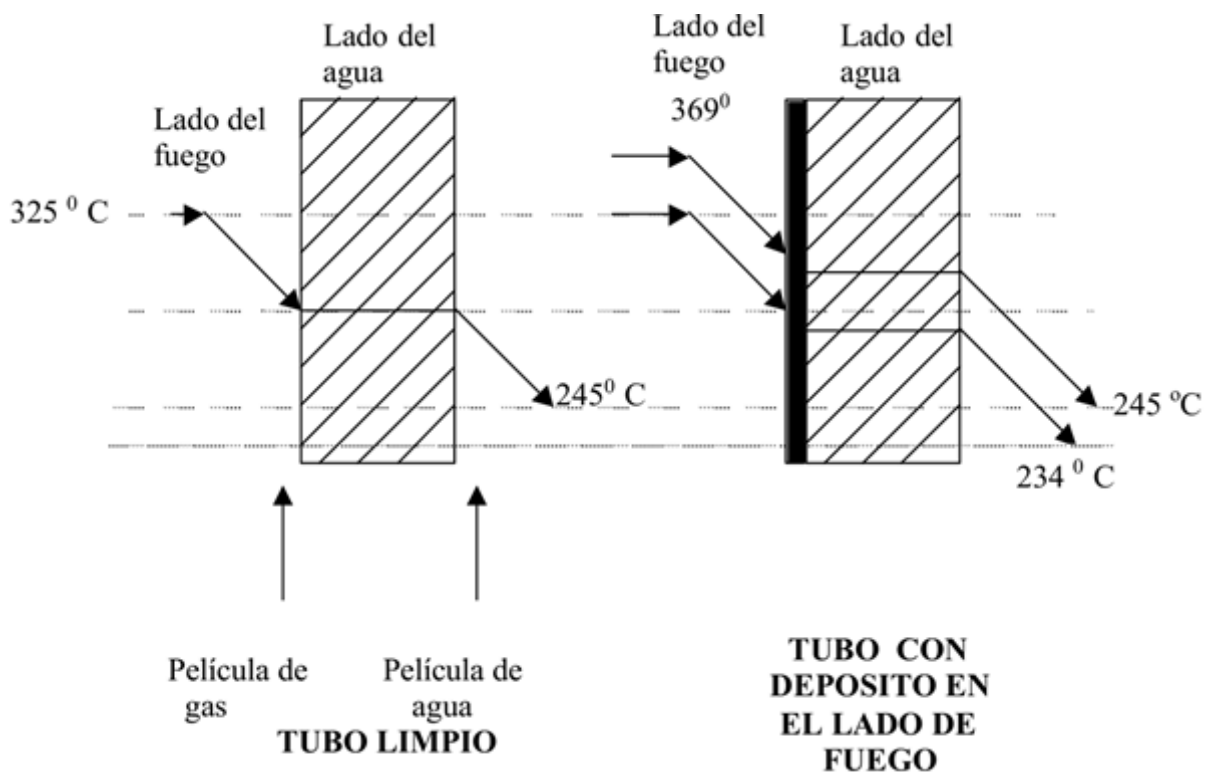


Figura 2. 2: Efecto de los depósitos de cenizas sobre los tubos.

Como se observa, para lograr la misma transferencia de calor en presencia de depósitos se debe aumentar la temperatura del lado del fuego y esto se logra quemando más combustible con la consecuencia de mayores costos y riesgos de

sobrepasar tanto la temperatura de fusión de los depósitos como la temperatura límite del metal.

Los ciclos de carga de la caldera tienen gran influencia sobre la severidad en la formación de cenizas y su posterior consecuencia. Una unidad que es sobrecargada está expuesta a tener problemas por ensuciamiento especialmente si el exceso de aire es muy bajo. En estas condiciones el horno, el sobrecalentador y el recalentador pueden saturarse de ceniza.

El soplado en la caldera contribuye a controlar el ensuciamiento en la zona de convección, sobrecalentadores y recalentadores. Los ciclos de soplado deben ser frecuentes para que sean efectivos, es decir, no permitir que se incremente el espesor de los depósitos sobre la superficie cuando están semifundidos.

- **Medición de Presión del vapor ante la turbina.**

Tiene como objetivo mantener constante la presión de vapor antes de la turbina. Consta de un regulador con consigna interna que corrige la presión de salida de la caldera. Su salida tiene correspondencia con la petición de energía calorífica. Es introducido un límite con el fin de no sobrepasar la carga máxima permitida por la capacidad de la caldera o por el número de quemadores en servicio o por la pérdida de un ventilador.

Es importante el mantenimiento de la presión de trabajo fijada, ya que la misma es función del esquema termo-técnico de la fábrica y de la eficiencia prevista.

- Variación de la presión de vapor por exceso.

La presión de vapor en el colector de salida debe mantenerse dentro de los límites de la presión de trabajo, si existe ascenso de la presión por encima de un 10 % de la fijada, se decreta parada de emergencia, pues puede provocar roturas y accidentes, ya que la presión sobrepasaría los límites de resistencia mecánica de los equipos.

- Variación de la presión de vapor por caída.

Este parámetro en defecto implica mayor consumo de combustible y por ende menor eficiencia, no se debe permitir nunca que la presión de la caldera baje del 65% de la

presión normal de trabajo, ya que el aumento del volumen específico del vapor a presión reducida, afecta la circulación del agua en la Caldera y puede producir un estancamiento de la misma lo cual es provocado por:

- (i) Caída de nivel de agua en el Domo.
- (ii) Aumento de la demanda de vapor.
- (iii) Falta de combustible.

- **Temperatura de los gases a la salida de la caldera.**

La temperatura de los gases es importante por dos razones: primero como un indicador de la eficiencia de la caldera y segundo porque si cae por debajo del punto de rocío, el condensado formado, disolverá los óxidos de azufre en los gases, y el ácido resultante causará corrosión (Castro, 2009).

Para mantener los gases secos y por encima de su punto de rocío. La temperatura de los gases en el extremo frío de la chimenea es usualmente medida en varios puntos del mismo plano, obteniéndose como resultado el promedio de dichas mediciones. Cuando esta temperatura promedio cae próxima al punto de rocío, se comenzará a incrementar el punto de ajuste del Precalentador de Aire.

- Fallas por temperatura de gases de entrada.

Las altas temperaturas de los gases a la entrada de los CAR pueden estar ocasionadas por los siguientes problemas:

- (i) Termoresistencia dañada.
- (ii) Superficies sucias de los tubos.

Para dar solución a los mismos se le aplica soplete a fin de limpiar la superficie de los tubos y sustituir la termoresistencia.

- Fallas por temperatura gases de salida.

La temperatura de los gases de escape es uno de los factores principales para diagnosticar el comportamiento de la combustión. Estas anomalías no planificadas por mala combustión, pueden ocurrir por varios factores como (Lifschitz, 1993):

- (i) Válvulas de escape quemadas o deficiente hermeticidad.
 - (ii) Ensuciamiento no deseado en los intercambiadores de temperatura en el Hogar de la Caldera.
- Temperaturas elevadas de gases de salida superiores a 200°C.
- (i) Excesivo caudal de aire.
 - (ii) Excesivo ensuciamiento de las superficies de calefacción.
 - (iii) Deficiente regulación del aire.
 - (iv) Ensuciamiento exterior por mala combustión o deficiente limpieza.
 - (v) Incrustaciones en los interiores por mala calidad del agua.

La temperatura neta de los gases de Chimenea resulta de la diferencia entre la temperatura de salida de gases de Chimenea y la temperatura ambiente. Una temperatura neta alta de gases indica que se está desaprovechando calor. Una buena práctica recomienda mantener esta temperatura lo mínimo posible sin llegar a la del rocío del vapor de agua.

2.3. Herramienta de Diagnóstico.

Para realizar el diagnóstico de la Caldera de la unidad IV de la CTE Antonio Maceo, específicamente en los agregados de la caldera, se diseñó un programa en la plataforma Matlab®. Éste consta de dos ventanas, la primera se utiliza como portada y presentación del software (Ver Anexo 1). Posee un enlace directo a la ventana en donde se realiza el diagnóstico.

La segunda y más importante ventana cuenta con varias herramientas que permiten analizar la degradación del sistema y dar un diagnóstico acerca del mismo (Ver Anexo 2). Para ello, se programaron algoritmos basados en el estudio de las principales causas que afectan el comportamiento de las variables analizadas en epígrafes anteriores, y el establecimiento de sus rangos de operación o límites permisibles en los cuales la caldera tiene un óptimo rendimiento. De esta manera se realiza un proceso de ingeniería inversa con el objetivo de mantener el control por variable y detectar la presencia de anomalías que influyen de una manera u otra, en el progresivo ensuciamiento de los agregados de la caldera y por ende, en el sistema de generación de vapor (ver Figura 2. 3).

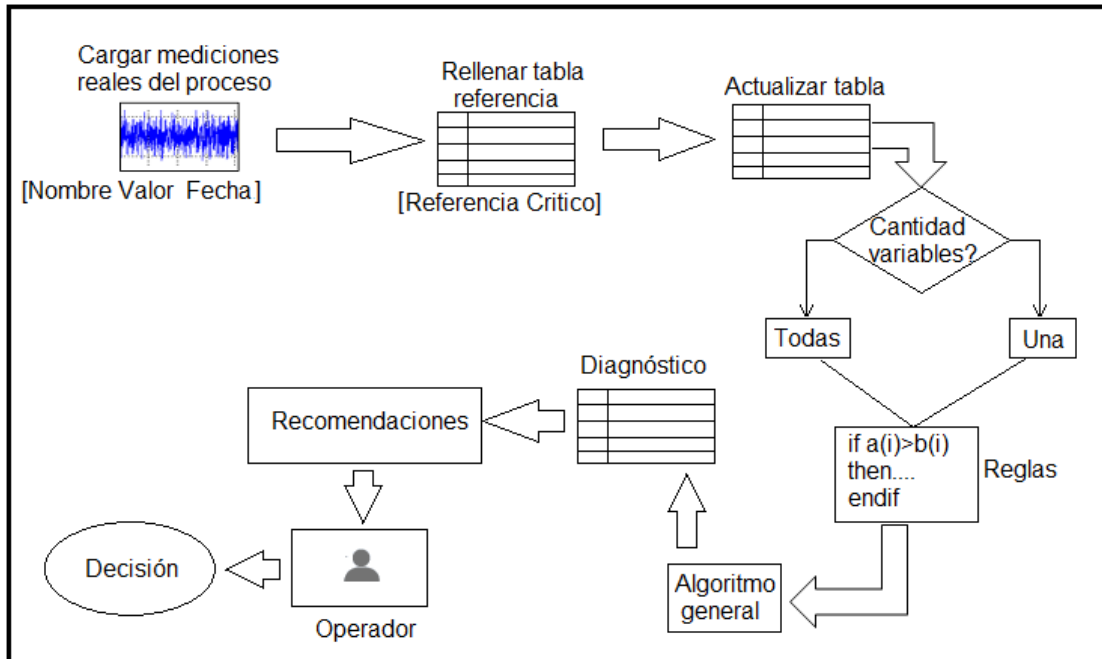


Figura 2. 3: Esquema general del software propuesto.

Los rangos de operación son definidos por criterios de expertos y cartas tecnológicas que caracterizan cada una de las variables. Éstos son de gran importancia ya que su utilización da la posibilidad de tener bajo supervisión, el comportamiento de dichas variables y las oscilaciones mantenidas alrededor de su punto de operación o límites de tolerancia.

EL procedimiento de trabajo es el siguiente: primeramente el usuario debe importar los datos correspondientes a las mediciones provenientes del SCADA, con extensión Excel (.xls), a través de un botón previamente configurado para ello, el cual también brinda posibilidad de cargar ficheros Matlab con extensión (.mat). Una vez cargados, se refleja en una tabla toda la información asociada a las variables como: nombre, unidad de medida, referencia de buen comportamiento, etc. En esta misma tabla se pueden editar estos valores antes citados de referencia en la operación, ya sea por alguna modificación futura hecha en la planta o una actualización de los modelos de trabajo. Está integrada también la funcionalidad de guardar en un archivo (.mat) los valores de la tabla completa para facilitar luego la labor en una futura sesión de trabajo.

Luego se selecciona la variable que se desea someter a análisis en caso de que se vaya a hacer una a la vez.

Para realizar el diagnóstico del sistema a partir de la desviación de las variables es necesario detectar si éstas se alejan de su rango de operación y en qué medida lo hacen. Para esto se comparan los valores de los estados estacionarios con los límites establecidos, obteniendo como resultado si el parámetro está fuera de rango o no, los posibles problemas operacionales correspondientes a dichas variables y las recomendaciones para resolverlos. Si estos parámetros oscilan en valores intermedios dentro de los límites de operación, significa que está trabajando en óptimas condiciones, pero de no ser así e indican que se encuentra fuera del límite, los resultados de la evaluación se mostrarán en una tabla revelando los posibles problemas que esté afrontando el sistema en ese momento. Las problemáticas y recomendaciones específicas para cada variables cambian en dependencia de cuan alejados estén sus valores medidos de sus valores normados y el peso que tenga esto sobre el proceso.

Debido a la naturaleza multivariable de la planta es inevitables que existan relaciones y dependencias de unas variables con otras (incluyendo las seleccionadas). Podría darse el caso de que se detecten problemas operacionales por encontrarse una determinada variables fuera de rango y sin embargo no lo hay porque ésta depende de otra que si se encuentra en norma. Estas dependencias también fueron tomadas en cuenta gracias a los criterios de expertos garantizando así resultados más acertados.

De manera muy general, el algoritmo de trabajo es el siguiente:

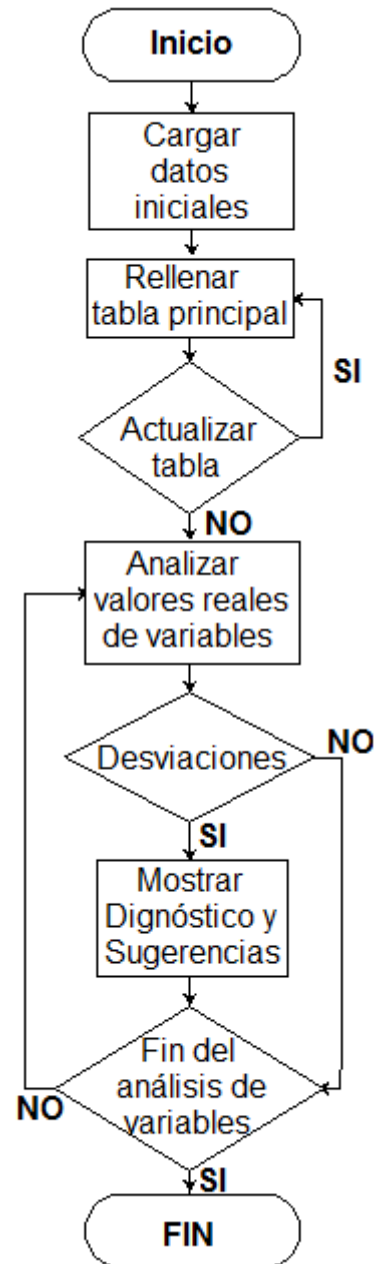


Figura 2. 4: Funcionamiento del algoritmo del programa.

2.4. Resultados experimentales en la CTE Antonio Maceo “Rente”.

Durante la realización de la investigación se tomaron las mediciones de 9 días comprendidos entre el 22 de febrero del 2016 al 20 de abril del 2016. Este período coincidió con la realización de un mantenimiento en la caldera, entre el 19 de marzo del 2016 hasta el 2 de abril del 2016 (ver Anexo 3), en donde se ejecutaron tareas de escombreo, limpieza y lavado en los sobrecalentadores de techo, el conjunto

recalentador y economizador, CAR, entre otros, dando como resultado el restablecimiento de los parámetros normativos de las superficie de intercambio de la caldera.

El análisis de las mediciones demuestra una clara degradación en sus magnitudes a medida que avanzan los días de explotación antes del mantenimiento, producto del aumento de las incrustaciones durante la combustión. En la Figura 2. 5 se aprecia la evolución en el tiempo de la medición de la diferencia de presión entre la entrada y salida del CAR realizada de manera manual por el Técnico de Régimen y Explotación. Aquí se observa con el paso del tiempo un aumento de parámetro hasta alcanzar el punto crítico, en donde se decide programar el mantenimiento. El aumento de la diferencia de presión es provocado por la obstrucción de los cestos debido al incremento de la resistencia aerodinámica de los conductos de gases. El salto en la gráfica hasta la próxima toma de mediciones es debido precisamente a que en este periodo la planta estaba parada por el mantenimiento por lo que no se realizaron mediciones.

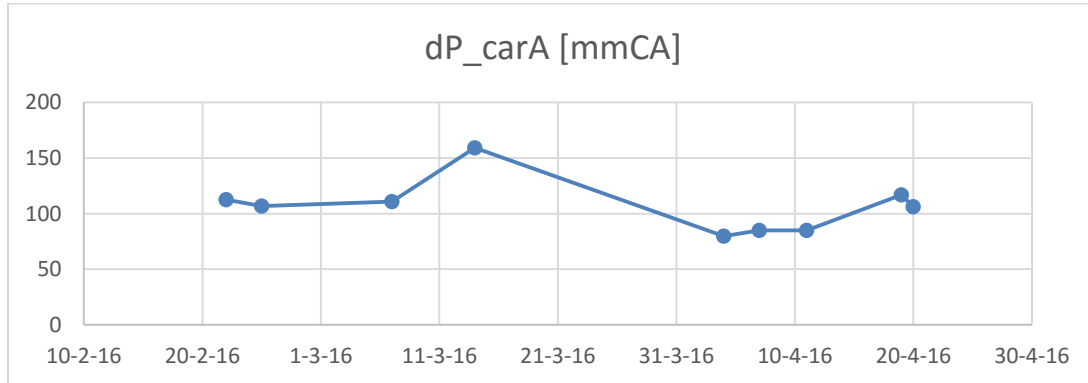


Figura 2. 5: Comportamiento del diferencial de presión en la toma de gases del CAR.

En los sobrecalentadores de techo también observa el mismo efecto (ver Figura 2. 6) aunque la degradación ocurre con menor velocidad por la separación existente entre los tubos que componen todo el conjunto. Los sedimentos en esta zona se caracterizan por su gran adhesividad lo cual está en correspondencia con la composición química del combustible. Estos depósitos acompañados de corrosión son los responsables de

las roturas de estos aditamentos en las calderas de altos valores de la temperatura del vapor.

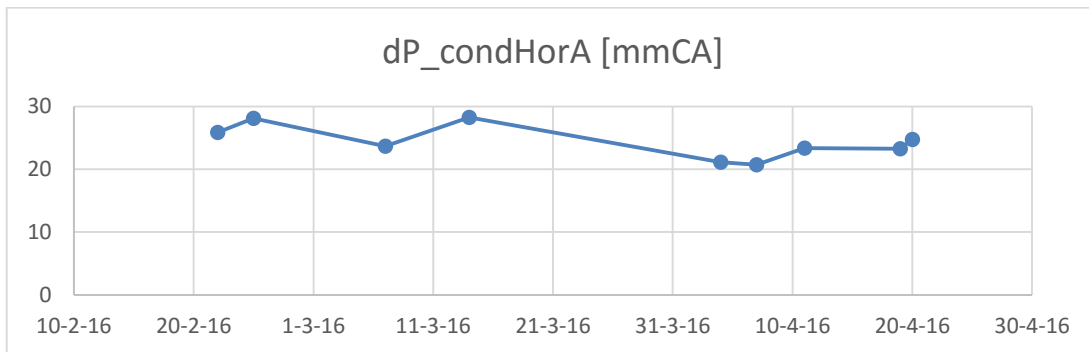


Figura 2. 6: Comportamiento del diferencial de presión en la sección del Sobrecalentador.

Esta degradación repercute en todo el proceso afectando el funcionamiento en general y la eficiencia. El incremento de los depósitos de cenizas y hollín sobre la superficie de calor disminuye la transferencia de energía hacia la sustancia de trabajo (agua o vapor). En la Figura 2. 7 se observa este problema en la temperatura del vapor sobrecalentado por el bajo coeficiente de conductividad térmica de los sedimentos que se forman, lo que conlleva a un bajo coeficiente global de transferencia de calor.

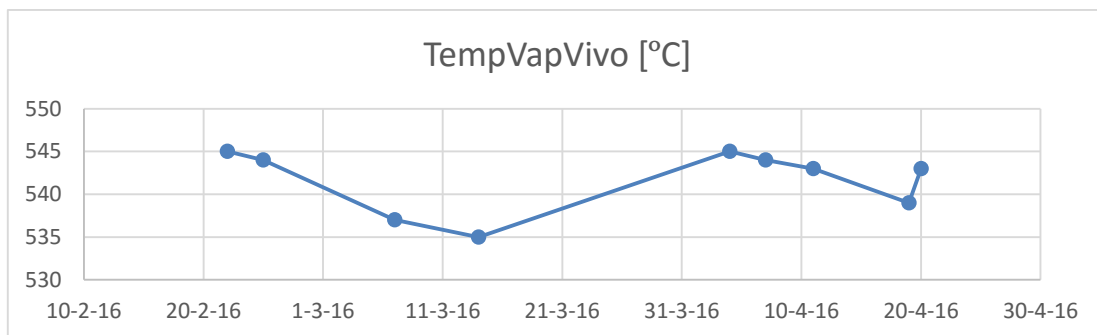


Figura 2. 7: Tendencia de la temperatura del vapor vivo durante la investigación.

El circuito de agua es parte importante del sistema y es suministrada al generador de vapor por la bomba de agua alimentar que al circular por el economizador se calienta y la envía hacia el domo, cuando se incrementa la suciedad de la superficie de intercambio la temperatura del agua alimentar disminuye incidiendo en todo el proceso, este comportamiento se observa en la Figura 2. 8 y luego de realizar la limpieza mejora el intercambio.

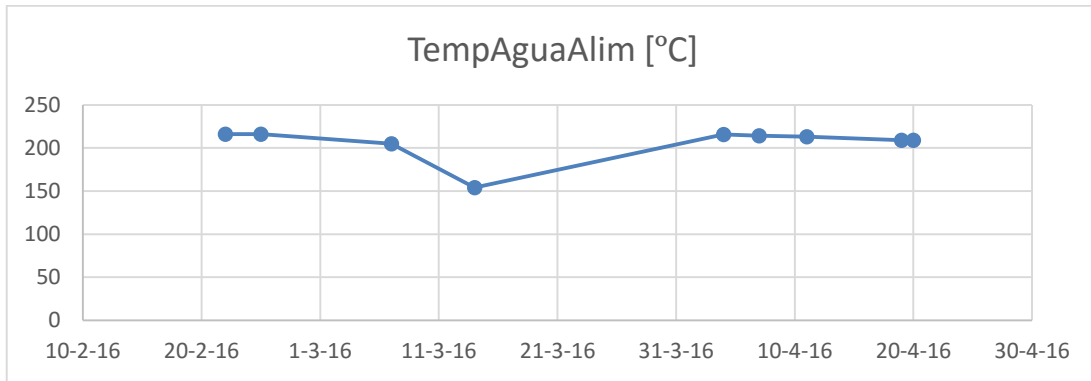


Figura 2. 8: Temperatura del agua alimentar.

Para mantener la combustión y lograr la transferencia del calor liberado en ella a la sustancia de trabajo, es necesario de extraer los productos de combustión del horno, y luego hacerlos circular a través de las diferentes superficies de calentamiento. El recorrido de los gases comienza en el horno, prosigue por la superficie de la caldera, el sobrecalentador, recalentador, economizador y calentador de aire hasta llegar a la chimenea para ser descargados a la atmósfera. Durante todo su recorrido los gases transfieren su calor al agua, vapor y aire en cada uno de los equipos, si en éstos se incrementan las incrustaciones en las superficies de transferencia provoca un aumento de la temperatura de los gases a la salida de la chimenea afectando notablemente el medio ambiente y los indicativos de eficiencia de la caldera, esto queda demostrado en la Figura 2. 9, en donde luego del mantenimiento se vuelven a obtener las condiciones normadas de buen comportamiento.

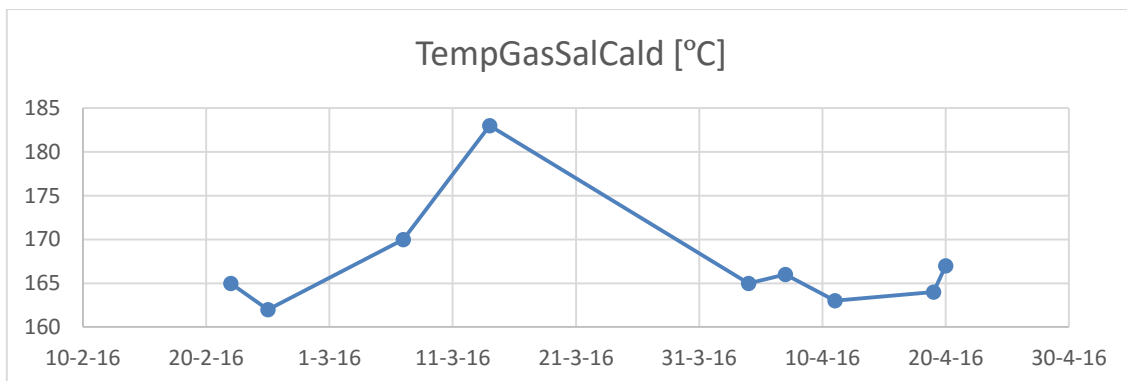


Figura 2. 9: Comportamiento de la temperatura de gases a la salida de la caldera.

Todas las variables analizadas contienen información útil al usuario ya que existe una relación física muy estrecha entre el ensuciamiento y dichas variables, pues se conoce que en la superficie de las placas se depositan las suciedades que arrastran los gases, se incrementa el espesor de las incrustaciones y se reduce el diámetro equivalente de los conductos entre los tubos y las placas. De esta manera aumenta la caída de presión tanto en el conducto de gases como de aire y por consiguiente crea un aumento en el diferencial de presión, siendo esta última catalogada por los expertos como la portadora de mayor información sobre el ensuciamiento de los agregados de la caldera.

Como se observa en la Figura 2. 10 se realizó un análisis de todas las variables del proceso el día 7/3/16, ya que a partir de aquí comienzan a degradarse algunos de los parámetros escogidos para el estudio del ensuciamiento de las superficie de intercambio de calor de los agregados de la caldera. El sistema fue capaz de detectar estas degradaciones en el conducto horizontal, en el eje convectivo y en el CAR, por incremento de los niveles de suciedad, además de reconocer las desviaciones de variables como: presión de vapor vivo, vacío en el horno, temperatura de agua alimentar, temperatura de los gases a la salida de la caldera y la carga.

	Variables	Diagnostico	Recomendaciones
1	dP_condHorA	Posible ensuciamiento de las superficies del eje Horizontal.	Aumentar frecuencia de soplado en el conducto.
2	dP_condHorB	Posible ensuciamiento de las superficies del eje Horizontal.	Aumentar frecuencia de soplado en el conducto.
3	dP_recalentadorA	La superficie del Recalentador esta comenzando a ensuciarse.	Incrementar el soplado del recalentador a 4 c/turno.
4	dP_recalentadorB	La superficie del Recalentador esta comenzando a ensuciarse.	Incrementar el soplado del recalentador a 4 c/turno.
5	dP_carA	El CAR esta comenzando a ensuciarse.	Elevar la frecuencia de soplado 2 c/turno.
6	dP_carB	El CAR esta comenzando a ensuciarse.	Elevar la frecuencia de soplado 2 c/turno.
7	VacioHorno	Posible aumento de presion de la que se necesita.	Disminuir el flujo de petroleo en un 20%.
8	PresVapVivo	Presion de vapor vivo disminuyendo, afectando la eficiencia.	Aumentar el el flujo de petroleo en un 10%.
9	TempVapVivo	La temperatura de vapor vivo es correcta.	
10	TempVapRecCal_A	Es correcta la temperatura de vapor recalentado.	
11	TempVapRecCal_B	Es correcta la temperatura de vapor recalentado.	
12	TempAguaAlim	La temperatura de agua alimentar es decreciendo, por mala transfere...	Aumentar el coeficiente de exceso de aire en un 15%.
13	TempGasSalCald	Posible salida de gases mas calientes a la atmosfera.	Elevar la frecuencia de soplado en el CAR a 2 c/turno.
14	TempAirSalCAR_A	La transferencia de calor de los gases de salida esta disminuyendo.	Elevar la frecuencia de soplado en el CAR a 2 c/turno.
15	TempAirSalCAR_B	La temperatura del aire que entra al CAR esta en buen rango de opera...	
16	Carga	Posible perdida de MW producto del ensuciamiento.	Realizar el soplado de los agregados de la caldera con mayor fr

Figura 2. 10: Diagnóstico de los niveles de suciedad utilizando la herramienta informática el 7/3/2016.

La Herramienta de Diagnóstico también fue puesta a prueba en condiciones críticas del proceso alcanzada el día 14/3/2016, en donde las variables muestran el punto crítico de degradación. La herramienta logró detectar que las desviaciones se encontraban en punto crítico que estaba afectando considerablemente la eficiencia de la planta, el consumo de combustible y la vida útil de los agregados (ver Figura 2. 11). El resultado es tan acertado que de hecho a partir de este momento es que la dirección de la entidad decide hacer una parada para ejecutar un mantenimiento preventivo en aras de corregir en la mayor manera posible estos problemas.

Luego del mantenimiento se realizó otra prueba balance y ajuste de régimen de caldera para verificar que se cumplieron los objetivos del mismo. La Herramienta de Diagnóstico, para todos los casos, detectó que las variables analizadas se mantenían dentro del rango de operación considerado como de buen comportamiento y si existían desviaciones no eran muy considerables por lo que se podía concluir que la planta se encontraba trabajando en buenas condiciones. (ver Figura 2. 12).

	Variables	Diagnostico	Recomendaciones
1	dP_condHorA	Posible ensuciamiento de las superficies del eje Horizontal.	Aumentar frecuencia de soplado en el conducto.
2	dP_condHorB	Posible ensuciamiento de las superficies del eje Horizontal.	Aumentar frecuencia de soplado en el conducto.
3	dP_recalentadorA	La superficie del Recalentador esta comenzando a ensuciarse.	Incrementar el soplado del recalentador a 4 c/turno.
4	dP_recalentadorB	La superficie del Recalentador esta comenzando a ensuciarse.	Incrementar el soplado del recalentador a 4 c/turno.
5	dP_carA	Estado critico, El CAR sucio.	Realizar el lavado con agua a alta presion y caliente.
6	dP_carB	Estado critico, El CAR sucio.	Realizar el lavado con agua a alta presion y caliente.
7	VacioHorno	Estado critico, puede haber problemas en el horno.	Disminuir el flujo de petroleo en un 30%.
8	PresVapVivo	Presion de vapor vivo disminuyendo, afectando la eficiencia.	Aumentar el el flujo de petroleo en un 10%.
9	TempVapVivo	Notable disminucion de la temperatura.	Aumentar el el flujo de petroleo en un 10%.
10	TempVapRecCaL_A	Esta disminuyendo la temperatura del vapor recalentado.	Aumentar el coeficiente de exceso de aire en un 15%.
11	TempVapRecCaL_B	Esta disminuyendo la temperatura del vapor recalentado.	Aumentar el coeficiente de exceso de aire en un 15%.
12	TempAguaAlim	Baja temperatura de vapor recalentado, posible mal funcionamiento.	Aumentar el coeficiente de exceso de aire en un 50%.
13	TempGasSalCald	Alta temperatura de los gases de salida afectando el medio ambiente.	Realizar una limpieza general de la caldera para cumplir con el C
14	TempAirSalCAR_A	Perdida de calor por transferencia, posible ensuciamiento en el CAR.	Realizar el lavado con agua a alta presion y caliente.
15	TempAirSalCAR_B	Perdida de calor por transferencia, posible ensuciamiento en el CAR.	Realizar el lavado con agua a alta presion y caliente.
16	Carga	Posible perdida de MW producto del ensuciamiento.	Realizar el soplado de los agregados de la caldera con mayor fre

Figura 2. 11: Diagnóstico de los niveles de suciedad utilizando la herramienta informática el 14/3/2016.

	Variables	Diagnostico	Recomendaciones
1	dP_condHorA	Posible ensuciamiento de las superficies del eje Horizontal.	Aumentar frecuencia de soplado en el conducto.
2	dP_condHorB	Posible ensuciamiento de las superficies del eje Horizontal.	Aumentar frecuencia de soplado en el conducto.
3	dP_recalentadorA	La superficie del Recalentador esta comenzando a ensuciarse.	Incrementar el soplado del recalentador a 4 c/turno.
4	dP_recalentadorB	La superficie del Recalentador esta comenzando a ensuciarse.	Incrementar el soplado del recalentador a 4 c/turno.
5	dP_carA	Intercambio de calor en CAR correcto.	
6	dP_carB	Intercambio de calor en CAR correcto.	
7	VacioHorno	Buen comportamiento en el Vacio del horno.	
8	PresVapVivo	Comportamiento correcto de la Presion de vapor vivo.	
9	TempVapVivo	La temperatura de vapor vivo es correcta.	
10	TempVapRecCa_A	Es correcta la temperatura de vapor recalentado.	
11	TempVapRecCa_B	Es correcta la temperatura de vapor recalentado.	
12	TempAguaAlim	Buena transferencia de energia hacia el agua alimentar.	
13	TempGasSalCald	Buena transferencia de calor de los gases en la caldera.	
14	TempAirSalCAR_A	La temperatura del aire que entra al CAR esta en buen rango de opera...	
15	TempAirSalCAR_B	La temperatura del aire que entra al CAR esta en buen rango de opera...	
16	Carga	La carga entregada por la unidad cumple con el plan energetico.	

Figura 2. 12: Diagnóstico de los niveles de suciedad utilizando la herramienta informática el 4/4/2016.

Según el estudio anterior, cada variable seleccionada se ve afectada por varios problemas que causan la desviación de sus límites permisibles de operación por lo que, al aplicar la herramienta informática propuesta, utilizando las variables escogidas en la CTE Antonio Maceo y observando su comportamiento en cada una de las situaciones se obtiene resultados que coinciden con los escenarios reales.

Conclusiones parciales.

En este capítulo, tomando como fundamentación la descripción de las principales variables en la unidad IV de la CTE Antonio Maceo y de los principales problemas operacionales que se pueden presentar, se realizó el diseño de una interfaz gráfica en la plataforma Matlab con el Toolbox GUIDE, la cual permite la evaluación y el diagnóstico del comportamiento de las principales variables que por su nivel de importancia intervienen en el ensuciamiento de los agregados de la caldera (sobrecalentador de techo, recalentador, economizador y CAR).

Valoración Económica.

La rentabilidad de una CTE se basa en los gastos de producción relacionados con la producción misma, dentro de estos gastos se encuentran:

- Combustible.
- Gastos por mantenimiento.
- Pago del personal en diversas actividades.
- Imprevistos.

Considerándose solo los gastos fundamentales ocasionados por un consumo excesivo de combustible y sabiendo que el consumo promedio del generador de vapor es de 28 t/h de combustible para la generación de un 100% de carga y asumiéndose que para un ensuciamiento normal de un 12% de los CAR, un 25% del conjunto sobrecalentador de techo, recalentador y economizador, se puede asumir unas pérdidas de \$2100.00/h, todo lo cual nos brinda una justificación económica para la aplicación de la investigación desarrollada.

En el caso de no contar con un sistema de Evaluación y Diagnóstico eficiente, corroborado con los expertos correspondientes, se puede afrontar una rotura general de los sobrecalentadores de techo, recalentador, economizador y CAR, teniéndose la necesidad de realizar una Reparación Capital de los mismos, con un costo aproximado de \$10000.00, dado que el pago del salario del personal se realiza en CUP y otra parte en CUC de acuerdo a lo estipulado en la Empresa sumándose a esta situación la imposibilidad de utilización de dicha unidad.

Impacto Medioambiental.

Las CTE, como consecuencia de sus procesos para la generación de la electricidad provocan impactos negativos en el Medio Ambiente, siendo el proceso de combustión altamente contaminante por los gases a la salida de la Chimenea. Estos gases, al ser expulsados a la atmósfera traen consigo elementos perjudiciales que laceran a cada una de las variables ambientales (SMA, 2014). Dentro de estos elementos se encuentran:

- Contaminación debida al carbono.

La combustión completa del carbono produce CO_2 que es el principal contribuyente al efecto invernadero. Este componente es una consecuencia inevitable de la combustión. Si la combustión del carbono no es completa se produce CO , gas tóxico que en concentraciones elevadas puede provocar afectaciones a la capacidad respiratoria de personas y animales e incluso la muerte.

- Contaminación debida al azufre.

El azufre está presente en los combustibles en proporciones variables; la oxidación del azufre puede producir SO_3 que en contacto con el agua puede dar lugar a ácido sulfúrico (H_2SO_4) condensado que acompaña a las gotas de lluvia, dando lugar a lo que se conoce como “Lluvia ácida”.

- Contaminación debida al nitrógeno.

A elevadas temperaturas de la llama, el nitrógeno que forma parte del combustible y el nitrógeno del aire comburente pueden combinarse con el oxígeno para formar NO , que en la atmósfera se combina lentamente con el oxígeno del aire para formar NO_2 .

Uno de los métodos utilizados en las CTE para atenuar estos elementos perjudiciales provocados por la combustión y que traen consigo los gases a la atmósfera es la implementación de los CAR. Estos equipos aprovechan la temperatura de estos gases para calentar el aire a inyectar al horno, garantizando una buena combustión y una disminución de las temperaturas de los gases a la salida de la chimenea mejorando el ciclo de la generación de vapor.

Por todo lo anteriormente analizado se hace de vital importancia observar el comportamiento tanto de los CAR como de los otros agregados de la caldera, ya que en el caso de una avería general en el mismo, las temperaturas de los gases que salen a la chimenea tendrían valores muy altos provocando grandes riesgos no solo para la vida humana sino también para la flora y la fauna. El programa diseñado en este trabajo de investigación, es una herramienta útil para el monitoreo agregados de la caldera ya que advierte al operador de la planta sobre los posibles problemas que estos pueden ocasionar y le brinda una recomendación de como atenuar la situación, teniendo en cuenta su nivel de ensuciamiento y la temperatura de los gases de la combustión. (García, 2001) .

Si se instalara la herramienta de diagnóstico propuesta en la investigación en los servidores de la planta para su ejecución en tiempo real, se contaría con una valiosa arma proteger al medio ambiente de altas emisiones de cargas contaminantes producto de la baja eficiencia de la caldera. Ésto se puede lograr porque el software está diseñado para analizar los valores de varios días de operación y evaluar si están comenzando a degradarse los principales parámetros utilizados para el diagnóstico, función que el sistema de supervisión instalado en la planta no tiene implementado en la actualidad ya que solo es capaz de actuar cuando las desviaciones de las variables sobrepasan el umbral predefinido en el momento actual, teniendo en cuenta solamente las degradaciones a corto plazo y no las degradaciones a largo plazo.

Conclusiones Generales

Las conclusiones presentes en este trabajo son:

1. Se realizó una revisión de los procesos tecnológicos para la generación de vapor, en especial las principales características de los agregados de la caldera, realizando un estudio de los problemas en dichos sistemas.
2. Se diseñó un sistema asistente con el objetivo de determinar la operación eficiente de los agregados de la caldera utilizando Matlab® creando de esta manera, una herramienta informática que permite evaluar el desempeño de la misma.
3. Se comprobaron los algoritmos elaborados con datos reales del proceso, alcanzándose resultados satisfactorios con predicciones acertadas en la mayoría de los casos lo cual indica concordancia entre el criterio de los expertos y los resultados obtenidos.
4. Se aumenta la seguridad de las variables ambientales por concepto de disminución de los efectos nocivos provocados por los gases de la combustión a la atmósfera.
5. La previsión de futuras roturas a través de la detección de degradaciones existentes se revierte en un sustancial ahorro monetario y por ende de combustible en el orden de \$ 2100.00/h para un 12% de ensuciamiento de los CAR, un 25% del conjunto sobrecalentador de techo, recalentador y economizador, y en caso de una vería total sería de \$ 10000.00/h aproximadamente.

Recomendaciones.

Al culminar este trabajo de investigación sugerimos las siguientes recomendaciones:

1. Continuar perfeccionando el programa creado.
2. Implementar la ejecución en tiempo real (online) de la Herramienta de Diagnóstico en la CTE Antonio Maceo.
3. Enriquecer el espectro teórico de las relaciones de las variables con la operación de la planta y dar seguimiento a estudio de otras variables que según su comportamiento posibilite detectar degradaciones que afecten no solo a los agregados de la caldera sino también a nivel general la producción de vapor.
4. Instalar sensores para la medición y registro en el sistema supervisorio de las restantes variables que hasta el día de hoy se hacen de forma manual en las pruebas de balance y ajuste de régimen en generadores de vapor, para lograr así una mayor confiabilidad y para ampliar el rango de posibilidades que surgen de trabajar con series temporales.

Bibliografía

Benítez, G. (2010). *Determinación del flujo real de vapor para la atomización del petróleo en el Generador de Vapor de la caldera BKZ - 340-140/29M de la Unidad # 3 De la Central Termoeléctrica: Antonio Maceo Grajales*. Tesis de diplomado, Centro de Estudios de Eficiencia Energética, Instituto Superior Politécnico José Antonio Mella, Facultad de Ingeniería Mecánica, Santiago de Cuba.

Borroto Nordelo, A., & Rubio González, A. (2010). *Combustión y generación de vapor*. La Habana: Félix Varela.

Castro, D. (2009). *Jerarquización de los riesgos en el Calentador de Aire Regenerativo de una Central termoeléctrica*. Universidad de Matanzas, Departamento de Química e Ingeniería Química.

Correas, L. (2001). *Thermoeconomic diagnosis of a combined cycle operation*. Tesis de Doctorado, University of Zaragoza.

Díaz, D. (2014). *Plataforma de soporte a la detección de estados estacionarios con fines de monitorización en la CTE Felton*. Tesis de maestría, Instituto Superior Politécnico José Antonio Mella, Departamento de Automática, Facultad de Eléctrica, Santiago de Cuba.

Epstein, N. (1988). *General Thermal Fouling Models*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Flynn, D. (2003). *Thermal Power Plant Simulation and Control*. London: Editora de la IEE.

García, R. (2001). *Combustión y combustibles*.

Heins, A., Veiga, R., Ruiz, C., & Riera, A. (2007). *Fouling monitoring and cleaning optimization in a heat exchanger network of a crude distillation unit*. REPSOL YPF, Argentinean Technology Center (CTA).

Ingimundardóttir, H., & Lalot, S. (2009). *Detection of fouling in a cross-flow heat exchanger using wavelets*. International Conference on Heat exchanger Fouling and Cleaning.

Lifschitz. (1993). *Cuadernos profesionales. AADECA .No2-vol1 y vol2*.

Lindsley, D. (2005). *Power-plant control and instrumentation: The control of boilers and HRSG systems*. IEE.

Lingfang, S. (2008). *Research on the fouling prediction of heat exchanger based on support vector machine*. International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA).

Macgregor, J. F. (2004). *Data-Based Latent Variable Methods for Process Analysis, Monitoring and Control*. In European Symposium on Computer Aided Process Engineering.

Quintana, A. (2012). *Evaluación del comportamiento del consumo específico con la introducción de nuevos Quemadores Prior en el Generador de vapor BKZ- 340-140/29M de la Unidad #3 De la Central Termoeléctrica: Antonio Maceo Grajales.RENTÉ*. Tesis de diplomado, Centro de Estudio de Eficiencia Energética, Instituto Superior Politécnico José Antonio Mella, Facultad de Ingeniería Mecánica, Santiago de Cuba.

Reini, M., & Tacani, R. (2005). *Improving the energy diagnosis of steam power plants using the Lost Work Impact Formula*. Int J Appl Thermodyn.

Rodríguez, J. M. (2010). *Sistema para el monitoreo y análisis del ciclo térmico en Centrales Termoeléctricas*. Trabajo de Diplomado, Instituto Superior Politécnico José Antonio Mella, Departamento de Automática, Facultad de eléctrica, Santiago de Cuba.

Rodríguez, M. A. (2014). *Herramientas para el manejo de una base de datos orientada a un sistema experto de arranque en la unidad VI de la CTE Rente*. Tesis de diplomado, Instituto Superior Politécnico José Antonio Mella, Departamento de Automática, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Santiago de Cuba.

- Saravanamuttoo, H., & Maclsaac, B. (1983). *Thermodynamic models for pipeline gas turbine diagnostics*. J Eng Power.
- Skogestad, S. (2012). Chapter 11 Economic Plantwide Control. En G. R. Kariwala (Ed.), *Plantwide control: Recent Developments and Applications* (págs. 259 - 251). John Wiley and Sons.
- SMA. (2014). *Guía de aspectos ambientales relevantes para centrales termoeléctricas*. Gobierno de Chile.
- Smuts, J. (2010). Improving Boiler Stability Through Advanced Regulatory Control. *ISA Automation*.
- Stamatis, A., Mathioudakis, K., & Papailiou, K. (1990). *Adaptive simulation of gas turbine performance*. ASME J Eng Gas Turbines Power.
- Stoppato, A., & Lazzaretto, A. (1996). *The exergetic analysis for energy system diagnosis*. Eng Syst Design Anal ASME.
- Uche, F. (2000). *Thermoeconomic analysis and simulation of a combined power and desalination plant*. Tesis de Doctorado, University of Zaragoza.
- Upadhyaya, B. R., & Hines, J. W. (2004). *On-Line Monitoring and Diagnostics of the Integrity of Nuclear Plant Steam Generators and Heat Exchangers, Final Report: Volume 1, Experimental and Hybrid Modeling Approach for Monitoring Heat Exchanger System Performance*. DOE-NEER Program of the University of Tennessee, Knoxville.
- Valero, A., Correas, L., Zaleta, A., Lazzaretto, A., Verda, V., & Reini, M. (2004). *On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions. Part-1 the TADEUS problem*. Energy.
- Valero, A., Correas, L., Zaleta, A., Lazzaretto, A., Verda, V., Reini, M., y otros. (2004). *On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions. Part 2. Malfunction definitions and assessment*.

Valero, A., Torres, C., Lerch, F., Royo, J., & Serra, L. (2002). *Structural theory and thermoeconomic diagnosis. Part II: application to an actual power plant*. Energy Convers Manage.

Vazquez, L. (2015). *La detección de estados estacionarios y su aplicación a la monitorización de generadores de vapor de termoeléctricas*. Tesis doctoral, Instituto Superior Politécnico José Antonio Mella., Departamento de Automática. Facultad de Ingeniería Electrica, Santiago de Cuba.

Verda, V., & Borchiellini, R. (2007). *Exergy method for the diagnosis of energy systems using measured data*. Politecnico di Torino, Department of Energy Engineering, c.so Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, Italy.

Verda, V., Serra, L., & Valero, A. (2004). *The effects of the control system on the thermoeconomic diagnosis of a power plant*. Energy.

Yuanhao, S., & Jingcheng, W. (2011). *Ash fouling monitoring and key variables analysis for coal fired power plant boiler*. Ministry of Education, Shanghai, China, Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, and Key Laboratory of System Control and Information Processing.

Anexos

Anexo 1: Portada de la Herramienta de Diagnóstico.



Anexo 2: Interfaz principal de la sistema asistente Herramienta de Diagnóstico.

Diagnostico

Fuente de Datos
 Nombre dia6.mat
 Fecha 4/7/2016
 Cargar Variables

Analizar
 Una Todas
 Evaluar

	Nombre de variable	Unidad	Norma	Valor Real	Valor Bueno	Critico
1	dP_condHorA	mmCA	10	20.7176	15	30
2	dP_condHorB	mmCA	10	20.7176	15	30
3	dP_recalentadorA	mmCA	30	53.1221	40	70
4	dP_recalentadorB	mmCA	30	53.1221	40	70
5	dP_carA	mmCA	80	84.9953	90	120
6	dP_carB	mmCA	80	84.9953	90	120
7	VacioHorno	kg/cm ²	-3.5000	-4.5000	-3	-1
8	PresVapVivo	kg/cm ²	130	120	120	100
9	TempVapVivo	°C	545	544	535	490
10	TempVapRecCal_A	°C	545	543	535	490

	Variables	Diagnostico	Recomendaciones
1	dP_condHorA	Posible ensuciamiento de las superficies del eje Horizontal.	Aumentar frecuencia de soplado en el conducto.
2	dP_condHorB	Posible ensuciamiento de las superficies del eje Horizontal.	Aumentar frecuencia de soplado en el conducto.
3	dP_recalentadorA	La superficie del Recalentador esta comenzando a ensuciarse.	Incrementar el soplado del recalentador a 4 c/turno.
4	dP_recalentadorB	La superficie del Recalentador esta comenzando a ensuciarse.	Incrementar el soplado del recalentador a 4 c/turno.
5	dP_carA	Intercambio de calor en CAR correcto.	
6	dP_carB	Intercambio de calor en CAR correcto.	
7	VacioHorno	Buen comportamiento en el Vacio del horno.	
8	PresVapVivo	Comportamiento correcto de la Presion de vapor vivo.	
9	TempVapVivo	La temperatura de vapor vivo es correcta.	
10	TempVapRecCal_A	Es correcta la temperatura de vapor recalentado.	
11	TempVapRecCal_B	Es correcta la temperatura de vapor recalentado.	
12	TempAguaAlim	Buena transferencia de energia hacia el agua alimentar.	
13	TempGasSalCald	Posible salida de gases mas calientes a la atmosfera.	Elevar la frecuencia de soplado en el CAR a 2 c/turno.
14	TempAirSalCAR_A	La temperatura del aire que entra al CAR esta en buen rango de opera...	
15	TempAirSalCAR_B	La temperatura del aire que entra al CAR esta en buen rango de opera...	
16	Carga	La carga entregada por la unidad cumple con el plan energetico.	

Anexo 3: Datos del mantenimiento realizado del 22 de marzo al 2 de abril del 2016 en la unidad IV de la CTE Antonio Maceo.

Unidad IV	
Fecha de salida para mantenimiento.	22 de marzo del 2016
Disponibilidad de la unidad antes de su salida para mantenimiento	83 MW
Tipo de mantenimiento	Corrector de 10 días
Lavado de ambos CAR	Si
Limpieza del eje horizontal y del eje convectivo	Si, alto nivel de incrustaciones
Fecha de entrada en servicio post mantenimiento	2 de abril del 2016
Carga alcanzada	95 MW

Anexo 4: Consumo de combustible durante los meses de estudio.

Durante el período que se analiza la asignación y quema del tipo de combustible ha sido Crudo y se muestran en la Tabla 1, 2, 3 las cantidades por mes así como también las cantidades de aditivo y las relaciones correspondientes que constituyen las dosis.

Tabla 1: Cantidad de combustible quemado en la unidad IV durante el mes de febrero.

Mes	Consumo de Aditivo (Litros)	Consumo de Crudo 1400 Cts (Ton/Eq)	Consumo de Fuel - Oíl Mediano Bajo Vanadio (Ton/Eq)	Consumo de Crudo 1100 Cts (Ton/Eq)	Consumo fuel Pesado Bajo Vanadio	Dosis Aditivo Promedio (L/Ton)
Febrero	8317,6	11116,66	9905,37	-	-	0,39
Consumo Total de Combustible en el Mes		21 022,39				

Anexo 4: Continuación.**Tabla 2:** Cantidad de combustible quemado en la unidad IV durante el mes de marzo.

Mes	Consumo de Aditivo (Litros)	Consumo de Crudo 1400 Cts (Ton/Eq)	Consumo de Fuel -Oíl Mediano Bajo Vanadio (Ton/Eq)	Consumo de Crudo 1100 Cts (Ton/Eq)	Consumo fuel Pesado Bajo Vanadio	Dosis Aditivo Promedio (L/Ton)
Marzo	9609,95	15 398,16	8 576,21	-	-	0,40
Consumo Total de Combustible en el Mes		23 974,69				

Tabla 3: Cantidad de combustible quemado en la unidad IV durante el mes de abril.

Mes	Consumo de Aditivo (Litros)	Consumo de Crudo 1400 Cts (Ton/Eq)	Consumo de Fuel -Oíl Mediano Bajo Vanadio (Ton/Eq)	Consumo de Crudo 1100 Cts (Ton/Eq)	Consumo fuel Pesado Bajo Vanadio	Dosis Aditivo Promedio (L/Ton)
Abril	7 562,1	1 719,67	9 504,54	-	6 931,44	0,41
Consumo Total de Combustible en el Mes		18 155,69				

Anexo 5: Costo de los materiales de los agregados de la caldera.

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	PRECIO UND	TOTAL
1	Kg	44,4	Estructura para soporte de todos los componentes	\$ 31,53	\$ 1400,00
2	Und	2	Motoreductores 1/2 HP, Frame 56 C, 1800 rpm de entrada, 70 rpm de salida, trifásico	\$ 838,35	\$ 1676,70
3	Und	8	Rodamiento de bolas #6810 para eje de 50mm	\$ 110,00	\$ 880,00
4	Und	2	Variadores de velocidad	\$ 410,50	\$ 821,00
5	Und	2	Piñones para cadena 80, tipo A, 15 dientes	\$ 12,80	\$ 25,60
6	Und	2	Piñones para cadena 80, tipo A, 40 dientes	\$ 30,20	\$ 60,40
7	Kg	335,4	Ejes de transmisión acero SAE 1018 de = 95mm L = 1500mm	\$ 2,51	\$ 841,85
8	ft	50	Cadena Simple No.80	\$ 2,75	\$ 137,50
9	Und	48	Pernos M8 x 40mm, tuercas, anillos de presión	\$ 2,25	\$ 108,00
10	Und	4	Tornillos de regulación de potencia M24 x 136mm	\$ 7,75	\$ 31,00
11	Und	8	Platinas inmovilizadoras acero A-36	\$ 3,37	\$ 26,96
12	Und	1	Prefabricación de materiales varios	\$ 1.500,00	\$ 1.500,00
TOTAL MATERIALES					\$ 7.509,01

Anexo 6: Calentador de Aire Regenerativo.

