

# Diagnóstico de fallas con redes neuronales. Parte 1: Reconocimiento de trayectorias

## Fault diagnosis with neural networks. Part 1: Trajectory recognition

Enrique Eduardo Tarifa<sup>1</sup> y Sergio Luis Martínez<sup>2</sup>

### RESUMEN

La investigación realizada tuvo como objetivo la formulación de un método para el diseño de un sistema de diagnóstico de fallas para plantas químicas utilizando redes neuronales artificiales. El diagnóstico de fallas tiene como misión identificar la falla que está afectando a un proceso dado a través del análisis de las señales suministradas por los sensores del proceso. Las redes neuronales son modelos matemáticos que intentan reproducir la actividad cognoscitiva del cerebro humano. Éstas se caracterizan por su estructura y el método de aprendizaje utilizado. El problema del diagnóstico de fallas se aborda a partir de la perspectiva de la identificación de las trayectorias (secuencias temporales de datos) que describen las variables del proceso al ser afectado por una falla. De esta forma, reconocidas las trayectorias, se habrá identificado la falla asociada. El desarrollo teórico realizado recomienda una estructura y un método de entrenamiento optimizado para las redes neuronales a emplear. Tanto la estructura como el método de entrenamiento propuesto fueron evaluados realizando estudios comparativos con estructuras y un método de entrenamiento tradicionales. Los resultados así obtenidos mostraron la superioridad de las redes neuronales diseñadas y entrenadas con el método propuesto en este trabajo. Salvo en procesos simples, el diagnóstico de fallas es más complejo que el reconocimiento de trayectorias porque cada falla puede provocar un conjunto infinito de trayectorias (flujo). Por ese motivo, los fundamentos establecidos en el trabajo son utilizados en la parte II, donde el análisis se extiende al reconocimiento de flujos.

**Palabras clave:** diagnóstico de fallas, redes neuronales, reconocimiento de trayectorias, optimización, tolerancia al ruido.

### ABSTRACT

The present investigation was focused on formulating a method for designing a fault diagnosis system for chemical plants by using artificial neural networks. Fault diagnosis is aimed at identifying a fault which affects a given process by analysing the signs supplied by process sensors. Neuronal networks are mathematical models which try to imitate the functioning of the human brain. A neural network is defined by its structure and the learning method used. The difficulty with diagnosing faults lies in recognising the trajectories (temporal series of data) followed by process variables when a fault affects the process; when trajectories are recognised, the associated fault is also identified. The theory so developed recommended an optimised structure and training method for the neural networks to use. Both the proposed structure and the training method were tested by carrying out comparative studies between traditional structures and a training method. The results showed the superiority of the neural networks designed and trained with the method proposed in this work. Except for simple processes, fault diagnosis is a more complex problem than simply identifying trajectories, because a fault may cause an infinite set of trajectories (i.e. flow). The fundamentals established in this work are thus used in Part II, where the analysis is extended to recognise flows.

**Keywords:** fault diagnosis, artificial neural network, trajectory recognition, optimisation, noise tolerance.

Recibido: diciembre 7 de 2006

Aceptado: marzo 5 de 2007

### Introducción

Desde hace tiempo las redes neuronales, también llamadas ANN (*Artificial Neural Networks*), son empleadas en una variedad de aplicaciones (Fan *et al.*, 1993; Chen *et al.*, 1999; Rengaswamy y Venkatasubramanian, 2000; Persina y Tovornik, 2005). La capacidad de aprender y la tolerancia

al ruido las destacan sobre cualquier otra herramienta. Sin embargo, para que la aplicación sea exitosa se debe elegir cuidadosamente tanto la estructura de la red como el método de entrenamiento. Esta selección es muy dependiente del problema a tratar. El presente trabajo formula un método

<sup>1</sup> Ph.D., en ingeniería química. Profesor asociado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy, Argentina. Investigador, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – CONICET. eetarifa@arnet.com.ar

<sup>2</sup> Ingeniero electrónico. Profesor adjunto, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy, Argentina. smartinez@imagine.com.ar

para realizar una adecuada selección en el marco del problema del diagnóstico de fallas en plantas químicas.

Un sistema de diagnóstico de fallas tiene la misión de analizar el estado del proceso bajo supervisión -por ejemplo: una planta química- a fin de determinar si está desarrollándose en forma normal o anormal. En este último caso, determina la causa de la anomalía, la cual podrá ser: avería en algún equipo, error de operación, cambios en las corrientes de entrada de la planta, etc.; esta causa se denomina falla. La identificación temprana de la falla es de suma importancia a fin de iniciar las acciones necesarias para atenuar o evitar las consecuencias: lesiones en los operadores, daño en los equipos, pérdidas de producción, explosiones, liberación de contaminantes, etc. Las técnicas a utilizar para tal identificación pueden ser muy variadas (Wang *et al.*, 1997; Persina y Tovornik, 2005; Witczaka *et al.*, 2006; Zhang, 2006). En forma general, se las pueden clasificar como técnicas basadas en modelos y en datos. Dado que las primeras requieren información precisa y consistente del proceso o su modelo, se prefiere el uso de las técnicas del segundo grupo. De esta forma, sólo se necesita un conjunto de datos históricos del proceso, los cuales pueden obtenerse de los sensores instalados para realizar la supervisión y control del proceso (Venkatasubramanian *et al.*, 2003).

Cuando un proceso es afectado por una falla, las variables del proceso evolucionan siguiendo trayectorias (secuencias temporales de datos) que pueden ser utilizadas para identificar la falla que las originan (Wang *et al.*, 1997; Wah y Qian, 2002). Por este motivo, en las secciones siguientes se plantea formalmente el problema a resolver: el diagnóstico de fallas; luego, adoptando un enfoque basado en datos, dicho problema es tratado como si fuera uno de reconocimiento de trayectorias. Con este tratamiento, al reconocer las trayectorias observadas, se identifica la falla asociada. Para ello se formula un método que recomienda la estructura y otro de entrenamiento adecuados para las redes neuronales que componen el sistema de diagnóstico y que estarán a cargo del reconocimiento de trayectorias. Tanto la estructura como el método de entrenamiento propuestos fueron comparados con estructuras y un método de entrenamiento tradicionales. Los resultados obtenidos respaldaron la utilización del método propuesto aquí.

Con excepción de procesos simples, el diagnóstico de fallas es más complejo que el reconocimiento de trayectorias porque cada falla puede provocar un conjunto infinito de trayectorias (flujo). Por ese motivo, los fundamentos establecidos en este trabajo son utilizados en la parte II (Tarifa y Martínez, 2007), donde el análisis se extiende al reconocimiento de flujos.

## Diagnóstico de fallas

Cuando una falla ocurre en una planta química (por ejemplo: una bomba se detiene), inicialmente afecta a un pará-

metro o a una variable del proceso (la presión en la tubería decae). Luego, esta perturbación original se propaga a lo largo de la planta, afectando a las variables que encuentra en su camino (presiones, caudales, temperaturas, concentraciones, etc.), alejándolas de sus valores normales. La forma en que las variables afectadas evolucionan es función de las características de la falla presente. Habrá diferentes evoluciones dependiendo de cuál es el parámetro o variable inicialmente afectado por la falla, y de la forma en que se efectúa dicha perturbación original. Tarifa *et al.* (2002) proponen realizar la identificación de la falla que está afectando a la planta mediante el estudio de la forma en que evolucionan las variables cuando el estado del proceso es anormal. Para lograr este fin, en el citado trabajo, el sistema de diagnóstico adopta la estructura que se muestra en la Figura 1. En este sistema, cada intervalo de tiempo  $\Delta t$ , el detector recibe del sistema de adquisición de datos el vector  $X$ , que contiene los valores de las variables del proceso. Luego compara estos valores con los valores normales  $X_n$  considerando una cierta tolerancia fijada por la banda de normalidad  $\Delta X_n$ . Como resultado de esta comparación se obtiene el vector de desviaciones tipificadas  $\delta X$ . Este vector es enviado posteriormente a un banco de ANN, el cual está conformado por una ANN por cada falla potencial de la planta; cada ANN está especializada únicamente en el reconocimiento de la falla que se le asignó. Las ANN analizan los datos provenientes del detector buscando síntomas o pruebas para sus respectivas fallas. El resultado de este análisis es el grado de certeza  $\mu^F$  que soporta a cada falla, el cual es un número real entre 0 y 1. De esta forma, en un tiempo dado  $t$ , la certeza que reporta cada ANN indica el grado de concordancia entre la evolución observada de las variables con respecto a la evolución esperada para la correspondiente falla hasta ese momento. Un valor nulo significa que no existe concordancia alguna y, por lo tanto, no existen pruebas a favor de la falla correspondiente. Por el contrario, un valor igual a la unidad implica una concordancia total entre lo observado y lo esperado y, por lo tanto, todas las pruebas están a favor de la falla considerada. Valores intermedios significan respaldo intermedio para las fallas.

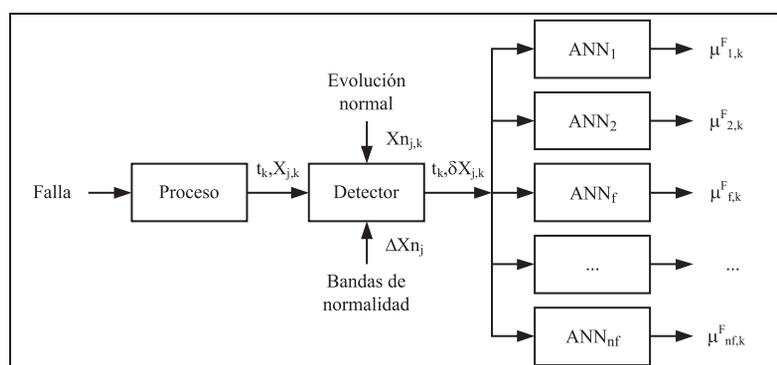


Figura 1. Estructura del sistema de diagnóstico

### 3. Modelado de fallas con trayectorias

En este primer estudio la evolución de las variables de un proceso afectado por una falla será modelada utilizando trayectorias (secuencia temporal de datos provistos por los sensores). Además, se considerará que el proceso tiene una única variable para supervisar. Ambas simplificaciones permiten explicar con mayor claridad el trabajo realizado sin que por ello se vea afectado el valor de las conclusiones alcanzadas, como queda demostrado en el trabajo presentado por Tarifa y Martínez (2007). Continuando con la descripción del proceso ficticio adoptado como ejemplo, supóngase que la única variable medida es una temperatura. En condiciones normales, el proceso opera en estado estacionario; y por lo tanto, la temperatura mantiene su valor normal  $X_n = 80$  °C. Considere, además, que existen cuatro fallas potenciales que amenazan al proceso, ellas son:  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  y  $f_4$ . Cada vez que una de ellas lo afecten, la temperatura evolucionará con una trayectoria característica tal como se muestra en la Figura 2, la cual se obtuvo con un intervalo de muestreo  $\Delta t = 8$  s. Como puede apreciarse, la variable permanece en su valor normal hasta que ocurre una de las fallas en el tiempo de activación  $t_a = 48$  s. Tomando como referencia a la falla  $f_1$ , la  $f_2$  es indistinguible en un principio, pero a partir de  $t = 88$  s comienza a diferenciarse. En cambio,  $f_3$  es en principio distinta de la  $f_1$ , pero a partir de  $t = 112$  s, se confunde con ella. Finalmente, la  $f_4$  es en todo momento distinguible de la  $f_1$ . Las trayectorias descritas son representativas de las trayectorias que pueden observarse en un proceso real, de allí la importancia del proceso ficticio adoptado como ejemplo.

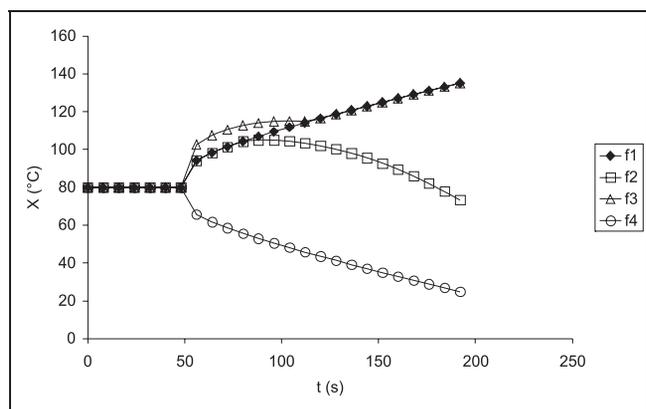


Figura 2. Trayectorias de X para cada falla,  $t_a = 48$  s y  $\Delta t = 8$  s

En la práctica, los datos obtenidos del proceso están afectados por ruido, y lo que en realidad observa el operador es lo que se muestra en la Figura 3. La incertidumbre generada por el ruido hace necesario que el sistema de diagnóstico permita cierta variación alrededor del valor normal, esta tolerancia está fijada por la banda de normalidad  $\Delta X_n$ . El valor de la variable se considerará normal mientras permanezca en el intervalo  $(X_n - \Delta X_n, X_n + \Delta X_n)$ . La banda debe ser dimensionada en función del ruido que afecta a la variable; si es demasiado estrecha, se producirán falsas alarmas; y si es demasiado amplia, el sistema perderá sensibilidad y detecta-

rá tardíamente las fallas. Si el ruido obedece una distribución normal con media nula y desviación estándar  $\sigma$ , el riesgo de falsas alarmas es de 32% para  $\Delta X_n = \sigma$ , 5% para  $\Delta X_n = 2\sigma$  y 0,3% para  $\Delta X_n = 3\sigma$ . Para este ejemplo se tomó  $\Delta X_n = 2^\circ\text{C}$ . Entonces, para este caso en particular, el problema de diagnóstico de fallas puede plantearse como: 1) mientras X esté dentro de la banda de normalidad, no realizar acción alguna; 2) desde que se observe el primer valor anormal, determinar, por comparación con las trayectorias mostradas en la Figura 2, cuál es la falla que mejor explica la evolución observada. Esta tarea es realizada automáticamente por el sistema mostrado en la Figura 1; en las secciones siguientes se explica más detalladamente su funcionamiento.

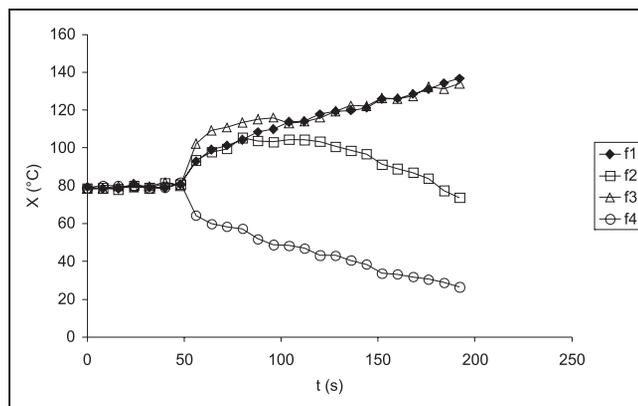


Figura 3. Trayectorias de X afectadas por ruido,  $\Delta X_n = 2^\circ\text{C}$

### 4. El detector

Para el ejemplo bajo estudio el sistema detector propuesto por Tarifa *et al.* (2002) se simplifica de la forma que se explica a continuación. La misión del bloque detector es analizar los valores de X que recibe del sistema de adquisición de datos, en busca de algún valor anormal o síntoma que indique la presencia de una falla. Detectado el mismo, activará el bloque de diagnóstico, y le suministrará la diferencia tipificada  $\delta X$ . Para poder cumplir con su función, cada  $\Delta t$ , el detector recibe del sistema de adquisición de datos el valor de X, siendo la muestra  $k$  tomada en el tiempo  $t_k = k \times \Delta t$ . Por otra parte, el detector también conoce el valor normal  $X_n$ , y lo utiliza para calcular la desviación  $\Delta X = X - X_n$ . Calculada la desviación, el detector emplea la banda normal  $\Delta X_n$  para calcular la desviación tipificada como sigue:

$$\delta X_k = \frac{\Delta X_k}{\Delta X_n} \quad (1)$$

Entonces, la desviación tipificada es un número adimensional que está escalado tomando como referencia la banda de normalidad de la variable.

El detector calcula  $\delta X$  para cada tiempo de muestreo. Por definición, mientras el proceso opere normalmente, el valor absoluto de la desviación tipificada será menor que la unidad, porque los valores de la variable estarán dentro de la banda de normalidad. Cuando el valor de la variable escape de la banda de normalidad el proceso dejará de operar normalmente, y se habrá detectado un estado diná-

mico provocado por una falla. El tiempo de detección o de observación  $t_o$  es definido como aquel en que se observa por primera vez un valor anormal, formalmente:

$$\begin{aligned} & \text{Min}_k \quad k \\ & \text{S.a:} \quad (2) \\ & |\delta X_k| \geq 1 \\ & t_o = k \Delta t \end{aligned}$$

En el tiempo  $t_o$  del proceso, el sistema de diagnóstico es encendido para iniciar la búsqueda de la falla que origina los síntomas observados. El reloj del sistema de diagnóstico arranca en cero esto es, el tiempo  $t_o$  del proceso corresponde al cero en el sistema de diagnóstico. La Figura 4 presenta las trayectorias del vector  $\delta X$  para cada falla. Cuando una de las cuatro fallas potenciales ocurra, el bloque detector entregará gradualmente la correspondiente trayectoria observada de  $\delta X$  al bloque de diagnóstico. Por lo explicado anteriormente, dichas trayectorias nacen en el tiempo cero y con valores absolutos mayores o iguales a la unidad. Debido a que los tiempos de observación  $t_o$  pueden ser distintos para cada falla, las trayectorias de  $\delta X$  (Figura 4) pueden estar desplazadas respecto de las trayectorias de  $X$  (Figura 2), y con mucho más razón, respecto a las trayectorias afectadas por ruido (Figura 3).

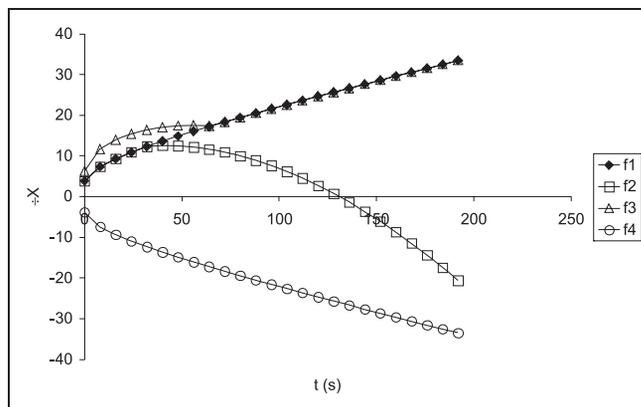


Figura 4. Trayectorias de  $\delta X$  para cada falla,  $\Delta t = 8$  s

### El sistema de diagnóstico

Para el caso particular del ejemplo bajo análisis, el sistema de diagnóstico propuesto por Tarifa *et al.* (2002) se simplifica como se explica a continuación. El grado de certeza  $\mu^F$  que soporta a la falla  $f$  en el tiempo  $t_k$  es definido como:

$$\mu_{f,k}^F = \prod_{l=0}^k \mu_{f,l}^X \quad (3)$$

donde  $\mu^X$  representa la certeza que soporta a la variable  $X$ , y se calcula como:

$$\mu_{f,l}^X = \text{fd}(\delta X_l, \delta X_{f,l}^0) \quad (4)$$

donde  $\text{fd}(\delta X, \delta X^0)$  es la función de evaluación que se utiliza para evaluar la diferencia entre el valor observado  $\delta X$ , originado por una falla desconocida, y el valor esperado  $\delta X^0$  para el caso en el que la falla  $f$  fuera la que está afectando

al proceso; ambos valores se obtienen de la Figura 4. La citada función describe el grado de pertenencia a un conjunto borroso (Russell y Norvig, 1995), y se define de la siguiente forma:

$$\text{fd}(\delta X_l, \delta X_{f,l}^0) = \begin{cases} 1 & e \leq 1 \\ 1 - \mu^0 \left( 1 - \frac{f(e)}{f(1)} \right) & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (5)$$

$$e = |\delta X_l - \delta X_{f,l}^0|$$

donde  $\mu^0$  pertenece al intervalo  $[0, 1]$ , y es utilizado para ajustar la rigurosidad de la evaluación; a mayor valor, mayor rigurosidad. En este trabajo se tomó  $\mu^0 = 1$ .

De acuerdo a las definiciones precedentes, la Figura 5 muestra la dependencia de  $\mu^X$  con respecto a  $\delta X$  y  $\delta X^0$ . La zona plana con  $\mu^X$  igual a la unidad, para el intervalo  $[-1, 1]$  de la abscisa, implica que se toleran diferencias entre lo observado y lo esperado mientras el valor absoluto de las mismas sea menor que uno. Esta tolerancia es necesaria para que el diagnóstico no se vea afectado por el ruido, por ese motivo la de tolerancia para la comparación es del mismo tamaño que la banda de normalidad.

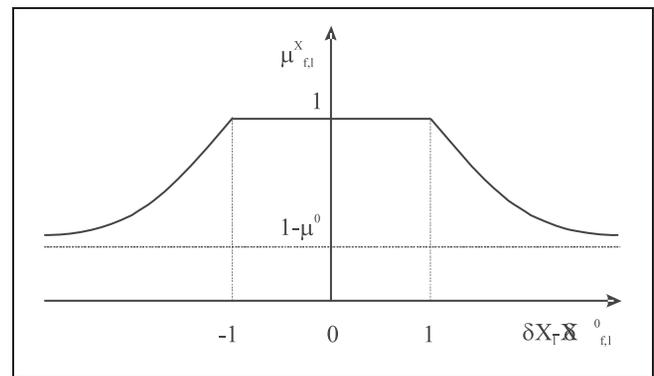


Figura 5. Dependencia de  $\mu^X$  con respecto a  $\delta X$  y  $\delta X^0$

Dada la forma de la ecuación (3), se la puede reescribir de manera recursiva:

$$\begin{aligned} \mu_{f,k}^F &= \mu_{f,k-1}^F \mu_{f,k}^X \\ \mu_{f,-1}^F &= 1 \end{aligned} \quad (6)$$

Finalmente, el procedimiento para realizar el diagnóstico es: 1) recibir la muestra  $k$  de  $\delta X$ ; 2) para cada falla  $f$ , obtener de la Figura 4 el valor  $\delta X^0$ ; 3) para cada falla  $f$ , calcular  $\mu^X$  utilizando la ecuación (4); 4) para cada falla  $f$ , calcular  $\mu^F$  utilizando la ecuación (6). Como resultado, se obtendrán las trayectorias de los  $\mu^F$  para todas las fallas. Si se grafican estas trayectorias en función del tiempo de diagnóstico, se observará que todas se inician con valor unidad, pues no existen pruebas suficientes para descartar a ninguna falla; pero a medida que pasa el tiempo, los  $\mu^F$  de las fallas que no son la causa del estado anormal observado, irán tendiendo a cero, mientras que el  $\mu^F$  de la falla que sí afecta al proceso mantendrá su valor igual a uno.

La Figura 6 presenta las trayectorias de los  $\mu^F$  obtenidas al comparar las trayectorias  $\delta X$  de la Figura 4 con la que se originaría si  $f_1$  fuera la falla que realmente está afectando al proceso. Como puede apreciarse, cuando se ingresa la trayectoria originada por  $f_1$ ,  $\mu^F$  se mantiene en 1 respaldando en todo momento a dicha falla. En cambio, cuando se ingresa la trayectoria originada por  $f_2$ , el sistema no descarta  $f_1$  debido a que las trayectorias que ambas fallas originan son similares hasta los 32 s (Figura 4). A partir de los 40 s, el sistema descarta a la falla  $f_1$  disminuyendo  $\mu^F$ . Cuando se presentan las trayectorias de  $f_3$  y  $f_4$ , la falla  $f_1$  es descartada en forma temprana.

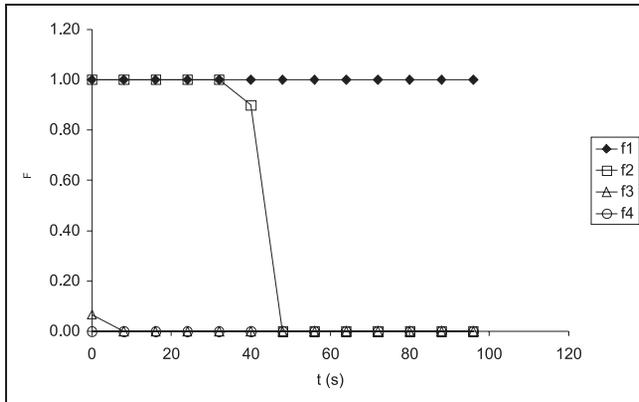


Figura 6. Trayectorias del  $\mu^F$  que soporta a  $f_1$  ante la presencia de cada falla potencial

### Redes neuronales

El bloque de diagnóstico descrito en la sección anterior demanda un gran esfuerzo computacional que siempre debe tratar de evitarse, sobre todo en una aplicación que funcionará *on-line*. Por este motivo, es necesario encontrar la forma de realizar la misma tarea pero con un menor requerimiento computacional (Tarifa *et al.*, 2002). La alternativa seleccionada para resolver el problema es la que se muestra en la Figura 1, donde el bloque de diagnóstico se implementa utilizando ANN. Esta solución, además de cumplir con el requisito de baja demanda computacional, agrega la propiedad de tolerancia al ruido –característica notable de las ANN–, mejorando así la robustez del sistema (Wah y Quian, 2002).

Las ANN se caracterizan por su estructura y el método de entrenamiento (Russell y Norvig, 1995; Looney, 1997). Trabajos anteriores aplicaron ANN al diagnóstico de fallas, pero lo hicieron en una forma que sólo es eficaz para los casos particulares descritos (Garcés Castro y Miranda, 2005; Zhang, 2006; Witczaka *et al.*, 2006). En esta sección se realizará un análisis de las estructuras y un método de entrenamiento propuestos en trabajos anteriores, se plantearán sus ventajas y desventajas, y finalmente se describirá una nueva estructura novedosa y un nuevo método de entrenamiento adecuados para la gran mayoría de los casos. La nueva estructura y el nuevo método de entrenamiento son el resultado directo del desarrollo presentado en las secciones anteriores.

La unidad fundamental de una ANN es la neurona. Las neuronas se agrupan en capas. De acuerdo a la forma en que se agrupan y se conectan, se tienen diferentes tipos de estructuras. En este trabajo se analizaron tres de ellas (Figura 7): *feedforward* estándar, *feedforward* con ventana móvil y *feedforward* parcialmente recurrente (con retroalimentación). Las dos primeras arquitecturas fueron utilizadas en trabajos anteriores (Fan *et al.*, 1993; Cheng *et al.*, 1999; Rengaswamy y Venkatasubramanian, 2000), y la última está basada en la Ecuación (6); todas ellas tienen una capa de entrada, otra oculta y otra de salida. Para el ejemplo bajo estudio, la entrada de cada ANN estará asociada al estado del proceso, mientras que la salida de la red será  $\mu^F$ .

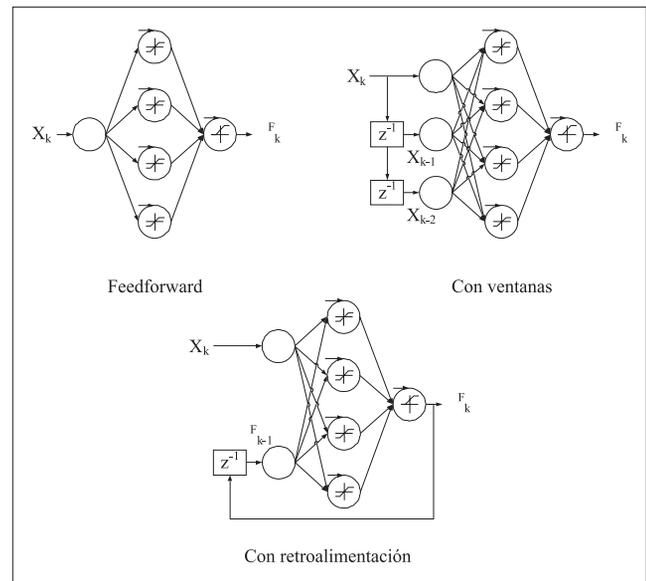


Figura 7. Estructuras de ANN a evaluar

Una vez elegida la estructura, es necesario que la ANN aprenda a realizar la tarea asignada; esto se logra en la etapa de aprendizaje, donde el método de entrenamiento ajusta los pesos de las conexiones entre neuronas. En este trabajo se emplearon métodos de entrenamiento supervisados, en los cuales, al tiempo que se presentan diferentes entradas a la ANN, se presentan también las salidas deseadas correspondientes; entonces, a través del algoritmo *backpropagation* (Demuth y Beale, 2000), el método de entrenamiento ajusta los pesos para minimizar el error entre los resultados reportados por la ANN y los deseados. Las estructuras contenidas en la Figura 7 fueron entrenadas con dos métodos: el tradicional y el optimizado, empleando como entradas las trayectorias  $\delta X$  exhibidas en la Figura 4, mientras que las salidas deseadas dependen del método de entrenamiento empleado. En el método de entrenamiento tradicional, a la red se le exige salida igual a 1 cada vez que se le ingresa la trayectoria  $\delta X$  de la falla correspondiente a la ANN (recuerde que existe una red por cada falla potencial); por el contrario, se le exige salida igual a 0 cada vez que se le ingresan las trayectorias  $\delta X$  de otras fallas. En el método optimizado (Tarifa *et al.*, 2002) se cambia significativamente esta última parte de la siguiente forma: cada vez que se le ingresan trayectorias  $\delta X$

de otras fallas, a la red se le exige que la salida sea igual a lo indicado por la Ecuación (6). Por ejemplo, para la red correspondiente a la  $f_1$ , las entradas son los  $\delta X$  mostrados en la Figura 4, mientras las salidas deseadas correspondientes son los  $\mu^F$  presentados en la Figura 6.

La diferencia entre los dos métodos es profunda y determinante. En efecto, en el método tradicional el valor de  $\mu^F$  se fija por la concordancia entre la falla que origina la trayectoria  $\delta X$  observada y la correspondiente a la ANN entrenada, esto es,  $\mu^F$  será 1 cuando se ingrese la trayectoria  $\delta X$  de la falla correspondiente a la ANN entrenada, y será 0 cuando se ingrese la trayectoria  $\delta X$  de una falla distinta de la correspondiente a la ANN entrenada sin considerar la forma de la trayectoria observada; esto último constituye la principal debilidad del método. Si la trayectoria  $\delta X$  provocada por una falla distinta de la correspondiente a la ANN entrenada es similar a la provocada por esta última falla, la ANN recibirá un entrenamiento contradictorio y será incapaz de aprender. Por ejemplo, en el entrenamiento de la ANN correspondiente a la falla  $f_1$ , cuando se le alimenta la trayectoria  $\delta X$  provocada por la  $f_1$ , se le enseña a la ANN que produzca una salida  $\mu^F$  igual a 1; por el contrario, cuando se le alimenta la trayectoria  $\delta X$  provocada por la  $f_2$ , se le enseña que produzca una salida  $\mu^F$  igual a 0; sin embargo, debido a que durante los primeros 32 s ambas trayectorias son indistinguibles (Figura 4), la ANN no podrá decidir si  $\mu^F$  debe ser 0 ó 1 durante el tiempo en que ambas trayectorias son iguales, ya que para entradas  $\delta X$  similares se le piden salidas  $\mu^F$  disímiles. Este problema se soluciona en el método optimizado al fijar el valor de  $\mu^F$  en función de la concordancia entre la trayectoria  $\delta X$  observada y la esperada para la falla de la ANN, y no en la concordancia de las fallas que causan las trayectorias observadas y esperadas como lo hace el método tradicional.

Retornando al ejemplo anterior del entrenamiento de la ANN correspondiente a la  $f_1$ , cuando se le alimenta la trayectoria  $\delta X$  provocada por  $f_1$  se le enseña a la ANN que produzca una salida  $\mu^F$  igual a 1 porque la trayectoria observada es igual a la esperada; cuando se le alimenta la trayectoria  $\delta X$  provocada por la  $f_2$ , se le enseña que produzca una salida  $\mu^F$  igual a 1 durante los primeros 32 s ya que durante ese tiempo la trayectoria observada es igual a la esperada (Figura 4); pero a partir de ese momento, la trayectoria observada comienza a diferir de la esperada, y el valor  $\mu^F$  refleja este hecho disminuyendo proporcionalmente su valor (Figura 6). De esta manera, la ANN no tiene ningún conflicto durante el aprendizaje porque para entradas  $\delta X$  similares se le piden salidas similares. No obstante estos resultados, el método tradicional puede ser útil en los casos en que las trayectorias  $\delta X$  provocadas por las fallas no se superpongan en ningún intervalo; si esta condición se cumple, la ANN no tendrá ningún conflicto durante el aprendizaje; sin embargo, la tolerancia al ruido será menor que la que puede obtenerse con el método optimizado debido a la naturaleza discreta de los valores de  $\mu^F$  que se utilizan para el entrenamiento.

## Estructura feedforward

La primera ANN estudiada fue del tipo *feedforward*. Luego de varias pruebas se fijó una capa interna de cuatro neuronas y una capa de salida de una única neurona (Figura 7). La señal de excitación *net* de cada neurona está definida por la función de excitación, que en este trabajo se tomó como igual a la suma ponderada de todas las señales que llegan a la neurona:

$$net = \sum_{i=1}^N w_i x_i - b \quad (7)$$

donde  $x_i$  es la salida de la neurona  $i$  de la capa anterior formada por  $N$  neuronas,  $w_i$  es el peso de la conexión entre dicha neurona y la que recibe la señal, y  $b$  es el *bias* de la neurona que está siendo evaluada.

La señal de salida  $x$  de cada neurona está definida por la función de activación, que en este trabajo se tomó como igual a la función sigmoide bivaluada para las neuronas de la capa interna:

$$x = \frac{2}{1 + e^{-2net}} - 1 \quad (8)$$

y como la función sigmoide positiva para la neurona de la capa de salida:

$$x = \frac{1}{1 + e^{-net}} \quad (9)$$

El comportamiento de esta ANN para identificar las trayectorias de la Figura 4 fue deficiente, tanto cuando se entrenó con el método tradicional como cuando este se hizo con el método optimizado. Por ejemplo, la ANN que fue entrenada para reconocer la  $f_1$  reportó un  $\mu^F$  cercano a 0,5 sin importar la trayectoria  $\delta X$  que se le ingresara, cuando lo deseado era que reportara un  $\mu^F$  cercano a 1 cuando se le ingresara la trayectoria  $\delta X$  correspondiente a la  $f_1$ , y cercano a 0 cuando se le ingresaran trayectorias de otras fallas.

Para esta experiencia se utilizó una arquitectura neuronal 1+4+1 completamente interconectada (Figura 7), especializando una ANN para el reconocimiento de la trayectoria de falla  $f_1$ . Como conjunto de entrenamiento se emplearon las cuatro trayectorias mostradas en la Figura 4. Durante el proceso de entrenamiento se aplicaron 500 iteraciones, produciéndose un error cuadrático medio (MSE) de 0,158 para el método de entrenamiento tradicional y un MSE de 0,152 para el de entrenamiento optimizado. En la fase de comprobación, la ANN que fue entrenada para reconocer la  $f_1$  reportó en todo momento un  $\mu^F$  cercano a 0,5 sin importar la trayectoria  $\delta X$  que se le ingresara, a excepción de la falla  $f_4$ , para la cual el  $\mu^F$  reportado fue 0. Este resultado difiere mucho de la conducta deseada ( $\mu^F$  cercano a 1 cuando se le ingresa la trayectoria  $\delta X$  correspondiente a la  $f_1$ , y cercano a 0 cuando se le ingresan trayectorias de otras fallas).

Esto demuestra que la ANN no puede aprender las trayectorias generadas por las fallas, ni por lo tanto, identificarlas

en forma adecuada. La incapacidad de aprender de esta ANN se origina en su misma estructura. En efecto, al tener que decidir el valor de  $\mu^f$  (salida) en función de un único valor  $\delta X$  (entrada), la ANN no cuenta con la información necesaria para discriminar entre varias trayectorias, ya que un valor dado puede ser alcanzado por varias de ellas. Por ejemplo, el valor  $\delta X = 10$  es alcanzado en algún momento por las trayectorias de  $f_1$ ,  $f_2$  y  $f_3$  (Figura 4); y ambos métodos de entrenamiento piden en algún momento valores de salida  $\mu^f$  diferentes para dicha entrada, lo cual confunde a la ANN. Una forma de resolver este problema es aumentando la cantidad de información disponible para la ANN; a continuación se exploran dos alternativas en este sentido.

### Estructura con ventanas

Para incrementar la información enviada a la ANN, se amplió la ANN descrita en la sección anterior por medio de la incorporación de dos entradas adicionales. Estas se obtienen de conservar, mediante retardos, los dos últimos valores observados de  $\delta X$ ; es decir, se construyó una red con ventana temporal, también denominada TDNN -*Time Delay Neural Network*- (Figura 7). En principio esta estructura es más apropiada que la *feedforward* en el modelado y reconocimiento de secuencias dinámicas (Principe, 2002), pero su desempeño fue igualmente pobre para los dos métodos de entrenamiento empleados.

Para esta experiencia se utilizó una arquitectura neuronal 3+4+1 completamente interconectada (Figura 7), especializando una ANN para el reconocimiento de la trayectoria de falla  $f_1$ . Como conjunto de entrenamiento se emplearon nuevamente las cuatro trayectorias mostradas en la Figura 4. Durante el proceso de entrenamiento se aplicaron 500 iteraciones, produciéndose un MSE de 0,048 para el método de entrenamiento tradicional y un MSE de 0,028 para el de entrenamiento optimizado. En la fase de comprobación se determinó que la ANN no reconocía apropiadamente las trayectorias utilizadas en el entrenamiento, tanto para la falla de especialización como para las restantes. Esto ocurrió con ambos métodos, aunque se observó una sensible mejora con respecto al modelo anterior, reflejado en la reducción del error entre la salida reportada y la deseada.

El fracaso con el método tradicional es debido a la debilidad intrínseca del mismo y a la superposición de las  $\delta X$ , mas el fracaso con el método optimizado delata una limitación de la estructura probada. Esta limitación podría estar originada en la reducida cantidad de neuronas de la capa interna o por el limitado ancho de la ventana temporal. No obstante, aquí se detiene el análisis de este tipo de red a favor de la estructura, que se explica en la sección siguiente debido a que demostró ser más simple y a la vez más eficaz.

### Estructura con reciclo

La estructura con reciclo presentada en la Figura 7 está inspirada en la Ecuación (6), la cual le brinda respaldo teórico. Al tener una retroalimentación, la información que recibe

la ANN combina el estado presente y la historia total del proceso, lo que le da una gran ventaja sobre la estructura *feedforward*. Esta misma ventaja la mantiene frente a la estructura con ventanas, la cual sólo ve una porción de la historia del proceso (en el ejemplo estudiado, solo se tomaron dos muestras hacia atrás); pero además mantiene la simplicidad al permitir conservar toda la historia del proceso por el agregado de una única entrada escalar adicional: el  $\mu^f$  reciclado. Esto último es de gran importancia cuando se supervisan procesos con gran cantidad de variables. Así, si el proceso tiene 20 variables, la estructura *feedforward* tendrá 20 entradas, la estructura con ventanas con dos retardos tendrá  $3 \cdot 20 = 60$  entradas; en cambio, la estructura con reciclo tendrá  $20 + 1 = 21$  entradas. A esta simplicidad de estructura, la ANN con reciclo agrega un excelente comportamiento en las pruebas realizadas con el método optimizado. En efecto, cuando la ANN correspondiente a la falla  $f_1$  fue entrenada utilizando el método optimizado, fue capaz de producir exactamente las salidas  $\mu^f$  deseadas reproduciendo fielmente las curvas de la Figura 6. En cambio, su conducta fue deficiente cuando se la entrenó con el método tradicional debido a las falencias del método empleado y no de la estructura propuesta en sí.

Para esta experiencia se utilizó una arquitectura neuronal 2+4+1 completamente interconectada (Figura 7), especializando una ANN para el reconocimiento de la trayectoria de falla  $f_1$ . Como conjunto de entrenamiento se emplearon nuevamente las cuatro trayectorias mostradas en la Figura 4. Durante el proceso de entrenamiento se aplicaron 500 iteraciones, produciéndose un MSE de  $0,192 \times 10^{-3}$  para el método de entrenamiento tradicional y un MSE de  $0,128 \times 10^{-3}$  para el de entrenamiento optimizado. Como ya se comentó, en la fase de comprobación la ANN entrenada utilizando el método optimizado fue capaz de producir exactamente las salidas  $\mu^f$  deseadas. En cambio, su conducta no fue tan eficiente cuando se la entrenó con el método tradicional.

Las pruebas realizadas hasta aquí estuvieron dirigidas al reconocimiento de trayectorias que fueron empleadas durante el entrenamiento, es decir, hasta ahora sólo se evaluó la capacidad de aprendizaje de las ANN. Sin embargo, para que el sistema de diagnóstico sea eficaz las redes deben ser capaces de reconocer trayectorias afectadas por ruido. Esto podría lograrse incorporando trayectorias con ruido en la fase de entrenamiento, o aprovechando la tolerancia al ruido que presentan las ANN. La primera alternativa exige que se determinen los  $\mu^f$  con la Ecuación (3) para todas las trayectorias con ruido que se vayan a utilizar en el entrenamiento; mientras más trayectorias se utilicen, mejor será el entrenamiento, pero mayor será el esfuerzo para calcular los  $\mu^f$ . Por otra parte, la segunda alternativa no requiere que se entrene la ANN con trayectorias con ruido, sino que confía en su capacidad intrínseca para tolerarlos. A fin de probar este punto, en el entrenamiento se utilizaron exclusivamente las trayectorias sin ruido para observar la eficacia de la ANN en reconocer trayectorias con ruidos a pesar de no haberlas

utilizado en el entrenamiento. De esta manera, ahora no solo se emplea la capacidad de aprendizaje de la ANN sino que también se acude a su capacidad de generalización. En esta situación, la ANN correspondiente a la  $f_1$  reprodujo de nuevo las curvas de  $\mu^F$  mostradas en la Figura 6, con una única excepción: esta se presentó en el valor de  $\mu^F$  perteneciente a la segunda muestra cuando se ingresó el  $\delta X$  de la falla  $f_1$  afectado por ruido. En la Figura 8 puede verse que dicho valor es menor que el correcto, el cual es 1. La explicación de este error es la particular manera en que la ANN ajustó sus pesos para aprender la trayectoria causada por  $f_1$ . Para tener una idea de la forma en que la ANN ve a dicha trayectoria, la Figura 9 muestra el entorno de cada valor  $\delta X$  dentro del cual la ANN reporta un  $\mu^F > 0,99$ . Como puede verse, en la segunda muestra la ANN no tolera valores  $\delta X$  menores que el esperado, y de allí el valor incorrecto de  $\mu^F$  para dicha muestra. También en la citada figura queda claro por qué la ANN puede distinguir la trayectoria de la  $f_1$  de las trayectorias causadas por las restantes fallas.

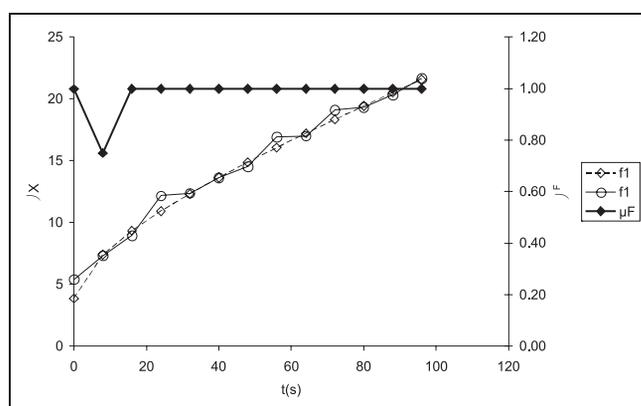


Figura 8. Salida  $\mu^F$  de la ANN correspondiente a la  $f_1$  cuando ingresa  $\delta X$  provocado por la  $f_1$  y ruido

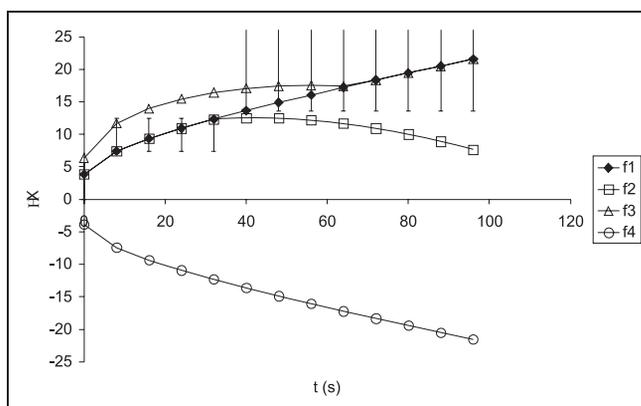


Figura 9. Banda de tolerancia al ruido de la ANN correspondiente a la  $f_1$  con  $\mu^F > 0,99$

## Conclusiones

En el trabajo se ha presentado un desarrollo teórico para aproximar el problema de diagnóstico de fallas al de reconocimiento de trayectorias. Como fruto de él, se determinaron la estructura y el método más adecuados de entrenamiento para las ANN que conforman el sistema de

diagnóstico de fallas de la Figura 1. El rendimiento de las ANN así obtenidas fue comparado con el de dos estructuras tradicionales (la red *feedforward* y la red con ventana móvil) entrenadas con el método tradicional y el optimizado. Del estudio surgió que la combinación propuesta (una estructura con reciclo y el método de entrenamiento optimizado) es la más adecuada ya que logra producir las salidas deseadas sin recurrir a una arquitectura mucho más compleja que las empleadas tradicionalmente. En efecto, en las experiencias realizadas para comparar diferentes estructuras y métodos de entrenamiento se mantuvo constante la cantidad de neuronas (Figura 7). El logro de las salidas deseadas sin recurrir a una estructura mucho más compleja es una gran ventaja del método propuesto sobre todo si se considera que, en igualdad de condiciones, las arquitecturas tradicionales fueron incapaces de producir las salidas deseadas. Otra ventaja es la tolerancia al ruido que demostró la estructura propuesta. Queda por perfeccionar el método de entrenamiento para que la ANN aumente su tolerancia inherente al ruido, lo cual podría lograrse incorporando trayectorias con ruido en la fase de entrenamiento, o considerando explícitamente las bandas de normalidad durante la citada fase. Finalmente, las conclusiones de este estudio son extendidas al reconocimiento de flujos en la parte II de este trabajo (Tarifa y Martínez, 2007).

## Nomenclatura

$\delta X$ : vector de desviaciones tipificadas.

$\delta X^0$ : vector de desviaciones tipificadas esperadas.

$\mu^F$ : vector de certeza de fallas.

$\mu^x$ : vector de certeza de variables medidas.

$\sigma$ : desviación estándar.

$\Delta t$ : intervalo de muestreo.

$\Delta X$ : vector de desviaciones cuantitativas.

$\Delta X_n$ : vector de bandas de normalidad.

$f$ : fallas.

$net$ : señal de excitación en una neurona.

$nf$ : cantidad de fallas potenciales.

$t$ : tiempo de muestreo.

$ta$ : tiempo de activación.

$to$ : tiempo de observación del primer síntoma.

$x$ : salida de la neurona.

$w$ : vector de pesos de conexión en una ANN.

$N$ : número de neuronas en la capa de una ANN.

$X$ : vector de variables medidas.

$X_n$ : vector de valores normales.

## Bibliografía

Chen, B. H., Wang, X. Z., Yang, S. H. and Mcgreavy, C., Application of wavelets and neural networks to diagnostic system

Development., I. Feature extraction, *Computers and Chemical Engineering*, 23 (7), 1999, pp. 899-906.

Demuth, H. and Beale, M., *Neural Network Toolbox for Use with MATLAB*, The MathWorks, Inc. USA, 2000.

Garcez-Castro, A. R. and Miranda, V., An interpretation of neural networks as inference engines with application to transformer failure diagnosis., *Electrical Power and Energy Systems*, 27, 2005, pp. 620-626.

Fan J., Nikolaou, M. and White, R., An approach to fault diagnosis of chemical processes via neural networks., *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 39 (1), 1993, pp. 82-88.

Looney, C.G., *Pattern Recognition Using Neural Networks: Theory and Algorithms for Engineers and Scientists.*, Oxford University Press, New York, 1997.

Persina, S. and Tovornik, B., Real-time implementation of fault diagnosis to a heat exchanger., *Control Engineering Practice* 13, 2005, pp. 1061-1069.

Principe, J., *Dynamic Neural Networks and Optimal Signal Processing.*, Capítulo 6 en *Handbook of Neural Network Signal Processing*, CRC Press, USA, 2002.

Rengaswamy, R. and Venkatasubramanian, V., A fast training neural network and its updation for incipient fault detection and diagnosis., *Computers and Chemical Engineering*, 24, (2-7), 2000, pp. 431- 437.

Russell, S.J. and Norvig, P., *Artificial Intelligence - A Modern approach.*, Prentice Hall, New Jersey, 1995.

Tarifa, E.E. y Martínez, S.L., Diagnóstico de fallas con redes neuronales. Parte II: Reconocimiento de flujos, Ingeniería e Investigación, *In press*, 2007.

Tarifa, E.E., Humana, D., Franco, S., Martínez, S., Nuñez, A. and Scenna, N., Fault diagnosis for a MSF using neural networks., *Desalination*, 152, 2002, pp. 215-222.

Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Kavuri, S. and Yin, K., A review of process fault detection and diagnosis. Part III: Process history based methods., *Computers and Chemical Engineering*, 27, 2003, pp. 327-346.

Wah, B. and Qian, M., *Constraint-Based Neural Network Learning for Time Series Predictions.*, Department of Electrical and Computer Engineering and the Coordinated Science Laboratory University of Illinois, Urbana-Champaign, USA, 2002.

Wang, Z., Zhang, Y., Li, C. and Liu, Y., ANN-Based Transformer Fault Diagnosis., *59th American Power Conference*, Chicago, Vol. 59-I, 1997, pp. 428-432.

Witczaka, M., Korbicz, J., Mrugalskia, M. and Patton, R.J., A GMDH neural network-based approach to robust fault diagnosis: Application to the DAMADICS benchmark problem., *Control Engineering Practice*, 14, 2006, pp. 671-683.

Zhang, J., Improved on-line process fault diagnosis through information fusion in multiple neural networks., *Computers and Chemical Engineering*, 30, 2006, pp. 558-571.



## Alfaomega Colombiana S.A.



**TECNOLOGÍAS BIOMÉTRICAS  
APLICADAS A LA SEGURIDAD**  
TAPIADOR, Marino y  
SIGÜENZA, Juan  
456 págs. Rústica, 17 x 23 cm  
ISBN 970-15-1128-X  
Coedición: Alfaomega-Rama

**NOVEDAD**

Se efectúa un interesante recorrido sobre las técnicas biométricas más utilizadas en la actualidad, tanto en su vertiente estática como dinámica. Los autores desean mediante esta primera obra en lengua española sobre Biometría compartir sus experiencias con los potenciales lectores y acercarlos a un mundo fascinante y en expansión permanente, como demuestra el auge de congresos y publicaciones internacionales sobre la materia que han tenido lugar en los últimos años.

### Resumen del contenido:

Parte I: Aspectos generales de la biometría - Introducción a la biometría - Reconocimiento de patrones - Evaluación de sistemas biométricos - Parte II : Biometría estática - Huella dactilar - Iris y retina - Geometría de la mano - Parte III: Biometría dinámica - Reconocimiento de locutor - Reconocimiento de firma escrita - Escritura manuscrita - Dinámica de teclado - Parte IV: Aplicaciones biométricas - Fusión de datos - Tarjetas de identificación - Biometría forense - Estándares biométricos - Seguridad informática y PKI.

Adquiera nuestros textos en el punto de venta **Alfaomega Carrera 15 No 64a - 29** o en las principales librerías del país.

Afíliase a nuestro **CLUB DEL CONOCIMIENTO** a través de nuestra página web, y reciba descuentos en nuestro punto de venta, contenidos actualizados vía Internet, información de novedades, prioridad en productos promocionales y entregas a domicilio sin costo adicional.

Visite nuestra página Web:  
[www.alfaomega.com.co](http://www.alfaomega.com.co)