

Diagnóstico de fallas basado en modelos: Una solución factible para el desarrollo de aplicaciones SCADA en tiempo real

Model-based fault diagnosis: A feasible approach to develop SCADA applications in real time

Cerrada, Mariela^{1,2*}, Cardillo, Juan¹ y Prada, Anneliese

¹Departamento de Sistemas de Control. ²CEMISID, Facultad de Ingeniería

Universidad de Los Andes

Mérida 5101, Venezuela.

*cerradam@ula

Resumen

La proposición de técnicas y modelos para tareas de automatización que garanticen soluciones en tiempo real constituye un reto fundamental en el área industrial, con el fin de responder a los cambios inesperados de los sistemas de control y minimizar la operación incorrecta de los procesos que afectan la calidad del producto, la seguridad humana y las consecuencias ambientales. Considerando la importancia de disminuir la brecha entre las propuestas teóricas y los requerimientos de implantación en un ambiente industrial real para incorporar la detección y diagnóstico de fallas como tareas de control supervisorio, en este trabajo se presenta la implantación sobre una arquitectura SCADA de una aplicación de detección y diagnóstico de fallas basada en modelo sobre el prototipo industrial DAC603, bajo los lineamientos de la norma ISA95.

Palabras clave: Detección y diagnóstico de fallas, monitoreo y supervisión, sistemas en tiempo real, automatización.

Abstract

Nowadays, there is a need of new approaches and models for real time solutions in industrial automation to respond to unexpected changes in systems control and to minimize non adequate operations in the process that may affect the product's quality, safety and can have environmental consequences. In the case of fault detection and diagnosis, a real time performance of the proposed solutions allows the development of applications in the SCADA level. Taking into account the importance of minimizing the differences between theoretical approaches and industrial requirements, this paper presents the development of a SCADA application based on models for fault detection and diagnosis under ISA 95 norm.

Key words: Fault detection and isolation, monitoring and supervision, real-time tasks, automation.

1 Introducción

El diagnóstico de fallas es necesario en cualquier proceso automatizado para aumentar el grado de confiabilidad y disponibilidad de los procesos industriales. Cada componente de un proceso o sistema es diseñado para desempeñar cierta función, si el componente no cumple los objetivos para el cual fue diseñado, entonces el proceso funcionaría en modo degradado o podría incluso generar paradas de planta no programadas que repercuten en la calidad del producto y otras consecuencias asociadas a la seguridad. Así, el contar con aplicaciones de diagnóstico y detección que se ejecuten en tiempo real constituye un reto fundamen-

tal en el área industrial (Blanke y col., 2006).

Desde el punto de vista de los desarrollos teóricos, existen propuestas donde la implementación en ambientes industriales reales es compleja y termina teniendo poco valor práctico. En este sentido, algunas propuestas recientes encontradas en la literatura, retoman técnicas basadas en modelos para ofrecer soluciones en tiempo real. La ventaja de usar técnicas basadas en modelo, reside en el hecho de requerir básicamente cálculo numérico sobre los datos provenientes de los sensores disponibles para generar la información necesaria para lograr el diagnóstico (Zhang y Kezunovic, 2007, Palluat y col., 2006; Persin y Tovornic, 2005).

Clásicamente, las tareas de detección y diagnóstico de fallas son ejecutadas en el nivel de supervisión, como aplicaciones paralelas al control supervisorio, jerárquicamente en niveles diferentes a los sistemas de control local. Esta arquitectura hace compleja la integración de las funciones, funcionalidades e información que permitan la flexibilidad en los procesos industriales, tal y como se propone en las nuevas tendencias para la automatización integrada de procesos, (Tarantino y col., 2000; Albert y col., 2002; Cerrada y col., 2007; Rao y col., 1998; Ríos-Bolívar y col., 2008). En el marco de este reto, las nuevas tendencias en automatización apuntan hacia la implementación de estas tareas, en lo posible, como aplicaciones del SCADA. De esta manera, el clásico supervisor soportado por un SCADA es concebido como un sistema de control que integre las tareas de detección y diagnóstico de fallas, como una actividad previa que permite incorporar de manera natural el control tolerante a fallas.

Considerando la importancia de disminuir la brecha entre las propuestas teóricas y los requerimientos de implantación en un ambiente industrial real para incorporar la detección y diagnóstico de fallas como tareas de control supervisorio, en este trabajo se presenta la implantación de una aplicación de detección y diagnóstico de fallas basada en modelo, sobre una arquitectura de automatización industrial bajo los lineamientos del estándar ISA95.

Específicamente, la aplicación implementa un Observador Generalizado para detectar fugas y malfuncionamiento de válvulas en el sistema de tanques del proceso industrial a escala DAC603, usando la plataforma de automatización Wonderware® (System Platform 1) como SCADA, su módulo Industrial Application Server y un PLC Control Logic 5000. El desarrollo de esta aplicación permitió generar un entorno de pruebas industrial real que muestra la factibilidad de implantar este tipo de aplicación a piso de planta en tiempo real sobre una arquitectura para control y automatización industrial bajo un estándar ampliamente aceptado.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: La sección 2 presenta los fundamentos asociados al observador generalizado de Luenberger, la norma ISA 95 y la concepción de un supervisor en tiempo real. La sección 3 muestra el diseño del sistema de detección y diagnóstico de fallas, se especifica el proceso DAC 603 y se estudian las fallas del sistema. En la sección 4, se presenta la implementación en tiempo real de la aplicación y sus pruebas. Finalmente la sección 5 muestra las conclusiones.

2. Marco Teórico

2.1 El observador generalizado de Luenberger

El Observador Generalizado de Luenberger (OGL) es una extensión del observador clásico de Luenberger y usado para la detección y diagnóstico de fallas (Tarantino y col., 2000; Ríos-Bolívar, 2003). Bajo condiciones de detec-

tabilidad y separabilidad de las fallas, esta extensión permite la asignación de una estructura particular a la matriz de la dinámica del error de estimación, así como la ubicación de sus autovalores, lo que es fundamental para lograr el diagnóstico de las fallas.

Considérese el modelo de diagnóstico:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \quad x(0) = x_0 \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}\quad (1)$$

donde

$x \in X \subset \mathbb{P}^n$ son los estados, $u \in U \subset \mathbb{P}^m$ son los controles, y $y \in Y \subset \mathbb{P}^q$ son las salidas. Las matrices A, B, C son conocidas y de dimensiones apropiadas. Se asume que el par (A, C) es observable.

Las fallas se pueden representar como entradas adicionales en la dinámica del proceso, luego el sistema (1) puede ser descrito según (2):

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + \sum_{i=1}^k L_i V_i(t) \quad x(0) = x_0 \\ y(t) &= Cx(t) + \sum_{i=1}^k M_i V_i(t);\end{aligned}\quad (2)$$

donde $L_i \in \mathfrak{R}^{n \times p}$ y $M_i \in \mathfrak{R}^{q \times p}$ indican las direcciones de fallas en los subespacios de entrada y salida, respectivamente, que se suponen conocidas y linealmente independientes. $V_i(t)$ corresponde al modo de falla, una función independiente, arbitraria y desconocida e igual a cero en el instante t_0 , y k es el número de fallas.

Suponga que las condiciones de detectabilidad y separabilidad de las fallas son satisfechas (Ríos-Bolívar, 2003) y sea el sistema descrito por (2), con $M_i = 0$, $i = 0, \dots, k$. Considerando la k-ésima derivada de la salida del sistema en (2):

$$y^{(k)} = P_k(A, C)x + \sum_{i=0}^{k-2} Q_k^i(A, B, C)u^{(i)} + Q_k^{k-1}(B, C)u^{k-1}\quad (3)$$

entonces, la generalización de orden k para el observador de Luenberger se define como:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + D_0(y - C\hat{x}) + D_1(\dot{y} - P_1(A, C)\hat{x} - Q_1^0(B, C)u) + \dots \\ &+ D_k(y^{(k)} - P_k(A, C)x - \sum_{i=0}^{k-2} Q_k^i(A, B, C)u^{(i)} - Q_k^{k-1}(B, C)u^{k-1}) \\ \hat{y} &= C\hat{x}\end{aligned}\quad (4)$$

Considerando una única salida compuesta por las señales obtenidas por derivaciones sucesivas, esto es:

$$Y(t) = \begin{pmatrix} y(t) \\ \dot{y}(t) \\ \vdots \\ y^{(k)}(t) \end{pmatrix} \quad (5)$$

la ecuación (4) puede escribirse como:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x}(t) + Bu(t) + D(Y(t) - \hat{Y}(t)) \quad (6)$$

donde \hat{Y} son las salidas y sus derivadas sucesivas estimadas.

El error de estimación del observador y los residuos de la salida se definen según las ecuaciones (7) y (8) respectivamente:

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (7)$$

$$r(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (8)$$

entonces, la matriz de ganancia D del observador (6) deben ser tales que la matriz de dinámica del error de estimación sea lo más cercano a una matriz diagonal, con autovalores estables $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$. Si dicha matriz es una matriz diagonal, entonces las fallas están desacopladas y se alcanza la separabilidad.

En general, el algoritmo de diagnóstico de fallas basado en OGL se enmarca en el esquema conceptual de la figura 1, donde r es el residuo y es la variable indicadora de falla.

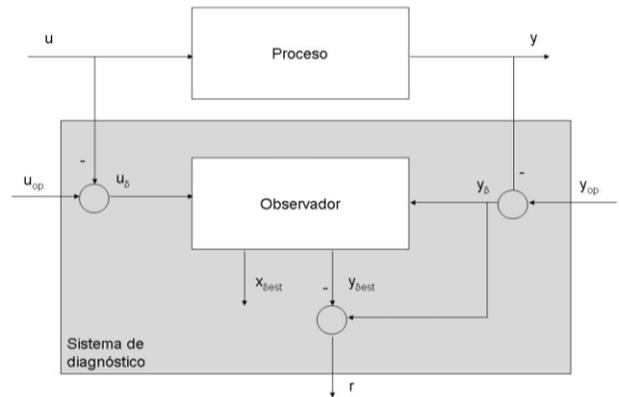


Fig. 1. Diagnóstico de fallas en sistemas de variable continua

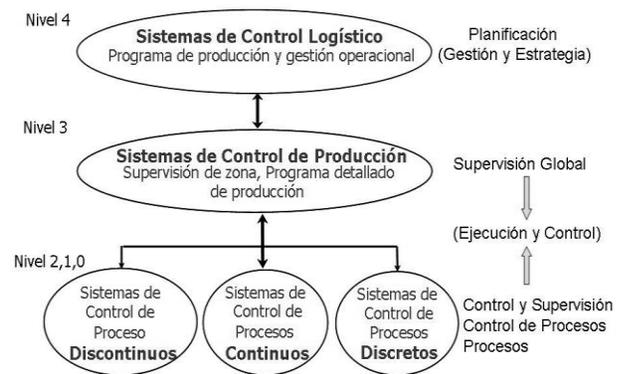


Fig. 2. Modelo Funcional de Sistemas para la producción de ISA 95

2.2 La norma ISA95

La tendencia actual en automatización de procesos de producción es la integración de las funcionalidades y de la información para permitir la flexibilidad en la implantación de aplicaciones, pero concebida dentro de un estándar industrial. ISA en los actuales momentos posee una norma para la integración de sistemas de control en el sistema de la empresa, denominada ISA951.

Basada en los modelos de referencia de estratificación de competencias CIM-PRM (Production Resources Management, de la Universidad de Purdue, ver Williams, 1989) y el modelo funcional de interacción entre lo operativo y lo gerencial (Modelo MES, Manufacturing Execution Systems), la norma ISA95 establece el Modelo Funcional de Sistemas para la producción, en donde los niveles 0, 1, 2, abarcan los sistemas de control. En el nivel 3, se ubican los sistemas de control de producción y en el nivel 4 los sistemas de control logísticos, ver figura 2.

La inclusión del control y la supervisión en el nivel mas bajo del modelo funcional propuesto por ISA95 requiere, como alternativa de solución, bajar la inteligencia (modelos de comportamiento autogestionados) hasta la capa de control de procesos. Esto hace que el clásico supervisor soportado por un SCADA tome la forma de un sistema de control de producción que incluso integra las funciones de mantenimiento incorporando de manera natural el control tolerante a fallas.

2.3 Concepción del supervisor para ISA 95

Basados en el modelo funcional de Sistemas para la producción de ISA 95, ver figura 2, se establece un jerarquía funcional de sistemas de tal manera que se requiere un modelo jerárquico de equipamiento. Este modelo de equipamiento esta concebido para cada uno de los diferentes procesos, así para procesos discontinuos se tienen celdas de producción conformadas de unidades, para procesos continuos se tienen unidades de producción donde cada una es

¹ www.ISA-95.com, www.ISA.org.

un eslabón de la cadena de valor del proceso, y para procesos discretos se tienen líneas de producción compuestas de celdas de trabajo. Esta descripción hace al proceso productivo flexible y reconfigurable.

La garantía de la flexibilidad y la reconfigurabilidad en el proceso pasa por bajar la inteligencia a nivel de piso de planta. Es por ello que el supervisor debe ser concebido como un sistema distribuido inteligente, el cual supervisa el control regulatorio de los quipos y coordina los diferentes entes, es decir, unidades, subprocessos, celdas de trabajo de los diferentes tipos de procesos como lo son las celdas de proceso, las unidades de producción y las líneas de trabajo, respectivamente, así como gestionar los recursos de cada uno de ellos asociados al flujo del producto y al cumplimiento de la receta. Todo esto es la concepción del sistema SCADA.

Con estas consideraciones de la norma, las funciones de este supervisor son vista y ejecutadas en tiempo real estricto, no estricto y fuera de línea dependiendo de la función. En este sentido, las limitaciones en tiempo real las impone el proceso y es la arquitectura teleinformática distribuida la que la soporta.

3 Sistema de detección y diagnóstico de fallas para el DAC 603

En esta sección se presenta la implantación del sistema de detección de fallas en tiempo real, basado en OGL, para sistema de tanques del DAC 603, el cual es el resultado fundamental de este trabajo, como parte de la primera fase de desarrollo de un sistema de supervisión ajustada a la norma ISA95.

Primeramente se dan las especificaciones del proceso industrial a escala DAC 603, así como la instrumentación disponible. Luego, se presenta la arquitectura de implantación basado en ISA95, y finalmente el diseño del OGL y su implementación usando Wonderware®.

3.1 DAC e instrumentación

El DAC 603, ver figura 3, es un equipo disponible en el Laboratorio de Sistemas de Control de la Escuela de Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Los Andes, que permite el entrenamiento básico en calibración de instrumentos y lazos de control, en donde se destacan subsistemas con lazos de control de temperatura, flujo, presión y nivel².

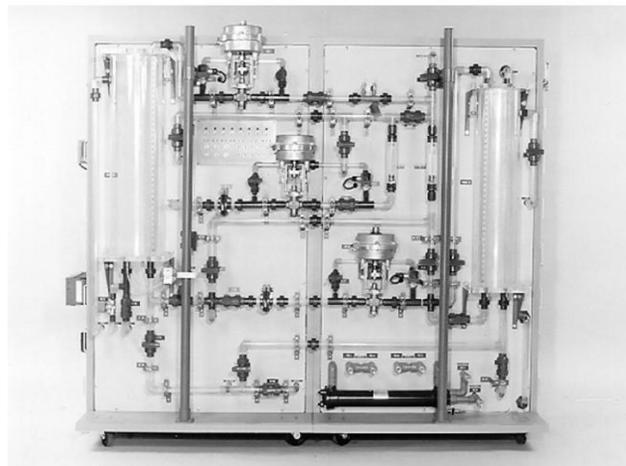


Fig. 3. Unidad de Entrenamiento Industrial DAC 603

El proceso comienza con el suministro de flujo (agua) al tanque 1, desde el tanque 3, por medio de una bomba de 1 HP (bomba 1) a una velocidad de 3450 RPM, mientras que a través de las válvulas manuales V-15, V-16 y V-18 y la válvula neumática CV-3 se realiza la interconexión con el tanque 2, es decir, se extrae líquido del tanque 1 permitiendo llenar el tanque 2. Luego por medio de la válvula manual V-21 se extrae el agua del tanque 2 y se reingresa al tanque 3 (ver figura 4).

La variable de entrada del proceso es la razón de flujo q_i que llega al tanque 1, la cual es medida por medio del rotámetro 1 de la unidad de entrenamiento. Las salidas del sistema están descritas por las alturas h_1 y h_2 de los tanques 1 y 2, respectivamente, y son medidas a través de transmisores de presión diferencial, los cuales generan una señal eléctrica entre 4-2mA, correspondiente a la altura de líquido en el tanque. De esta manera el proceso considerado para el control y diagnóstico de fallas se muestra en la figura 5.

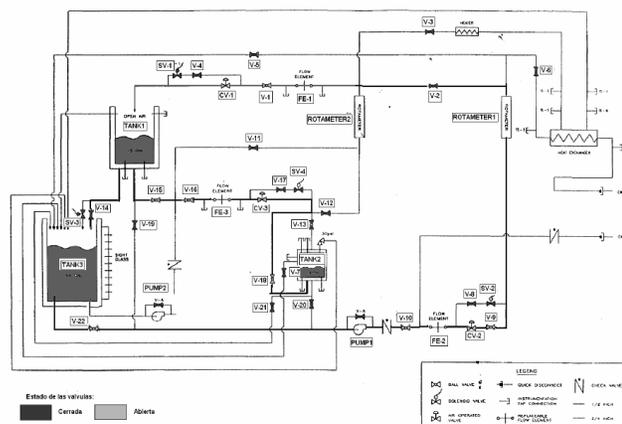


Fig. 4. Esquema P&I del DAC 603

² <http://www.dac-3d.com>

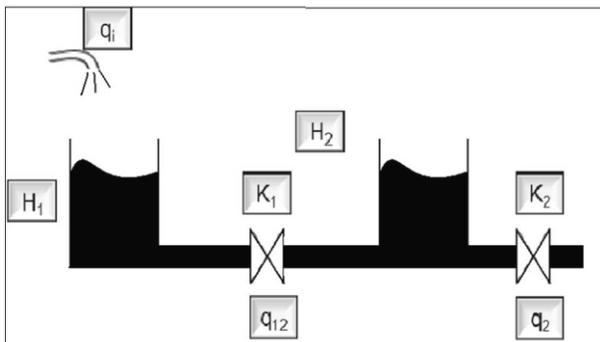


Fig. 5. Sistema de Tanques interconectados

(I) Calibración del proceso:

El proceso fue calibrado a través del ajuste manual de la apertura de la válvula V-21, que une los tanques 2 y 3. Después de varias pruebas, y considerando diferentes magnitudes del flujo de entrada al tanque 1, se encontró el porcentaje de apertura adecuado que brindara un amplio rango de operación.

(II) Calibración de los sensores:

El transmisor de presión diferencial está conectado a una placa orificio de 0.428” de diámetro. El transmisor ha sido calibrado para transmitir las variaciones de flujo en un rango de 0 a 12,5 g.p.m. valores que se corresponden con el flujo mínimo y máximo proporcionado por la bomba al sistema. Las ecuaciones que permiten relacionar la salida del transmisor con las medidas de flujo y altura son las siguientes:

$$\%salida_transmisor = \frac{(i - 4)(mA)}{(20 - 4)(mA)} * 100\%$$

$$\%flujo = \sqrt{\%salida_transmisor} * 10$$

$$gpm = \frac{\%flujo * 12,5(gpm)}{100(\%)}$$

$$h = (i - 4)(mA) * \frac{(LS - LI)(pulg)}{(20 - 4)(mA)} + LI(pulg)$$

donde *i* es la corriente de salida del transmisor de presión, LS es el límite de calibración superior (altura máxima medida) y LI es el límite de calibración inferior (altura mínima medida).

3.2 Arquitectura de implantación

Según el modelo ISA95, en el nivel 4 se realiza la recolección de información requerida para la planificación de mantenimiento predictivo y preventivo, así como la generación de dicho plan dentro de la programación de producción. En el nivel 3, se establecen la programación inmediata

detallada de producción que incluye actividades de mantenimiento. Esto sugiere que la ejecución de aplicaciones para la detección y diagnóstico de fallas puedan ser ejecutadas en el nivel 2, como parte del esquema de supervisión, considerando técnicas con tiempos de respuesta equiparables a los requeridos por la restricción de tiempo real del proceso. Clásicamente la ejecución de estas aplicaciones se realizaba en el nivel 3 y superiores, correspondientes al modelo ISO de OSI3.

En consecuencia, ajustados a la propuesta de este trabajo, la implantación física del esquema de la figura 4 sobre plataforma y dispositivos comerciales, se muestra en la figura 6. La primera capa abarca el nivel 0, esto es, el proceso físico y los componentes de control directo (PLC, sensores y actuadores), y la segunda capa implementa la aplicación de diagnóstico como un componente del SCA-DA.

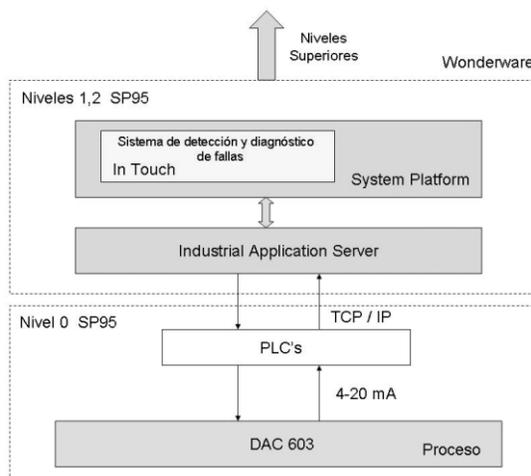


Fig. 6. Arquitectura de implantación industrial

3.3 Diseño del sistema de detección y diagnóstico

En esta sección se presenta el diseño del OGL usando el modelo de la figura 5.

Para el diseño del observador, se realizaron los siguientes pasos: (i) Identificación de los modelos nominal y con falla del proceso en la forma de la ecuación (1); (ii) Verificación de las condiciones de detectabilidad y separabilidad, según los teoremas propuestos por Ríos-Bolívar (2003); (III) Diseño de las ganancias del observador para garantizar una dinámica de error de estimación asintóticamente estable.

(I) Identificación de los modelos nominal y con falla del proceso

Considerando el balance de masa del proceso, la

³ www.Pchardware.Org/Redes/Redes_OSI.htm.

dinámica del proceso viene dada por el par de ecuaciones (9):

$$\begin{aligned} \frac{dh_1}{dt} &= \frac{1}{C_1} q_i - \frac{K_1}{C_1} \sqrt{h_1 - h_2} \\ \frac{dh_2}{dt} &= \frac{K_1}{C_2} \sqrt{h_1 - h_2} - \frac{K_2}{C_2} \sqrt{h_2} \end{aligned} \quad (9)$$

donde C_1 es el área del tanque 1, C_2 es el área del tanque 2, K_1 y K_2 son constantes.

A partir de la construcción experimental de las curvas de altura contra razón de flujo de cada tanque, y sabiendo que en equilibrio $Q_{12} = K_1 \sqrt{H_1 - H_2}$ y $Q_2 = K_2 \sqrt{H_2}$, se obtuvieron los valores estimados de las constantes K_1 y K_2 usando el método de los mínimos cuadrados. En consecuencia, considerando las constantes estimadas y los valores de los parámetros $C_1=95.52$ pulg² y $C_2=64$ pulg² en la ecuación (9), el modelo nominal para el sistema viene dada por la ecuación (10):

$$\begin{aligned} \frac{dh_1}{dt} &= 0.0105q_i - 0.01\sqrt{h_1 - h_2} \\ \frac{dh_2}{dt} &= 0.0150\sqrt{h_1 - h_2} - 0.0213\sqrt{h_2} \end{aligned} \quad (10)$$

Para efectos del diseño del sistema de diagnóstico, se consideraron dos modos de falla. La primera, llamada falla 1, es una fuga en el tanque 1, a través de la válvula V-14, la cual fue modelada como un flujo de salida adicional en el tanque 1 a través de la ecuación $q_L = K_3 \sqrt{h_1}$. Una segunda falla, llamada falla 2, es el bloqueo total o parcial de la válvula V-16 de interconexión entre el tanque 1 y el tanque 2, en la posición cerrada. Esta falla se modela como un cambio ΔK en la resistencia al flujo, $K_\delta = K_1 - \Delta K$, donde K_1 es la constante del modelo nominal y K_δ es la constante del modelo con falla. Incorporando estos modos de falla en la ecuación (9), se obtiene el modelo sujeto a falla del sistema, dado por la ecuación (11):

$$\begin{aligned} \frac{dh_1}{dt} &= \frac{1}{C_1} q_i - \frac{K_1}{C_1} \sqrt{h_1 - h_2} - \frac{K_3}{C_1} \sqrt{h_1} + \frac{\Delta K}{C_1} \sqrt{h_1 - h_2} \\ \frac{dh_2}{dt} &= \frac{K_1}{C_2} \sqrt{h_1 - h_2} - \frac{K_2}{C_2} \sqrt{h_2} - \frac{\Delta K}{C_1} \sqrt{h_1 - h_2} \end{aligned} \quad (11)$$

El punto de operación del modelo nominal considerando el flujo nominal Q_i^* está dado por la ecuación (12):

$$(Q_i^*, H_1^*, H_2^*) = (Q_i^*, (\frac{1}{K_1^2} + \frac{1}{K_2^2}) \cdot Q_i^*, \frac{1}{K_2^2} \cdot Q_i^*) \quad (12)$$

Linealizando el modelo nominal alrededor de dicho punto de operación y expresando en forma paramétrica las direcciones y los modos de falla, el modelo lineal del sistema sujeto a falla se escribe en la ecuación (13):

$$\begin{aligned} \dot{h}_\delta &= \begin{bmatrix} -\frac{K_1^2}{2C_1 Q_i^*} & \frac{K_1^2}{2C_1 Q_i^*} \\ \frac{K_1^2}{2C_2 Q_i^*} & -\frac{K_2^2}{2C_2 Q_i^*} \end{bmatrix} h_\delta + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{1}{C_1} Q_\delta + \begin{bmatrix} l_1 \\ 0 \end{bmatrix} V_1(t) + \begin{bmatrix} l_2 \\ -l_2 \end{bmatrix} V_2(t) \\ y_\delta &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} h_\delta \end{aligned} \quad (13)$$

La figura 7 muestra el comportamiento del modelo lineal y no lineal alrededor del punto de operación $Q_i^*=3$ g.p.m. Se observa, en estado estable, el valor de $H_1^*=14.64$ pulg. y $H_2^*=4.845$ pulg.; los correspondientes valores experimentales obtenidos en laboratorio fueron $H_{1e}=14.485$ pulg. y $H_{2e}=4.375$ pulg., los cuales muestran un comportamiento aceptable del modelo identificado.

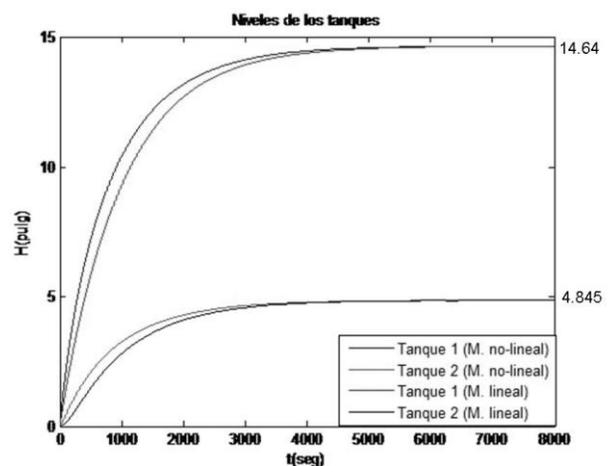


Fig. 7. Comparación de los modelos lineal y no lineal

(II) Verificación de las condiciones de detectabilidad y separabilidad

Luego de determinar la matriz de observabilidad O y verificar la observabilidad completa del par (A,C) , se comprueban las condiciones de detectabilidad y separabilidad (ver Ríos-Bolívar, 2003). Considerando que:

$$OL_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{-K_1^2}{2C_1Q_i^*} \cdot 1 & \frac{K_1^2}{2C_2Q_i^*} \cdot 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$OL_2 = \begin{bmatrix} 1_2 & -1_2 & \frac{-K_1^2}{2C_1Q_i^*} \cdot 1_2 & \left(\frac{K_1^2}{2C_2Q_i^*} + \frac{K_2^2}{2C_2Q_i^*} \right) \cdot 1_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

y siendo ambas de rango completo, las dos fallas son detectables. Dado que OL1 y OL2 son linealmente independientes, entonces, las fallas son separables.

(III) Diseño de las ganancias del observador

La salida única, por extensión, viene dada por la ecuación (16) y la salida estimada es dada por la ecuación (17):

$$Y = \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \frac{-K_1^2}{2C_1Q_i^*} & \frac{K_1^2}{2C_1Q_i^*} \\ \frac{K_1^2}{2C_2Q_i^*} & -\left(\frac{K_1^2}{2C_2Q_i^*} + K_2^2 \right) \end{bmatrix} h_\delta + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{C_1} \\ 0 \end{bmatrix} Q_\delta + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_1 \\ 0 \end{bmatrix} V_1(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_2 \\ -l_2 \end{bmatrix} V_2(t) \quad (16)$$

$$\hat{Y} = \begin{bmatrix} \hat{y} \\ \hat{\dot{y}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \frac{-K_1^2}{2C_1Q_i^*} & \frac{K_1^2}{2C_1Q_i^*} \\ \frac{K_1^2}{2C_2Q_i^*} & -\left(\frac{K_1^2}{2C_2Q_i^*} + K_2^2 \right) \end{bmatrix} h_\delta + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{C_1} \\ 0 \end{bmatrix} Q_\delta \quad (17)$$

Definiendo la matriz de ganancias del observador como en la ecuación (18):

$$D = \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \\ d_5 & d_6 & d_7 & d_8 \end{bmatrix} \quad (18)$$

y sustituyendo las ecuaciones (16), (17) y (18) en el observador (6), se seleccionaron d3=3, d4=2, d7=y d8= -1, para asegurar la separabilidad de las fallas. El resto de los di se seleccionan para garantizar la estabilidad asintótica del error de estimación, obteniéndose la matriz de ganancia (19). Finalmente, la ecuación de la dinámica del error y la ecuación del residuo vienen dadas por (20) y (21), respectivamente:

$$D = \begin{bmatrix} 0,99842 & 0,0113 & 3 & 2 \\ 0,00478 & 0,98554 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} e + \begin{bmatrix} -2l_1 \\ 0 \end{bmatrix} V_1(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -2l_2 \end{bmatrix} V_2(t) \quad (20)$$

$$\eta = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

El observador diseñado será implantado según el esquema de la Figura 1 y su desempeño se muestra en las simulaciones de la figura 8, la cual muestra el comportamiento de los residuos en presencia de fallas. Al inicio, la planta esta libre de fallas y los residuos son aproximadamente cero, la falla 1 (fuga en el tanque 1) aparece en t = 4000s. y es posible observar que sólo el residuo 1 es distinto de cero por lo que la detección y el diagnóstico se puede llevar a cabo. Posteriormente, aparece simultáneamente la falla 2 en el instante t = 6000s, en este caso ambos residuos son diferentes de cero.

Finalmente, para la implementación en tiempo real, el observador diseñado fue discretizado usando el Método de Euler, obteniendo la ecuación en diferencias (22), donde T es el período de muestreo, el cual fue elegido en T=250ms., siguiendo los criterios conocidos para su selección (Ogata, 1996):

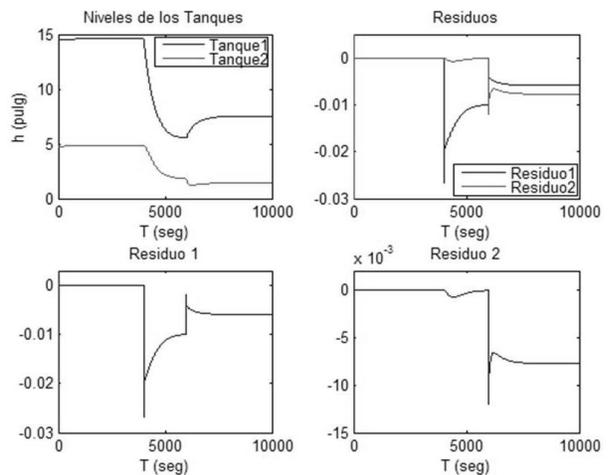


Fig. 8. Comportamiento de los residuos ante la presencia fallas

$$\hat{h} [k+1]T = A_d \hat{h} [k]T + B_d Q [k]T + D_d \left(h_\delta [k+1]T - \hat{h} [k+1]T \right) + L_{1d} V_1 [k+1]T + L_{2d} V_2 [k+1]T \quad (22)$$

donde Ad, Bd, Dd, L1d y L2d son matrices de dimensiones apropiadas. Mas detalles sobre el cálculo de estas matrices pueden revisarse en (Prada, 2008).

4 Implementación y pruebas

La implementación en tiempo real del observador de fallas se hizo sobre Wonderware®, la cual es una herramienta de software para crear aplicaciones de control y supervisión en ambientes industriales⁴. El paquete esta integrado por los módulos In Touch, SuiteVoyager, Industrial SQL Server, DAS/IO Server, Active Factory, In Control, Industrial Application Server, PEM, In Track, QI Analyst y DT Analyst, los cuales se distribuyen según una arquitectura industrial llamada ArchestrA, diseñada por Wonderware®, para extender la vida de los sistemas existentes, al tiempo que se implementan las últimas tecnologías de software (ver figura 9).

Este trabajo usa el módulo Industrial Application Server el cual facilita la adquisición de datos en tiempo real, manejo de alarmas y eventos, servicios de manipulación de datos y capacidad de desarrollos de ingeniería. Entre sus características principales están la escalabilidad, flexibilidad y modularidad. La representación del sistema de automatización se hace bajo el modo de instrumentación virtual, pudiendo representarse el modelo de la planta tal cual es en la realidad.



Fig. 9. Aplicaciones Wonderware en la arquitectura ArchestrA

La interfaz hombre-máquina (HMI), para la visualización de las aplicaciones desarrolladas en Industrial Application Server se implementa usando el módulo In Touch, el cual permite crear la interfaz hombre-máquina (HMI) para visualizar y controlar procesos industriales a través del manejo y configuración de aplicaciones mediante gráficas. La adquisición de los datos en tiempo real se hizo a través del

⁴ <http://ve.wonderware.com>

PLC Logix5555, el cual usa el software de Rockwell® RSLinx y RSLogix5000 V11.0.

A través del IDE (Ambiente de Desarrollo Integrado), todos los dispositivos de la planta tendrán su homólogo en objetos, los cuales pueden ser agrupados por áreas (tales como una línea de producción), y éstas a su vez por plantas, siguiendo los diagramas de procesos reales. Así pues, el observador diseñado fue definido como un objeto y adecuadamente instanciado para poder implementar la ecuación (22), y luego incorporarse al resto de objetos que describe al sistema de control de nivel (Cooz, 2008). Para minimizar a presencia de ruido en la señal de los residuos se implementó, adicionalmente, un filtro promediador.

(I) Implantación del Observador

La implantación del observador en Wonderware se hizo conforme los siguientes pasos:

- 1. Recuperación y prueba del sistema de monitoreo.** En este paso se recuperó el sistema de monitoreo desarrollado en Cooz, 2008, a fin de incorporarle el observador. Dicho sistema es una colección específica de objetos ArchestrA, incluyendo WinPlatforms, áreas, ingenierías y objetos de aplicación que representan el DAC 603. Para verificar la comunicación entre las instancias, se usó el módulo de pruebas fuera de línea de Wonderware® llamado Testprot.
- 2. Programación y configuración del observador.** Consistió en la creación de un nuevo objeto dentro del sistema de monitoreo y la definición de las instancias y variables auxiliares necesarias para la programación de las ecuaciones en diferencia del observador. Posteriormente, se procedió a realizar las primeras pruebas fuera de línea con emulador Testprot para verificar la comunicación entre las instancias y la adquisición de los valores de los niveles de los tanques.
- 3. Desarrollo de la interface.** Para la visualización de la información proveniente del observador, se creó una nueva ventana en la aplicación DAC de InTouch que despliega las seis graficas que muestran los niveles reales y estimados de los tanques y los residuos generados.

(II) Configuración del PLC

La configuración del PLC se hizo según los siguientes pasos:

- 1. Configuración de la comunicación entre el computador y el PLC a través de Ethernet, usando el software RSLinx.**
- 2. Configuración del programa para la adquisición de los datos, usando el software RSLogix5000.**
- 3. Configuración del módulo de entradas analógicas.**

La incorporación del PLC al DAC 603 se muestra en la figura 10, considerando la inserción de una resistencia de 250 Ω para tener entradas al PLC en voltios.

(III) Ejecución en tiempo real

El proceso fue llevado al punto de operación seleccio-

nado para el diseño, y se comprueba que los residuos generados indican ausencia de falla, ver figura 11.

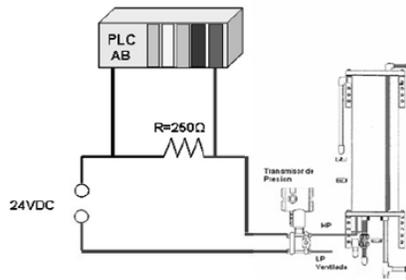


Fig. 10. Conexión del DAC 603 con el PLC

De manera manual se generaron las fallas 1 y 2. La figura 12 muestra el comportamiento de los residuos ante la falla 1 y 2. Los primeros instantes de tiempo el sistema no presenta falla y los residuos son aproximadamente 0; posteriormente aparece la falla 1, el residuo 1 cambia su valor y el residuo 2 se mantiene alrededor de 0. Finalmente aparece simultáneamente la falla 2 y ambos residuos son diferentes de 0, con un patrón de comportamiento definido.

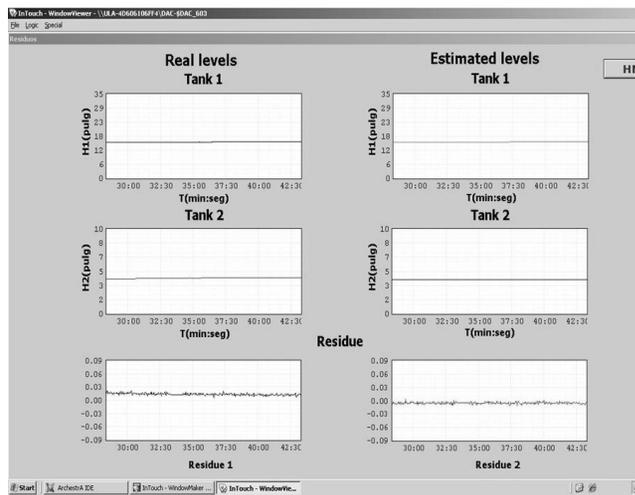


Fig. 11. Comportamiento de los residuos en ausencia de fallas

La figura 13 muestra el caso en el cual primero aparece la falla 2 y luego aparece, simultáneamente la falla 1. Los primeros instantes de tiempo el sistema no presenta falla y los residuos son aproximadamente 0; posteriormente aparece la falla 2 y se observa que el patrón de comportamiento de los residuos es diferente a cuando ocurre solamente la falla 1 (ver figura 12). Posteriormente ocurre la falla 1 y se observa como los residuos siguen el patrón de comportamiento esperado cuando las dos fallas ocurren simultáneamente (ver figura 13).

Es importante resaltar que la detección de fallas es descrita por la dinámica de los residuos, ecuaciones (20) y

(21), los cuales son basados en el modelo del proceso bajo fallas. De esta manera, la velocidad de detección está directamente asociada a la velocidad del cálculo de la solución de la ecuación (22). En este caso, esta solución se logra en un solo ciclo de ejecución de la herramienta desarrollada sobre Wonderware. Así, dado que la constante de tiempo del proceso está alrededor de 10 minutos y el ciclo de ejecución está sobre los 100 milisegundos, se puede decir que la detección de las fallas es prácticamente instantánea, una vez que las mismas ocurren en el proceso.

Los resultados experimentales muestran el correcto desempeño del filtro y de la aplicación en tiempo real. Se comprueba que, en efecto, en ausencia de falla, los residuos son aproximadamente cero y en presencia de las mismas los patrones de comportamiento de cada residuo son diferentes, lo que permite diagnosticar perfectamente cual de las fallas está ocurriendo.

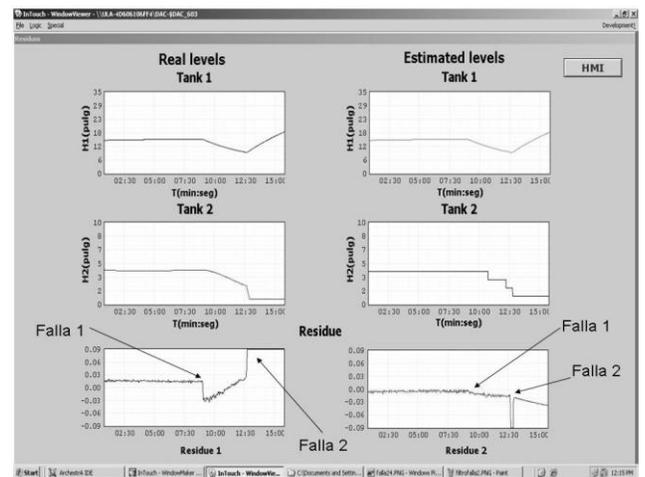


Fig. 12. Comportamiento de los residuos ante la falla 1 y la falla 2

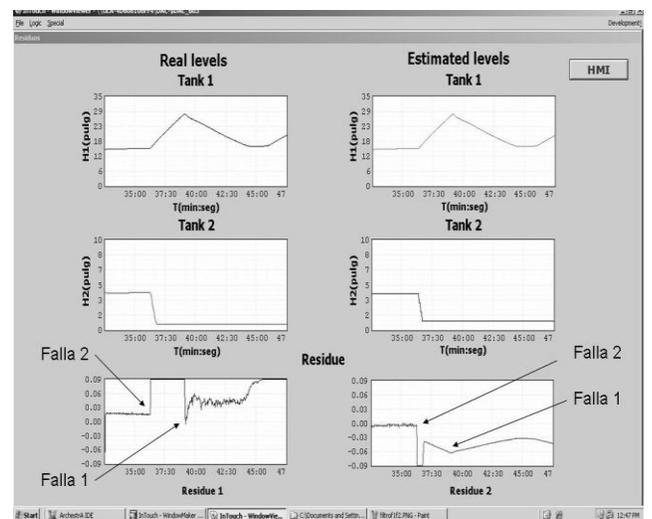


Fig. 13. Comportamiento de los residuos ante la falla 2 y la falla 1

5 Conclusiones

En este trabajo se presentó el desarrollo e implantación de una aplicación para la detección y diagnóstico de fallas bajo los lineamientos del estándar ISA95. Se mostró que las técnicas basadas en modelo pueden resultar en aplicaciones del SCADA, que son implantadas bajo la arquitectura propuesta en este trabajo, y se ajustan a los requerimientos de tiempo real exigidos por el proceso. Bajo la concepción de un supervisor bajo las premisas de la norma ISA95 las limitaciones en tiempo real las impone el proceso y es la arquitectura teleinformática distribuida la que la soporta.

Se mostró el desempeño en tiempo real de los desarrollos teóricos para el diseño de filtros de detección y diagnóstico de fallas. El éxito de los métodos basados en redundancia analítica depende del correcto modelado del proceso, ya que si bien el método resuelve satisfactoriamente la detección de las fallas, el problema de diagnóstico depende estrictamente del modelo y del conocimiento del efecto de las fallas sobre el sistema. Se podría considerar el modelado de los instrumentos y de otras variables del proceso, por lo que se recomienda disponer de sensores y actuadores adecuados.

Este trabajo constituye una de las fases requeridas para la construcción del sistema de control y supervisión del proceso industrial a escala DAC 603, que permitirá probar el desempeño en tiempo real de otras propuestas teóricas. Los futuros trabajos están orientados a dos direcciones: por un lado, cerrar los lazos de control y conjuntamente con el sistema de detección se pretende tener el sistema de control tolerante a fallas, y por otro lado, considerar otras fallas en el sistema estudiado para aumentar la complejidad del modelo y continuar evaluando los desempeños en tiempo real.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco del proyecto I-1131-08-02 del CDCHT-ULA. Los autores agradecen el soporte financiero para su desarrollo. Así mismo el agradecimiento de los autores es para Wonderware® de Venezuela por la donación de 21 licencias no comerciales de su plataforma, y a Rockwell Automation de Venezuela por la donación del PLC Control Logic usado en este trabajo.

Referencias

Albert M, Längle T, Wörn H, Capobianco M y Brighenti A, 2002, Multi-agent systems for industrial diagnostics, XV IFAC World Congress, Barcelona, Spain.

Blanke M, Kinnaert M, Lunze J y Staroswiecki M, 2006, Diagnosis and Fault Tolerant Control, Springer-Verlag, Berlin.

Cerrada M, Cardillo J, Aguilar J y Faneite R, 2007, Agents-based design for fault management systems in industrial processes, Computers in Industry, Vol. 58, pp. 313-328.

Cooz K, 2008, Sistema de monitoreo del equipo de entre-

namiento DAC Instrumentation and process control training products 603, Technical report, Universidad de Los Andes.

Ogata K, 1996, Sistemas de Control en Tiempo Discreto, Prentice-Hall Hispanoamericana, México.

Palluat N, Racoceanu D y Zerhouni N, 2006, A neuro-fuzzy monitoring system: Application to flexible production systems, Computers in Industry, Volume 57, Issue 6, pp. 528-538.

Persin S y Tovornik B, 2005, Real-time implementation of fault diagnosis to a heat exchanger, Control Engineering Practice, Vol. 13, Issue 8, pp. 1061-1069.

Prada A, 2008, Diseño e implementación de un sistema de detección y diagnóstico de fallas para el DAC 603, Tesis de pregrado. Escuela de Ingeniería de Sistemas. Universidad de Los Andes.

Rao M y Yang H, 1998, Integrated Distributed Intelligent System Architecture for Incidents Monitoring and Diagnosis, Computer in Industry, Vol. 37, pp. 143-151.

Ríos-Bolívar A, 2003, Metodologías para la Construcción de Sistemas de Detección y Diagnóstico de fallas. Tesis Doctoral, Universidad de Los Andes.

Ríos-Bolívar A, Cerrada M, Narciso F, Hidrobo F, Aguilar J, 2008, Implantando Sistemas de Control con Agentes Inteligentes, Ciencia e Ingeniería, Vol. 29, No. 3, pp. 249-260.

Tarantino R, Szigeti F y Colina-Morles E, 2000, Generalized Luenberger observer-based fault detection filter design: an industrial application, Control Engineering Practice, Vol. 8, No. 6, pp. 665-671.

Williams T, 1989, A reference model for Computer Integrated Manufacturing CIM, International Purdue Works.

Zhang N y Kezunovic M, 2007, A real time fault analysis tool for monitoring operation of transmission line protective relay References and further reading may be available for this article. To view references and further reading you must purchase this article. Electric Power Systems Research, Vol. 77, Issues 3-4, pp. 361-370.

Recibido: 10 de junio de 2010

Revisado: 07 de septiembre de 2011