

Fault detection and diagnosis using robust transition structures

Betsy Sánchez y Rubén Rojas

¹Decanato de Investigación. Universidad Nacional Experimental del Táchira. San Cristóbal 5001. Venezuela. E-mail: bsanchez@unet.edu.ve. ²Escuela de Ingeniería Eléctrica. Universidad de los Andes. Mérida 5101. Venezuela. E-mail: rdrojas@ula.ve

Abstract

The robust transition structures originally applied to control processes with different operation points, is presented as alternative for fault detection and diagnosis. An advantage of this method is the reduction of the mathematical complexity inherent to many structures applied to fault detection and diagnosis. The proposed method utilizes parametric mathematical models to characterize the faults in the instruments. Finally, this scheme is tested by means of computer simulations through a Continuous Stirred tank Reactor (CSTR) model as a process.

Key Words: Detection, diagnosis, fault, transition structure, computer simulation

Detección y diagnóstico de fallas utilizando estructuras de transición robusta

Resumen

Las estructuras de transición robusta aplicada originalmente al control de procesos con diferentes regímenes de operación, se plantean como alternativa para la detección y el diagnóstico de fallas. Una de las ventajas de este método es la reducción en la complejidad matemática inherente a muchas estructuras aplicadas a la detección y el diagnóstico de fallas. El esquema propuesto utiliza modelos matemáticos paramétricos para caracterizar las fallas en los instrumentos. Finalmente esta técnica es probada mediante simulaciones utilizando como proceso el modelo de un tanque de agitación continua.

Palabras clave: Detección, diagnóstico, fallas, estructura de transición, simulaciones en computador.

1. Introducción

Cuando un proceso industrial presenta desviaciones en sus parámetros, sus salidas generalmente no corresponden a los valores normales dentro del rango de operación. Estas desviaciones podrían ser causadas por desperfectos o mal funcionamiento de los dispositivos implicados dentro de dicho proceso. Las salidas no deseadas son consideradas fallas, es decir, desviaciones del comportamiento normal de la planta o de su instrumentación.

Se han realizado muchas investigaciones para la detección y el diagnóstico de fallas, me-

dante la aplicación de algoritmos matemáticos y modelos de señales. Las primeras investigaciones se realizaron al principio de la década de los 70, basadas en el diseño de observadores y uso de filtros. Más adelante se desarrolló el principio de redundancia analítica [2]. Posteriormente se implementó, por primera vez, un sistema de monitoreo especializado para la detección y diagnóstico de fallas en una planta nuclear [3]. En los últimos años han sido investigadas y aplicadas técnicas prometedoras como lo son: el espacio de paridad [4], la lógica difusa y las redes neuronales [5], entre otras.

Muchos de los métodos desarrollados presentan el uso de un modelo matemático del proceso, el cual en algunos casos no es posible de obtener fácilmente, además incluyen un análisis matemático que presenta considerable complejidad. En otros métodos, se requiere de dispositivos externos cuyo costo, tamaño o peso, limita su uso.

Un enfoque alternativo para la detección y diagnóstico de fallas está referido al diseño de modelos de fallas y análisis de error, en donde las posibles fallas son representadas por modelos matemáticos y patrones que son capaces de reconocer la ocurrencia de una falla en un momento determinado [6]. En forma similar a este enfoque se ha planteado la técnica de estructuras de transición robusta que ha mostrado ser efectiva para el control de procesos con múltiples regímenes o puntos de operación [7].

Por lo anteriormente expuesto este trabajo propone el uso de la técnica estructura de transición robusta para la detección y diagnóstico de fallas. Por las características del método y de los sistemas a los que se aplica (cambio en el régimen de operación), las estructuras de transición se plantean como alternativa para la detección de fallas, pues en este caso también se presentan cambios en las características del proceso que son tomadas en cuenta para el diseño del método, que incluye una biblioteca de modelos representativos de las fallas, estimándose así entonces que las estructuras de transición son viables para la detección y diagnóstico de fallas.

2. Metodología Propuesta

En esta sección se presenta la metodología propuesta para la detección y el diagnóstico de fallas. En primer lugar, se detalla el método de estructuras de transición robusta para el control de sistemas con múltiples regímenes de operación, como base para la comprensión del método propuesto. Inmediatamente se expone el esquema de detección y diagnóstico de fallas usando estructuras de transición robustas. Además, se incluye la metodología para el modelado de las fallas en sensores y actuadores utilizados en los ejemplos de simulación, así como, las condiciones de experimentación utilizadas en dichos ejemplos.

2.1. Estructuras de Transición para el control de sistemas con diferentes regímenes de operación

El método presentado está basado en un trabajo de Debin Sun y Karlene Hoo [7], para el control de procesos con diferentes regímenes cuando un sistema de control tradicional con parámetros fijos no es capaz de mantener el proceso dentro de los rangos normales para su buen funcionamiento.

Esta estructura está compuesta de diferentes controladores candidatos, una biblioteca de modelos y un supervisor de transición (Figura 1):

Biblioteca de Modelos: se construyen modelos identificando los modelos lineales en cada uno de los diferentes regímenes de operación.

Biblioteca de controladores candidatos: deberá ser diseñado un controlador por cada régimen de operación o cada modelo nominal.

Supervisión de Transición: La función de este bloque es decidir mediante lógica cuál de los controladores candidatos es el mejor para mantener el proceso y cuando debe ser colocado en el lazo de realimentación del proceso.

2.2. Método de Detección y Diagnóstico propuesto

Inicialmente se define el error como el valor absoluto puntual entre la salida del proceso y los modelos del proceso en operación normal y cada una de las fallas. Luego se halla un umbral de error permisible para considerar al proceso libre de falla, sobre la base de los históricos y el conocimiento heurístico del proceso. El Proceso de Detección y Diagnóstico de falla se lleva a cabo en dos etapas: la primera etapa consiste en una primera verificación en línea. La detección de la falla se realiza con la medida de los valores de error. Según sea este error, se genera un código que indica si existe un desajuste del proceso. A partir de este código se verifica la existencia o no de la falla.

El código de falla es un binario de n bits (está formado por ceros y unos), según la ubicación de los unos, va a advertir al sistema de detección que existe una anomalía. El número n de bits del código va a depender del número de modelos de fallas detectadas, un ejemplo de diferentes códigos de falla se muestra en la Figura 2. En

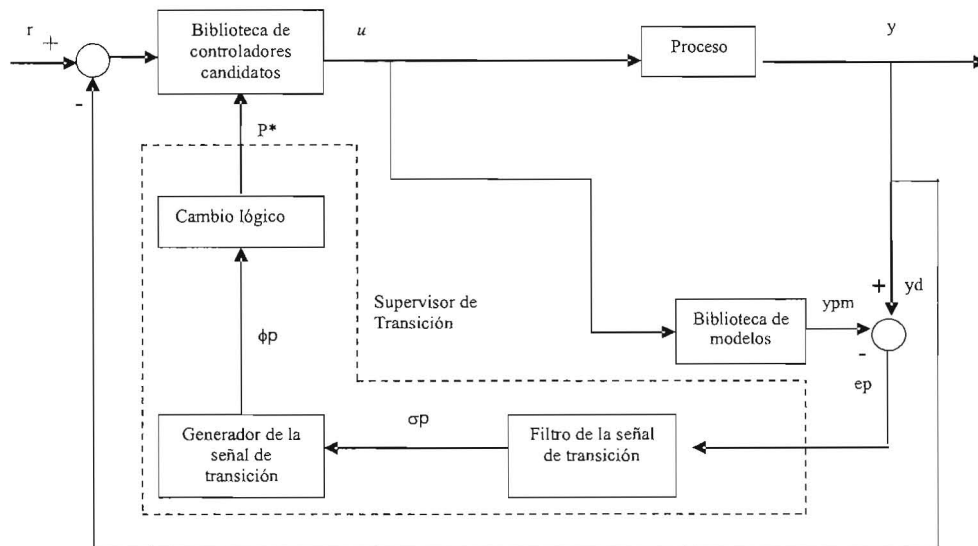


Figura 1. Esquema para la estructura de control de transición

1	0	0	0	0	Proceso sin falla
0	1	0	0	0	Falla en el Span del Transmisor
0	0	1	0	0	Falla en la Zona Muerta del Span del Transmisor
					•
					•
					•

Figura 2. Ejemplos de códigos de falla generados por el sistema de detección.

caso de que no se establezca en esta primera etapa el origen de la falla, es decir, que la falla se haya producido en un valor diferente o en las vecindades del valor en el cual se ha identificado la misma, se genera el siguiente código de falla:

0 0 0 0 0

Este código informa al sistema de detección la presencia de una irregularidad, pero que no es posible detectarla en esta primera fase, por ello se pasa automáticamente a la segunda etapa que se realiza en el proceso fuera de línea. En esta segunda etapa se calculan los errores entre la salida registrada del proceso y la salida de otro banco de modelos que han sido hallados previamente en las vecindades de los distintos tipos de fallas que fueron identificadas en la primera etapa, procediéndose así al proceso exacto de detección.

Cuando ocurre un cambio de referencia, es detectado antes y serán activados los modelos correspondientes a este valor de referencia.

Este sistema de detección utiliza la información proveniente del proceso, mediante el uso de medidores que permiten el flujo de datos hacia el sistema de detección según el esquema de la Figura 3. El patrón de salida es mostrado y se toma la decisión si existe o no la anomalía y si es necesario pasar a la segunda etapa. En ese caso se enviará una señal para el comienzo de registro de los datos para el proceso fuera de línea ya descrito antes.

Al establecer el origen de la falla se procederá a tomar las medidas necesarias para que el proceso continúe su operación dentro de los parámetros normales para su buen funcionamiento.

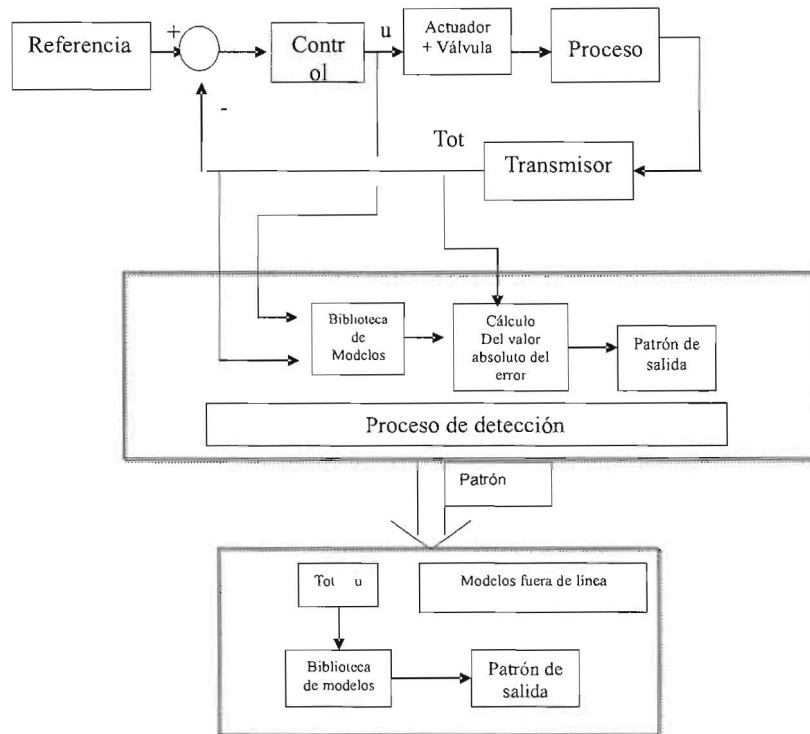


Figura 3. Esquema para la detección y el diagnóstico de falla

2.3. Modelado de fallas en los Instrumentos y Actuadores

Un instrumento se considera libre de falla si la relación entre los valores reales de la variable, comprendidos dentro del campo de medida, y los valores de lectura del aparato, es lineal [8], tal como se observa en la Figura 4. Así es posible expresar el modelo de las fallas de los instrumentos como la ecuación de la recta que relaciona la variable dependiente con la variable independiente del instrumento, tomando en cuenta los parámetros involucrados se obtiene la siguiente ecuación:

$$lec(t) = \frac{lec \max - lec \min}{Vr \max - Vr \min} v(t) \quad (1)$$

Según la recta representativa de la figura, $lec(t)$, representa la lectura del instrumento en el instante t ; $v(t)$, es el valor de la variable medida en el instante t ; $lec \max$ y $lec \min$, definen los valores de lectura máxima y mínima del instrumento, respectivamente. Mientras que $Vr \max$ y $Vr \min$, los valores máximo y mínimo de salida de la variable real.

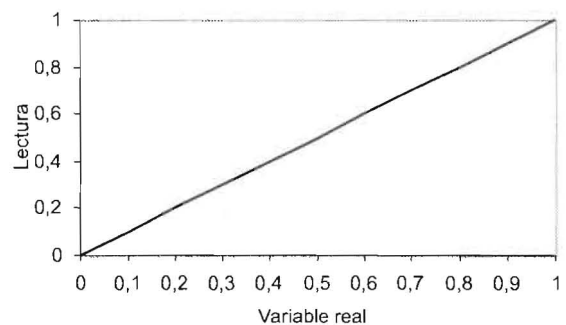


Figura 4. Relación valor real vs. valor medido en un instrumento.

El instrumento y sus partes deben ser representados en forma dinámica por lo que la Ecuación (1) se convierte en una ecuación dinámica siguiendo un comportamiento de primer orden.

$$\tau \frac{dlec(t)}{dt} lec(t) = \frac{lec \max - lec \min}{Vr \max - Vr \min} (v(t) Vr \min) + lec \min \quad (2)$$

siendo τ la constante de tiempo del bloque que representa al instrumento.

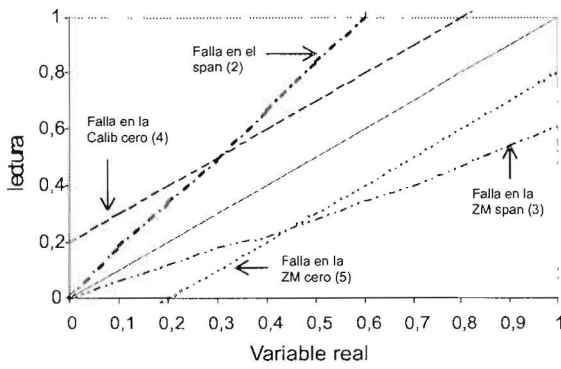


Figura 5. Desviaciones de la recta debida a fallas en el instrumento.

Según se presenten desviaciones del valor medido respecto a la recta representativa de un instrumento típico (Figura 4) se tendrán alteraciones en los componentes del dispositivo modelado. Esto representa las fallas de medida del aparato, tales como falla en el span, (desviación positiva, manteniendo el cero fijo) falla en la zona muerta (ZM) del span (desviación negativa de la recta, manteniendo el cero fijo), falla en la calibración del cero (desviación paralela positiva de la recta) y falla en la zona muerta (ZM) del cero (desviación paralela negativa de la recta), tal como se muestra en la Figura 5. De esta forma es posible modelar algunos tipos de falla en los instrumentos del proceso mediante simple variación de alguno de los parámetros de Ecuación (2) (lec_{max} , lec_{min} , Vr_{max} y Vr_{min})

Las fallas en el actuador son modeladas a partir de las características lineales inherentes a las válvulas. En general se considera sin falla si mantiene su relación original entre la señal de control relativa y su correspondiente flujo relativo, así entonces cualquier falla puede ser reflejada como desviación de dicha relación.

En forma general y para efectos de modelado la relación entre la señal de control y el flujo de la válvula puede ser representada mediante la siguiente ecuación:

$$\tau_v \frac{dq(t)}{dt} + q(t) = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{U_{max} - U_{min}} (u(t) - U_{min}) + Q_{min} \quad (3)$$

Donde Q_{max} y Q_{min} , son los flujos máximo y mínimo permitidos para la señal de control U_{max} y U_{min} , respectivamente Al igual que en el

caso anterior, variaciones sobre los parámetros son desviaciones en la relación entre el flujo y la señal de control y representan las fallas del dispositivo.

2.4. Condiciones de Experimentación

Para las simulaciones planteadas y el análisis subsiguiente se deben considerar algunas suposiciones:

- Las fallas son modeladas como términos aditivos de los parámetros de la instrumentación.
- Se consideran perturbaciones de hasta un 5% del valor normal en el flujo de entrada
- Se asume que ocurre una sola falla a la vez.
- Para la validación de la técnica de detección de fallas se usa la prueba T - Student [12], con esta prueba se confirma que los modelos hallados discriminan la falla existente. Considerando los resultados estadísticamente significativos para valores de $p > 0.4$
- Se toman en cuenta válvulas lineales y transmisores sin retardo de tiempo.

3. Ejemplo de Simulación

En esta sección se presentan los resultados de aplicar la técnica propuesta a un proceso no lineal, un tanque reactor de agitación continua, ante fallas en el transmisor y en el actuador de la válvula.

Este tanque, Figura 6, es usado para un proceso de vapor cuyos componentes premezclados logran una composición uniforme. El modelo matemático se obtiene mediante balances de Energía y Masa en el tanque y el serpentín [9]:

$$\begin{aligned} dT/dt &= 0,00833f(t)T_i(t) - 0,00833f(t) T(t) - 0,0769(T(t)-T_s(t)) \\ dT_s/dt &= 3,636W(t) - 1,909(T_s(t)-T(t)) \end{aligned} \quad (4)$$

donde $T(t)$: Temperatura del tanque (Variable controlada), $T_s(t)$: Temperatura del vapor de condensado del serpentín utilizado para el calentamiento del tanque, $T_i(t)$: Temperatura del flujo de entrada.

Un controlador proporcional integral PI es usado para regular la temperatura en el tanque manipulando la posición de la válvula de vapor. Para la simulación de este proceso el controlador PI es sintonizado por el método de Ziegler y Nichols en una primera aproximación que luego fue

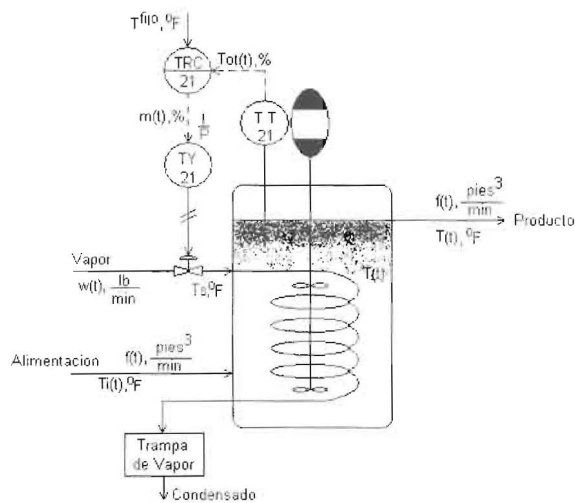


Figura 6. Tanque de agitación continua.

ajustado variando manualmente los parámetros del controlador, hasta obtener la respuesta deseada.

3.1. Modelado del Proceso en Operación Normal y en Falla

Para realizar el modelado de los procesos en operación normal y en falla se planteó la identificación mediante modelos paramétricos bajo la estructura ARX, Ecuación (5). Dicha identificación se realiza excitando al sistema con una perturbación de entrada (señal PBRs, secuencia binaria pseudo aleatoria) y midiendo la respectiva salida [11].

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + e(t) \quad (5)$$

Basado en los históricos del proceso, se diseñan cada uno de los modelos que representan el proceso en su operación normal y en cada una de las fallas existentes o de las que se tenga un registro. Se halla un primer modelo sencillo cuyo orden va en aumento hasta alcanzar el orden que satisfaga los requerimientos para el fin que fue diseñado, en este caso que pueda describir la falla que ocurre en un momento determinado. Dichos modelos son validados utilizando una prueba de autocorrelación, estableciéndose un 90% como límite de confianza del error [10].

Simulaciones de Fallas

Para simular las fallas de la instrumentación utilizada, transmisores y válvulas, se introducen desviaciones simuladas en sus parámetros como perturbaciones aditivas de tipo escalón y de amplitud de un 10% en los parámetros del instrumento, tales como, fallas en el span del transmisor (FST), falla en la zona muerta del span del transmisor (ZMST), falla en la calibración del cero del transmisor (FCCT), falla en la zona muerta del cero del transmisor (FZMCT), falla en el span de la válvula (FSV), falla en la zona muerta del span de la válvula (FZMSV). Luego de simular las desviaciones en los parámetros y con las amplitudes especificadas, se obtienen las salidas de cada uno de los modelos hallados previamente, midiendo el valor absoluto del error y obteniendo así el código de falla para determinar si existe alguna anomalía en el proceso. Si las fallas ocurren sobre algunas variaciones de los valores en los que han sido modeladas se tienen modelos fuera de línea y serán utilizados sólo si los modelos principales no logran detectar el origen de la falla existente, según el código de falla arrojado por el sistema de detección.

También se consideraron perturbaciones o ruidos que no son ocasionados por fallas en la instrumentación, sino por variaciones y/o ruidos inherentes al proceso, con el fin de verificar la salida y robustez del método propuesto.

Cambio de Referencia

Para un cambio en el set-point o valor de referencia se consideran dos posibles soluciones:

- Eliminar el efecto de cambio: para ello se diseña la función de transferencia representativa de la variación del set-point. Esta función de transferencia representa la relación entre la señal de control y el cambio en el set-point, y es restado del valor de la señal de control cuando ocurre el cambio.
- Diseño de un segundo banco de modelos calculados incluyendo la variación en el set-point: se toma como ejemplo una variación del 10% del valor original de referencia

y se realiza el cálculo de los modelos de igual forma que el caso anterior.

4. Resultados

Para el tanque reactor de agitación continua simulado, se determinó que los modelos en funciones de transferencia de cuarto orden representan mejor las fallas. Esto se comprobó mediante validación usando la prueba de autocorrelación. La Figura 7 corresponde al error entre la salida de cada uno de los modelos y la del proceso real cuando se produce una FST, a partir de la muestra 1250, con una desviación del 10% del valor normal del parámetro correspondiente.

Puede notarse que el menor error es el correspondiente al modelo hallado para una FST. El código de falla generado

1	0	0	0	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---

, en este caso de 7 bits, por el número de fallas tomadas en cuenta, advierte que existe una FST.

Según la Tabla 1, se verifica también que la mayor probabilidad se obtiene para el modelo correspondiente a una FST, esto indica como el método logra discriminar la falla ocurrida al presentar un resultado estadísticamente significativo.

Perturbaciones en el Proceso

La Figura 8 muestra el error entre la salida del proceso y de cada uno de los modelos cuando es simulado una perturbación en el flujo de entrada de tipo escalón, del 4% de su valor normal. Puede observarse que el menor error, durante la perturbación, ocurre entre la salida del proceso y el modelo del proceso en operación normal. Sin embargo, este error es considerable, debido que las condiciones de modelado habían sido otras.

Cambio de Referencia

La Figura 9 muestra las salida del proceso y de cada uno de los modelos hallados, cuando se simula un cambio en el valor de referencia, estos modelos son aquellos diseñados sin tomar en cuenta dicho cambio.

Puede notarse que si se utilizan estos modelos, al ocurrir un cambio de referencia, en el instante 500 la falla producida posteriormente (instante 1500, en la FZMST) no es identificada por los modelos existentes. Así surge la necesidad de utilizar un banco de modelos diferente para el

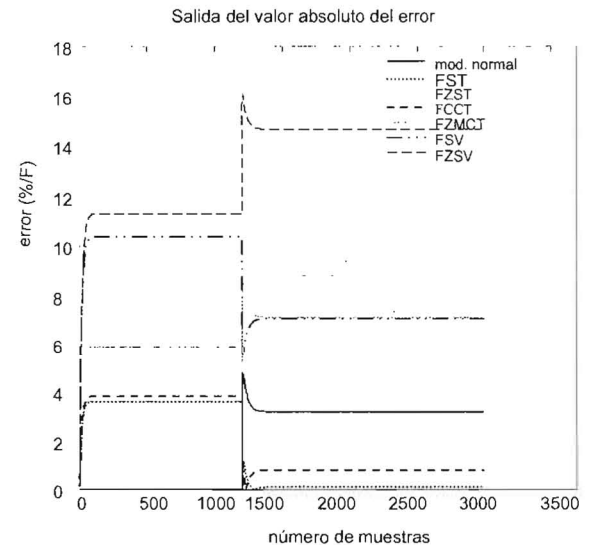


Figura 7. Valor absoluto del error entre la salida real del proceso y cada uno de los modelos para una falla en el span del transmisor.

cambio de referencia. La Figura 10 muestra el error entre las salidas del proceso y de cada uno de los modelos hallados tomando en cuenta el cambio de referencia, puede observarse que en este caso la salida que más se aproxima al modelo real es el modelo correspondiente a una FZMST, siendo la falla simulada.

5. Conclusiones

Se propuso una nueva alternativa para la detección y el diagnóstico de fallas, basada y aprovechando las características de un método utilizado originalmente para el control de procesos con diferentes regímenes de operación. Una de las ventajas del método propuesto es la utilización de sólo la señal de entrada (señal de control) y la salida del proceso, para la obtención de los modelos. Además de ser una técnica que no requiere demasiada complejidad matemática al ser utilizadas sólo señales disponibles y el uso de las técnicas de identificación paramétricas, es decir, está entonces, orientada a un sentido práctico que pueda ser implementado en cualquier tipo de procesos.

El análisis se realizó para fallas que están presentes en el proceso bajo control, es decir, que con ello puede demostrarse que cualquier anor-

Tabla 1
Valores del error absoluto y de probabilidad entre el proceso real y cada uno de los modelos, para una FST

Modelo	lel	P
Sin falla	3,1952	0,00
FST	0,1035	0,61
FZMST	8,8463	0,00
FCCT	0,8195	0,00
FZMCT	7,1100	0,00
FSV	7,0600	0,00
FZMSV	14,6500	0,00

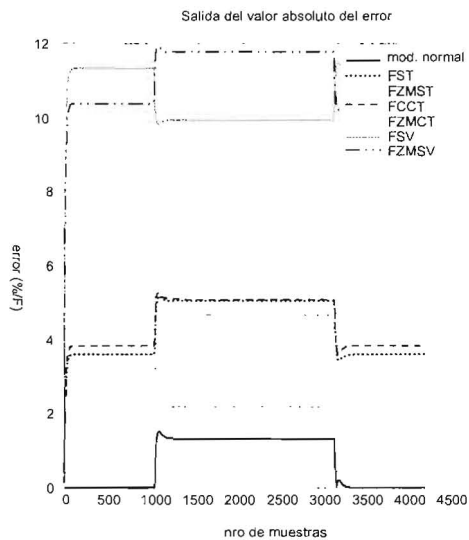


Figura 8. Error entre las salidas del proceso y de cada uno de los modelos, cuando se tiene una perturbación de tipo escalón de un 4% sobre el valor normal, en el flujo de entrada.

malidad del proceso puede ser representada por un modelo matemático, mediante sistemas de Identificación, basándose, claro está en los históricos del proceso bajo estudio, cumpliendo así con el objetivo inicial del estudio. Con la segunda etapa fuera de línea se evita la ejecución de todos los modelos, pues sólo se irá a ella en caso de ser necesario, esto es, si con los modelos principales no es posible hallar la localización de la falla ocurrida, además con ello se toman en cuenta las

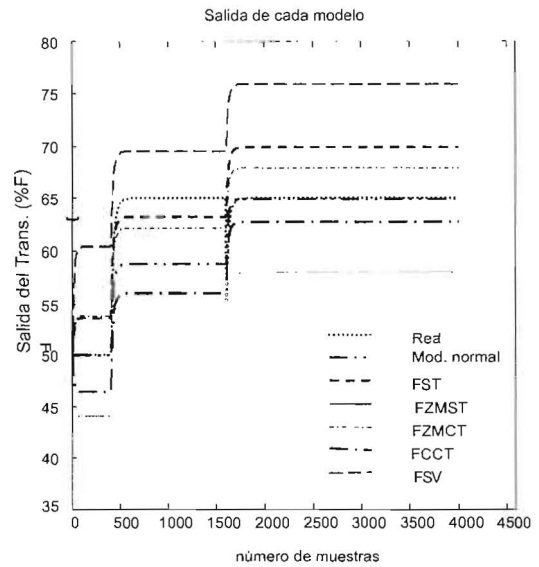


Figura 9 Salida del proceso y cada uno de los modelos, del banco de modelos hallados sin tomar en cuenta el cambio de referencia.

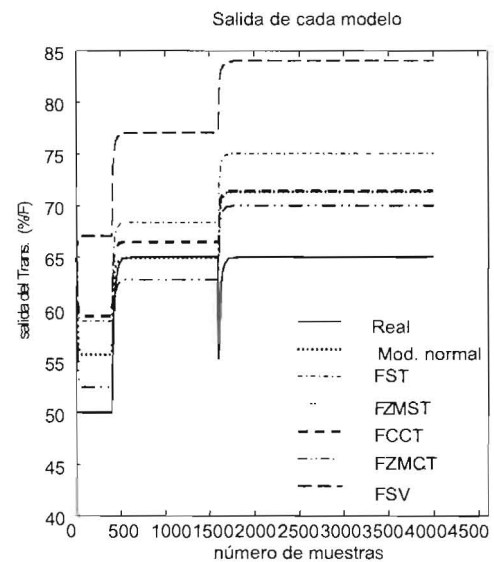


Figura 10 Salida del proceso y cada uno de los modelos, del banco de modelos cuando se toma en cuenta el cambio de referencia.

fallas que puedan ocurrir en las cercanías de los valores originalmente modelados.

A medida que sean tomadas en cuenta un mayor número de fallas, el número de modelos irá en aumento, lo que podría representar un posible inconveniente al presentarse nuevas fallas,

pero que pueden también ser reagrupadas según las características que presenten.

Otra ventaja de este método, como se mencionó antes es el tomar en cuenta un mayor rango de valores para las posibles fallas, con los modelos que se encuentran fuera de línea. Además permite tener un grado de confiabilidad en los resultados por la aplicación de la prueba T-Student, estableciendo la pertenencia de la salida del proceso en un determinado momento a los modelos de las fallas existentes.

Para futuras investigaciones es posible mejorar la técnica empleada utilizando modelos no paramétricos para los modelos del proceso y de las respectivas fallas. Debido a que la dinámica del control varía para cada valor de referencia se recomienda hallar un modelo de dicha dinámica a fin de reducir los bancos de modelos utilizados. Otro aspecto a tomar en cuenta para futuros estudios el de incluir válvulas no lineales o transmisores con retardo de tiempo y estudiar su comportamiento.

6. Referencias Bibliográficas

1. Isermann Rolf. Process Fault Detection Based on Modelling and Estimation Methods – A Survey. *Automatica* Vol 20 Nro. 4 1984.
2. Willsky A., Chow Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems. *IEEE Transaction Automatic Control*. Vol. AC 29, 1984.
3. Bokor, V., Naggy Y. Reactor noise analysis: applying multivariable AR&ARMA methods. 2do taller Europeo de diagnóstico de fallas, España 1987.
4. Gertler, J., Structured Residuals for Fault Isolation, Disturbance Decoupling and Modelling error Robustness. *IFAC On-line Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industries*, Delaware, USA 1992.
5. P. Amann, E. Alcorta Garcia, B Koeppen-Seliger, P.M. Frank. Knowledge and data based models for fault diagnosis. *Journal on Systems Analysis*, 1998.
6. Garcés Sayra. Propuesta de un Sistema Automático para Detección y Diagnóstico de Fallas. Tesis de Grado Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela, 1999.
7. Sun, D., Hoo, K. A robust transition control structure for time-delay systems. *Int. Journal of Control*, 72, 1992.
8. Tarantino, R. Detección de Fallas en Sistemas Dinámicos lineales variantes en el tiempo. Proyecto de Grado. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela, 1999.
9. Smith, C. Corripio, A. Principles and Practice of Automatic Process Control. John Wiley & Sons Inc., 1997.
10. González Duberlis. Comparación y Aplicación de Métodos de Identificación. Tesis de Grado. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela 2000.
11. Ljung L. *Systems Identification: Theory for Users*. Prentice Hall. 1987.
12. Meyer, Probabilidad y Estadística. Adisson &Wesley. 1970.

Recibido el 19 de Enero 2004

En forma revisada el 31 de Enero 2005