

Para la detección y el diagnóstico de fallos

Inteligencia artificial

El nuevo reto es incorporar el conocimiento en los entornos de supervisión con el propósito de aprovechar toda la información disponible para decidir, en todo momento y de forma automatizada y objetiva, sobre el estado del proceso e identificar los elementos causantes de tal situación.

En los últimos años nos hemos acostumbrado a ver soluciones de automatización y control en que la utilización de técnicas de inteligencia artificial aporta beneficios contrastables. Varias marcas comercializan reguladores borrosos o combinados (por ejemplo, PID con control anticipativo borroso), o incluyen mecanismos de ajuste fino de parámetros basados en lógica borrosa. Ocasionalmente, las redes neuronales se han utilizado en el modelado y control de sistemas no lineales.

La implantación masiva de sistemas de adquisición y registro de datos (en ocasiones impuestos por requisitos de trazabilidad y calidad) ha permitido un mejor conocimiento de las plantas, que se ha reflejado en las tareas de ingeniería y gestión.

Se persigue, por tanto, la reutilización de este conocimiento directamente en planta para detectar y diagnosticar en línea. El beneficio recaerá tanto en la mejora de planes de mantenimiento (ajuste de tiempos, predicción de fallos, asignación de recursos, planificación, etc.) como en la toma de decisiones por parte del supervisor (reducción del tiempo para conocer las causas) para evitar situaciones catastróficas.

Conocimiento para la detección y el diagnóstico

Es habitual separar detección y diagnóstico de fallos, con el propósito de diferenciar entre los efectos producidos por los fallos en las variables

medidas (detección) y la identificación y localización de sus causas (diagnóstico).

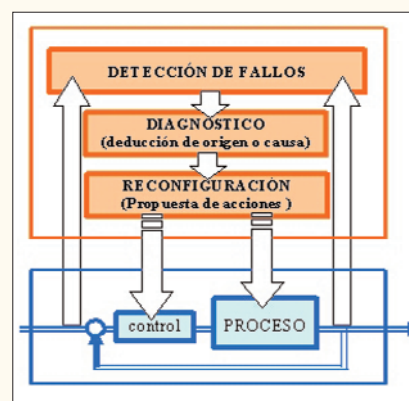
La ejecución correcta de ambas tareas reside en la utilización del conocimiento sobre la planta. Mientras que para la detección de fallos es suficiente conocer las condiciones de funcionamiento normal, para el diagnóstico a menudo es necesario un conocimiento más profundo del proceso, incluyendo su operación en fallo.

Actualmente, los mecanismos de detección utilizados en la industria consisten en la instalación bien de sensores redundantes en puntos críticos con el propósito de validar la medida, o en su caso detectar el fallo de uno de los dos sensores, bien de los mecanismos software de generación de alarmas que incorporan los sistemas scada.

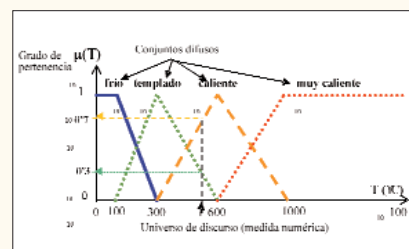
La utilización de conocimiento se reduce en los primeros a la elección de las variables críticas donde duplicar los sensores y, en los segundos, a fijar los umbrales de activación de alarma, sean absolutos, relativos, relación de cambio, etc.

En cuanto al diagnóstico, son pocas las plantas que incorporan mecanismos para la identificación y localización de fallos de forma automatizada (o de soporte) una vez se ha detectado el fallo. El problema principal reside en transferir el conocimiento y experiencia a las máquinas, y en cómo debe ser procesado este conocimiento.

El problema principal al que se en-



■ Etapas de supervisión.



■ Una posible representación borrosa de la temperatura de un horno.

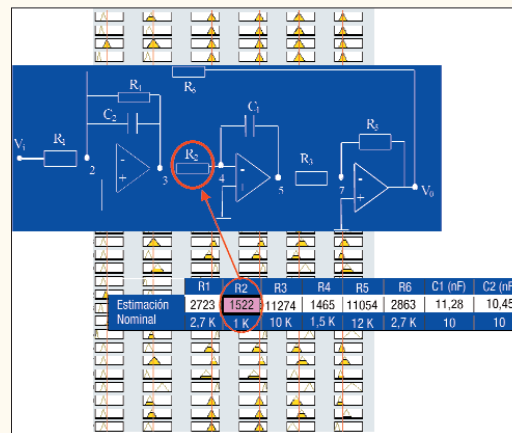
frentan las técnicas de detección y diagnóstico de fallos es la complejidad creciente de los procesos actuales debido a no linealidades, sistemas cambiantes, múltiples interacciones y acoplamientos, distribución de tareas, etc.

Esto hace que no sea fácil el desarrollo de modelos analíticos (incertidumbre en los parámetros, modelos incompletos), el obtener descripciones lógicas completas de los procesos (difícil descomposición funcional, desconocimiento interno, etc.), o el establecer relaciones infalibles entre las medidas y sus causas (explosión combinatoria de posibles

situaciones, ruido en las medidas, perturbaciones).

La solución a estos problemas pasa por añadir ciertos rasgos de inteligencia a los métodos anteriores con la ayuda de las técnicas que proporciona la Inteligencia Artificial. Así, la incertidumbre y la imprecisión pueden tratarse con lógica borrosa, las redes neuronales artificiales ofrecen una solución a la identificación de modelos no lineales, los algoritmos genéticos permiten la adaptación para optimizar determinadas tareas, los sistemas expertos permiten representar y procesar relaciones heurísticas en sus reglas, el razonamiento basado en casos se ofrece como forma de aprendizaje constante a través de experiencias previas.

La utilización de una o varias de es-



Ejemplo de conjuntos borrosos: Identificación de fallos en circuitos electrónicos

El efecto de las tolerancias en los componentes de un circuito electrónico puede tratarse con lógica borrosa. De esta forma, a partir de medidas reales del circuito a diagnosticar pueden establecerse comparaciones con situaciones anteriores para determinar si su funcionamiento es o no normal. Al mismo tiempo se pueden estimar los valores de cada componente y diagnosticar los componentes causantes del mal funcionamiento, si éste se produce.

■ Estimación de valores de componentes a partir de las medidas del circuito y lógica borrosa.

tas técnicas de la Inteligencia Artificial aplicadas directamente o en combinación con los métodos anteriores de detección y diagnóstico permiten abordar soluciones que hasta el momento no eran tratables.

A continuación se presenta de forma descriptiva cómo algunas de estas técnicas de Inteligencia Artificial pueden ser utilizadas en beneficio de la detección y diagnóstico de fallos.

Detección y diagnóstico: técnicas

La idea básica que subyace en los sistemas de detección y diagnóstico recae en el principio de redundancia: en condiciones de funcionamiento normal, las medidas adquiridas del proceso pueden ser validadas a partir del conocimiento disponible del propio proceso funcionando bajo estas condiciones de normalidad.

Como consecuencia, cualquier fallo en esta validación será indicativo de una situación anómala (detección de fallos).

El conocimiento profundo de cómo interactúan los diferentes elementos, junto con la experiencia sobre situaciones anómalas anteriores, nos permitirá diagnosticar el origen de estos fallos. Existen múltiples técnicas para la detección y diagnóstico de fallos en función del tipo de conocimiento de que se dispone.

- Se reconocen bajo las siglas FDI (*Fault Detection and Isolation*) aquellos métodos que utilizan modelos analíticos del proceso para comparar la información adquirida de la planta con la teórica que da el modelo frente a los mismos estímulos.

Las desviaciones obtenidas de dicha comparación se conocen como residuos, y son tratados para aislar los diferentes tipos de fallos.

Los modelos pueden usarse en conjunción con las medidas de diferentes formas, dando lugar a técnicas diferentes según su uso (simulación, ecuaciones de paridad, observadores, estimación de parámetros).

- Otro conjunto de técnicas de diagnóstico consiste en comparar las observaciones del proceso con una descripción funcional de éste y las dependencias lógicas entre sus componentes (en funcionamiento normal).

Se usa para ello razonamiento lógico con el propósito de, frente a una situación de fallo, identificar inconsistencias entre las observaciones hechas y la descripción lógica del proceso en funcionamiento normal.

- A medio camino entre estas dos estrategias encontramos otro gran conjunto de métodos de detección y diagnóstico conocidos como métodos basados en el análisis de la señal.

Estos métodos se basan en que la experiencia ha permitido establecer correspondencias entre las variaciones medidas en las señales (síntomas) o en transformaciones efectuadas sobre ellas, y los elementos causantes (diagnóstico) de dichas situaciones.

El análisis frecuencial o de vibraciones, por ejemplo, se utiliza para diagnosticar fallos en sistemas rotacionales (desequilibrios en motores o sus cargas, desgastes de engranajes, desalineaciones, etc.). El control estadístico (SPC, *Statistical Process Control*) constituye otro ejemplo de análisis de la señal donde se analiza la evolución de las medidas respecto a los parámetros estadísticamente correctos (media y varianza, por ejemplo), constituyendo estos parámetros el modelo estadístico del proceso.

Caracterizar a través de las señales

Uno de los aspectos fundamentales a la hora de utilizar herramientas de Inteligencia Artificial para el análisis de situaciones en procesos industriales es el tratamiento de las señales provenientes del proceso. Se trata, en definitiva, de extraer y codificar, a partir de las señales, aquella información útil sobre los fallos que deben detectarse o diagnosticarse.

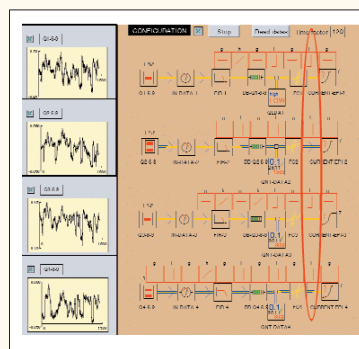
Si el objetivo es evaluar estas señales para decidir sobre el estado del proceso, deben establecerse los mecanismos que permitan tratar los diversos problemas que pueden afectarlas, como pueden ser la imprecisión, la incertidumbre, la ausencia o la cantidad excesiva de información.

El tipo de procesado a utilizar dependerá del tipo de señales y del propio conocimiento del proceso que posteriormente va a ser utilizado para la detección o el diagnóstico. Las técnicas utilizadas, por lo tanto, son muy variadas.

En primer lugar, podemos incluir aquí los métodos tradicionales de procesado de señales como el análisis temporal y frecuencial (*Wavelets*, FFT/SFT, etc), la utilización de filtros digitales (FIR/IIR) o técnicas estadísticas (histogramas, entropía, componentes principales, etc.), que permiten filtrar componentes indeseados (ruido, perturbaciones, etc.), calcular pendientes y tendencias, obtener caracterizaciones frecuenciales o cuantificar desviación respecto a un valor estadísticamente correcto (media, mediana, etc.).

Otros mecanismos útiles son los que permiten la generación de eventos a partir de las señales ya procesadas. Una forma inmediata de generar dichos eventos es a partir del sobrepaso de umbrales establecidos convenientemente. Esto permite en los métodos estadísticos, por ejemplo, detectar las desviaciones anormales; o detectar máximos y mínimos a partir de las tendencias.

Otros métodos tienen en conside-



■ Representación cualitativa de tendencias en G2 para la monitorización.

Ejemplo de representación cualitativa de señales: Monitorización de presiones

La monitorización de varias presiones en diferentes puntos permite detectar comportamientos en las señales asociables a situaciones de fallo o prefallo. Con este propósito las señales se filtran y caracterizan mediante secuencias de episodios cualitativos, de forma que la identificación de comportamientos significativos es más sencilla. Se trata de facilitar la posterior aplicación de un sistema de decisión, en este caso un sistema basado en reglas.

ración la trayectoria de las señales en un periodo de tiempo o ventanas temporales de observación. En ellos se tiene en cuenta no sólo el valor de la señal en un instante, sino su evolución dentro de la ventana de observación, y, por tanto, permiten un análisis de la señal en línea y la generación de eventos más elaborados, como por ejemplo la aparición de determinadas componentes frecuenciales o el reconocimiento de formas predeterminadas.

Representación simbólica

Las técnicas de cualificación o representación simbólica permiten una representación de las señales próxima a la percepción humana sobre las mismas. Para conseguir este objetivo, normalmente se combinan las herramientas descritas en los párrafos anteriores con otras herramientas como la simple cualificación del valor de la señal mediante la división de su rango de valores en intervalos y la asignación de etiquetas a cada una de

Redes neuronales artificiales

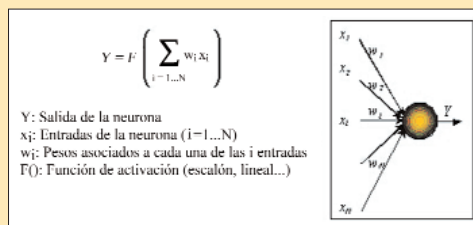
Las redes neuronales artificiales (RNA) son algoritmos de computación que basan su potencia en el ajuste de los pesos que ponderan las entradas de cada neurona (elemento básico de cálculo), para calcular la salida que debe entregarse a otras neuronas para conseguir un objetivo de cálculo común para toda la red.

La estrategia de ajuste de dichos pesos constituye el aprendizaje del sistema y, junto con su topología (interconexión entre neuronas), determina su funcionalidad y prestaciones.

Una vez finalizado el entrenamiento, los pesos quedan fijados (el aprendizaje ha finalizado) y la red está lista para operar como un sistema que responde a estímulos de entrada. Sus campos de aplicación son tan diversos como: clasificación, modelado, aproximación de funciones, reconocimiento de patrones, etc. Existen múltiples topologías de RNA y diferentes estrategias para el aprendizaje.

En aplicaciones de detección de fallos, las redes neuronales, gracias a su capacidad de aproximar funciones no lineales, han venido usándose en sustitución de los modelos analíticos para simular sistemas altamente no lineales como son las plantas químicas, nucleares, sistemas de control de vuelo, etc.

Para ello deben entrenarse con conjuntos de datos suficientemente representativos de las condiciones de funcionamiento normal del proceso,



Representación de una neurona artificial.

las divisiones (por ejemplo, Negativo, Próximo_a_cero, Positivo), o la obtención de tendencias que expresen el comportamiento de la señal (por ejemplo, Subir, Mantenerse, Bajar o Oscila, No_Oscila.).

Se denominan *episodios* los intervalos de tiempo en los que la evolución de la señal no sufre cambios importantes. Las representaciones mediante episodios se caracterizan, entonces, por los instantes de cambio y la correspondiente descripción simbólica, constante entre dichos instantes.

Las representaciones simbólicas anteriores son útiles para el tratamiento de la incertidumbre. Para la representación y el tratamiento de la imprecisión, cada vez está más extendida la utilización de conjuntos borrosos (*fuzzy*).

En detección y diagnóstico, las conclusiones o decisiones difícilmente pueden tener estrictamente la forma

de sí/no o verdadero/falso. La complejidad del conocimiento del proceso, o las condiciones vagas, inciertas, siempre llevan conclusiones intermedias, transitorias o vagas.

Para representar los datos, los conjuntos borrosos permiten cuantificar esta vaguedad definiendo funciones de pertenencia asociadas a éstos para designar el grado en que un elemento pertenece a un conjunto.

A partir de aquí, la teoría de la lógica borrosa da una solución al problema de la representación del conocimiento y del razonamiento con datos imprecisos. Muchas de las herramientas que se describen en las secciones siguientes pueden incluir razonamiento borroso.

El caso más claro es el de los sistemas expertos, ya que permite métodos de decisión más próximos a la manera humana de pensar y, por tanto, facilita la representación y utilización del conocimiento experto

sobre los procesos.

También se ha utilizado la lógica borrosa en la evaluación de residuos para el diagnóstico de fallos, o en redes neuronales entrenadas para simular el comportamiento del proceso o para clasificar determinadas situaciones.

Grafos, análisis causal y sistemas expertos

Los métodos basados en análisis causal utilizan las relaciones síntomas-diagnóstico o relaciones causa-efecto (modelado causal).

Las primeras aplicaciones basadas en estos métodos fueron los llamados árboles de fallos, formados por nodos que representan hechos y puertas lógicas que codifican las relaciones entre éstos. Los hechos se conectan mediante flechas de unión; un nodo OR representa la disyunción de condiciones que causan una salida, mientras un nodo AND representa la conjunción de condiciones que causan la salida.

Otra herramienta la constituyen los SDG (*Signed Directed Graph*), establecidos para modelar procesos continuos. Un SDG consiste en nodos que representan variables numéricas o de tipo cualitativo (por ejemplo: normal, alto, bajo) y ramas que representan relaciones causales entre los nodos y que pueden ser positivas (+) o negativas (-).

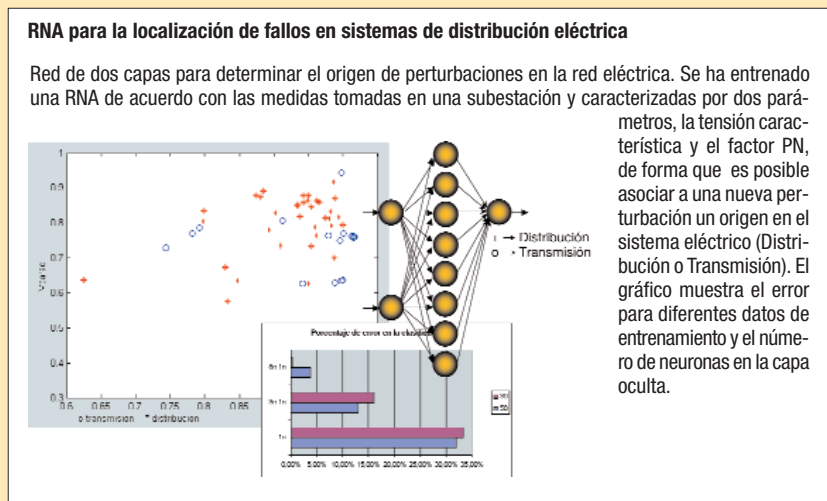
Cada nodo puede influir sobre uno o varios otros nodos. Las relaciones causales pueden incluir información auxiliar, como retardos, intensidad, probabilidades, etc.

La idea básica de esta técnica consiste en rastrear los funcionamientos defectuosos. Puede usarse tanto para el modelado de fallos (propagación de fallos) como para el diagnóstico (buscando causas iniciales de los funcionamientos defectuosos observados, desde los síntomas hasta el origen del fallo). Para casos prácticos de aplicación, los grafos pueden ser representados de forma equivalente por un conjunto de reglas.

y utilizar como vectores de entrada muestras de las señales en instantes sucesivos.

El uso de RNA para el diagnóstico puede encontrarse en la implementación de algoritmos de reconocimiento de patrones correspondientes a situaciones de fallos, operando directamente sobre las señales adquiridas, o como sistema de evaluación de los residuos sensibles a los diferentes modos de fallo en estrategias basadas en modelo.

La utilización de RNA como clasificador supervisado permite la estimación de índices no mesurables o la asociación automática de síntomas (extraídos de las señales) con diagnósticos. Asimismo, se utilizan para descubrir y clasificar comportamientos característicos de los procesos.



RNA para la localización de fallos.

Razonamiento basado en casos

Actualmente, en muchos procesos se dispone de registros históricos de datos que no se explotan suficientemente. A la vez, los operadores de planta acumulan experiencias y conocimiento que no revierte en una mejor gestión de la planta. El razonamiento basado en casos se ofrece como una metodología de resolución de problemas aplicable al diagnóstico, pero también a la planificación, el diseño, etc. que pretende un aprovechamiento de los datos y del conocimiento existente en el dominio de la aplicación.

La propuesta consiste en registrar experiencias previas para una posterior reutilización, tal y como en medicina se consideran los pacientes como casos clínicos. A partir de esta idea, el Razonamiento Basado en Casos (RBC) define una estructura adecuada para los casos (memoria de caso) y cuatro mecanismos básicos (ciclo de las 4R): Retención (registro), Recuperación (mediante criterios de semejanza), Reutilización (adaptación de acuerdo con los nuevos objetivos) y revisión (validación de la propuesta efectuada).

Como se ha dicho, en aplicaciones de diagnóstico es común asociar síntomas (normalmente extraídos de las señales y alarmas) con diagnósticos (localización del fallo, identificación de componentes, grado de afectación). Por tanto, los mecanismos descritos en el párrafo anterior se utilizan en primer lugar para evaluar la semejanza entre los síntomas actuales y los obtenidos en situaciones pasadas. Entonces, a partir de la recuperación de situaciones similares y los diagnósticos de las mismas, puede deducirse (mediante la correspondiente adaptación) un diagnóstico para la situación actual.

Se trata de una nueva metodología de trabajo con pocas aplicaciones industriales en este momento, pero con una gran aceptación debido al aprovechamiento de recursos que supone (registros históricos y conocimiento). Bajo esta concepción, el razonamiento basado en casos puede concebirse como metodología de integración con otras técnicas. El reto principal recae en la definición e implementación de las cuatro operaciones básicas.

RBC en la Generación automatizada de recetas en un secadero

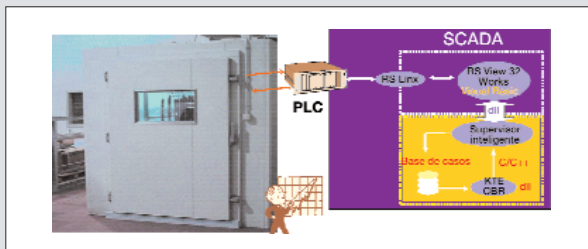
Un secadero, en general, es una cámara en la que se procesan lotes de acuerdo con una receta preconcebida. En el caso de secaderos de embutidos, estas recetas se ajustan a criterio del experto y de acuerdo con la percepción que éste tiene del grado de curado y de las variables medidas.

La utilización de Razonamiento Basado en Casos permite incorporar de forma objetiva estos ajustes expertos en posteriores producciones.

El procedimiento consiste en identificar en todo momento el estado del proceso (secadero + embutido) a partir de las variables medidas. A partir de este conocimiento pueden recuperarse recetas similares ejecutadas con éxito en el pasado y proponer ajustes a la receta en proceso. Una vez finalizada la producción y convenientemente evaluada, la receta ejecutada puede retenerse para un uso posterior.



RBC para la generación de recetas en un proceso batch.



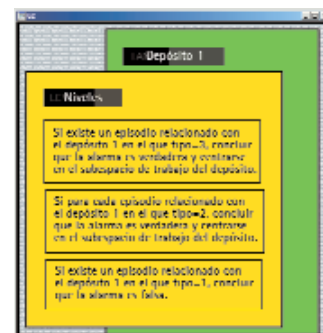
Integración de un sistema CBR con un scada comercial. Cámara real en TFA (Técnicas Frigoríficas Aplicadas, S.A.)

Los sistemas expertos intentan codificar el conocimiento experto mediante un sistema basado en reglas de producción de forma que puedan expresarse la experiencia, el razonamiento aproximado, la imprecisión, el razonamiento por defecto, aprendizaje, etc.

Específicamente, se trata de representar el conocimiento experto para tener un sistema que responda como lo haría el experto humano. En su forma tradicional, un sistema experto está formado por una base de reglas y un motor de inferencia que razona sobre una base de hechos.

Una base de reglas es un conjunto de reglas del tipo IF...THEN ('certainty'). La 'certainty' significa la seguridad con que el experto de procesos (operario o ingeniero) hace esta afirmación que hemos convertido en una regla.

La base de hechos es el conjunto



Ejemplo de entorno comercial de desarrollo de Sistemas Expertos

Gensym G2 es un ejemplo de entorno industrial de supervisión experta. Con características propias de un sistema SCADA y utilizando una filosofía orientada a objetos, este entorno permite la representación del conocimiento mediante Reglas (editadas utilizando un lenguaje natural estructurado de fácil comprensión), Procedimientos (funciones programables ejecutables en tiempo real), y Modelos dinámicos (simulaciones para la predicción, realización de pruebas o el diagnóstico basado en modelos).

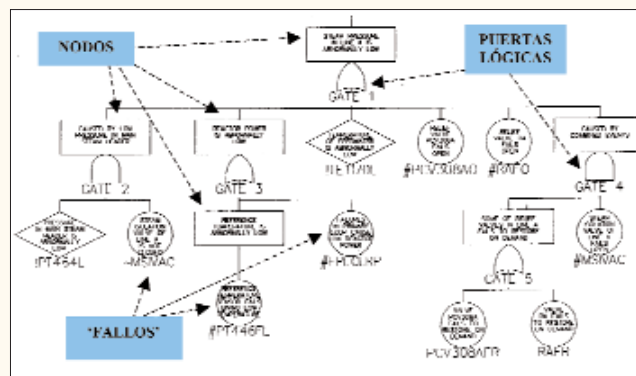
La filosofía orientada a objetos permite una estructuración en clases y subclases a partir de las cuáles se crean gráficamente las variables, reglas, procedimientos o modelos, la clonación de estos elementos (objetos), conexiones gráficas entre los mismos para el intercambio de información y su agrupación en bibliotecas especializadas.

de evidencias, junto con sus certezas asociadas como una variable medida (por ejemplo, la temperatura de una caldera) o una posible alarma (Alarma 708 con certeza 30%) o conclusión de una o varias reglas (Diagnostico: Problemas con la válvula 12, con certeza 90%).

El motor de inferencia se encarga de recorrer las reglas inspeccionando si las puede aplicar, es decir, se encarga de ejecutar el razonamiento.

Existen diversas formas de realizar dicha ejecución, pero básicamente podemos decir que el razonamiento consiste en aplicar una base de reglas a una base de hechos para obtener nuevas conclusiones. A medida que se van aplicando las reglas se deducen nuevos hechos que se añaden a la base de hechos.

Los sistemas expertos son capaces de manipular información incierta o de tipo cualitativo, permitiendo de esta forma codificar conocimientos igualmente inciertos o imprecisos. Las ventajas de la utilización de sistemas expertos para detectar y diagnosticar fallos residen en la posibilidad de representar y codificar el conocimiento experimental, mientras que el principal inconveniente es precisamente la obtención de este



■ Árbol de fallos extraído de "Reliability Engineering and System Safety", núm. 44, 1994.

tipo de conocimiento. Su campo de aplicación se reduce a instalaciones complejas y normalmente de grandes dimensiones (procesos petroquímicos y cementeros, etc.).

Integración. Combinación de técnicas

Muchas de las aplicaciones actuales de detección y diagnóstico de fallos van asociadas a resultados de investigación y son soluciones a medida. La tendencia es desarrollar sistemas integrados que incluyen y combinan diversas técnicas.

Cada técnica de las presentadas anteriormente tiene sus ventajas y desventajas para la detección y el diagnóstico de fallos. Por lo tanto, la combinación de dos o más técnicas puede, muchas veces, resolver problemas difíciles de solucionar de otra forma.

Existen aplicaciones, por ejemplo, que combinan simulaciones del proceso con sistemas de reglas que permiten incorporar el conocimiento de los expertos y sistemas de razonamiento basado en casos que permiten aprovechar los datos históricos.

En otros casos, las redes neuronales se usan para modelar sólo las partes

desconocidas de modelos físicos, para mejorar los métodos estadísticos (permitiendo no linealidades) o como parte de sistemas expertos de diagnóstico.

Actualmente, las tareas directamente relacionadas con la adquisición y almacenamiento de datos, la representación gráfica y animada de variables de proceso, y la monitorización de éstas se realizan mediante los sistemas scada, que permiten además actuar sobre autómatas y reguladores autónomos o directamente sobre el proceso.

Este tipo de entornos, por lo tanto, representa el marco para incorporar este conjunto de herramientas útiles para el diagnóstico, facilitando la conectividad entre aplicaciones y bases de datos, locales o distribuidas mediante redes de comunicación (AeI núm. 334, noviembre de 2002).

Es importante disponer de mecanismos flexibles que aseguren esta conectividad como sistemas abiertos, ya sea incorporando lenguajes de programación estándar (VBA, Visual Basic for Applications, C/C++) o mecanismos que faciliten el intercambio de datos (OPC, ActiveX, compatibilidad XML, SQL, etc.).

Joaquim Meléndez
(quimmel@eia.udg.es)

Juan Colomer
(colomer@eia.udg.es)

Institut d'Informàtica i Aplicacions / Centre EASY-XIT
Universitat de Girona



■ Esquema de un entorno integrado de detección y diagnóstico.