

**A HIGH IMPACT FAULT DETECTION AND DIAGNOSIS SYSTEM DESIGN FOR  
HIGH PRESSURE INDUSTRIAL BOILERS****DISEÑO DE UN SISTEMA DE DETECCION Y DIAGNOSTICO DE FALLAS DE ALTO  
IMPACTO EN CALDERAS INDUSTRIALES DE ALTA PRESION**

**Ing. Walter Gastelbondo Barragán, PhD. Rocco Tarantino Alvarado**  
**MSc. Sandra Aranguren Zambrano**

**Universidad de Pamplona**, Ciudadela Universitaria, Pamplona, Colombia  
Instituto de Investigación y Desarrollo de Tecnologías Aplicadas IIDTA  
{walter, roccot, saranguren}@unipamplona.edu.co

**Abstract:** This paper presents a fault detection and diagnosis system design, using one of two methods of fault detection (physical redundancy and analytic redundancy), the diagnosis is carried out using statistical analysis packages, in which a database is created with significant samples of the fault behavior of the instrumentation associated to the level control in high pressure industrial boilers.

**Resumen:** En el siguiente trabajo se presenta el diseño de un sistema de detección y diagnóstico de fallas (SDDF), haciendo uso de dos métodos de detección de fallas (redundancia física y redundancia analítica), el diagnóstico se lleva a cabo a través de paquetes de análisis estadístico, en donde se crea una base de datos con muestras significativas del comportamiento de las fallas más incidentes en la instrumentación asociada al control de nivel en calderas industriales de alta presión.

**Keywords:** Fault detection and diagnosis system, Physical redundancy, Analytic redundancy, Modeling, Simulation, Statistics analysis.

**INTRODUCCION**

Todo sistema físico, sin excepción esta sujeto a cambios en sus parámetros, los cuales modifican el comportamiento para el cual fueron diseñados. Estos cambios son debido a efectos de la temperatura, desgastes ocasionados por la fricción, el envejecimiento de los componentes, etc. Los cambios en los parámetros del sistema a zonas fuera de los límites de tolerancia (zona umbral) especificados por el fabricante o de los límites establecidos de acuerdo a criterios de ingeniería, serán considerados como fallas dentro del presente trabajo, estas modificaciones afectan en su mayor

parte el buen funcionamiento del sistema provocando desde una reducción en el desempeño hasta la posibilidad de accidentes más graves.

La no-detección de una falla podría conllevar a colapsar cualquier sistema, generando pérdidas económicas, humanas o ambientales; además las estadísticas demuestran que la mayoría de las paradas en la industria son debido a fallas que no se detectan a tiempo, lo cual genera una disminución en la productividad y ganancias de la empresa. Las fallas además afectan el trabajo, la seguridad y la confiabilidad de los sistemas, como el caso de la planta de energía nuclear de

Chernobyl, en donde, una falla que no fue detectada a tiempo se propago a través de todo el sistema y este colapsó, generando pérdidas no sólo económicas sino también ambientales y humanas.

## 2. DESARROLLO

Para el desarrollo del presente proyecto de investigación se llevaron a cabo los siguientes pasos.

### 2.1 Selección del sistema a analizar

Durante la primera fase de investigaciones se pudo concluir, que uno de los sistemas que presentaba mayor numero de fallas y que estas podrían conllevar a pérdidas humanas, económicas y/o ambientales era el concerniente al lazo de control de nivel en la caldera, en la Figura 1, se puede apreciar el diagrama en bloques de este lazo de control.

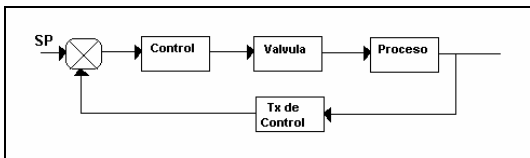


Fig. 1. Diagrama en bloques del lazo de nivel

### 2.2. Modelado del Lazo de Control

El siguiente paso consiste en modelar el sistema de control que se muestra en la figura 1. Los pasos para modelar cada uno de los instrumentos son:

#### 2.2.1 Transmisor de Nivel

Como primer instrumento se analizará el transmisor de nivel, cuya recta de calibración se ve en la fig. 2.

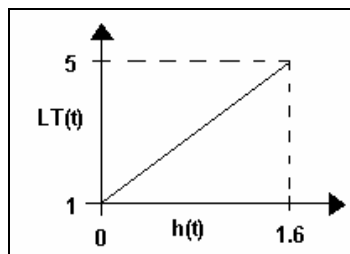


Fig. 2. Recta de calibración del transmisor de nivel

A partir de la figura 2, se obtiene la ecuación (1), la cual representa el comportamiento estático del transmisor de nivel,

$$LT(t) = \left( \frac{LT_{\max} - LT_{\min}}{h_{\max} - h_{\min}} \right) * (h(t) - h_{\min}) + LT_{\min} \quad (1)$$

De la figura 2, se obtiene:

$$LT_{\max} = 5V, \quad (2)$$

$$h_{\max} = 1.6mt, \quad (3)$$

$$LT_{\min} = 1V, \quad (4)$$

$$h_{\min} = 0mt, \quad (5)$$

Reemplazando (2), (3), (4) y (5) en (1), se obtiene (6).

$$LT(t) = 2.5 * h(t) + 1, \quad (7)$$

Aplicando dinámica de primer orden a la ecuación (7):

$$Tt * \frac{dLT(t)}{dt} + LT(t) = 2.5 * h(t) + 1 \quad (8)$$

Despejando de la ecuación (8), resulta:

$$\frac{dLT(t)}{dt} = \frac{2.5 * h(t) - LT(t) + 1}{Tt} \quad (9)$$

La ecuación (9) representa el comportamiento dinámico de primer orden del transmisor de nivel. Según tablas de fabricante de transmisores se tiene que:

$$1 \leq Tt \leq 3$$

#### 2.2.2 Válvula de Agua de Alimentación

El segundo instrumento a analizar es la válvula del agua de alimentación, cuya recta de calibración se muestra en la figura. 3.

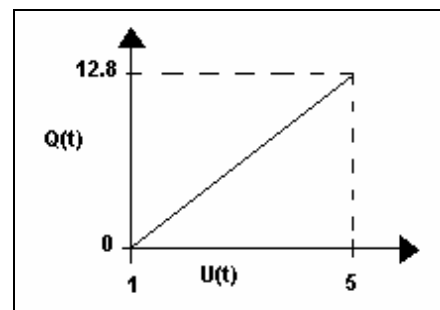


Fig. 3. Recta de calibración de la válvula del agua de alimentación

Teniendo en cuenta la recta de calibración de la figura 3, se calcula la ecuación (10), la cual representa el modelo matemático general de la válvula:

$$Q_i(t) = \left( \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}} \right) * (U(t) - U_{\min}) + Q_{\min} \quad (10)$$

De la figura 3, se obtiene:

$$Q_{\max} = 12.8 \text{ Ton/h}, \quad (11)$$

$$U_{\max} = 5 \text{ Vcc}, \quad (12)$$

$$Q_{\min} = 0 \text{ Ton/h}, \quad (13)$$

$$U_{\min} = 1 \text{ Vcc}, \quad (14)$$

Reemplazando (11), (12), (13) y (14) en (10), se obtiene,

$$Q_i(t) = 3.2 * U(t) - 3.2, \quad (15)$$

Aplicando dinámica de 1<sup>er</sup> orden a (15):

$$T_u * \frac{dQ_i(t)}{dt} + Q_i(t) = 3.2 * U(t) - 3.2 \quad (16)$$

Despejando de la ecuación (16), se obtiene final:

$$\frac{dQ_i(t)}{dt} = \frac{3.2 * U(t) - Q_i(t) - 3.2}{T_t} \quad (17)$$

La ecuación (17) representa el comportamiento dinámico de primer orden de la válvula de alimentación. Según tablas de fabricante de válvulas se tiene que:

$$10 \leq T_u \leq 30$$

### 2.2.3 Proceso

Para la calcular la ecuación que modela el proceso se debe recurrir al método de balance de masa, el cual esta dado por la ecuación (18),

$$\frac{dV(t)}{dt} = Q_i(t) - Q_o(t) \quad (18)$$

Teniendo en cuenta que la variación de volumen se puede expresar como:

$$\frac{dV(t)}{dt} = A * \frac{dh(t)}{dt} \quad (19)$$

Reemplazando (19) en (18) se obtiene:

$$A * \frac{dh(t)}{dt} = Q_i(t) - Q_o(t) \quad (20)$$

Despejando  $\frac{dh}{dt}$  de (20), resulta:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{Q_i(t) - Q_o(t)}{A} \quad (21)$$

Teniendo en cuenta la información entregada por los ingenieros de proceso, quienes representan la salida del proceso de la siguiente manera:

$$Q_o(t) = \frac{K_v}{\sqrt{(V - A * h(t))}} \quad (22)$$

En donde

$V$ ; es el volumen total del tambor y equivale a  $18.08 \text{ m}^3$ .

$A$ ; es el área del tambor y equivale a  $11.3 \text{ m}^2$ .

Reemplazando (22) en (21) se obtiene:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{Q_i(t)}{A} - \frac{K_v}{A * \sqrt{(V - A * h(t))}}, \quad (23)$$

Para calcular la constante de la válvula ( $K_v$ ) se debe tener en cuenta los puntos de equilibrio del sistema los cuales se encuentran dado como:

$$\frac{dh(t)}{dt} = 0, \quad (24)$$

$$Q_i(t) = 6.4, \quad (25)$$

$$h(t) = 0.8, \quad (26)$$

Reemplazando (24), (25) y (26) en (23), se obtiene,

$$0 = 6.4 - \frac{K_v}{\sqrt{(18.08 - 11.3 * 0.8)}} \quad (27)$$

Despejando  $K_v$  de (27) se obtiene:

$$K_v = 19.2, \quad (28)$$

Reemplazando (28) y  $A$  en la ecuación (23), se obtiene finalmente,

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{Q_i(t)}{11.3} - \frac{19.2}{11.3 * \sqrt{(18.08 - 11.3 * h(t))}} \quad (29)$$

La ecuación (29) representa el comportamiento dinámico de primer orden del proceso.

### 2.2.4 Controlador

La ecuación del controlador esta dada de la siguiente manera:

$$U(t) = U + \left[ K * e(t) + \int \frac{K}{T_i} * e(t) dt \right] \quad (30)$$

En donde el error va estar dado como,

$$e(t) = SP(t) - LT(t), \quad (31)$$

Se seleccionó un controlador PI debido a que el sistema a controlar es un sistema de capacidad

simple. Los valores de K y Ti para el controlador se calcularon utilizando el método de Ziegler - Nichols, el cual generó los siguientes resultados,

$$K_C = 1.35, \quad (32)$$

$$T_i = 13.32, \quad (33)$$

Reemplazando (32) y (33), en (30), se obtiene que la ecuación del controlador, se encuentra dada como,

$$U(t) = U + \left[ 1.35 * e(t) + \frac{1.35}{13.52} * \int e(t) * dt \right] \quad (34)$$

### 2.3 Simulación Dinámica del Lazo de Control de Nivel

Haciendo uso de paquetes de simulación dinámica se obtuvo los siguientes resultados.

En la figura 4, se puede observar el comportamiento del sistema completamente estabilizado, como se aprecia, inicialmente el Set Point o punto de operación se encontraba en 3V y el proceso se estabilizo en 3V; luego se vario el SP a 4V y el controlador lleva el proceso a 4V. Con ello se puede concluir que el sistema cumple con su función de diseño.

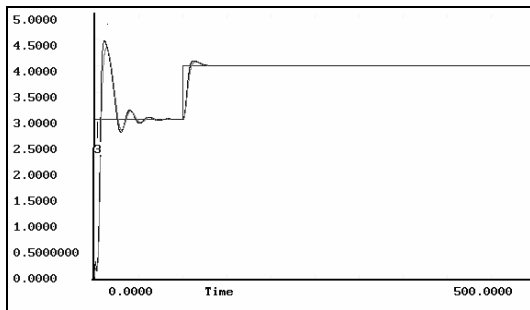


Fig. 4. Respuesta obtenida a la salida del transmisor

### 2.4 Metodología Para el diseño del sistema de Detección y Diagnostico de Fallas

La siguiente es la metodología propuesta para el diseño del sistema de detección y diagnóstico de fallas. La detección en los transmisores se realizara mediante redundancia física, que no es más que aprovechar el uso de elementos repetitivos en el sistema, estos elementos permiten, por medio de comparaciones de funcionamiento, tomar decisiones sobre la presencia de fallas y sobre posibles acciones correctivas.

Los métodos basados en redundancia física son muy confiables y permiten una rápida corrección de posibles fallas; el diagnóstico se realizará mediante el tratamiento estadístico del error, o sea que los datos que generan los dos transmisores generan un residual y el resultado se analizara en un paquete llamado de tratamiento estadístico del error, en donde se observa el comportamiento del error y se compara con una serie de patrones de fallas ya conocidos. La estructura de este tipo de sistema de detección se puede apreciar en la fig. 5.

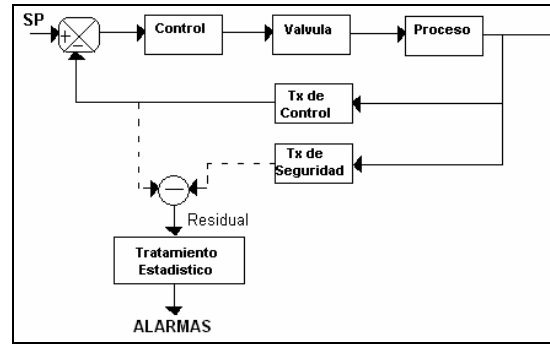


Fig. 5. Diagrama en bloques del proceso acoplado con el SDDF aplicando redundancia física en transmisores

Para detectar fallas en válvulas, se aprovechara el hecho de que el E.F.C. cuenta con un posicionador inteligente, teniendo en cuenta ello, se detectara fallas en válvulas mediante el método de redundancia analítica, el diagnóstico se realizara mediante el análisis estadístico del error, o sea que el error generado por la diferencia entre el posicionador real y el virtual se analizara en un paquete estadístico en donde se observa el comportamiento del error y se compara con una serie de patrones de fallas ya conocidos.

La figura 6, representa el diagrama en bloques del lazo de control de nivel con redundancia analítica en posicionador.

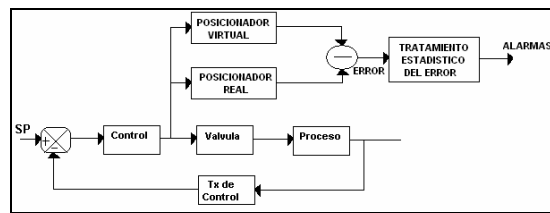


Fig. 6. Diagrama en bloques del proceso acoplado con el SDDF aplicando redundancia analítica en válvula

## 2.5. Simulación del SDDF Aplicando el Método de Redundancia Física

Al aplicar el método de redundancia física en transmisores, la respuesta obtenida es muy similar a la de la figura 4, esto se debe a que los dos instrumentos utilizados presentan características similares ya que son de la misma marca y presentan las mismas características. En la figura 7, se observa la respuesta obtenida al aplicar tratamiento estadístico del error producido por la salida de los dos transmisores.

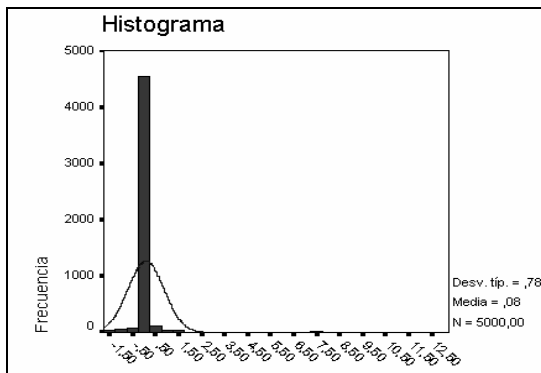


Fig. 7. Respuesta estadística del sistema de transmisores sin falla

Como se puede apreciar en la figura 7, la máxima amplitud de la recta gaussiana tiende a darse en el punto cero del eje horizontal, lo cual indica que el error que se presenta entre la salida de los dos transmisores es pequeño. A continuación se aplicara algunas de las fallas con mayor insipiencia en este tipo de sistemas.

### 2.5.1 Falla por descalibración de Banda Muerta

Según el estudio realizado durante las primeras fases de investigación, se concluyó que la falla por descalibración de banda muerta es muy frecuente en este tipo de sistemas. En la figura 8, se puede apreciar el comportamiento de este tipo de fallas.

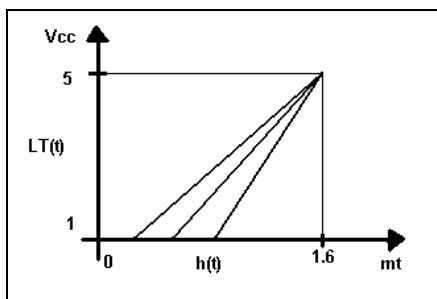


Fig. 8. Falla por descalibración de Banda Muerta en transmisor

La falla por descalibración de banda muerta que se muestra en la figura 8, conlleva al funcionamiento anormal de uno de los transmisores como se aprecia en la figura 9.

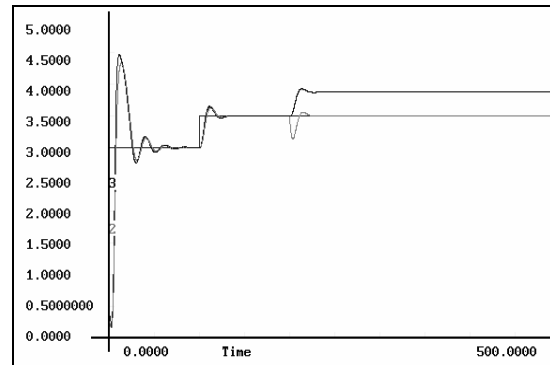


Fig. 9. Respuesta obtenida a la salida de los Transmisores con falla

Similar a la figura 9, se aplicaron distintos valores de falla, esto para poder garantizar el patrón; la respuesta obtenida a través del tratamiento estadístico del error al variar con distintos valores el delta de falla fue el siguiente.

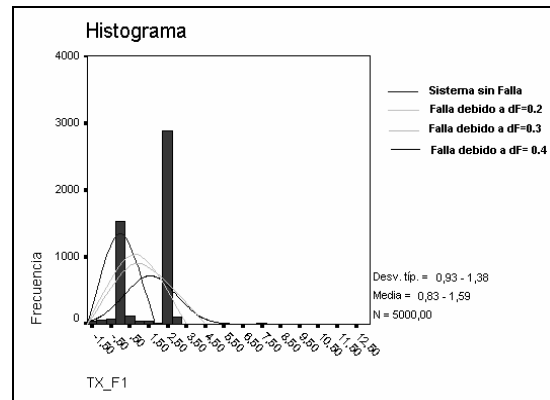


Fig. 10. Respuesta estadística del sistema de transmisores con falla

En la figura 10, se puede observar que cuando el sistema no presenta fallas, la máxima amplitud de la campana se encuentra alrededor del punto cero del eje horizontal y cuando se aplicaron las fallas por descalibración de banda muerta, la campana se achato y se desvió hacia la derecha.

Los patrones obtenidos en la figura 10, describen el comportamiento que presentaría el sistema de transmisores cuando se presenta una falla por descalibración de banda muerta, estos resultados que se obtuvieron son ingresados a una base de datos y en el momento en que uno de los

transmisores presente este tipo de fallas se puede detectar. De igual manera se aplicaron fallas a los transmisores de descalibración de amplitud y descalibración de cero y se realizó el mismo análisis que el sistema con falla de banda muerta.

### 2.6. Simulación del SDDF Aplicando el Método de Redundancia Analítica

En la figura 11, se aprecia la respuesta obtenida a la salida del posicionador real y virtual de la válvula al variar el sep point, como se puede apreciar el controlador cumple con las especificaciones de diseño.

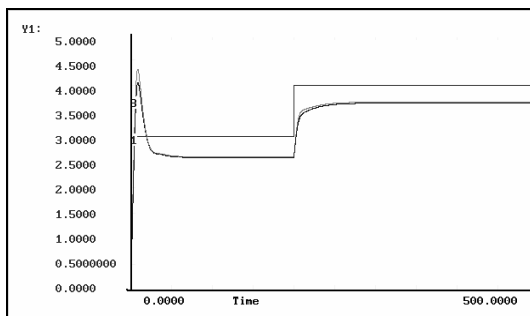


Fig. 11. Respuesta obtenida a la salida de los posicionadores con falla

El residual generado a la salida de los posicionadores es llevado al paquete de tratamiento estadístico del error, con el cual se obtiene la respuesta de la figura 12.

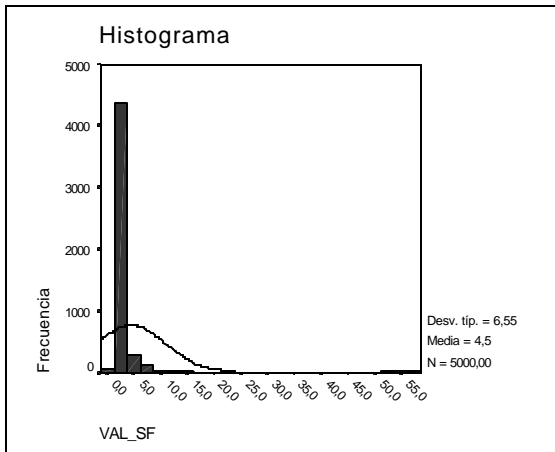


Fig. 12. Respuesta estadística del sistema de posicionadores sin falla

Como se observa en la figura 12, el sistema tiene una distribución gaussiana normal y la máxima amplitud de la campana tiende a darse en los puntos cercanos al cero de eje horizontal, el

histograma de la figura 12. A continuación se aplicara una serie de fallas a uno de los posicionadores para analizar la respuesta.

#### 2.6.1 Falla por descalibración de Banda Muerta

Al igual que para los transmisores se tiene, que una de las fallas mas incipientes que afecta el posicionador de las válvulas es la falla de banda muerta, la cual presenta el comportamiento mostrado en la figura 13.

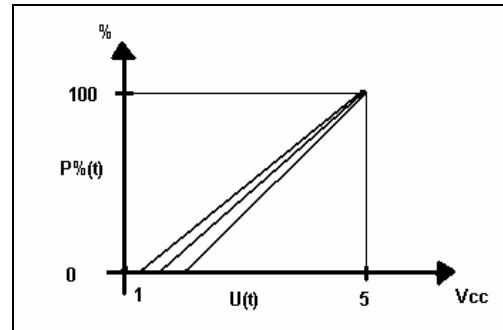


Fig. 13. Falla por descalibración de banda muerta en posicionador

Debido a la descalibración de banda muerta, el posicionador empieza a presentar comportamientos anormales como el que se muestra el figura 14.

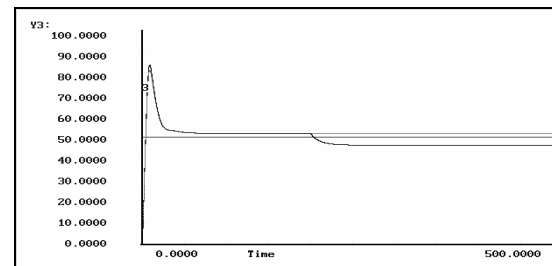


Fig. 14. Respuesta obtenida a la salida de los posicionadores con falla

Si se comparan los resultados obtenidos en la simulación de la falla por descalibración de banda muerta en transmisores y la descalibración de banda muerta en posicionador se puede concluir que una misma falla puede producir comportamientos totalmente diferentes en dos tipos diferentes de instrumento.

Al igual que para el transmisor se aplicaron diferentes valores de falla para poder de esta manera garantizar el patrón; la respuesta obtenida a través del tratamiento estadístico del error al variar con distintos valores el delta de falla fue el siguiente.

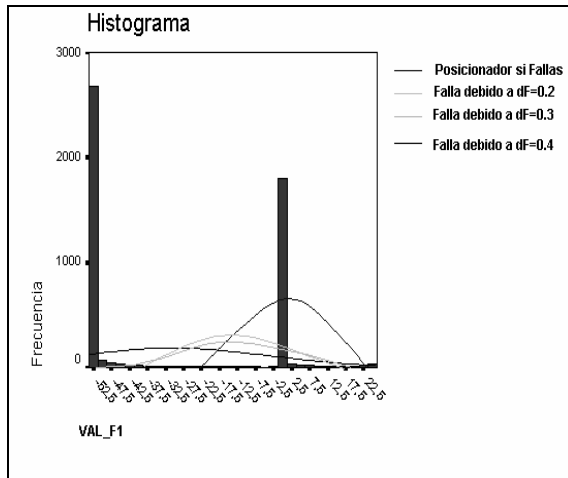


Fig. 15. Respuesta estadística del sistema de posicionadores con falla

Como se puede ver en la figura 15, el patrón sin fallas mantiene su máxima amplitud alrededor del cero del eje horizontal, mientras que las respuesta obtenidas al aplicar las fallas tienden a disminuir su amplitud y la curva se distribuye más hacia la izquierda.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el desarrollo de este trabajo contribuyen las bases para la implementación del SDDF en calderas industriales de alta presión (control de nivel), logrando con ello un aumento en la confiabilidad y disponibilidad del sistema.

La rápida detección de la presencia de fallas en los sistemas puede ayudar a tomar decisiones correctivas y de este modo reducir el daño potencial que esta falla puede ocasionar al sistema.

Los SDDF logran que los sistemas sean mucho más confiables y robustos, aumentando la producción y las ganancias de la empresa.

No todas las fallas son detectables ya que hay algunas que se esconden detrás del kernel y no pueden ser detectados por los SDDF.

La detección y el diagnóstico de fallas mediante redundancia física en este caso no aumentan costo debido a que ya se cuenta con transmisores de control y seguridad instalados en la planta.

La redundancia analítica es un método de detección de bajo costo debido a que para su implantación solo se hace uso de la información del sistema y los modelos matemáticos de los instrumentos.

La principal ventaja que presenta la redundancia analítica es que carece de los problemas que presenta la redundancia física como lo son costo, tamaño y el peso de los dispositivos.

## RECOMENDACIONES

Los SDDF deben implementarse en el periodo de vida útil del sistema, ya que si implementa al final de la vida útil, no se tendrán los mismos resultados en cuanto a confiabilidad y eficiencia del sistema.

En trabajos posteriores se puede llegar a diseñar un Sistema de Detección y Diagnóstico de Fallas en Proceso aplicando el método de observador de estado.

Se recomienda desarrollar sistemas similares utilizando otros métodos de detección y diagnóstico de fallas y/o esquemas tolerantes a fallas.

## REFERENCIAS

- ALCORTA, Efraín. (1997). "Diagnóstico de Fallas Usando Observadores no Lineales". Practice. Vol. 5.
- CREUS, Antonio. (1995). "Instrumentación Industrial". 5<sup>a</sup> Ed. Barcelona. Alfa y Omega.
- GERTLER, J. (1998). "Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems". Marcel Dekker, Inc. Printed USA.
- ISERMANN, R. (1984). "Proceso de Detección de Fallas Basados en Modelos y Métodos de Estimación". Automática.
- OAKLAND, Jhon. (1986). "Statistical Process Control" Jhon Wiley & Sons, Inc. New York..
- PATTON, Chen. (1999). "Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems. Kluwer Academic Publishers.
- TARANTINO, Rocco. (2004). "Metodología de Detección y Diagnóstico de Fallas", Pamplona.