

Metodologías a considerar para la aplicación del mantenimiento por diagnóstico de los Calentadores de Aire Regenerativos de Centrales Termoeléctricas.

Autores:

Dra Teresita Rodríguez Nogueira

MSc Juan Landa García.

Dr. Roberto Vizcón Toledo.

Resumen:

En el presente trabajo se parte de exponer los tipos de mantenimientos que en la actualidad se aplican en los equipos de las Centrales Termoeléctricas dentro de los que se encuentran los Calentadores de Aire Regenerativos. Se enfatiza en las características del mantenimiento por diagnóstico y se muestran metodologías que constituyen herramientas a tener en cuenta a la hora de aplicar este tipo de mantenimiento que pueden ser utilizadas en cualquier equipo.

Introducción:

En las centrales termoeléctricas cubanas se realizan diferentes tipos de mantenimiento, el que más se explota es el preventivo planificado sin tener en cuenta el estado técnico de los equipos y la necesidad de sus limpiezas.

En dichas centrales se utilizan Calentadores de Aire Regenerativos con la finalidad de calentar el aire a inyectar al horno del generador de vapor a través de aprovechar la energía contenida en los gases de escape de la combustión. Al utilizar estos equipos en la combustión de las mezclas de petróleo crudo nacional mejorado se ha observado un incremento de la velocidad a que se ensucia la superficie de los cestos al compararlo con otros combustibles anteriormente utilizados lo que obliga a una realización mas frecuente de su limpieza con vapor y con agua. Por lo que con este trabajo se persigue el objetivo de brindar metodologías que se pueden tener en cuenta a la hora de aplicar el mantenimiento por diagnóstico y determinar el tiempo al cual debe efectuarse la limpieza del calentador de aire regenerativo.

1. Tipos de mantenimientos que se aplican en la actualidad en las Centrales Termoeléctricas de Cuba.

Los métodos o sistemas de mantenimiento con más aplicación en las centrales eléctricas son (SOMCE, 1996):

- Mantenimiento Preventivo Planificado (M.P.P).
- Mantenimiento por diagnóstico (M.D)

1.1 Definición de Mantenimiento Preventivo Planificado (MPP)

Se define como aquellas acciones de mantenimiento que se realizan a intervalos predeterminados con la intención de reducir la posibilidad de que la condición del equipo caiga por debajo de un nivel requerido de aceptabilidad.

Características principales del MPP

- Establece distintas categorías de mantenimiento en función de su contenido y duración.
- Establece intervalos entre las distintas categorías de mantenimiento.
- Norma recursos humanos y materiales para las distintas categorías.
- Evalúa la calidad de los mantenimientos mediante pruebas previas y posteriores de acuerdo a las normas establecidas.
- Permite perfeccionar el sistema basado en la experiencia e información adquirida.

Categorías de mantenimiento

- Mantenimiento Profiláctico
- Mantenimiento Ligero.
- Mantenimiento Parcial.
- Mantenimiento Parcial ampliado.
- Mantenimiento General.

Definición y alcance de cada categoría de Mantenimiento.

Mantenimiento Profiláctico

Este mantenimiento es el de más corta duración. Se establece para unidades que operan en régimen base con una duración de 24 horas, entre una actividad de mantenimiento u otra. Las 24 horas se darán en dos plazas, uno de 8 horas cualquier día (fundamentalmente de las 22.00 a las 06.00 horas) y otro de 16 horas los días no laborables (después de un día hasta antes del pico del otro día).

En este mantenimiento se reparan defectos que lo permitan las condiciones térmicas del bloque y se ejecuten en el plazo establecido.

Mantenimiento Ligero.

En el se realizan cambios de algunos componentes de corta vida, se cambian lubricantes, se limpia el equipo y se elimina los efectos detectados durante la operación. Como ejemplo puede citarse la supresión de salideros de agua, vapor, lubricantes, y gases, limpieza de superficie de calentamiento, revisión de sistema de regulación, arranque y protección, eléctrica y revisión ligera de interruptores, etc. Así como tomar información para próximos mantenimientos.

Mantenimiento Parcial.

Tiene como objetivo realizar reparaciones y sustituciones de piezas de mayor duración así como la ejecución de trabajo más complejos que en la categoría anterior. Como ejemplo podemos citar cambios de cestos de calentadores de aire regenerativo, reparación de baffles de caldera, pruebas de equipos etc.

Mantenimiento Parcial ampliado.

Esta categoría de mantenimiento se aplica exclusivamente a los Equipos Básicos de las Centrales Eléctricas.

El mantenimiento Parcial ampliado surge producto de la necesidad de ejecutar volúmenes de trabajo, que sin lograr el alcance de un mantenimiento general sobrepases considerablemente el contenido y duración de un mantenimiento Parcial.

El mantenimiento Parcial ampliado cumple el objetivo fundamental de ajustar el ciclo de mantenimiento de la Caldera, con el de la Turbina y el generador.

En este mantenimiento se acometerán volúmenes de trabajos tales como: renovación parcial o total en conductos de gases, refractarios de pisos y boca de quemadores, cambio de cestos o paquetes de los calentadores de aire, cambio parcial de tubos de Caldera y condensadores, inspección y prueba del sistema de regulación y protecciones, renovación de los sellos de Hidrógeno del Generador, Control de Metales, etc.

Mantenimiento General.

Esta categoría de mantenimiento implica la ejecución de volúmenes de trabajo mayores y consume más cantidad de recursos materiales, humanos y de tiempo.

Actividades típicas de este mantenimiento son: cambio de agregado de caldera. Revisión y/o reparación de rotores y estatores del turbogruppo, revisión de chumaceras y sistema de regulación de turbinas, cambio de tubos de intercambiadores de calor y mantenimientos generales en equipos auxiliares categorías B.

1.2 Mantenimiento por diagnóstico.

La tendencia actual en la actividad de mantenimiento es hacia la aplicación del mantenimiento por diagnóstico. A ello contribuye el avance de la tecnología y su vasto campo de aplicación.

La determinación de los volúmenes de trabajo verdaderamente necesarios para garantizar máxima disponibilidad del equipo con óptima eficiencia y confiabilidad estableciendo el momento más adecuado para su ejecución, constituyen en resumen los objetivos del diagnóstico aplicado al mantenimiento.

Para el logro de un buen diagnóstico resulta imprescindible la creación de un sistema amplio de tomas de datos, clasificación y procesamiento de los mismos, así como la caracterización sistemática de todo un universo de fallos.

Etapas de desarrollo: Se consideran dos etapas.

Etapas 1

- Creación y aplicación de un sistema de medición periódica de parámetros operacionales seleccionados y ejecución de pruebas de comportamiento.
- Creación y aplicación de un sistema de información y procesamiento estadístico mediante programa de computo de los resultados de pruebas y medición.
- Análisis y caracterización de los síntomas asociados a cada fallo caracterizado.

En lo que respecta a los equipos rotatorios, los parámetros de operación a controlar y las pruebas de comportamiento, están relacionadas fundamentalmente con las revisiones de los niveles de vibración y ruido.

En cuanto a los generadores de vapor, el control del carácter y la progresión del ensuciamiento resulta determinante.

Etapas 2

Análisis sistemático del comportamiento operacional, por unidad electrogeneradora con vistas a la determinación predictiva del momento más probable de generación autoeconómica o límite y de los volúmenes de trabajo verdaderamente necesarios a ejecutar para restituir los valores normados de eficiencia y confiabilidad.

Requerimientos del Diagnóstico.

El cumplimiento de las dos etapas del diagnóstico requiere:

- Aplicación de las técnicas de computación.
- Equipamiento para pruebas y ensayos.
- Apoyo priorizado de laboratorio de control de metales.
- Personal técnico de amplia experiencia y especialización.

Procedimiento a seguir en la aplicación del MPP y diagnóstico.

La aplicación de las técnicas del diagnóstico implica en algunos casos la variación de los ciclos de mantenimiento de los equipos y por consiguiente la no ejecución de un mantenimiento planificado o el cambio de la categoría del mantenimiento.

Duración del mantenimiento.

Se considera como duración del mantenimiento la cantidad de días calendarios comprendidos entre la apertura del interruptor de la unidad para la vía libre, hasta la sincronización definitiva de la misma después del mantenimiento, incluyendo las pruebas e inspecciones necesarias y la eliminación de defectos surgidos durante los mismos.

Modo de financiamiento de los mantenimientos.

Las actividades de mantenimiento antes enumeradas se dividen en dos grandes grupos: el primero por los mantenimientos profilácticos, ligeros, parciales, diagnóstico, revisiones e inspecciones, los cuales son financiados con los fondos asignados a las centrales para su explotación y los mantenimientos generales y parciales ampliados se financiarán con los fondos salvados por la UNE para ese fin. En ambos casos el objetivo principal debe ser la conjugación necesaria conveniente entre la inversión de recursos y el aseguramiento del servicio y la eficiencia del equipo que se trate.

2. Calentadores de aire regenerativos (CAR).

La función de los Calentadores de aire regenerativos es recuperar parte de la energía que se encuentra almacenada en los gases de escape de la combustión de los hornos.

Los Calentadores de aire regenerativos son equipos de accionamiento continuo que trabajan en régimen transiente. La sustancia que se encuentra a mayor temperatura (los gases) se pone en contacto con la estructura del equipo y le cede energía a esta, calentándola, posteriormente esta se retira y se pone en contacto con esta el fluido frío (el aire), el cual absorbe parte de la energía almacenada en la estructura, calentándose, por lo que la temperatura de la pared se reduce. Este proceso es repetido una y otra vez, por lo que se dice que el equipo trabaja en forma periódica.

Existen dos tipos de calentadores de aire regenerativos, los rotatorios (Lungstrom) y los de estructura fija.

Los Calentadores de aire regenerativos rotatorios (Lungstrom) se encuentran constituidos por un eje central al que se encuentran unidos sectores circulares de placas de variado perfil los cuales se denominan cestos. Los cestos que se ponen en contacto con los gases calientes se denominan cestos calientes, los que le siguen cestos intermedios y, por último, los que están en contacto con los gases fríos se denominan cestos fríos. Ver figura 1 donde se muestra una vista del Calentador de Aire Regenerativo tipo Lungstrom (ASINEL, 1985).

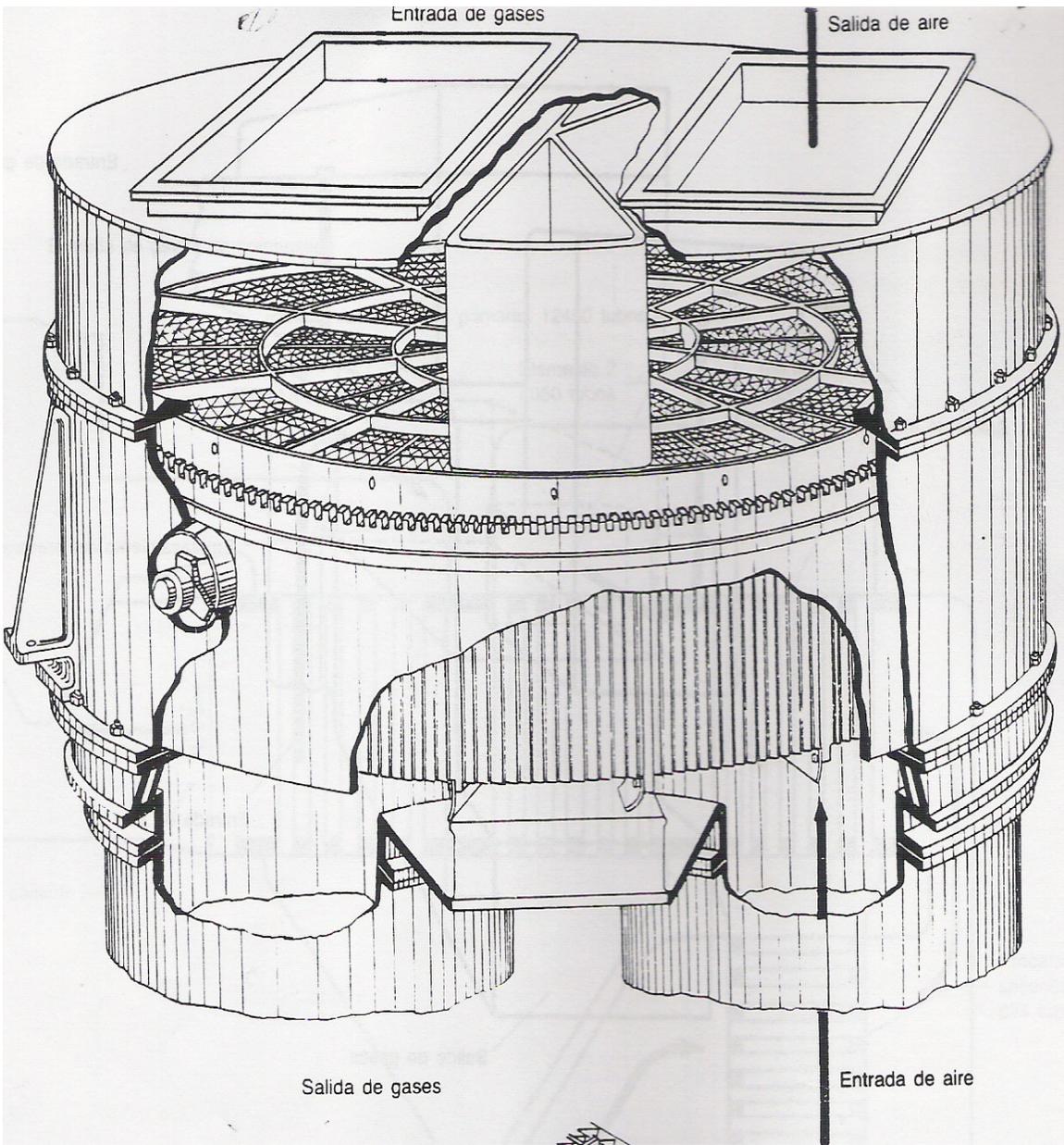


Figura 1. Vista Calentador de aire regenerativo tipo Lungstrom.

2.1 Características de los calentadores de aire regenerativo (CAR) de la central termoeléctrica.

Propósito del CAR.

El fin de los calentadores de aire rotativos es procurar que el aire de combustión este a una temperatura compatible con una buena combustión y que los gases se enfríen mejorando de este modo el rendimiento del ciclo.

Estos calentadores toman las calorías de los gases en la salida del economizador y las restituyen al aire.

Descripción del sistema.

La instalación consta de dos calentadores de aire rotativos de tipo Ljungstrom, un calentador en cada fila, cada uno de los calentadores de aire representa una función: FRA para el lado izquierdo y FRB para el del lado derecho.

Cada calentador de aire consta esencialmente de un rotor con sus cojinetes guía y soporte y un estator.

El rotor es normalmente arrastrado por un motor alimentado en 380 v. En caso de indisponibilidad del motor normal, se ha previsto un motor de emergencia de velocidad lenta alimentado con una tensión continua de 220 v.

Un controlador comprueba la rotación del rotor.

Comprende 12 sectores, y cada sector comprende los elementos calentadores distribuidos según tres capas.

El cojinete guía es lubricado por un baño de aceite con circulación e incluye:

- La caja de rodamientos de capacidad 15 litros.
- El grupo motobomba de aceite de 6 L/mm a 3.5 bares con su válvula de alivio.

- Un conjunto de dos filtros normal/emergencia con su grifo de 6 vías para la selección de filtro.
- Un enfriador de agua de superficie 0.71m² aislable por medio de dos grifos.

El cojinete soporte es lubricado por baño de aceite con circulación e incluye:

- La caja de rodamientos de capacidad 83 L.
- El grupo motobomba de aceite de 11 L/mm a 3.5 bares con su válvula de alivio.
- Un conjunto de dos filtros normal/emergencia con su grifo de 6 vías para la selección de filtro.
- Dos grifos de cierres.
- Un enfriador de agua de superficie 0.71m² aislable por medio de dos grifos.

Cada calentador de aire puede lavarse por medio de un circuito de agua de lavado.

El circuito de lavado consta de una alimentación en agua tibia con una válvula de cierre, las toberas de inyección en el comportamiento de gases y una purga de punto bajo. Los CAR pueden ser drenados en el punto bajo mediante las válvulas, lado gases y lado aire.

Un aparejo común para los dos calentadores permite realizar las operaciones de mantenimiento.

El sistema de incendio comprende una alimentación de agua con válvula de cierre neumática equipada con fines de calderas. Esta válvula es accionada con dos electroválvula de apertura y de cierre. Estas válvulas están montadas sobre una placa neumática. Hay una purga de punto bajo.

Funcionamiento.

- En funcionamiento normal, los dos CAR están en servicio con su motor normal; los registros manuales de los circuitos de aire y gases están abiertos del todo; las bombas de aceite de lubricación están funcionando, en secuencia con la temperatura del aceite.
- Los registros manuales lados aire y gases están cerrados para las operaciones de lavado o de extinción de incendios así como para las operaciones de mantenimiento.

En cuanto a las operaciones de lavado o extinción de incendio se pone localmente en marcha el motor de pequeña velocidad.

- Después del lavado como para permitir el secado de los elementos calentadores, se abren los registros lado aire.
- No se efectúan las operaciones de lavado y de secado sobre más de un calentador de aire a la vez.

2.2 Limpieza de los calentadores de aire regenerativos.

Los calentadores de aire regenerativos son los elementos de los generadores de vapor que sufren un ensuciamiento más acusado, lo cual está condicionado por los siguientes factores:

1. Los canales por los cuales circulan los gases producto de la combustión son de pequeñas dimensiones. Su diámetro equivalente varía en 9.7 y 9.8 mm (Oliva, 1988).
2. Una parte considerable del CAR trabaja con una temperatura del metal menor que la temperatura del punto de rocío. Una característica importante del ensuciamiento del CAR es que la suciedad no se distribuye uniformemente a todo lo ancho del rotor, sino que en las zonas cercanas al eje y en la periferia el ensuciamiento es más intenso debido a una menor temperatura de los gases. Un factor de gran influencia sobre la intensidad del ensuciamiento de los CAR es la temperatura del aire que entra en él. Al aumentar la temperatura del aire a la salida del precalentador a valores mayores de 80 ° C se reduce notablemente el ensuciamiento del CAR (Oliva, 1988). Jorge (Canés, 1999) coincide en general con este criterio al plantear que la temperatura de las paredes de los cestos del CAR motiva la formación de las incrustaciones.
3. El método utilizado en la limpieza de las incrustaciones(Oliva, 1988)

Una característica importante del ensuciamiento de los CAR es que la suciedad no se distribuye uniformemente a todo lo ancho del rotor, sino que en las zonas cercanas al eje y a la periferia el ensuciamiento es más intenso debido a una menor temperatura de los gases.

Un factor de gran influencia sobre la intensidad del ensuciamiento de los CAR es la temperatura del aire que está en él. Con el incremento de la temperatura del aire a la salida del precalentador, hasta valores mayores de 80 C, se reduce notablemente el ensuciamiento del CAR.

Según (Canés, 1999) los motivos de la incrustación son: la temperatura de las paredes de los cestos del CAR y el método de limpieza de las incrustaciones.

Entre los métodos más utilizados para la limpieza de los Calentadores de Aire Regenerativos según (Oliva, 1988) se encuentran:

1. Soplado con aire o vapor.
2. Lavado con agua.
3. Calentamiento con los gases producto de la combustión(craqueo)
4. Limpieza por impulsor.

Soplado con aire o vapor

Para el soplado de los CAR se utiliza fundamentalmente sopladores oscilantes cuyo cabezal de soplado se mueve a velocidad constante, de la periferia del rotor a su eje en uno y otro sentido.

En los CAR de grandes dimensiones el flujo de vapor requerido para la limpieza exige la construcción de tuberías de suministro de vapor con un diámetro considerable.

Los aparatos de soplado se instalan en el conducto de gases antes y después del CAR, a una distancia de 150 a 300 mm de la superficie de los cestos. La instalación de los sopladores en el conducto de gases es más efectivo que el conducto de aire, ya que la eliminación de la suciedad es más fácil cuando la temperatura de las láminas del CAR es

mayor, además de que en este caso se produce la eliminación inmediata del ácido sulfúrico condensado, con lo que se atenúa la velocidad de corrosión.

La frecuencia de la limpieza mediante el soplado depende del tipo del combustible que se quema y de la temperatura del trabajo en la parte fría del CAR realizándose generalmente de una a tres veces por turno.

Una cuestión muy importante para lograr la limpieza efectiva del CAR mediante el soplado con vapor es la selección correcta de sus parámetros. La utilización para la limpieza de vapor saturado o con un pequeño sobrecalentamiento puede intensificar el ensuciamiento. Hay que seleccionar los parámetros del vapor de tal forma que luego de la expansión en las toberas no se alcance el estado de saturación.

En la tabla 1 se dan los valores mínimos de temperatura del vapor sobrecalentado para diferentes valores de presión (con un rendimiento de la tobera de 0.85). Valores de temperatura menores que los indicados conducen a la aparición de vapor saturado a la salida de la tobera.

Tabla1. Valores mínimos de temperatura del vapor sobrecalentado para diferentes valores de presión.

| | | | | | |
|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Presión, kg/cm ² | 10 | 14 | 18 | 22 | 26 |
| Temperatura, ° C | 319 | 352 | 377 | 400 | 422 |

Lavado con agua

Durante el quemado de combustible con alto contenido de azufre es muy difícil mantener la resistencia aerodinámica de los CAR en los límites permisibles, si se utiliza solamente el soplado con vapor o aire. En estos casos cada cierto tiempo se realiza el lavado de los CAR con agua, con lo que se logra la limpieza total del equipo independientemente de su grado de ensuciamiento.

La alta efectividad de este método de limpieza está condicionado por el hecho de que la mayoría de las sustancias que entran en la composición de la suciedad depositada en las láminas del CAR son solubles en agua.

El consumo de agua para el lavado toma valores entre 4 y 5 t por m² de superficie de la sección transversal del rotor. Es necesario, además, que el agua tenga una cierta

alcalinidad ($\text{pH} = 12$) con el objetivo de atenuar el intenso proceso de corrosión de las láminas metálicas que tienen lugar mediante el lavado. Para una limpieza más eficiente se recomienda que el agua tenga una temperatura entre 70 y 90 ° C.

La experiencia demuestra que el lavado del CAR conduce a una notable disminución del espesor de las láminas metálicas, por lo que esta operación debe realizarse con la menor frecuencia posible. Es necesario tener en cuenta, además, que el agua de lavado de los CAR contiene sustancias nocivas, tales como vanadio, níquel, etc, en cantidades que sobrepasan en varias veces las concentraciones límites permisibles, por lo que antes de su envío al desagüe debe ser sometida a un tratamiento de purificación. La operación de lavado se considera concluida cuando el agua alcanza, a la salida del CAR, un pH entre 8 y 9 .

Limpieza de los CAR mediante el calentamiento con gases producto de la combustión.

Este método consiste en interrumpir parcial o totalmente el suministro de aire a uno de los CAR durante el trabajo del generador de vapor. En este período de tiempo que oscila entre 20 y 50 minutos, las láminas metálicas de los cestos del CAR se calientan y deforman, lo que produce el secado y posterior separación de la suciedad depositada sobre los mismos.

La principal desventaja de este método consiste en que durante su utilización puede tener lugar la deformación de los elementos del CAR y un desgaste excesivo de los sellos; este efecto negativo se acentúa en los calentadores cuyo diámetro alcanza valores entre 8 y 9 m. Una forma de atenuar la deformación de los elementos del CAR es limitar su calentamiento hasta 20 minutos, por otro lado, durante la realización del craqueo tiene lugar un incremento de la temperatura de los gases de escape con la consiguiente disminución de la eficiencia del generador de vapor.

Limpieza por impulso.

Este método es relativamente nuevo y consiste en la combustión periódica de una mezcla de gas natural y aire en una cámara con salida a la superficie que se desea limpiar. Como

resultado de lo anterior se forman ondas periódicas de presión que desprende la suciedad depositada en las láminas del CAR.

Durante la combustión de la mezcla en el tubo de impulsos pueden surgir presiones hasta 4 kg/cm² y a la periodicidad de estos impulsos oscilan entre 2 y 8 s. Se recomienda realizar la limpieza por impulsos de uno a tres veces por turno con una duración de hasta una hora.

Los métodos utilizados en la CTE “Antonio Guiteras” son los de soplado con vapor y lavado con agua.

3. Metodologías empleadas para determinar el tiempo más apropiado para la realización de la limpieza con agua del CAR.

3.1 Metodología para determinar el tamaño de la muestra a investigar durante la experimentación a escala industrial.

Para la realización de los experimentos se calcula inicialmente (según metodología utilizada por (Dominguez, 2002) y ajustada por (Rodríguez, 2005) en su tesis doctoral) el número de muestras que deben ser analizadas de la población total, utilizando la ecuación que permite determinar éste en los experimentos irrestrictos aleatorios, la cual se muestra a continuación:

$$n = \frac{no}{1 + no / NT} \quad (1)$$

donde:

$$no = \left(\frac{Z_{1-\frac{\alpha}{2}} S}{e} \right) \quad (2)$$

S – Desviación estándar de la variable.

$Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ - Valor de estadígrafo de distribución normal Z. Los cálculos se realizan con $\alpha = 0,05$.

n - tamaño de la muestra representativa de la población

NT - número total de elementos de la población. Este es tomado como el número de sopleteos que serán ejecutados durante el periodo en que se desarrolla la investigación, pues los análisis se realizan con las variables tomadas acabado de salir el equipo de un sopleteo, es decir para condiciones de limpieza.

El valor del número de sopleteos totales (NT) se estima, según se muestra en la siguiente expresión:

$$NT = NS * ND * NM \quad (3)$$

siendo:

NS - número de sopletos por días (6 sopleteos por días)

ND - número de días del mes (se consideró 30 días)

NM - número de meses que durará la experimentación (6 meses).

e - error total de la variable que se quiere medir

El valor e, si se tiene alguna prueba previa, puede tomarse de la variable que más error presenta y si no se posee ésta se realizará un estimado del mismo. En todos los casos se trabajó con valores calculados previamente, los cuales se obtuvieron mediante la determinación de los errores casuales y sistemáticos que se comenten en la medición de las variables, teniendo en cuenta que estas pueden ser mediciones directas o indirectas.

En las mediciones directas, que es la empleada en este trabajo, el error sistemático puede ser estimado a partir de la clase de precisión de los instrumentos y el error casual a partir del estadígrafo de Student y la desviación estándar de la media en las mediciones directas.

Para las mediciones directas se emplea el siguiente método (Preobrazhensky, 1980):

1. Error sistemático ΔX_{sis} .

$$X_{sis} = \frac{dk \cdot X_{max}}{100} \quad (4)$$

$$dk \approx \frac{\text{Sens} \cdot 100}{X_{\text{mesc}}} \quad (5)$$

$$X_{\text{mesc}} = (X_{\text{min}} + X_{\text{máx}})/2$$

Donde: $dk \rightarrow$ Clase de precisión del instrumento.

$\Delta X_{\text{sis}} \rightarrow$ Error sistemático en la medición de x .

$X_{\text{mesc}} \rightarrow$ Valor medio de la escala de un instrumento.

$X_{\text{máx}} \rightarrow$ Valor máximo de la escala del instrumento.

$X_{\text{min}} \rightarrow$ Valor mínimo de la escala del instrumento.

$\text{Sens} \rightarrow$ Sensibilidad del instrumento.

2. Error casual ΔX_{cas} .

$$\Delta X_{\text{cas}} = t_p \cdot St \quad (6)$$

$$St = \sqrt{\left(\frac{\sum (X_i - X_m)^2}{N_1 \cdot (N_1 - 1)} \right)} \quad (7)$$

Donde: $\Delta X_{\text{cas}} \rightarrow$ Error casual en la medición de x .

$St \rightarrow$ Desviación estándar de la media.

$t_p \rightarrow$ Estadígrafo de Student.

$X_i \rightarrow$ Valor de la variable x en la medición i .

$X_m \rightarrow$ Valor medio de la variable X para n mediciones.

$N_1 \rightarrow$ Tamaño de muestra usado para la estimación del error.

El Estadígrafo de *Student* se seleccionó para un 95 % de probabilidad y $N_1 - 1$ grados de libertad, todo según lo recomendado en la literatura especializada.

3. Criterios para precisar el error total de la medición de X , (ΔX_t); según (Preobrazhensky, 1980).

$$\text{Si } \Delta X_{\text{sis}}/St < 0.8 \quad \text{entonces: } \Delta X_t = \Delta X_{\text{cas}} \quad (8)$$

$$\text{Si } 0.8 < \frac{\Delta X_{\text{sis}}}{S_t} < 8 \quad \text{entonces: } \Delta X_t = K \cdot S_x \quad (9)$$

$$K = \frac{(\Delta X_{\text{cas}} + \Delta X_{\text{sis}})}{(S_t + \Delta X_{\text{sis}})} \quad (10)$$

$$S_x = \sqrt{\left(\frac{\Delta X_{\text{sis}}^2}{3}\right) + S_t^2} \quad (11)$$

$$\text{Si } \frac{\Delta X_{\text{sis}}}{S_t} > 8 \quad \text{entonces: } \Delta X_t = \Delta X_{\text{sis}} \quad (12)$$

Donde: $S_x \rightarrow$ Coeficiente estadístico que evalúa el efecto simultáneo del error sistemático y la desviación estándar de la media.

$\Delta X_t \rightarrow$ Error total de la medición de x .

$K \rightarrow$ Coeficiente estadístico que evalúa la relación del error casual a la desviación estándar de la media ponderada por el error sistemático.

El error relativo de X (Γ_x) se determina como:

$$\Gamma_x = \frac{\Delta X_t \cdot 100}{X_m} \quad (13)$$

Donde: $\Gamma_x \rightarrow$ Error relativo en la medición de X .

$X \rightarrow$ Parámetro medido.

Además se incorpora el cálculo del error en el sistema de información (Rodríguez, 2005) pues los datos de todas las variables se almacenan en históricos en la red de computadoras acopladas al proceso, y el error en la medición está influenciado por todo el sistema, calculado (Preobrazhensky, 1980) como:

$$\Gamma_x = \sqrt{(\Gamma_1)^2 + (\Gamma_2)^2 + \dots + (\Gamma_n)^2} \quad (14)$$

3.1.1 Aplicación de la metodología para el cálculo del tamaño de la muestra a investigar en el Calentador de Aire Regenerativo de la CTE “Antonio Guiteras”.

El cálculo de los errores experimentales de las variables medidas directamente en el CAR, se estima a partir de tomar 30 mediciones de 21 variables a analizar, tomadas cuando el calentador de aire regenerativo estaba acabado de salir de una limpieza con vapor (sopleteo), con las cuales se aplica la metodología antes expuesta para calcular los errores totales cometidos al realizar cada una de las mediciones. Obtenidos éstos, se estima el comportamiento del error para el intervalo de variación de cada una de las mediciones considerando que la variabilidad de la medición se mantiene constante dentro del intervalo de investigación.

Los resultados de los cálculos se presentan en la tabla 2, donde se puede observar que los errores de las mediciones realizadas son inferiores a un 3 %.

Una vez obtenido el tamaño de muestra representativo (n), se determinó cuáles serían los sopleteos a estudiar. Esto se realizó mediante un sorteo de la secuencia en que deben ser tomadas las muestras, para lo cual se utilizó la tabla de números aleatorios, para ello se utilizó una distribución de probabilidad uniforme, que es la que cumple con las condiciones de muestreo antes señaladas.

Al hacer el cálculo del tamaño de la muestra para todas las variables antes mencionadas, resultó que el valor mayor que se reportó para n fue de 41 por lo que se asumió para el experimento un tamaño de muestra de 45 y con esto se trabajó.

Tabla 2: Resultados del error relativo calculado e intervalo en que varía la medición de las variables investigadas.

| Variable Investigada | Error calculado | Intervalo en que varía la medición |
|----------------------|-----------------|------------------------------------|
| Tge CAR B | 2,41 | 0 - 400 °C |
| Tge CAR A | 1,75 | 0 - 400 °C |
| Tgs CAR B | 1,16 | 0 - 400 °C |
| Tgs CAR A | 1,26 | 0 - 400 °C |

| | | |
|------------------------|------|-------------|
| Tas CAR B | 1,09 | 0 - 400 °C |
| Tas CAR A | 1,22 | 0 - 400 °C |
| Tae CAR B | 0,48 | 0 - 400 °C |
| Tae CAR A | 1,88 | 0 - 400 °C |
| Pge CAR A | 2,71 | 0 - 60 bar |
| Pge CAR B | 2,17 | 0 - 60 bar |
| Pgs CAR A | 2,89 | 0 - 60 bar |
| Pgs CAR B | 1,45 | 0 - 60 bar |
| O ₂ a CAR A | 2,25 | 0 - 50 % |
| O ₂ a CAR B | 2,77 | 0 - 50 % |
| O ₂ d CAR A | 2,39 | 0 - 50 % |
| O ₂ d CAR B | 2,12 | 0 - 50 % |
| Fa CAR A | 2,58 | 0 - 600 t/h |
| Fa CAR B | 2,41 | 0 - 600 t/h |
| I de Tiro A | 2,62 | 0 - 400 A |
| I de Tiro B | 2,48 | 0 - 400 A |
| Carga Bloque | 2,53 | 0 - 340 MW |

El nombre de cada una de las abreviaturas utilizadas en esta tabla se puede consultar en el anexo 1.

Se programó en *Excel* una tabla de números aleatorios a seleccionar 45 muestras de mediciones en un total de 1980, distribuidos como sigue a continuación en la tabla 3.

Tabla 3: Distribución aleatoria de la muestra para 45 experimentos:

| Orden | Muestra |
|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| 1 | 3 | 10 | 371 | 19 | 74 | 28 | 1123 | 37 | 1507 |
| 2 | 42 | 11 | 406 | 20 | 789 | 29 | 1168 | 38 | 1552 |
| 3 | 88 | 12 | 449 | 21 | 822 | 30 | 1205 | 39 | 1596 |
| 4 | 129 | 13 | 491 | 22 | 865 | 31 | 1251 | 40 | 1630 |
| 5 | 174 | 14 | 532 | 23 | 913 | 32 | 1296 | 41 | 1673 |
| 6 | 212 | 15 | 585 | 24 | 958 | 33 | 1329 | 42 | 1715 |
| 7 | 253 | 16 | 623 | 25 | 997 | 34 | 1374 | 43 | 1766 |
| 8 | 290 | 17 | 667 | 26 | 1031 | 35 | 1411 | 44 | 1814 |
| 9 | 333 | 18 | 702 | 27 | 1084 | 36 | 1458 | 45 | 1859 |

2.1.2 Análisis de los resultados de la aplicación del método de cálculo del tamaño de la muestra a investigar.

Esta metodología permitió determinar dentro del marco de análisis de once meses, el tamaño de muestra a investigar en los Calentadores de Aire Regenerativos que resultó ser de 45 períodos entre sopleteos. Además esta metodología permitió organizar la experimentación a través de una distribución uniforme de las muestras a investigar y lleva implícita el cálculo del error que se comete al realizar la medición con cada una de las variables investigadas, lo que permite además de calcular el tamaño de la muestra, saber con qué error se está trabajando, y se pudo comprobar que el mismo resultó ser menor del 3 % en todas las variables analizadas, lo cual confirma que el trabajo realizado tiene confiabilidad.

3.2 Metodologías para la determinación de la variable de diagnóstico en los Calentadores de Aire Regenerativos.

Para la determinación de la variable que más información brinda sobre el ensuciamiento de los Calentadores de Aire Regenerativos se aplicaron dos métodos: el método de concordancia de Kendall y el método de Luna, que se describen en los epígrafes siguientes:

3.2.1 Método de Kendall o de los expertos para determinar variable de diagnóstico, según (Ibarra, 1998).

Consiste en la recopilación o recogida de información ponderada de un grupo de expertos de cuáles saldrían las características de calidad. El Método unifica el criterio de varios especialistas con conocimiento del producto sometido a estudio, de manera que cada integrante del panel (se debe trabajar con 7 expertos) haya ponderado según el orden de importancia, las características que cada cual entienda a criterio propio. Los integrantes seleccionados deben tener experiencia y conocimiento del aspecto que se va a evaluar. En la selección del experto se tendrá en cuenta la experiencia, el nivel de información que pueda aportar y el nivel técnico que tenga. Este método posee un procedimiento matemático y estadístico que permite variar la fiabilidad del criterio de los expertos mediante el coeficiente de Kendall (W).

Puede aplicarse para determinar las características de calidad, para evaluar la calidad de un producto, evaluar características que no pueden ser medidas, así como también controlar los resultados de algún método objetivo con la evaluación humana.

A continuación se muestran los pasos a seguir para la realización del método:

1. Llevar a la tabla el resultado de la votación de cada experto.
2. Sumatoria de todos los valores por fila.
3. Cálculo del coeficiente (T).

$$T = \frac{\sum^m \sum^k a_j}{K} \quad (15)$$

4. Se realiza el control de las características cuyo valor es menor que el coeficiente (T).
5. Cálculo de Δ , se hace por fila, uno por uno.

$$\Delta = E_a - T \quad (16)$$

6. Cálculo de Δ^2 , se halla la sumatoria al final de la columna.
7. Posteriormente se halla el coeficiente de Kendall (W)

$$W = \frac{\sum^k \Delta^2}{m^2 (K^3 - K)} \geq 0.5 \quad \rightarrow \quad \text{Si se cumple hay concordancia.} \quad (17)$$

K \rightarrow Cantidad de características.

m \rightarrow Número de expertos.

3.2.1.1 Aplicación del Método de Kendall para determinación de la variable de diagnóstico en el CAR de la CTE “Antonio Guiteras”:

Se aplica el método del coeficiente de concordancia Kendall a las variables que según el grupo de expertos brindan información sobre el ensuciamiento del Calentador de Aire Regenerativo.

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|-----|------|
| A | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 19 | -16 | 256 |
| B | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 12 | -23 | 529 |
| C | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 4 | 30 | -5 | 25 |
| D | 5 | 5 | 6 | 5 | 6 | 4 | 5 | 6 | 5 | 5 | 52 | 17 | 289 |
| E | 6 | 6 | 5 | 6 | 5 | 6 | 6 | 5 | 6 | 6 | 57 | 22 | 484 |
| F | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 3 | 40 | 5 | 25 |
| | | | | | | | | | | | 210 | | 1608 |

3.2.1.2 Análisis de los resultados del método de Kendall en el CAR:

Los resultados obtenidos:

$$W = 0.91 \geq 0.50$$

Indican que existe concordancia entre el criterio de los expertos y las variables seleccionadas que más información brindan en el ensuciamiento del Calentador de aire regenerativo, las mismas son:

Aumento del porcentaje de apertura de la compuerta de succión del VTF

Caída de presión por el conducto de aire

Caída de presión por el conducto de gases

Como se puede observar con la aplicación del método la variable considerada por los expertos como la que tiene una mayor información sobre el ensuciamiento del calentador de aire regenerativo es la caída de presión por el conducto de gases.

3.2.2 Metodología para la determinación del parámetro de diagnóstico según Luna (Luna, 1982).

El autor parte de hacer un análisis de lo que considera parámetros estructurales y lo que considera parámetros de diagnóstico

Parámetros estructurales.

El estado técnico está determinado por sus parámetros estructurales. Los parámetros estructurales pueden ser magnitudes geométricas (longitudes, espesores), físicos (juegos, holguras, temperaturas), eléctricas, químicas, etc. Pueden ser identificados como Y1, Y2, Y3,....., Yn. Los parámetros estructurales varían con el uso y explotación de las

máquinas, ya que existe una variación de los parámetros estructurales respecto al recurso (recorrido, tiempo, etc). La variación de un parámetro estructural dado respecto al recorrido puede representarse esquemáticamente como se muestra en la figura 2.

Parámetros estructurales:

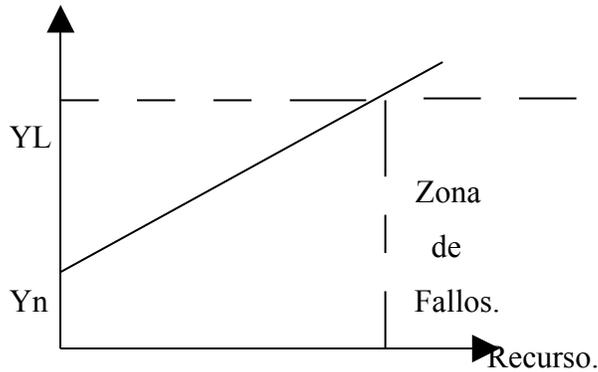


Figura 2: Variación del parámetro estructural con el recorrido.

Al efectuarse el montaje del mecanismo, el parámetro estructural ya ha de tener un valor nominal Y_n , a medida que aumente el tiempo de trabajo o recurso de dicho mecanismo, esta magnitud inicial va variando paulatinamente hasta alcanzar un valor límite Y , el cual determina que el mecanismo falle o que sea muy probable el fallo.

Los valores nominales de los parámetros estructurales vienen definidos desde la fabricación del artículo y los valores límites están determinados por la conveniencia técnica económica de su exterior explotación o por razones de seguridad.

Cada elemento que compone un mecanismo o sistema cualquiera posee una gran cantidad de parámetros estructurales. Sin embargo, siempre existen entre ellos algunos que influyen más directamente en el estado técnico del sistema y que por lo general constituyen una cantidad reducida. Estos parámetros son denominados críticos, por ejemplo el pistón de un motor posee cerca de 100 parámetros estructurales, pero el ancho de las ranuras es determinante en su estado técnico.

¿Por qué los parámetros estructurales no sirven para el diagnóstico?

- Porque para medir estos parámetros hay que desarmar.

- Un solo parámetro estructural no define el estado de un equipo.

Parámetros de diagnóstico.

Son los que determinan el estado técnico de un equipo, porque los síntomas se miden a través de estos parámetros de diagnóstico y los síntomas constituyen la base fundamental de todo proceso de diagnóstico porque su identificación, medición, valoración, así como su correlación con los fallos, debe estudiarse en detalle con el fin de poder realizar un buen diagnóstico.

Hay que buscar que los parámetros de diagnóstico se correspondan con la menor cantidad posible de parámetros estructurales.

3.2.2.1 Pasos para la selección de los parámetros de diagnóstico:

Confección del esquema estructural que muestra la relación entre todos los componentes de un sistema.

Tener en cuenta las siguientes propiedades de los parámetros de diagnóstico:

- Singularidad.
- Sensibilidad.
- Estabilidad.
- Máxima información.
- Fácil medición.

Cada parámetro de estos tiene en cuenta la relación del parámetro de diagnóstico con el parámetro estructural.

Entre varios posibles parámetros de diagnóstico se debe seleccionar siempre aquel que requiera menor complejidad tecnológica.

Descripción de las propiedades a analizar en la selección del parámetro de diagnóstico:

Singularidad: Que a cada valor del parámetro estructural corresponda solamente un valor completamente determinado de la señal escogida.

Sensibilidad: Que una pequeña variación del parámetro estructural provoque una variación lo más grande posible en el valor de la señal.

Estabilidad: Expresada por la dispersión de sus valores.

Máxima información: Relación física entre el parámetro estructural y la variable de diagnóstico.

Fácil medición: Que el parámetro sea fácil de medir, con instrumentos que garanticen la mayor exactitud posible.

3.2.2.2 Aplicación del método de selección de la variable de diagnóstico en el CAR de la CTE “Antonio Guiteras”según (Luna, 1982):

Para la realización de este epígrafe y del que sigue se tuvo en consideración el análisis de 15 muestras de los 45 sopleteos programados, esto producto de la complejidad de los datos y de la dinámica de trabajo de la planta que constantemente está variando la carga, regida por el sistema electroenergético nacional. Primeramente se consideró analizar solamente los sopleteos del CAR que no coincidieran con el sopleteo de caldera, puesto que este último desestabiliza el trabajo del generador de vapor y la segunda consideración, realizar el análisis solo para los sopleteos donde los datos cumplieran con los requerimientos para considerar a la caldera trabajando en estado estacionario. Estos requerimientos extraídos de la literatura especializada y según (Vizcón, 2002) son los siguientes mostrándose en la tabla 7.

Tabla 7: Requerimientos a tener en cuenta para considerar al generador de vapor trabajando en estado estacionario.

| | |
|---|------------|
| • Variación del flujo de vapor. | 10% |
| • Variación de la temperatura del vapor sobrecalentado. | 4% |
| • Variación de la presión del vapor sobrecalentado. | 3% |
| • Variación del exceso de aire en los gases salida. | 3% |
| • Variación de la temperatura del agua de alimentar. | 3% |

Al aplicar la metodología propuesta por (Luna, 1982) lo primero que se realizó fue la confección del esquema estructural como se muestra en la figura 3.

En este esquema se puede observar el parámetro estructural y los posibles parámetros de diagnóstico que resultaron del análisis, de donde se escogerá el más adecuado para el diagnóstico.

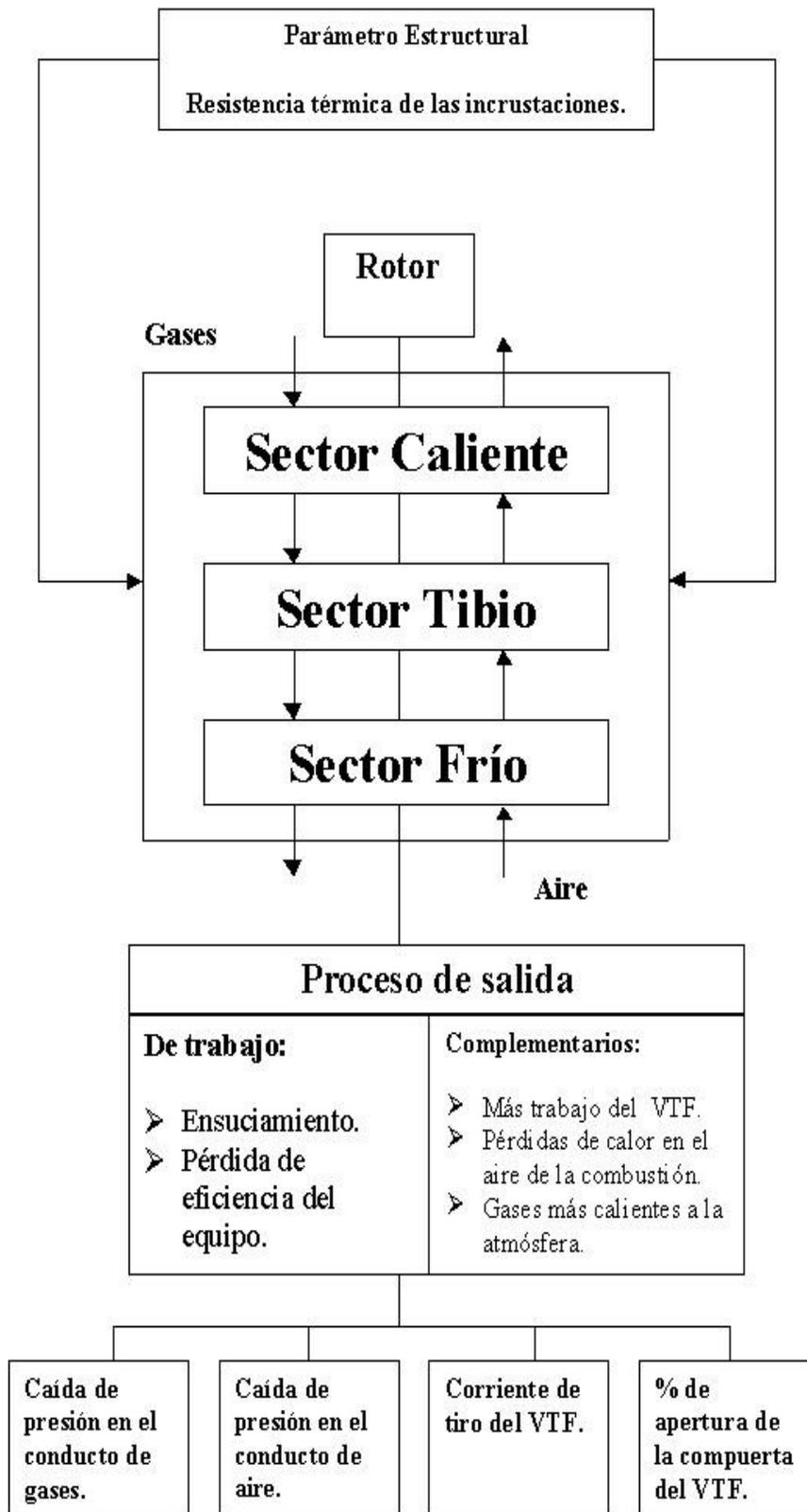


Figura 3: Esquema estructural del Calentador de Aire Regenerativo.

3.2.2.3 Análisis de los resultados de la aplicación del método de Luna en el CAR.

Análisis de parámetros estructurales.

Para diagnosticar la limpieza de las superficies de intercambio de calor el parámetro estructural a utilizar es la resistencia térmica de las suciedades depositadas por los gases sobre la superficie de los cestos, pues su incremento limita paulatinamente la capacidad de intercambio de calor de las mismas, llegando el momento en que el equipo no puede transferir la cantidad de calor requerida y debe entonces efectuarse la limpieza. Este parámetro puede determinarse en forma indirecta a partir del cálculo del coeficiente global de transferencia de calor a lo largo del tiempo de operación del equipo, el cual se determina a su vez a partir de los parámetros de operación medidos habitualmente o a través del cociente entre su espesor y su conductividad térmica. Al valorarse la posibilidad de utilizar el espesor como parámetro estructural debe tenerse en cuenta, como se reporta en (Vizcón, 1997), que la conductividad térmica varía en un amplio rango, de 0.08 a 4.0 W / (m * K), lo cual viene dado por la dependencia de este parámetro de su naturaleza y, desde luego, de sus propiedades y características físicas por lo cual en primera instancia no debe ser seleccionado. En este caso se ha establecido en (Munequele, 2000) que las propiedades físicas del combustible quemado varían en un amplio rango lo que trae como consecuencia variaciones notables de la conductividad térmica de las incrustaciones por lo que entonces no puede ser utilizado para definir el grado de ensuciamiento.

Análisis de Parámetros de diagnóstico.

Para la determinación del parámetro de diagnóstico se tuvieron en cuenta las variables resultantes del esquema estructural de la figura 3, tanto para el CAR A como para el CAR B, a partir de las propiedades a analizar para su selección: singularidad, sensibilidad, estabilidad, máxima información y fácil medición.

Para este análisis se le aplicó la herramienta del *Microsoft Excel* en análisis de datos: estadística descriptiva a todas las variables como se muestra en el anexo 2 y un análisis

de la tendencia del comportamiento de las variables analizadas con el programa *STATGRAPHICS* como se muestran en las figuras 4, 5, 6 y 7.

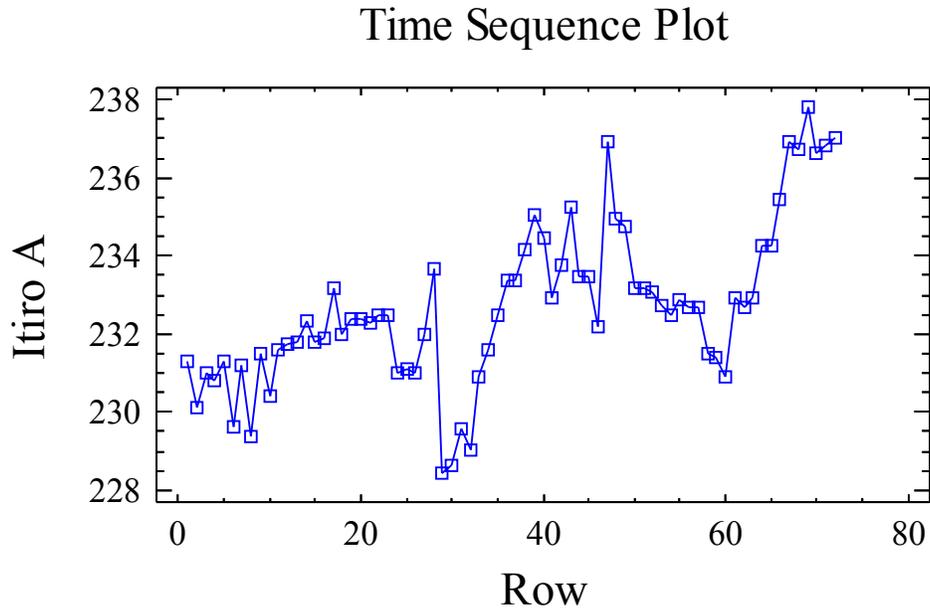


Figura 4: Tendencia del comportamiento de la corriente de tiro A

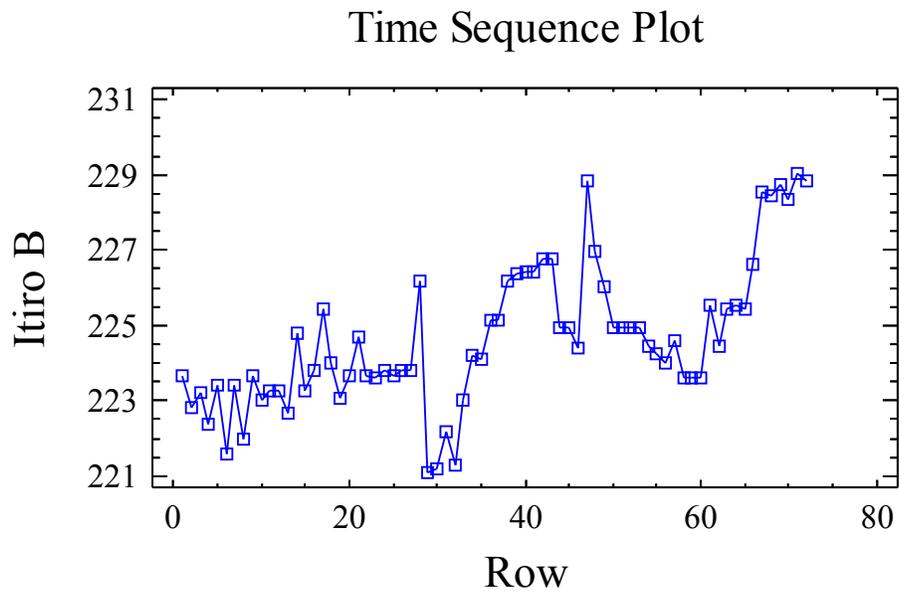


Figura 5: Tendencia del comportamiento de la corriente de tiro B

Time Sequence Plot

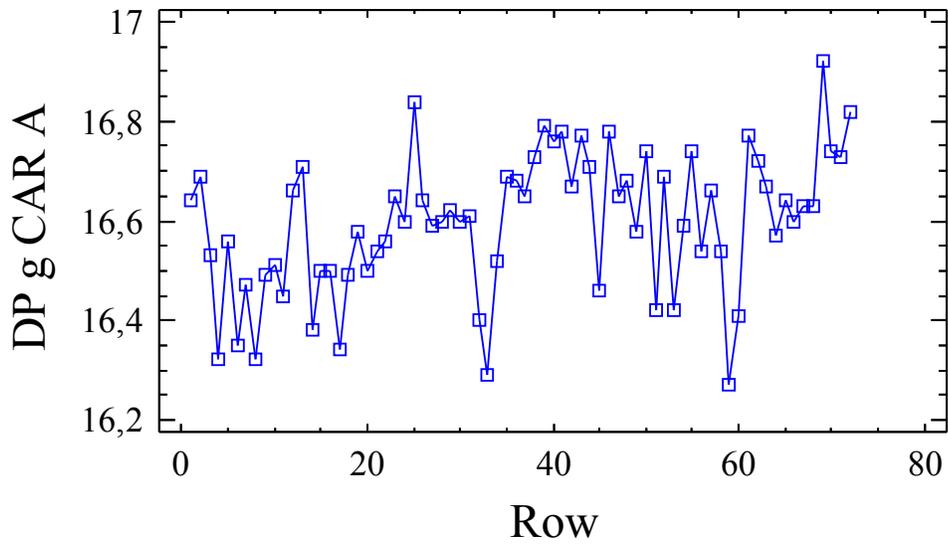


Figura 6: Tendencia del comportamiento de la caída de presión en el conducto de gases CAR A.

Time Sequence Plot

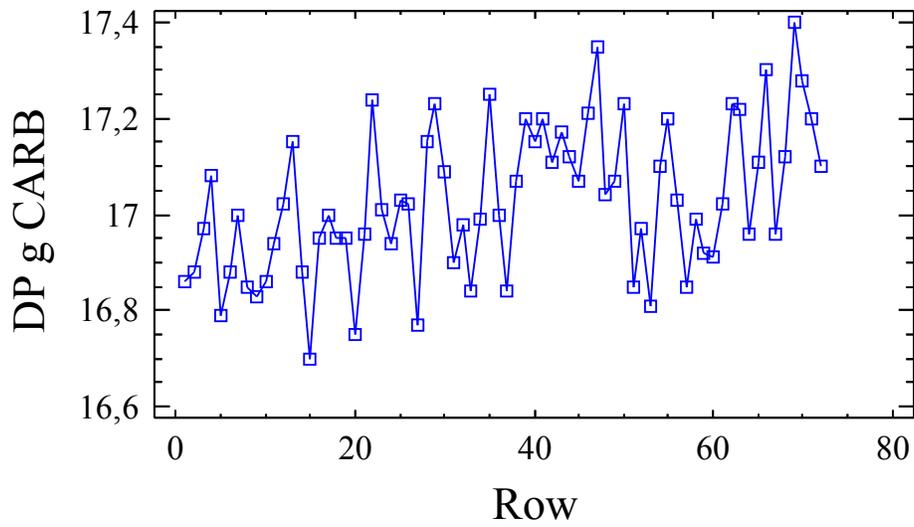


Figura 7: Tendencia del comportamiento de la caída de presión en el conducto de gases CAR B.

Al analizar las propiedades se realizaron las siguientes consideraciones:

- La **singularidad** no se tiene en cuenta en el análisis puesto que no se cumple en ninguna variable analizada, puesto que por la dinámica de trabajo de la planta la potencia eléctrica está constantemente cambiando, y este cambio es realizado por el despacho nacional, queda fuera del alcance del proceso, por lo que para un mismo valor del parámetro estructural las posibles variables de diagnóstico analizadas pueden tomar más de un valor.
- La propiedad **máxima información** se cumple en todas las variables analizadas porque existe una relación física muy estrecha entre el ensuciamiento y dichas variables, ya que como se sabe en la medida que sobre la superficie de las placas se deposita las suciedades que arrastran los gases, se incrementa el espesor de las incrustaciones, reduciéndose el diámetro equivalente de los conductos entre placas por lo que aumenta la caída de presión tanto en el conducto de gases como de aire, el consumo de corriente eléctrica en los ventiladores de tiro forzado aumenta, ya que los mismos realizan un mayor trabajo para vencer el aumento de presión en la descarga para mantener el mismo flujo de aire y el ventilador de tiro forzado para suministrar el mismo flujo de aire debe vencer el aumento de presión en la descarga, aumentando el porcentaje de apertura en la succión para garantizar el flujo de aire necesario.
- La propiedad **fácil medición** todas las variables analizadas lo cumplen por igual por las condiciones de automatización con que cuenta la planta.

En el análisis realizado a 15 muestras de intervalos entre sopleteos, se pudo comprobar que la variable % de apertura de la compuerta de tiro forzado para una misma carga no sigue el comportamiento que por lógica debe tener puesto que en condiciones de ensuciamiento de la caldera, para suministrar el mismo flujo de aire debe vencer el aumento de presión en la descarga, por lo tanto debe aumentar el porcentaje de apertura en

la succión para garantizar el flujo de aire necesario. Se pudo comprobar que esto es producto de problemas que existen actualmente con la medición de esta variable, ya en los momentos que se realiza el experimento se inhabilitó y se pasó a revisión por los especialistas.

En la variable caída de presión en el conducto de aire prácticamente no se observan cambios, por lo que se deja también fuera del análisis.

Las variables que quedan para determinar la variable de diagnóstico son la caída de presión por el conducto de gases por el CAR A y por el CAR B y la corriente de tiro por el CAR A y por el CAR B.

Con la ayuda de las dos herramientas antes mencionadas y teniendo en cuenta las propiedades **sensibilidad y estabilidad** se realiza el análisis a las posibles variables de diagnóstico.

En los gráficos 4, 5, 6 y 7 que muestra el comportamiento de la tendencia de las variables, se puede observar que las variables corriente de tiro A y B tienen mayor sensibilidad que las caídas de presión por el conducto de gases A y B por lo que se realiza el análisis de la estabilidad a través de la desviación estándar mostrada en el anexo 2 a través del Microsoft Excel, donde se muestra que la variable caída de presión de los gases presenta menor desviación estándar que las corrientes de tiro, por lo que es recomendable según la literatura (Luna, 1982) seleccionar este último para diagnosticar, por tener mayor estabilidad.

Análisis de las manifestaciones de estas variables en el ensuciamiento del Calentador de Aire Regenerativo.

Caída de presión por el conducto de gases y caída de presión por el conducto de aire

En la medida que se van depositando más cenizas en las láminas de los cestos, se incrementa la resistencia al paso del aire y de los gases, viéndose esto tanto por el lado gases como por el lado aire, y por consiguiente crea un aumento en el diferencial de presión.

Aumento del porcentaje de apertura de la compuerta de succión del VTF

El ventilador de tiro forzado para suministrar el mismo flujo de aire, en condiciones de ensuciamiento de la caldera, debe vencer el aumento de presión en la descarga, por lo tanto aumentando el porcentaje de apertura en la succión garantiza el flujo de aire necesario.

Aumento de la corriente del motor del VTF

En condiciones de ensuciamiento aumenta el consumo de corriente eléctrica en los ventiladores de tiro forzado, ya que realizan un mayor trabajo para vencer el aumento de presión en la descarga para mantener el mismo flujo de aire.

3.3 Metodología empleada para el cálculo de la caída de presión en los calentadores de aire regenerativo para el equipo limpio (БОТКАУИК, 1978).

$$\Delta P_l = 1.2 * \lambda_{tp} * \rho_g * \frac{w_g^2}{19.6} * \frac{h}{d_{eq}} \quad (18)$$

donde:

h es la altura de los cestos, en m.

d_{eq} diámetro equivalente, en m.

λ_{tp} factor de fricción, adimensional.

ρ_g densidad de los gases, en Kg/m³.

w_g velocidad de los gases de combustión, en m/s.

$$\lambda_{tp} = 0.35 * Re^{-0.25} \text{ si } Re \geq 1400 \quad (19)$$

$$Re = \frac{w_g * d_{eq}}{\gamma_g} \quad (20)$$

$$\gamma_g = \frac{\mu_g}{\rho_g} \quad (21)$$

$$\rho_g = 0.998 * \exp(-0.0013 * T_{gm}) \quad (22)$$

$$\mu_g = 3 * 10^{-8} * T_{gm} + 2 * 10^{-5} \quad (23)$$

$$W_g = \frac{G_g}{A_{flujog} * \rho_g} \quad (24)$$

$$A_{flujog} = 0.785 * (D_r)^2 * x_g * K_r * K_l * n_{car} / 2 \quad (25)$$

$$\lambda_{ip} = \frac{90}{Re} \text{ si } Re \leq 1400 \quad (26)$$

Re número de Reynold, adimensional.

μ_g viscosidad dinámica de los gases, en Pa.s.

γ_g viscosidad cinemática de los gases, en m²/s.

G_g flujo másico de los gases de combustión que pasan por el CAR, Kg/s.

A_{flujog} área de flujo de los gases, m².

x_g coeficiente que caracteriza la sección transversal para el paso de los gases por el CAR.

K_r es un coeficiente que tiene en cuenta la sección ocupada por los tabiques y el cubo de la rueda del CAR, adimensional

K_l es un coeficiente que tiene en cuenta la sección del rotor ocupada por las láminas.

N_{car} es el número de CAR que trabajan en paralelo.

Las ecuaciones utilizadas en esta metodología para el cálculo de las propiedades físicas de los diferentes fluidos fueron tomadas de (Falume, 2001).

3.3.1 Aplicación de la metodología empleada para el cálculo de la caída de presión en los calentadores de aire regenerativo para condiciones de limpieza y obtención de modelo de las caídas de presión en función de la carga.

En los epígrafes 3.2.1 y 3.2.2 se determinó que la variación de la presión en los Calentadores de Aire Regenerativo de la Central Termoeléctrica Antonio Guiteras, es la variable más adecuada para realizar el diagnóstico técnico del equipo, por lo que es importante conocer cual es el comportamiento de la caída de presión en el equipo cuando el mismo está limpio.

Para obtener este comportamiento se aplicó la metodología expuesta en el epígrafe 3.3.

La metodología para el cálculo de la caída de presión se implementó el 15 de Julio del 2003, valores que se pueden considerar limpios, puesto que en días previos se realizó un mantenimiento preventivo planificado como se explicó en (Rodríguez, 2005), es decir el CAR está acabado de salir de una limpieza con agua, y entre limpiezas con vapor. En el programa computacional *Microsoft Excel* se implementó la metodología, y con el juego de datos resultante se fue a *STATGRAPHSC* y se ajustó un modelo de caída de presión en función de la carga.

El modelo ajustado es el siguiente para el CAR A:

$$DpA = -9.08851 + 0.0694964 * PotGen \quad Co = 98\%$$

y para el CAR B

$$DpB = -5.34701 + 0.0564398 * PotGen \quad Co = 94\%$$

El comportamiento gráfico de dichos modelos se puede observar en el anexo 3.

Validación de los modelos obtenidos:

Para llevar a cabo esta validación se tomaron los modelos obtenidos del día 15 de julio y se implementaron en los datos del 28 de septiembre, obteniéndose un juego de datos de la caída de presión (DP) para ese día. Con los valores de los datos de la caída de presión que fueron medidos en la planta y los implementados el 28 de septiembre del 2003, se calculó el error mediante la siguiente fórmula:

$$\text{error} = \frac{\Delta P(15/07/03) - \Delta P(28/09/03)}{\Delta P(15/07/03)} * 100$$

donde:

$\Delta P(\text{datos})$, resultado de la caída de presión para los datos medidos en la planta el 28 de septiembre.

$\Delta P(\text{implementado})$, resultado de la variación de presión por el modelo implementado del día 15 de julio en el día 28 de septiembre del 2003.

Obteniéndose valores menores del 5%, ver anexo 4, lo que indica que los modelos obtenidos del día 15 de julio son válidos y a la vez representativos para el tamaño de muestra a analizar, ver anexo 5.

3.4 Obtención de modelos para las caídas de presión límites en función de la carga que definen el momento más adecuado para la realización del mantenimiento en los Calentadores de Aire Regenerativo.

Los modelos obtenidos de las caídas de presión de los gases en los CAR para condiciones de limpieza se tomaron como punto de partida para el cálculo de los valores límites que definen el ensuciamiento de estos equipos como se explica a continuación.

En los manuales de operación de la central termoeléctrica viene especificado que el nivel de suciedad de los cestos del CAR está dado cuando la diferencia de presión del lado de los gases alcanza de 1,25 a 1,30 la presión nominal, pero por el grado de complejidad que tiene la operación de la planta actualmente, con un cambio constante de la carga, es difícil sólo tener en cuenta la carga nominal, pues todos los parámetros varían con la misma y es por eso que en este trabajo se considera partir de los valores de caída de presión para condiciones de limpieza en función de la carga según modelos obtenidos, para obtener los valores límites siguiendo el criterio del 30 % por encima de cada una de las caídas de presiones tomadas como valores nominales para cada una de las diferentes cargas en los CAR.

$$\Delta P_{\text{Límite}} \text{ CAR A} = -11,815 + 0,09034614 * \text{PotGen.} \quad 97 \%$$

$$\Delta P_{\text{Límite}} \text{ CAR B} = -8,73254 + 0,0851325 * \text{PotGen.} \quad 95 \%$$

Estos modelos no se validaron porque se partió para su ajuste de valores provenientes de modelos validados y con un alto coeficiente de correlación.

Para comprobar si estos valores eran lógicos y si tenían validez se revisaron varios juegos de datos históricos en la planta y se verificó que realmente cuando estas magnitudes toman estos valores ya el equipo está próximo a contribuir a una limitación de la carga por el efecto de su ensuciamiento. Además se consultaron algunos expertos y

manifestaron que los modelos obtenidos daban un resultado adecuado al valor que toman estos equipos cuando ya están en el límite para comenzar a afectar la presión del horno.

3.4.1 Aportes y beneficios de los modelos obtenidos:

Los modelos obtenidos permiten realizar los siguientes análisis:

1.- Si se grafica el comportamiento de la caída de presión en el equipo de estudio entre dos sopleteos seguidos tomados del sistema de adquisición de datos se puede apreciar que en todo momento tiene un comportamiento por encima del que presenta la caída de presión que debía haber si el equipo estuviera limpio, ver figuras de la 8 y 9.

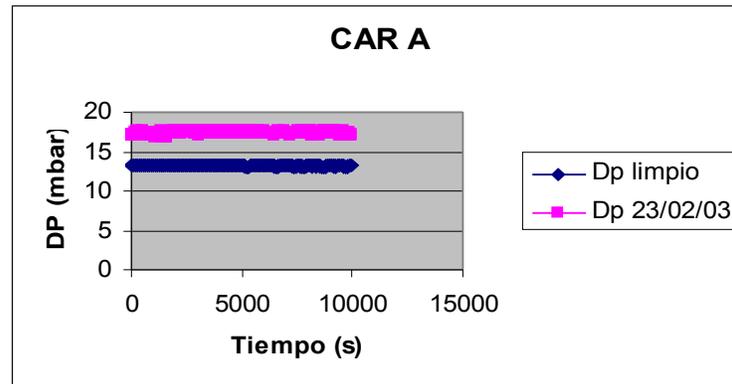


Figura 8: Comportamiento de la caída de presión en el CAR A para un intervalo entre sopleteos el día 23/02/03.

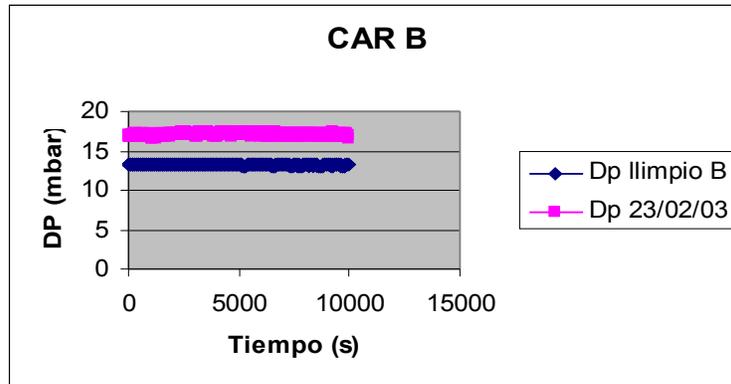
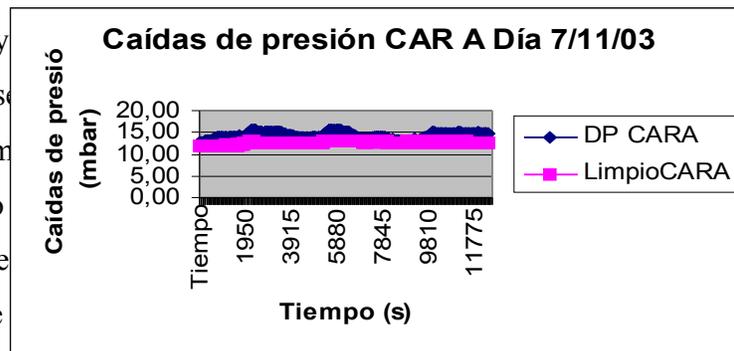


Figura 9: Comportamiento de la caída de presión en el CAR B para un intervalo entre sopleteos el día 23/02/03.

En los gráficos anteriores no se nota en los intervalos analizados un incremento como debía de existir y esto refleja que si a los equipos no se les da mantenimiento fuera mayor, por tal motivo cuando con vapor sin que su estado se determina que (2005) donde el vapor de los CAR debe ser de lo que se esta aplicando.



2.- Se puede graficar del equipo con respecto a si el mando como se observa en las figuras que pasan los días va incrementando la presión que representa como va aumentando el en

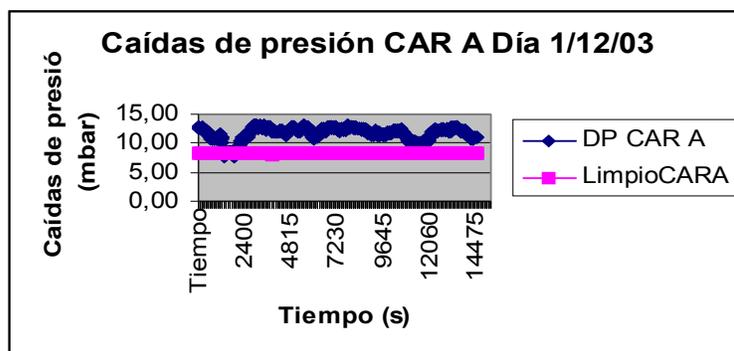
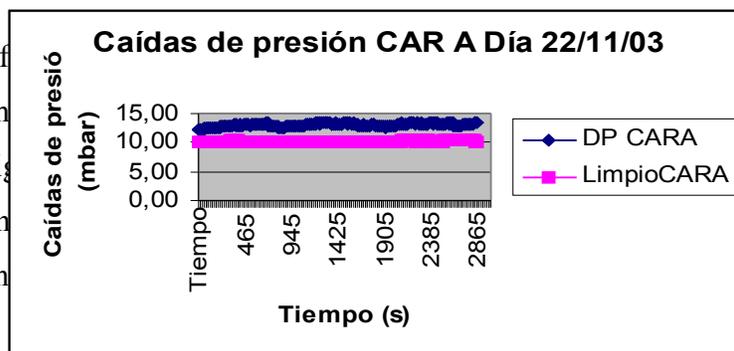


Figura 10: Gráfico de líneas que muestra las caídas de presión para el sistema CAR B.

El sistema CAR B está diseñado para resistir las caídas de presión de agua para CAR A.

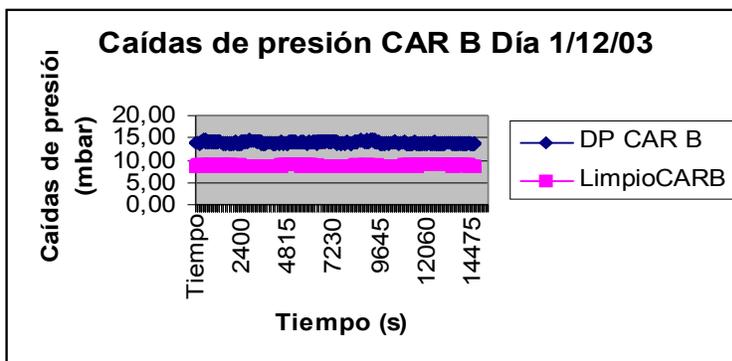
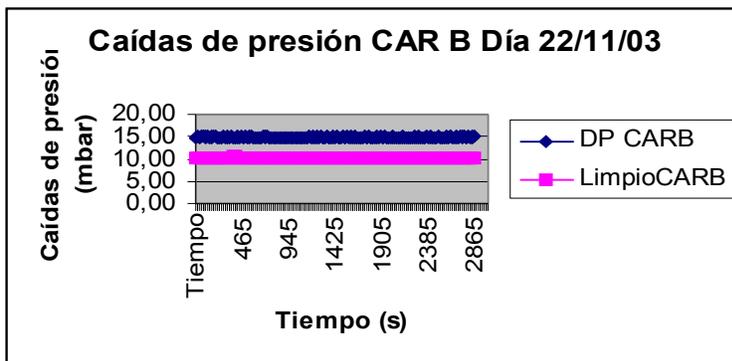
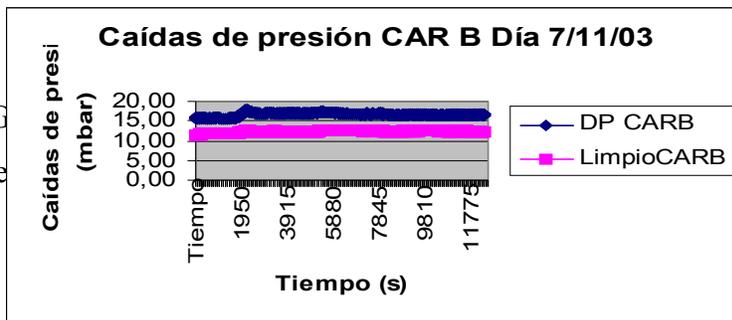


Figura 11: Gráficos de caídas de presión de comportamiento normal contra caídas de presión para el equipo limpio para diferentes días entre limpiezas con agua para CAR B.

Estos dos análisis anteriores utilizan en el seguimiento y comparación el modelo obtenido para el equipo limpio, pero el modelo más útil e interesante es el que reporta la curva de comportamiento de la caída de presión en función de la carga para el estado en que el equipo está a punto de estar fuera de parámetros y comenzar a afectar el trabajo del generador de vapor por ensuciamiento como se muestra en el punto siguiente.

3.- Con las condiciones que la planta tiene en estos momentos se propone que realicen un seguimiento con los promedios diarios en el software *Microsoft Excel* utilizando los modelos obtenidos para poder comparar diariamente cuan alejados están del comportamiento limpio y cuan próximos al estado límite, por encima del cual no deben pasar, para que no tengan que limitar la planta por alta presión en el horno. Estos modelos de caídas de presión límites en función de la carga en los CAR permiten al personal de operación tener una guía en el seguimiento diario que constituiría una base para la toma de decisión en cuanto a la limpieza con agua de estos equipos.

Un seguimiento de este tipo se realizó a datos tomados en la planta como se muestra en la figura 12.

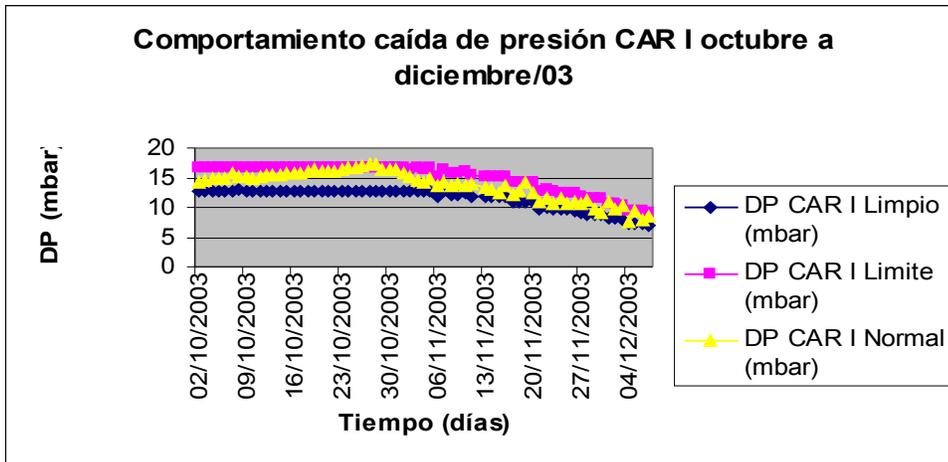
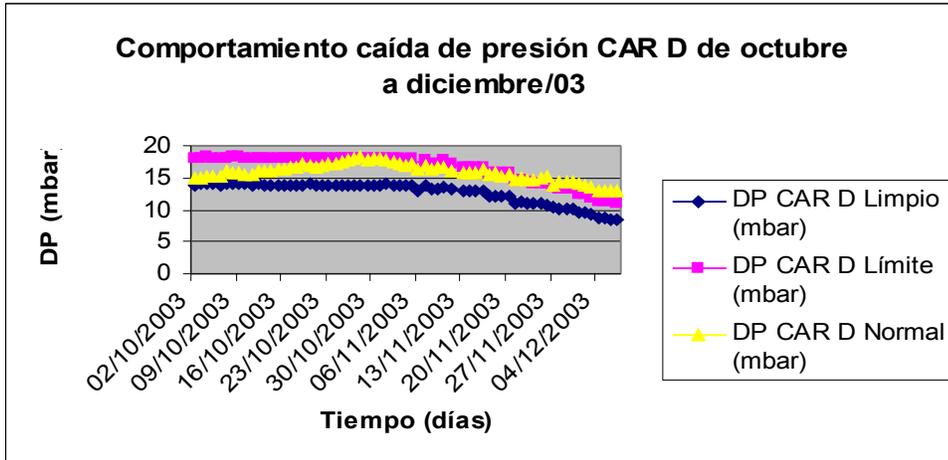


Figura 12: Comportamiento de la caída de presión en los CAR para un período entre limpiezas con agua con la referencia de los modelos obtenidos.

Los datos para estos análisis fueron tomados del promedio diario que lleva la planta y comienzan el 1ro de octubre hasta el 7 de diciembre que se realiza el mantenimiento y por supuesto la limpieza con agua, los datos de septiembre no pudieron ser incluidos puesto que se presentó problemas al tomar los datos históricos.

En el figura anterior se puede ver como en un mismo gráfico se puede tener un seguimiento del comportamiento en tiempo real de la variable de diagnóstico con respecto al comportamiento que debía tener el equipo si estuviera limpio y el límite sobre el cual no debe pasar dicha variable, pues a partir de ahí comienza a limitar la planta. Se puede observar como ya en el CAR D ya desde el día 22 de noviembre ya la variable caída de presión alcanzaba el límite. Hay que tener en cuenta que todo el tiempo este gráfico trabaja con la carga que en ese momento tiene la planta pues los modelos están en función de la misma también.

Conclusiones:

Con el presente trabajo se cumplen los objetivos propuestos y se arriban a las siguientes conclusiones:

1. Se muestra una metodología para el cálculo del tamaño de la muestra a investigar que a la vez calcula los errores presentes en las mediciones, lo que constituye una herramienta útil a la hora de planificar una experimentación. Se explica además dicha metodología en el caso concreto de la experimentación realizada en los CAR de la CTE Antonio Guiteras donde el cálculo del error resultó ser menor del 3 % en todas las variables analizadas, lo que permite evaluar que el trabajo realizado tiene confiabilidad.
2. Se exponen dos metodologías que se pueden tener en cuenta a la hora de seleccionar variables de diagnóstico y se aplica en el caso concreto de los CAR de la CTE Antonio Guiteras donde resultó que la variable a tener en cuenta a la hora de realizar el diagnóstico de dicho equipo y que se valoró a través de los dos métodos expuestos es la caída de presión por el conducto de gases.

3. Se expone metodología empleada para obtener los modelos de la caída de presión en función de la carga para condiciones de limpieza para el Calentador de Aire Regenerativo con un error inferior del 5 %.
4. Se expone metodología empleada para obtener los modelos de la caída de presión en función de la carga para estado límite de ensuciamiento para los Calentadores de Aire Regenerativo.
5. Se expone los pasos necesarios para implementar el seguimiento de la caída de presión en los Calentadores de Aire Regenerativos en funcionamiento normal contra caída de presión prevista para equipos limpios, comprobándose que los mismos se están limpiando con vapor con más frecuencia de la que necesitan.
6. Se exponen los pasos a seguir para implementar el seguimiento de las caídas de presión en los CAR teniendo en cuenta los modelos obtenidos y la importancia de los mismos para la toma de decisión del momento más oportuno para realizar la limpieza con agua.

Bibliografía:

ASINEL (Asociación de Investigación Industrial Eléctrica), 1985, Colección de textos sobre Centrales Termoeléctricas convencionales y nucleares. Grupo C. Volumen 01 Calderas de Vapor.

БОТКАУИК. И.А, 1978. РЕГЕНЕРАТИВНЫЕ ВОЗДУХОПОДРЕВАТЕЛИ ПАРОВЕНЕРАТОРОВ. Москва.

Domínguez Alonso F.J, 2002. Modelación, Simulación y Optimización del proceso de transferencia de masa que ocurre en la cristalización de azúcar por enfriamiento a nivel industrial. Tesis doctoral, ISPJAE, La Habana.

Ibarra M. F., 1998, "Metodología de la Investigación Social". Editorial Pueblo y Educación.

Jorge Canés, E., 1999. Aditivo; alternativa para reducir la corrosión y el ensuciamiento en las zonas de baja temperatura del generador de vapor en la CTE “Antonio Guiteras”; al quemar combustible de alto contenido de vanadio, Tesis presentada en opción al título de máster en Corrosión, Universidad de Matanzas, Matanzas.

Luna, H., 1982. Explotación técnica de automóviles”, Ediciones ENSPES, La Habana.

Munequele, Atanasio,, 2000 ”Análisis de los factores de la quema del crudo mejorado en la CTE José Martí”, Trabajo de Diploma, Universidad de Matanzas.

Oliva, Luís y otros, 1988. Explotación y materiales constructivos del generador de vapor, Ediciones ISPJAM, Santiago de Cuba.

Preobrazhensky V. P., 1980. "Measurements and Instrumentation in Heat Engineering. Edit. Mir, Moscú.

Rodríguez Nogueira T., El mantenimiento predictivo con enfoque de Producción más Limpia en agregados del Generador de Vapor de Centrales Termoeléctricas, Tesis Doctoral, 2005.

SOMCE, 1996. Tomo I. Dpto de Mantenimiento Dirección de Generación Unión Eléctrica.

Vizcón Toledo R, 1997, “Determinación de coeficientes y recomendaciones para el diseño del sobrecalentador de vapor convectivo en calderas bagaceras”, Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad de Matanzas.

Vizcón Toledo R., 2002, Notas de clases Curso de Explotación de Generadores de Vapor Industriales, Maestría de Ingeniería Termoenergética. CECYEN. UMCC.

Anexo 1: Nombre de las abreviaturas utilizadas en la tabla 2.

| Abreviaturas | Nombres |
|------------------------|---|
| Tge CAR B | Temperatura de los gases a la entrada del CAR B |
| Tge CAR A | Temperatura de los gases a la entrada del CAR A |
| Tgs CAR B | Temperatura de los gases a la salida del CAR B |
| Tgs CAR A | Temperatura de los gases a la salida del CAR A |
| Tas CAR B | Temperatura del aire a la salida del CAR B |
| Tas CAR A | Temperatura del aire a la salida del CAR A |
| Tae CAR B | Temperatura del aire a la entrada del CAR B |
| Tae CAR A | Temperatura del aire a la entrada del CAR A |
| Pge CAR A | Presión de los gases a la entrada del CAR A |
| Pge CAR B | Presión de los gases a la entrada del CAR B |
| Pgs CAR A | Presión de los gases a la salida del CAR A |
| Pgs CAR B | Presión de los gases a la salida del CAR B |
| O ₂ a CAR A | Oxígeno entrada CAR A |
| O ₂ a CAR B | Oxígeno entrada CAR B |
| O ₂ d CAR A | Oxígeno salida CAR A |
| O ₂ d CAR B | Oxígeno salida CAR B |
| Fa CAR A | Flujo de aire CAR A |
| Fa CAR B | Flujo de aire CAR B |
| I de Tiro A | Corriente de tiro A |
| I de Tiro B | Corriente de tiro B |
| Carga Boque | Potencia Generada. |

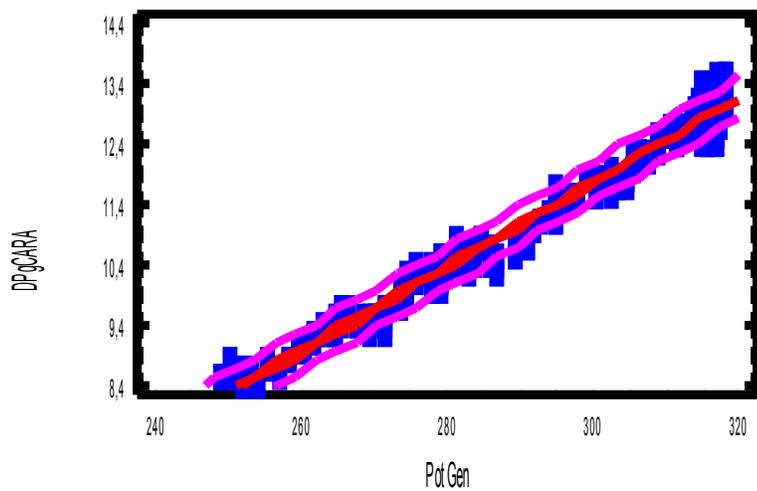
Anexo 2: Descripción estadística de las variables analizadas en los CAR.

| <i>Itiro A</i> | <i>% Apert ValvA</i> | <i>DP g CAR A</i> | <i>DP a CARA</i> |
|---------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|
| Media | 232,68 | 63,842 | 16,595 |
| Error típico | 0,2434 | 0,1000 | 0,0166 |
| Mediana | 232,47 | 63,68 | 16,605 |
| Moda | 232,47 | 63,85 | 16,6 |
| Desviación estándar | 2,0658 | 0,8488 | 0,1414 |
| Varianza de la muestra | 4,2675 | 0,7205 | 0,0200 |
| Curtosis | 0,1696 | 0,3112 | -0,286 |
| Coefficiente de asimetría | 0,4619 | -0,113 | -0,339 |
| Rango | 9,36 | 4,12 | 0,65 |
| Mínimo | 228,44 | 61,36 | 16,27 |
| Máximo | 237,8 | 65,48 | 16,92 |

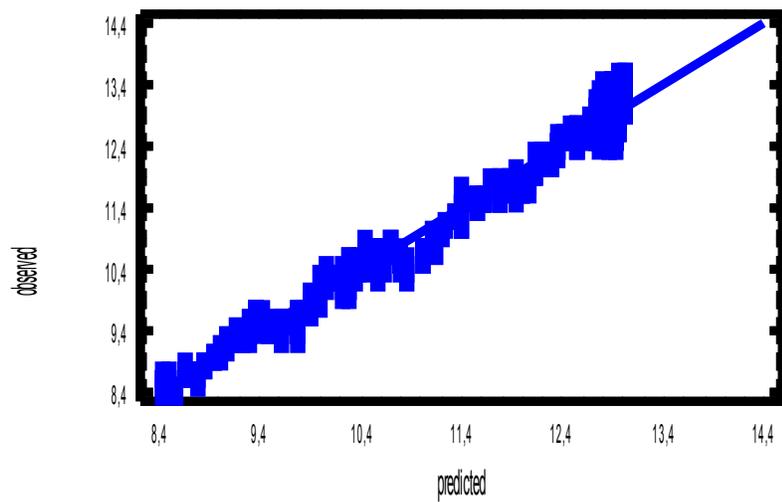
| <i>Itiro B</i> | <i>% Apert ValvB</i> | <i>DP g CARB</i> | <i>DP a CARB</i> |
|---------------------|--------------------------|------------------|----------------------|
| Media | 224,64 | 68,837 | 17,028 |
| Error típico | 0,2239 | 0,0932 | 0,0181 |
| Mediana | 224,33 | 68,67 | 17,015 |
| Moda | 224,95 | 68,48 | 17,2 |
| Desviación estándar | 1,9006 | 0,7913 | 0,1542 |
| | 5739 | 6348 | 4199 |

Anexo 3: Comportamiento gráfico de los modelos de DP en el CAR A y B

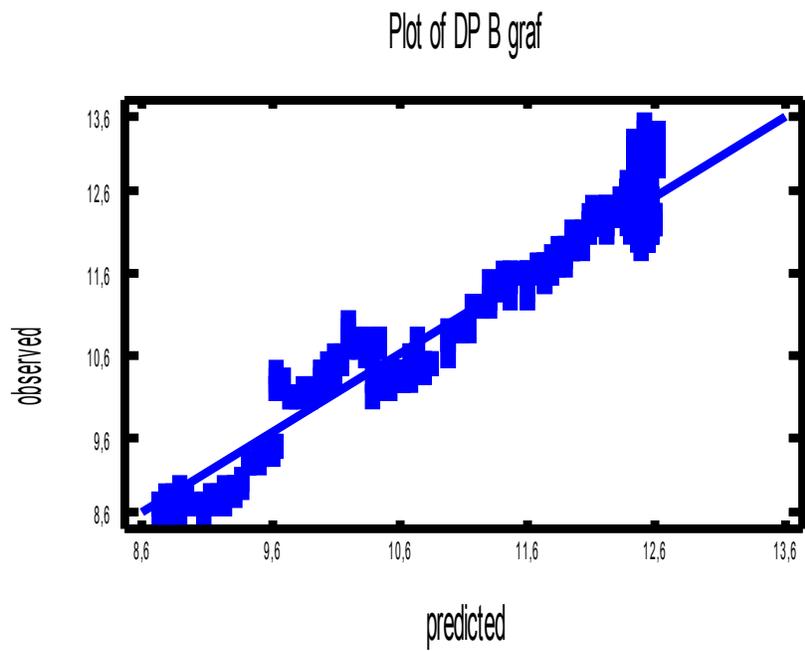
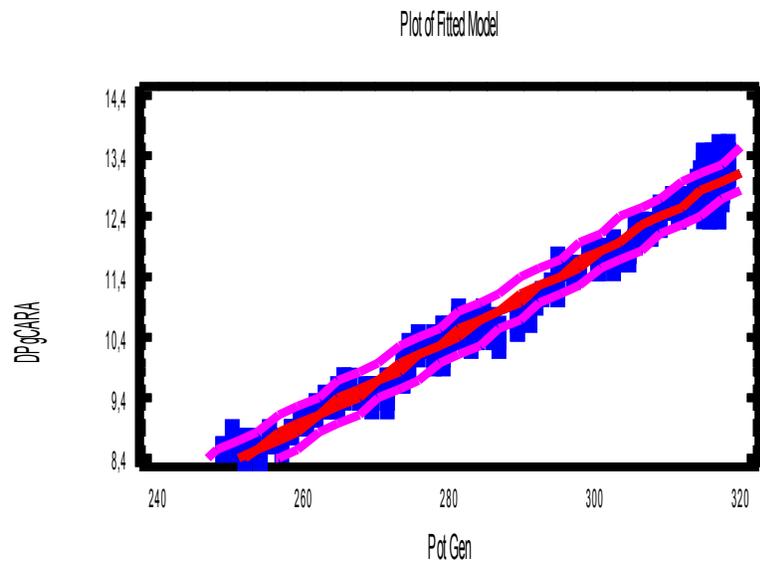
Plot of Fitted Model



Plot of DPgCARA

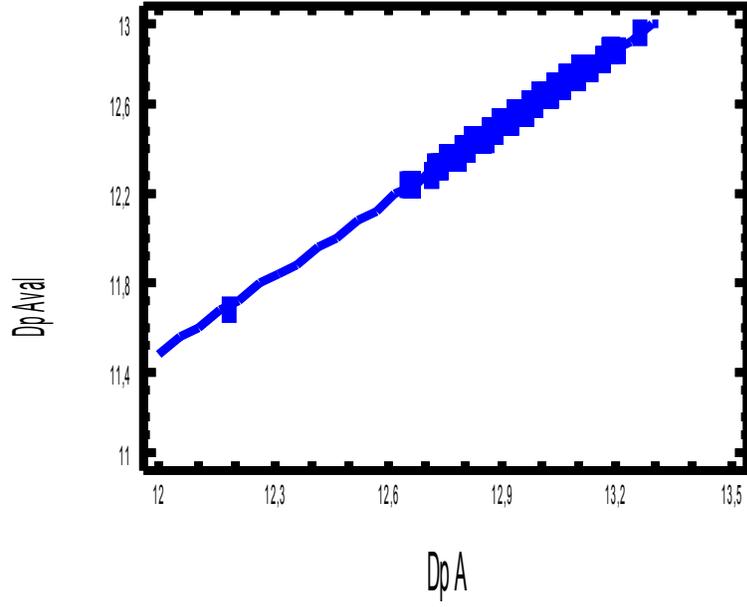


Anexo 3 Continuación

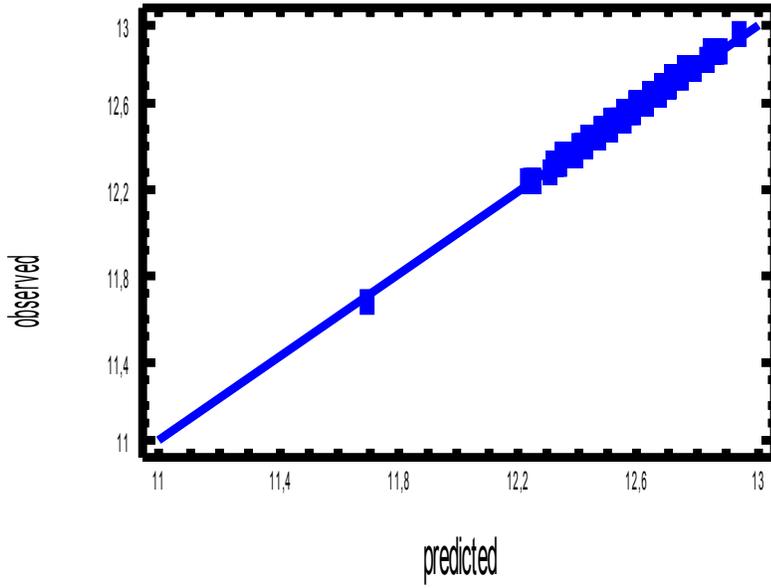


DP A

Plot of Fitted Model



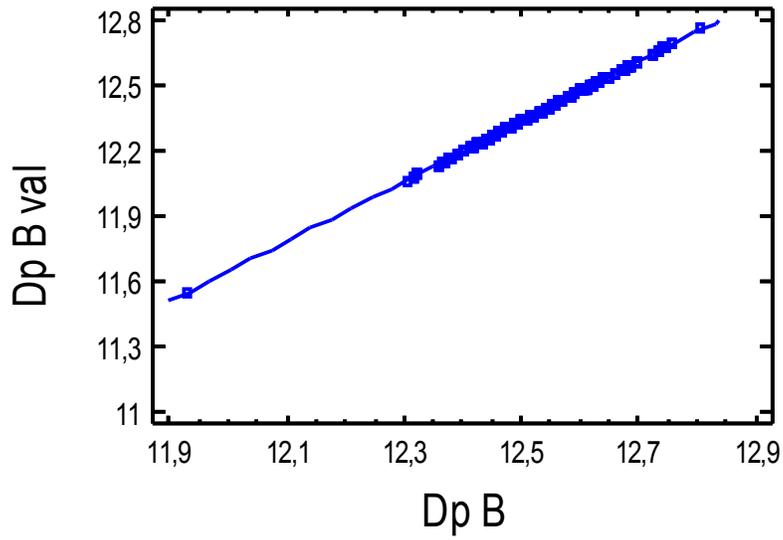
Plot of Dp A val



Anexo 5: Continuación.

DP B

Plot of Fitted Model



Plot of Dp B val

