

ARQUITECTURA DISTRIBUIDA PARA LA DETECCIÓN AUTÓNOMA DE FALLAS EN SENSORES

C. Verde, J. Cuellar, J. Mina

*Instituto de Ingeniería, UNAM
Apdo. Postal 70-472
04510 DF, México
verde@servidor.unam.mx
Fax: (52)-55-56228130*

Resumen:

A pesar de la tendencia actual de incluir en los transductores de los sensores dispositivos digitales que compensan incertidumbres y sesgos, pocos de ellos están dotados con capacidad para suministrar información adicional sobre la confiabilidad y validación de las mediciones que se realizan. Por otro lado pocas veces se cuenta con suficiente redundancia para detectar y aislar fallas en todos los sensores de un proceso. Estos hechos motivaron la idea de explotar el hardware de los transductores y acondicionadores y aumentar sus capacidades para mejorar las tareas de supervisión de procesos dinámicos. Así se propone en este trabajo dotar a los transductores de los sensores con capacidades individuales para el suministro de información sobre la confiabilidad de las mediciones en tiempo real. Esta filosofía para mejorar la supervisión de un proceso deja en un segundo nivel la integración de las tareas de toma de decisiones y reconfiguración del proceso. En particular como ejemplo se presenta una plataforma para la detección de fallas en la membrana de un medidor de oxígeno disuelto tipo Clark en donde de manera periódica se verifican las características dinámicas de la membrana, la cual depende de su espesor, la constante de difusión y la temperatura.

1. INTRODUCCIÓN

Una tarea fundamental de los sistemas de supervisión automática de procesos industriales es el diagnóstico de fallas en los diferentes componentes de la planta. El marco teórico de referencia para los sistemas de diagnóstico involucrando tanto la detección como la localización de fallas en procesos, es presentado por la mayoría de los expertos de manera integrada considerando las fallas en

sensores, actuadores y proceso, ver (Patton *et al.*, 2001). Sin embargo, esta conceptualización tan general provoca en sistemas complejos resultados conservadores sobre todo en la etapa del aislamiento de las fallas y en las condiciones de existencia de soluciones. Casos de referencia como el sistema hidráulico de tres tanques (Astrom *et al.*, 2001) deben ser tomados como ejemplos académicos, y no como procedimientos generales para atacar un problema de diagnóstico de fallas y control tolerante a fallas en aplicaciones industriales reales. Adicionalmente a esta problemática la comunidad de detección y aislamiento de fallas (FDI por sus siglas en inglés) ha reconocido que la robustificación de los sistemas de diagnóstico complejos se logra usando diferentes enfoques y

¹ Este trabajo incluye resultados del proyecto EOLI apoyado por la Comunidad Europea bajo el programa ICO con contrato ICA4-CT-2002-10012 y el contenido es responsabilidad de los autores. Este trabajo cuenta además con el apoyo de los programas de becas de la UNAM y el CONACYT-México

metodología en la parte de detección y aislamiento y dejando a un segundo nivel la toma de decisiones y reconfiguración (B. Koeppen-Seliger, June, 2003).

Por otro lado, las tareas de calibración y compensaciones de los transductores en los sensores tienden a explotar las capacidades computacionales del hardware actual (Tortora *et al.*, 2003). Esta tendencia puede ser explotada ya que provee las condiciones para diseñar subsistemas llamados supervisores distribuidos de manera análoga al caso de los sistemas distribuidos de control. Este tipo de subsistemas autónomos incluyen tareas o funciones como: diagnóstico, información sobre la confiabilidad y tendencias de la medición, validación, etc. Este enfoque es el que se aborda en esta presentación. En particular, aquí se analizan las ventajas de un sistema distribuido de supervisión diseñado como parte del proyecto (EOLI, 2004) patrocinado por la Comunidad Europea. Para ejemplificar la potencialidad de la propuesta se toma como dispositivo con auto-evaluación el caso de un medidor de oxígeno disuelto.

El presente trabajo está organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se propone una plataforma distribuida de supervisión de los sensores de un proceso. En la sección 3 se describe el comportamiento del medidor de oxígeno disuelto, así como el modelo considerado para diagnosticar fallas y en la sección 4 se propone el mecanismo de auto-evaluación de las condiciones del estado de la membrana del sensor. Finalmente en la sección 5 se presentan las conclusiones del trabajo y algunas de las actividades previstas para la integración del sistema distribuido de supervisión.

2. ARQUITECTURA DISTRIBUIDA PARA FDI

En los años setenta los dispositivos electrónicos y sensores conectados a los procesos eran pasivos, sin embargo, a principio de los 80's se inició una evolución para hacerlos activos e inteligentes. La distinción de inteligente se debe a las funcionalidades que permite el procesamiento de datos a través de tecnología digital asociada a los dispositivos. La asignación de cierta inteligencia entre todos los componentes del sistema permite transformar los sistemas centralizados de supervisión en Sistemas Distribuidos Inteligentes. En (Panetto *et al.*, 1993) y (Bayar and Staroswiecki, 1992) se proponen algunas funciones en los dispositivos de campo inteligentes.

Este tipo de sistemas de monitoreo y supervisión los cuales llegan a incluir tareas de reconfiguración de un proceso, son fuertemente demandados en aplicaciones industriales. Específicamente el pre-

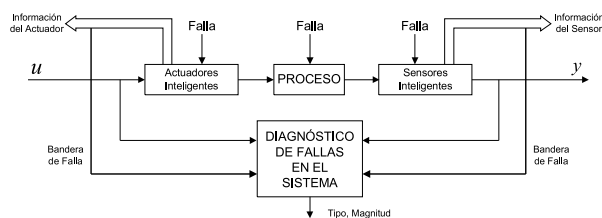


Fig. 1. Estructura del Sistema Distribuido de Diagnóstico

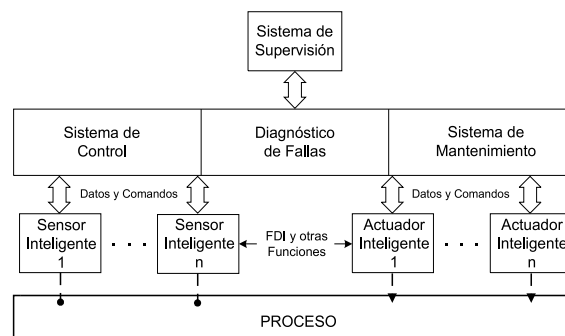


Fig. 2. Comunicación entre los dispositivos y niveles superiores

sente trabajo se enfoca a las funciones de supervisión distribuida de fallas en donde cada subsistema debe contar con un mecanismo de auto-evaluación que suministre indicadores de fallas a partir del diagnóstico. La validación apoyada por los resultados obtenidos en el diagnóstico consistirá en suministrar la medición o acción de control nominal directamente en ausencia de fallas y en caso contrario corregir el dato o acción a través de un ajuste.

La figura 1 muestra la estructura propuesta en donde se genera información sobre la confiabilidad de las mediciones y de las acciones de control, así como indicadores del desempeño de los sensores y actuadores de un proceso.

En esta arquitectura, las fallas del proceso se tratan de manera independiente en otro nivel, es decir, una falla en el proceso será detectada usando información del proceso junto con los reportes individuales de las funciones de FDI en los sensores y actuadores.

Con este esquema si bien es cierto que se requiere un gran esfuerzo inicial en el diseño de cada subsistema de supervisión, esto se compensa con los beneficios obtenidos en cuanto a modularidad, transportabilidad e intercambio de información con otros niveles jerárquicos en la estructura de control del proceso, véase la figura 2.

Por lo que respecta al indicador de fallas en los sensores se propone tener tres niveles.

- Borroso (*Fuzzy*): significa que el comportamiento es anormal pero está dentro de los límites razonables (ruido y forma).
- Confuso (*Confuse*): significa que hay evidencias de un comportamiento anormal, pero la duración de la condición es pequeña para diagnosticar una falla permanente.
- Ciego (*Blind*): significa que la señal no tiene relación con los valores esperados y este efecto se mantiene a lo largo del tiempo.

La información adicional que suministran los sensores permite entonces, no solo localizar fallas, sino ayudar a la toma de decisiones en la reconfiguración o suspensión parcial de un proceso.

3. MODELO DEL SENSOR DE OXÍGENO DISUELTO DO

La concentración del oxígeno disuelto DO es una medida de la capacidad para mantener vivos a los microorganismos en un líquido. Así que los sensores de DO tienen múltiples aplicaciones en el monitoreo de procesos biológicos. En particular, la estrategia de control de un reactor SBR para plantas de tratamiento de aguas está fundamentada en el estado del oxígeno disuelto siendo los sensores de DO dispositivos muy sensibles y fáciles de dañar.

El DO se mide normalmente en unidades de presión parcial p_{o_2} (atmósferas) o de concentración (partes por millón o $mg\ l^{-1} [O_2]$), y estas unidades son intercambiables vía Ley de Henry $[O_2] = H p_{o_2}$.

Para un medidor del tipo celda de Clark la relación existente entre la corriente y el nivel de DO se deriva vía la Ley de Faraday. La carga total Q de especies electroquímicas electrolizadas en un electrodo después de un intervalo de tiempo t en que circula la corriente i , está dada por

$$Q = \int_0^t i dt = mnF \quad (1)$$

con m = cantidad de moles de oxígeno (*mole* = 16grs), n = número de electrones requeridos para electrolizar una molécula de oxígeno, F = constante de Faraday. A partir de (1) se tiene entonces

$$i = nF \frac{dm}{dt} \quad (2)$$

en donde la razón de flujo de masa $\frac{dm}{dt}$ está relacionada vía la Primer Ley de Fick de Difusión con el flujo molar $\frac{1}{A} \frac{dm}{dt}$, el gradiente de concentración $\frac{dC}{dy}$ en la dirección de la difusión y el coeficiente de difusión D ; es decir

$$J = D \frac{dC}{dy} = \frac{1}{A} \frac{dm}{dt} \quad (3)$$

donde, A es el área del electrodo, J es la densidad de flujo molar de oxígeno en la superficie del

electrodo. Así que la corriente i se puede expresar como

$$i = nFAD \frac{dC}{dy} \Big|_{y=0} \quad (4)$$

Si se asume que la difusión del flujo de oxígeno es total, el flujo de salida J de la membrana está dado por la primer Ley de Fick

$$J = D_m H_m \frac{\partial p}{\partial y} \quad (5)$$

donde D_m es la difusividad de la membrana, H_m es el coeficiente de la ley de Henry para el material de la membrana y p es la presión parcial.

En la mayoría de las celdas Clark, el flujo J en la superficie del electrodo depende del flujo a través de la membrana y no es fácil de caracterizar su comportamiento en todas las direcciones. Sin embargo, se puede asumir que el flujo de salida de la membrana es uniforme y alcanza al electrodo instantáneamente, para obtener un modelo de una dimensión. Bajo estas condiciones el gradiente de la concentración puede ser aproximada por

$$\frac{dC}{dy} = \frac{[O_2]}{b} \quad (6)$$

donde b es el espesor de la membrana. Así la corriente en estado permanente puede escribirse como

$$i_{ss} = \frac{nAFD_m H_m p_w}{b} = \frac{nAFD_m H_m}{bH_w} [O_2]_w \quad (7)$$

en donde los subíndices m , w refieren a la membrana y al fluido externo (agua) respectivamente. Por tanto, la corriente está linealmente relacionada con las partes por millón de oxígeno disuelto en el fluido, y es inversamente proporcional al espesor b de la membrana. Así el oxígeno en estado permanente se reduce a

$$[O_2] = \frac{b}{nFAkD_m} i_{ss} = G_0 G(T) i_{ss} \quad (8)$$

donde $k = \frac{H_m}{H_w}$, siendo H_m y H_w las constantes de proporcionalidad de las leyes de Henry en la membrana y en el agua, respectivamente, $G(T)$ refleja las variaciones con respecto a la temperatura de calibración, y finalmente la constante de calibración G_0 está definida como

$$G_0 = \frac{[O_2]_0}{i_{ss0} G(T_0)} \quad (9)$$

donde $[O_2]_0$, i_{ss0} y $G(T_0)$ son valores en el punto de calibración.

Así que la corriente i_{ss} varía por efectos de la temperatura, el espesor b de la membrana y el propio oxígeno disuelto y se requiere de información complementaria para determinar la causa de una variación Δi_{ss} . Para ello se emplea el comportamiento transitorio de la corriente.

La idea básica consiste en energizar los electrodos del sistema una vez que se haya alcanzado un

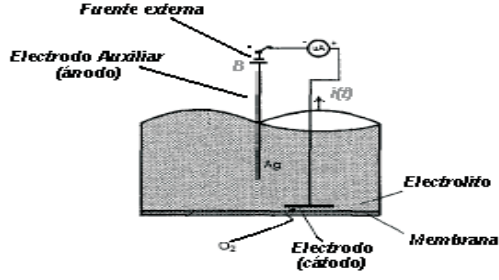


Fig. 3. Circuito del sensor de DO

equilibrio en la presión parcial de la membrana, es decir, cuando la presión en los extremos y dentro de la membrana es igual.

Al energizar los electrodos, las moléculas de oxígeno existentes en el electrolito son rápidamente removidas ocasionando una gran corriente inicial, la cual descende hasta alcanzar el equilibrio con una difusión permanente a través de la membrana.

La Fig. 3 muestra el esquema básico usado para la medición de DO, con una fuente externa B , la cual se propone usar para generar un comportamiento transitorio en la corriente.

Considerando la segunda ley de Fick de difusión

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \quad (10)$$

con las condiciones de frontera

$$p(0, t) = 0; \quad p(b, t) = p_w \quad (11)$$

y la condición inicial

$$p(y, 0) = p_w \quad (12)$$

se puede obtener

$$p(y, t) = v(y) + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_m t}{b^2}\right) \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (13)$$

donde

$$c_n = \frac{2}{b} \int_0^b (p_w - v(y)) \sin \frac{n\pi y}{b} dy \quad (14)$$

$$v(y) = p_w \frac{y}{b} \quad (15)$$

y simplificando se tiene

$$\frac{p(y, t)}{p_w} = \frac{y}{b} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_m t}{b^2}\right) \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (16)$$

Finalmente, considerando el intercambio de unidades vía la Ley de Henry ($[O_2] = H p_{O_2}$) y la ec. (4), se tiene la expresión de la corriente dada una distribución de oxígeno uniforme a través del sensor

$$i(t) = i_{ss} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_m t}{b^2}\right) \right) \quad (17)$$

en donde la corriente en $t = 0^+$ tiende al infinito y los términos en la sumatoria determinan la parte transitoria, los cuales dependen solamente de la difusión D_m y del espesor b de la membrana. Por tanto identificando ambos parámetros es posible detectar el deterioro de la membrana.

Para ello, se propone integrar la corriente ec. (17) a partir de un instante $h > 0$ durante una ventana de tiempo $h = 2h - h$ obteniendo

$$\frac{I}{i_{ss}} = h - \frac{2\tau}{\pi^2} \sum_1^{\infty} \frac{1}{n^2} \left(e^{-2n^2 \pi^2 h/\tau} - e^{-n^2 \pi^2 h/\tau} \right) \quad (18)$$

con $I = \int_h^{2h} i(t) dt$ y $\tau = \frac{b^2}{D_m}$.

Así, a través de la relación entre el valor de la corriente en estado permanente y de su integral durante el transitorio en un ventana de tiempo es posible estimar la constante τ y detectar las variaciones con respecto a la constante nominal $\tau_o = b_o^2/D_{m_o}$, obtenida al calibrar el instrumento.

4. AUTO-EVALUACIÓN DEL ELECTRODO

Los principales problemas que afectan la medición del sensor de DO de una celda tipo Clark, además de las variaciones en la temperatura, son los daños en la membrana por envejecimiento, ruptura y suciedad de la superficie de la membrana por sustancias externas.

Las condiciones mencionadas en el párrafo anterior producen una variación en la constante de tiempo de difusión $\tau = \frac{b^2}{D_m}$ y en el valor de i_{ss} . Debido a la gran sensibilidad del proceso electroquímico del sensor con respecto a la temperatura, es común medir ésta y compensar sus efectos por software. Fraher (Fraher and Clarke, 1998) compensa la incertidumbre en la medición ΔO debido a la temperatura y al deterioro de la membrana (b, D_m) usando un análisis de sensibilidad e incluyendo una membrana extra de comparación; es decir usando una membrana redundante (hardware) para diagnosticar variaciones de la corriente producidas por partículas adheridas a la membrana o desgaste de ésta. Sin embargo, esta redundancia no puede incluirse en los dispositivos ya existentes. Por el contrario, aquí se propone un procedimiento para detectar el deterioro en la membrana aprovechando las secuencias de un reactor SBR aerobio sin necesidad de duplicar el hardware.

La propuesta se basa en el hecho de tener un proceso en tanda de 4 fases con dinámicas muy lentas (Fibrianto and Dochain, 2003) en donde en la fase de vaciado y decantado permite interrumpir la circulación de corriente en la sonda del medidor de DO, Fig. (3) durante un intervalo de tiempo

mayor a $\Delta\Gamma$, de tal manera que cuando se cierre nuevamente el circuito cátodo-ánodo en la etapa de llenado se tenga una respuesta transitoria en la corriente de la forma de (17) y de ahí pueda identificarse la constante de tiempo τ .

Si el circuito del sensor (cátodo-ánodo) involucra un potencial externo B de ajuste como el de la Fig. 3, se puede interrumpir el voltaje de manera periódica para excitar al sistema y generar un transitorio en la corriente con lo cual se emula la condición obtenida en (17).

Así el coeficiente τ/τ_o es un indicador del estado de la membrana de la sonda que puede ser suministrado por intervalos de tiempo al sistema de supervisión junto con la medición del oxígeno disuelto actual.

Actualmente se encuentra en construcción el dispositivo y el sistema de adquisición de datos que permitirá validar la propuesta.

5. CONCLUSIONES

Se presenta una estructura distribuida para el monitoreo y supervisión de fallas de procesos complejos en donde se dota a cada sensor de un mecanismo de auto-evaluación y de comunicación para entregar junto con la medición un indicador de falla. Esta propuesta permite integrar la tarea de supervisión y diagnóstico de procesos complejos con niveles distintos de detección. En particular, el contar con sensores inteligentes que validen sus propias mediciones en tiempo real reduce la carga de trabajo de los supervisores de mayor jerarquía. Como ejemplo se presenta un procedimiento para autoevaluar las condiciones de la membrana de un sensor de oxígeno disuelto.

6. REFERENCIAS

- Astrom, K., P. Albertos, M. Blanke, A. Isidori, W. Schaufelbergar and R. Sanz (2001). *Control of Complex Systems*. Chap. Three-tank Control Reconfiguration, pp. 241–283. Springer.
- B. Koeppen-Seliger, T. Marcu, M. Capobianco M. S. Gentil M. Albert S. Latzel (June,2003). Magic: An integrated approach for diagnostic data management and operator support. In: *Safeprocess03, IFAC, Washington DC*. pp. 471–501.
- Bayar, M. and M. Staroswiecki (1992). Smart actuators: Generic functional architecture, service and cost analysis. In: *Proceedings of the International Conference on Intelligence Control and Instrumentation*. pp. 642–646.
- EOLI (2004). <http://www.auto.ucl.ac.be/EOLI/>.

- Fibrianto, H. and D. Dochain (2003). Time optimal control of a biological wastewater treatment process by hybrid approach. In: *IFAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems (ADHS)03*. Saint-Malo, France. pp. 171–176.
- Fraher, P. and D. Clarke (1998). Fouling detection and compensation in clark-type dox sensors. *IEEE, Trans on Instrumentation and Measurement* **47**(3), 686–691.
- Panetto, H., J. M. Rivi re and J. F. Pétin (1993). Towards a unified approach for intelligent actuators and sensors. In: *Proceedings of the International Conference on Systems, Man and Cybernetics 'Systems Eng in the Service of Humans*. Vol. 5. pp. 177–182.
- Patton, R., P. Frank and R. Clark (2001). *Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Springer. London.
- Tortora, Giacomo, Basil Kouvaritakis and David Clarke (2003). Fault-accommodation with intelligent sensors. *Automatica* **39**, 1227–1233.