

DISPOSITIVO PARA EL CONTROL OPERACIONAL DEL DESEMPEÑO

ENERGETICO DE CALDERAS PIROTUBULARES

CAMPO TÉCNICO

5

La presente invención se relaciona con un dispositivo que permite la identificación, sensado y recuperación en línea de las pérdidas energéticas y los costos operaciones asociados con calderas pirotubulares, los cuales se producen por la variación de la eficiencia estacional del equipo. Así, el presente equipo consta de

10 un dispositivo con sensores de medición de parámetros operacionales como: flujo de vapor, temperatura de agua de alimentar, flujo de combustible, conductividad del agua de calderas, temperatura de salida de gases, % de O₂, ppm de CO en gases de chimenea. Además consta de un sistema de validación termodinámica y estadístico de la información, con software de adquisición y procesamiento de la

15 información, elaboración de línea base de desempeño energético, establecimiento de rangos operativos de las variables significativas a controlar, monitoreo y seguimiento del indicador de desempeño, análisis de las desviaciones del consumo de energía respecto a la línea base online e identificación de sus causas y emisión de recomendaciones de medidas, con la evaluación de sus impactos en

20 energía, emisiones de GEI y respectivos costos.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

En la actualidad, el uso de calderas de tipo pirotubulares es muy ampliamente

25 conocido y aplicado, en donde, en un principio se considera que dichas calderas son aparentemente muy sencillas desde el control y su operación. Sin embargo, estas y sus equipos accesorios son factores de riesgo por la energía térmica y de presión asociada, por lo que en los sitios donde se hace uso de calderas, tales

como: hospitales, clínicas, restaurantes, clubes, hoteles, lavanderías, industrias, entre otros, se deben extremar las medidas de seguridad tanto en los equipos como en la operación o mantenimiento de los mismos para controlar y evitar que tales riesgos se transformen en accidentes o incidentes que afecten la salud, la vida de las personas, instalaciones o ambiente.

En el mercado existen empresas que producen dispositivos para el control operacional de parámetros que pueden afectar la disponibilidad y la calidad de la producción de vapor de estos equipos. Ejemplo de ello son dispositivos para el control online de la relación aire/combustible; dispositivos para el control del régimen de purgas de la caldera que mantiene la calidad del agua en los parámetros requeridos para evitar fenómenos de incrustación o espumado; dispositivos para el control del nivel óptimo de agua en la caldera; dispositivos para garantizar el arranque y operación segura de la caldera.

Sin embargo, estos dispositivos trabajan de forma independiente y tienen como objetivo directo el control de los parámetros que monitorean, en valores preestablecidos. Además, están dirigidos principalmente a lograr una operación segura de la caldera, pero no integran sus valores de control para mejorar el desempeño energético o la eficiencia estacional del generador de vapor.

En este sentido, se hace necesario contar con algún tipo de dispositivo que permita integrar los parámetros operativos para garantizar la eficiencia y seguridad del equipo y no poner en riesgo la integridad del sitio de trabajo, y más importante, no comprometer la seguridad de los operarios o las personas que se encuentran en las instalaciones donde se ubica la caldera.

Así las cosas, en el estado del arte existe una pluralidad de divulgaciones relacionadas con dispositivos adecuados para el monitoreo de calderas pirotubulares, dentro de los que se encuentra el documento US 5429059 que describe una caldera pirotubular encendida con carbón y un método para convertir

5 una caldera pirotubular encendida con gas en una caldera pirotubular encendida con carbón, en donde la caldera convertida incluye una pluralidad de zonas de combustión dentro de los tubos y estequiometría controlada dentro de las zonas de combustión. Esta conversión se lleva a cabo de una forma eficiente en términos económicos y la eficiencia total de la operación de la caldera se mejora usando

10 combustible de carbón

Sin embargo, esta anterioridad presenta la desventaja que no menciona un dispositivo para mejorar y controlar automáticamente la eficiencia de la caldera, sino que se refiere a la caldera como tal y al método para convertirla de gas a

15 carbón, lo cual es completamente conocido en el arte previo y es evidente para un experto en la materia. Adicionalmente, esta caldera no cuenta con ningún tipo de sensores que permita detectar y controlar la operación de la caldera, lo cual es indeseable y puede llevar a problemas considerables.

20 De otra parte, se encuentra el documento US 6564756 que define una caldera para generar vapor y/o agua caliente, la cual tiene un tanque que contiene agua, una salida ubicada cercana a la parte superior del tanque, y una entrada de retorno ubicada cercana a la parte inferior del tanque. Un conducto de combustión sustancialmente horizontal en relación de transferencia de calor con el agua se

25 extiende a través del tanque cercano a la salida. Una fuente de calor en comunicación con el conducto de combustión calienta y lleva el gas calentado al interior del conducto de combustión. Un juego de conductor de calor en relación de transferencia de calor con el agua y en comunicación con el conducto de

combustión, se extiende a través de dicho tanque por debajo del conducto de combustión. Cuando el gas calentado es llevado al interior del conducto de combustión, el gas calentado fluye a través del conducto de combustión, y luego fluye hacia abajo y luego en sustancialmente transversal a través de los conductos de fuego, y el calor es transferido al agua a medida que el gas calentado fluye a través del conducto de combustión y los conductos de fuego

No obstante, al igual que con el documento mencionado anteriormente, esta anterioridad indica únicamente una caldera como tal, la cual no incluye ningún tipo de dispositivo o elemento para mejorar la eficiencia de la misma, es decir, que no se indica el uso de sensores que permitan controlar de forma automática el funcionamiento de dicha caldera, lo que correspondería a una caldera normal conocida y disponible comercialmente.

Ahora bien, la solicitud de patente internacional con publicación WO 2005021122 divulga una caldera pirotubular que se basa en el principio que un conducto mejorado reemplaza varios tubos pequeños convencionales que se encuentran en este tipo de calderas, en donde el conducto mejorado incluye una pluralidad de aletas, cada una de las cuales se extiende a través de una pared del conducto. El conducto mejorado también incorpora una pluralidad de tubos a lo largo de su superficie externa, a través de los cuales fluye un medio de transferencia de calor. Este diseño mejora la relación de transferencia de calor entre el fluido caliente y el medio de transferencia de calor al suministrar una relación de transferencia de calor continua con el medio de transferencia de calor, aumentando el área superficial involucrada en la transferencia de calor y mejorando los acoples de convección/conducción.

Sin embargo, el dispositivo o aparato descrito en esta anterioridad presenta la desventaja que no cuenta con una serie de sensores u otros elementos para mejorar la eficiencia, sino que se hace todo el proceso de monitoreo por medio de una disposición de elementos, pero sin contar con algún tipo de control o sensado automático de las variables involucradas, lo cual no le permite realizar el monitoreo y la mejora de la eficiencia energética en línea y la hace similar a los comercialmente disponibles, presentando las desventajas que se mencionan en el presente documento.

10 Finalmente, se encuentra el documento US 8631769, el cual enseña una caldera mejorada para generar vapor, la cual incluye un alojamiento que tiene un extremo proximal y un extremo distal, con un puerto de entrada de agua en el extremo proximal. Una pluralidad de tubos de fuego se disponen en sentido de la longitud en el alojamiento, y los tubos se extienden sustancialmente la longitud del alojamiento entre el extremo proximal y el extremo distal. Los tubos son utilizados para pasar el gas de flujo calentado a través del alojamiento. Un par de difusores laterales se fijan a la superficie interna del alojamiento y se extienden por lo menos parcialmente hacia abajo la longitud del alojamiento para separar una porción del último paso de los tubos cerca del alojamiento. Por lo menos dos difusores seccionales se ubican adyacentes a los difusores laterales para dirigir el flujo de agua opuesto al flujo de gas en la parte separada de los tubos

No obstante, al igual que con los documentos mencionados previamente, esta anterioridad menciona una caldera como tal, sin referirse o sugerir un dispositivo que permita mejorar de forma automática la eficiencia y operación de dicha caldera, al tiempo que no menciona ni divulga nada con relación al uso o aplicación de sensores para controlar y sensar la operación y así mejorar la eficiencia de la caldera.

De otra parte y con relación a divulgaciones en Colombia, se encuentra la solicitud Colombiana NC2016/0000051, titulada “Método y Dispositivo Para la Gestión Integral de la Energía”, el cual, como su nombre lo indica, divulga un método y un
5 dispositivo específicamente diseñado para gestionar la energía en un sistema, tomando en cuenta el consumo de la misma. Sin embargo, esta anterioridad no divulga ni se refiere de forma específica a dispositivos para control de calderas pirotubulares, ni a las calderas como tal.

10 Teniendo en cuenta esta información definida en los párrafos anteriores, el estado del arte divulga una serie de calderas pirotubulares que tienen una eficiencia mejorada en comparación con las calderas existentes en el estado del arte, donde esta mejora en eficiencia se logra en algunos casos gracias a la ubicación de una pluralidad de aletas, y en otros casos es debido a la forma como fluye el gas o el
15 flujo que calienta en los tubos, pero donde todos los documentos del estado del arte se refieren a características estructurales y disposición de elementos para lograr dicha mejora en eficiencia y operación.

No obstante, en el estado de la técnica no existe una divulgación que enseñe el
20 uso o implementación de un dispositivo externo a las calderas pirotubulares, en donde dicho dispositivo esté compuesto por una pluralidad de sensores y elementos que permitan hacer un sensado y control automático y en línea de las variables de las calderas, con el fin de recuperar las pérdidas energéticas y aumentar la eficiencia del equipo. Por el contrario, todos los documentos del
25 estado de la técnica se refieren directamente a las calderas pirotubulares, sin mencionar el uso de sensores o demás elementos que permitan controlar y mejorar la operación de las mismas de forma integral.

De este modo, es claro para el experto en la materia que en el estado del arte existe un problema relacionado con la necesidad de incrementar de forma automática la eficiencia operativa de las calderas pirotubulares, en donde hasta el día de hoy no existe un dispositivo de este tipo que pueda sensor en línea el
5 impacto de todas las variables típicas de operación y del cambio del estado técnico de estos equipos en el tiempo, sobre el incremento del consumo de energía de los mismos por la disminución de su eficiencia, así como indicar la viabilidad técnica y económica de intervenir el equipo con medidas de optimización operacional y/o de mantenimiento para recuperar las pérdidas que se están
10 produciendo.

Es importante destacar que las disminuciones de la eficiencia de la caldera y sus causas guardan una estrecha relación con eventuales fallas técnicas que pueden afectar la integridad y seguridad operacional del equipo, por lo que el control de la
15 eficiencia es una acción preventiva de los riesgos asociados a accidentes o incidentes que afecten la salud, la vida de las personas, instalaciones o ambiente.

De acuerdo con lo anterior, es claro y evidente que en el estado del arte existe una necesidad por diseñar e implementar un dispositivo externo que permita mejorar la
20 eficiencia de calderas pirotubulares de una forma completamente automática, es decir, donde se cuente con elementos o componentes externos que permitan hacer un monitoreo constante del funcionamiento de la caldera, al tiempo que se puedan tomar decisiones sobre las variables involucradas en dicha caldera, mediante el ajuste y control de dichas variables, todo esto sin contar con la
25 presencia de un operario de forma constante, sino llevando a cabo el proceso de una forma totalmente automatizada y autónoma.

RESUMEN DE LA INVENCION

La presente invención está dirigida a un dispositivo que permite identificar, sensar y recuperar en línea las pérdidas energéticas y los costos operacionales de estas calderas que se producen por la variación de la eficiencia estacional del equipo, en
5 donde dicho producto consta de un dispositivo con sensores de medición de parámetros operacionales como: flujo de vapor, temperatura de agua de alimentar , flujo de combustible, conductividad del agua de calderas, temperatura de salida de gases, % de O₂, ppm de CO en gases de chimenea. Un sistema de valoración termodinámico y estadístico de la información con software de adquisición y
10 procesamiento de la información, elaboración de línea base de desempeño energético, establecimiento de rangos operativos de las variables significativas a controlar, monitoreo y seguimiento del indicador de desempeño, análisis de las desviaciones online e identificación de sus causas y emisión de recomendaciones de medidas con la evaluación de sus impactos en energía, emisión de GEI y
15 costos.

Así las cosas, el dispositivo de la presente invención presenta como sus principales características y ventajas el hecho de poder realizar seguimiento y evaluación de la eficiencia estacional del equipo y su impacto en el consumo de
20 energía, en emisiones contaminantes al medio y los costos operacionales. A diferencia de la medición de la eficiencia instantánea y en condiciones estacionarias, que se hace típicamente.

Así mismo, el dispositivo permite el establecimiento y seguimiento online de un
25 nuevo indicador de desempeño energético que permite reflejar en sus variaciones, la influencia de variables operacionales y de estados mantenimiento, en el consumo de energía, al tiempo que permite la identificación online de las variables significativas del tipo operacionales y de mantenimiento que impactan el consumo

de energía, así como el rango de control que produce el mejor desempeño energético.

Del mismo modo, con el presente dispositivo es posible realizar la identificación
5 online de las causas de la variación de la eficiencia del equipo y de las medidas
para su corrección, y la evaluación de la factibilidad de implementación de las
medidas recomendadas online en función de su costo/beneficio desde el punto de
vista económico, así como realizar una reducción significativa del tiempo de
detección de fallas de la eficiencia energética del equipo y sus causas previniendo
10 futuras fallas técnicas que resulten en afectaciones significativas de la seguridad
de las personas y la planta física.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

15 La presente invención se entiende de forma más clara a partir de las siguientes
figuras donde se muestran los componentes y resultados asociados a este
proceso, así como los elementos novedosos con respecto al estado del arte, en
donde, las figuras no pretenden limitar el alcance de la invención, el cual está
únicamente dado por las reivindicaciones adjuntas, en donde:

20

La Figura 1 corresponde a una vista en despiece del dispositivo de control de la
presente invención.

La Figura 2 corresponde a una vista en perspectiva del dispositivo de control de la
25 presente invención con la puerta de acceso abierta.

La Figura 3 corresponde a una vista frontal del dispositivo de control de acuerdo
con la presente invención, en donde la puerta está abierta.

La Figura 4 corresponde a una vista inferior del dispositivo de control de acuerdo con la presente invención.

- 5 La Figura 5 corresponde a una vista superior del dispositivo de control de acuerdo con la presente invención.

La Figura 6 corresponde a un plano del tipo y la ubicación de los sensores empelados en el método de control de acuerdo con la presente invención.

10

La Figura 7 corresponde a una descripción general de la metodología utilizada para el funcionamiento del dispositivo.

- La Figura 8 corresponde a una muestra del modelo lineal univariable entregada
15 por el dispositivo.

La Figura 9 corresponde a una muestra de la determinación por el dispositivo del rango operacional óptimo de una de las variables significativas operacionales de la caldera para alcanzar su máximo valor de eficiencia.

20

La Figura 10 corresponde al gráfico de tendencia del desempeño energético de una caldera, realizado por el dispositivo, para varios periodos de monitoreo de su eficiencia energética.

25

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

La presente invención está dirigida a un dispositivo y un método para el control operacional del desempeño energético de calderas pirotubulares.

La Figura 1 nos muestra una modalidad del dispositivo de acuerdo con la presente invención. Dicho dispositivo comprende módulos analógicos (1), una pantalla táctil (3) una fuente de potencia (4), un dispositivo PLC (5), una carcasa que comprende paredes laterales y una pared posterior (6), una placa inferior ranurada (7) donde entra el cableado de los sensores de campo para conectarse al PLC, una placa superior (8) donde se coloca un ventilador (17). La pared posterior (6) está unida a una placa de fondo falso (9) que sirve para sujetar los módulos analógicos (1), la fuente de potencia (4), donde se conecta la alimentación externa de energía al dispositivo y el dispositivo PLC (5).

La carcasa tiene en el frente una puerta de cierre (10), la cual está acoplada con la pantalla táctil (3), bisagras (11), seguros (13), un soporte (16) y un ventilador (17).

La Figura 2 y la Figura 3 nos permiten apreciar una vista de una modalidad del dispositivo de acuerdo con la presente invención, donde podemos ver todos los elementos ubicados en su lugar dentro de la carcasa.

La figura 6 nos muestra la distribución de los diferentes sensores utilizados para recopilar la información relacionada con el funcionamiento de la caldera. De acuerdo con una modalidad de la presente invención, el dispositivo de control comprende un sensor de humedad relativa (AIT-0101) que mide las condiciones de humedad ambientales, un sensor de conductividad del agua de la caldera (AIT-0301), un sensor de concentración de oxígeno en los gases de combustión (AIT-0501), un sensor de flujo de agua de alimentación (FIT-0301), un sensor de presión del vapor generado (PIT-0401), un medidor de consumo de energía eléctrica del ventilador (QIT-0101), un medidor del consumo de gas natural del quemador (QIT-0201), un medidor del consumo de energía eléctrica de la bomba de agua de alimentación (QIT-0301), un medidor de consumo de energía eléctrica

de la bomba de agua de alimentación (QIT-0301), un medidor de consumo de
agua de alimentación (QIT-0302), un medidor de la cantidad de vapor generado
(QIT-0401), un sensor de la temperatura ambiente (TIT-0101), un sensor de la
temperatura del agua de alimentación (TIT-0301), un sensor de la temperatura del
5 vapor generado (TIT-0401) y un sensor de la temperatura de los gases de
combustión (TIT-0501).

La presente solicitud también enseña un método para controlar la eficiencia
operativa de una caldera pirotubular. De acuerdo con el método de la presente
10 invención, los sensores adquieren la información que se indica a continuación en
la tabla 1:

TABLA 1. Listado de puntos de medición y datos medidos

Medidor	Tipo de medición	Lugar
AIT-0101	Humedad relativa ambiente	Cuarto de calderas
AIT-0301	Conductividad agua de caldera	Purga continua de la caldera
AIT-0501	Concentración de oxígeno	Chimenea
FIT-0301	Flujo de agua de alimentación	Entrada de agua a la caldera
PIT-0401	Presión de vapor	Salida de vapor de la caldera
QIT-0101	Consumo de energía eléctrica del ventilador	Accionamiento eléctrico del ventilador
QIT-0201	Consumo de combustible	Entrada de combustible al quemador
QIT-0301	Consumo de energía eléctrica de la bomba de agua de alimentación	Accionamiento eléctrico de la bomba
QIT-0302	Consumo de agua	Entrada de agua a la caldera
QIT-0401	Cantidad de vapor generado	Salida de vapor de la caldera
TIT-0101	Temperatura ambiente	Cuarto de calderas
TIT-0301	Temperatura de agua de alimentación	Entrada de agua a la caldera
TIT-0401	Temperatura del vapor	Salida de vapor de la caldera
TIT-0501	Temperatura de gases	Chimenea

Los datos adquiridos por los sensores en estos puntos, son enviados a la unidad PLC del dispositivo de control, el cual determina el cambio de la eficiencia de la caldera, las causas que lo produjeron y las recomendaciones para la recuperación del valor de eficiencia máximo disponible, de acuerdo con la siguiente metodología, que se representa en forma de diagrama de bloques en la fig.7

La metodología consiste en que se el PLC cuenta con una información de tiempo y frecuencia de toma de datos (puede ser modificada manualmente) que permite establecer el periodo que se toma como referencia para establecer el nivel de variabilidad de la demanda energética que se desea reducir y también el potencial al cual puede ser reducido. La frecuencia define la periodicidad con que deseo que el dispositivo me entregue la información de eficiencia y las causas de su variación.

El tiempo y la frecuencia debe ser tal, que permita una muestra de datos mínima para poder elaborar la línea base de referencia con que se evalúa el cambio de eficiencia. Una forma de estimar inicialmente una cantidad de datos que garantice estas condiciones es determinar esta cantidad de la ecuación que determina el error típico de un modelo:

$$no=(z^2*cv^2)/e^2, (1)$$

Donde **no** es la estimación inicial del tamaño de muestra necesario, antes de comenzar el muestreo.

cv es el coeficiente de varianza, producto del cociente de la desviación estándar respecto la media. Hasta que pueda estimarse la media real y la desviación

estándar de la población a partir de las muestras reales, se utilizará 0,5 como estimación inicial para el cv.

e es el nivel deseado de precisión.

5

z es el valor de distribución normal estándar con un número infinito de lecturas y para el nivel de confianza deseado.

Una vez definida la cantidad de datos de la muestra mínima de datos de la población, se puede definir un periodo de tiempo, considerando la frecuencia de tiempo con que deseo se tomen los datos, que es la misma que deseo se muestre la información por el PLC.

El periodo de tiempo debe ser tal que permita tomar al menos 20 veces la cantidad mínima de datos requerida por la muestra mínima de datos. Es decir, si mi muestra mínima de datos es por ejemplo 67 y la frecuencia es horaria, debo seleccionar un periodo de tiempo que permita tomar $67 \times 20 = 1340$ datos, o sea 56 días operacionales, 1,8 meses de trabajo.

Durante este periodo el PLC registrara los datos de consumo de energía, producción de vapor y todas las variables indicadas con anterioridad en este documento sensadas por los instrumentos de medición. Esta es la base de la información requerida por el dispositivo para establecer los valores de referencia de la eficiencia e identificar el intervalo del valor de las variables que produce el menor consumo de energía del equipo ante cualquier valor de la demanda de vapor.

La toma de la información de todas las variables operacionales durante este tiempo se procesan en línea mediante una validación lógica (que evita un valor ilógico de la variable como valor 0 o fuera de los límites máximos y mínimos establecidos previamente), una validación termodinámica (que verifica que las variables tomadas son correctas termodinámicamente al no violar el primer y segundo principio de la termodinámica, calculando el rendimiento energético y exergético de la caldera para cada grupo de variables).

Luego, las variables significativas son sometidas a una prueba de hipótesis sobre su influencia o no en la variación del consumo de energía de la caldera. Para esta prueba de hipótesis se utiliza el valor de probabilidad p-value.

Esta prueba consiste en determinar si la probabilidad de que las variaciones de la variable seleccionada no influyen sobre las variaciones del consumo de energía, es nula o no. Cuando el valor de probabilidad es menor de 0,05 se considera que la hipótesis es nula y por lo tanto la variable si ejerce influencia. Con ella se determina las variables que si influyen en la variación del consumo y que deben tenerse en cuenta en el control operacional del equipo para mantener su eficiencia en el valor mayor posible operacionalmente.

El dispositivo puede hacer un filtrado estadístico de la información en caso que esta después de pasar el filtrado lógico y la termodinámica arroje en la prueba de hipótesis que ninguna variable sensada es significativa en la variación del consumo de energía de la caldera. Esto puede ocurrir cuando hay descalibración de los instrumentos de medición y se producen datos anómalos que pueden producir este efecto.

Para realizar el filtrado estadístico el software del dispositivo obtiene el valor del error típico del análisis de la prueba de hipótesis p-value realizado y que dio fallido. Con este valor establece una frontera superior e inferior al valor del modelo lineal univariable obtenido de la correlación del consumo de energía con la producción de vapor de los datos de la muestra tomada.

Este modelo es un modelo de regresión lineal univariable que representa la variación del consumo de energía de la caldera en función de la producción de vapor, para la muestra de datos tomada. Este modelo es del tipo:

$$Y = m1 * X1 + b1 \quad (2)$$

$$R2 = Z1$$

Donde:

- X1 es la producción de vapor
- Y- consumo de energía
- b1- consumo de energía no asociado a la producción de vapor de la caldera

La frontera establecida para identificar los datos anómalos está formada por los valores:

Frontera superior: $Y + z * \text{error típico}$;

Frontera inferior: $Y - z * \text{error típico}$;

Y- valor estimado por el modelo de regresión lineal univariable.

El primer valor de z es un valor donde todos los datos de la muestra se encuentren dentro de esa frontera.

Al reducir el valor de z se va estrechando la frontera hasta encontrar uno o más valores reales de Y, que se salgan de la frontera. Esos valores son eliminados de

la muestra y con los valores que quedan en la muestra se vuelve a determinar el valor de la prueba de hipótesis p-value. Este proceso se repite hasta que ocurra cualquiera de estas condiciones:

- 5 El valor de p-value < 0,05

El número de datos de la muestra disminuye a un valor igual al calculado como valor mínimo de datos de la muestra.

- 10 En caso que ocurra la segunda condición, sin alcanzar la primera el dispositivo indicara que se requiere un nuevo periodo de toma de muestra de datos.

Una vez definidas las variables que si influyen en el consumo de energía de la caldera y por lo tanto en su eficiencia se realiza el proceso de linealización de modelo de consumo de energía de la caldera con todas las variables significativas.

- 15 Esta linealización consiste en obtener un modelo lineal que sea capaz de representar el comportamiento del consumo de energía con las variables significativas para determinar el valor del coeficiente de determinación de esa correlación. Este modelo es del tipo:

20
$$Y = m_1 * X_1 + m_2 * X_2 + \dots m_n * X_n + b \quad (2)$$

$$R^2 = Z$$

Donde:

- $X_1, X_2, \dots, X_n$ son las variables significativas sensadas.
- Y- consumo de energía
- 25 • b- consumo de energía no asociado al cambio de las variables operacionales de la caldera.

El valor del coeficiente de correlación Z determina si realmente se han considerado todas las variables que influyen en la eficiencia de la caldera o no o cuanto es el nivel de control de eficiencia que para ese equipo en específico es capaz de controlar el dispositivo. Ej. Para un coeficiente de 0,98 indicaría que el dispositivo es capaz de controlar el 98 % de los cambios de eficiencia de la caldera.

A partir de los datos registrados se obtiene un nuevo modelo de línea base del comportamiento de consumo de energía de la caldera. Este modelo es un modelo de regresión lineal que representa la variación del consumo de energía de la caldera en función de la producción de vapor, para la muestra de datos tomada. Este modelo es del tipo:

$$Y = m1 * X1 + b1 \quad (2)$$

$$R2 = Z1$$

Donde:

- X1 es la producción de vapor
- Y- consumo de energía
- b1- consumo de energía no asociado a la producción de vapor de la caldera

Un ejemplo de esto se observa en la siguiente figura 8.

El modelo lineal obtenido me permite normalizar el consumo de energía en períodos diferentes al periodo base, con respecto a la producción de vapor, de manera que esta no influya en las diferencias del consumo de energía. De esta forma las diferencias en el consumo de energía de un periodo cualquiera con respecto al base (determinado por el modelo lineal univariable) se deberán solo a la variación de aquellas variables que si dependen de la operación y del mantenimiento y que son las variables sobre las cuales si puedo actuar para corregir el consumo.

El valor de $R^2 = Z1$ del modelo lineal univariable me indica que por ciento de las variaciones del consumo de energía se deben a las variaciones de la demanda de vapor del proceso y el valor $100-(Z1*100)$, me indica que por ciento de las variaciones del consumo de energía se deben a las variaciones del resto de las variables significativas sensadas.

Por último, se identifican los criterios operacionales de control que corresponden a los límites en que deben encontrarse las variables significativas del consumo de energía que dependen de la operación o del mantenimiento para lograr el mejor desempeño energético de la operación del generador de vapor.

Estos límites pueden encontrarse en manuales de operación, recomendaciones del fabricante o prácticas operacionales impuestas por operadores de mayor experiencia, pero frecuentemente, los criterios utilizados para establecerlos no son el buen desempeño energético, sino, “zonas de confort” de operadores, criterios de seguridad o ambientales que pueden ya estar obsoletos y que pueden ser modificados sin impactar negativamente estos indicadores.

En el dispositivo estos límites se obtienen de las operaciones de mejor desempeño energético que han servido para elaborar el modelo lineal del comportamiento del consumo. Estas operaciones son las que tienen valores de consumo de energía por debajo de la curva que representa el modelo lineal univariable en función de la producción de vapor obtenido del periodo muestral.

Tomando los datos de las variables que dependen de la operación y del mantenimiento para las fechas de las mejores operaciones y realizando un gráfico de control de las mismas, podemos obtener el valor medio y los límites

operacionales en que se movieron estas variables, estableciendo criterios operacionales para lograr un mejor desempeño energético.

La figura 9 muestra un ejemplo de la determinación de estos límites de los valores
5 óptimos de las variables operacionales significativas para un generador de vapor.

Conociendo estos rangos de control operacional de las variables el dispositivo compara el consumo de energía medido de la caldera, para una producción de vapor dada, con el consumo de energía del modelo lineal univariable obtenido
10 para el mismo nivel de producción. Si resulta mayor revisa el valor de las variables significativas respecto a su rango de operación hasta encontrar la causa que provoco el incremento del consumo. Esto se ve reflejado en el indicador gráfico de tendencia del desempeño energético, el cual sirve para hacer el seguimiento on line de las diferencias entre el consumo de energía real y el consumo de
15 referencia.

En la Fig. 10 se muestra un gráfico de tendencia del desempeño energético de una caldera para varias etapas del monitoreo de su eficiencia energética.