

RAZONAMIENTO CUALITATIVO Y SEMI-CUALITATIVO EN LA SUPERVISIÓN DE PROCESOS, PARTE II

García-Beltrán, C.; Gentil, S.

§Laboratoire d'Automatique de Grenoble (UMR 5528 CNRS-INPG-UJF)
ENSIEG - BP 46, F-38402 Saint Martin d'Hères Cedex
cgarcia@ieee.org, Sylviane.Gentil@inpg.fr

Resumen– Este segundo artículo explora la aplicación de diversas herramientas en los sistemas de ayuda al operador para la supervisión. Nos enfocaremos a dos tipos de herramientas utilizadas en la toma de decisiones, la primera, un sistema de predicción de los efectos de una falla, basado en el análisis de tendencias y la segunda un sistema de generación de consejos de acción para el operador.

Palabras Clave –supervisión; predicción, análisis de tendencias, consejos de acción.

1. INTRODUCCIÓN

En la primera parte de esta pareja de artículos se presentaron algunas de las funcionalidades deseables de un sistema de supervisión avanzada. Particularmente se explicó un método de detección y diagnóstico de fallas basado en el grafo causal. En este segundo artículo nos enfocaremos en otras dos herramientas útiles en las tareas de supervisión y ayuda a la decisión: a) la utilización del análisis de tendencias para la predicción de variables y b) la utilización de un grafo causal para la generación de consejos de acción.

2. AYUDA AL OPERADOR EN LA PREDICCIÓN DE LOS EFECTOS DE UNA FALLA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE TENDENCIAS

Como se ha mencionado en el artículo anterior, diversos métodos han sido propuestos para la predicción de variables. Una de las técnicas más utilizadas para la predicción son las redes neuronales artificiales [García-Beltrán et al. 2003]. En este artículo presentamos la utilización de los resultados del análisis de tendencias para la predicción.

Las tendencias temporales están compuestas de episodios semicualitativos sucesivos [Charbonnier et al. 2002]. Un episodio corresponde a un intervalo de tiempo de comportamiento uniforme, es decir, las propiedades cualitativas de la señal son constantes. El episodio es generalmente descrito por $\{primitiva, extensión\}$.

La extracción de tales episodios a partir de los datos enfatiza los cambios relevantes ocurridos en la señal analizada y permite focalizar la atención del operador en los datos sujetos a cambios. Como un episodio representa solo el comportamiento relevante de la

señal sobre un período de tiempo determinado en línea, en función de la dinámica de la señal, la idea es extrapolar el último episodio con el propósito de dar al operador una idea de cómo la variable se comportará en el futuro.

El método de análisis de tendencias aquí propuesto consiste en cuatro etapas:

- Segmentación en línea de los datos en segmentos lineales.
- Clasificación de último segmento calculado en 7 posibles formas temporales.
- Transformación de la forma en un patrón de tendencia semicualitativo.
- Agregación de los patrones de tendencia semicualitativos con los anteriores para formar secuencias sucesivas.

2.1 Segmentación en línea

Aquí, una partición de los datos en segmentos lineales sucesivos es utilizada. El algoritmo de segmentación determina en línea el momento en que la aproximación actual ya no es aceptable y cuando un nuevo segmento debe ser calculado. Cada segmento está basado en un modelo lineal: $y(t) = p(t - t_0) + y_0$ donde t_0 es el momento en que el segmento comienza, p es su pendiente y y_0 es el valor al tiempo t_0 Figura 1. Los parámetros son obtenidos mediante un procedimiento de mínimos cuadrados.

La técnica de CUSUM es utilizada para detectar si la aproximación lineal es todavía aceptable. Esta técnica consiste en integrar la diferencia entre el valor observado y el modelo actual. Esta técnica es

muy sensitiva a cambios abruptos. El valor de cusum es calculado mediante:

$$\begin{aligned} \text{cusum}(t_1 + k\Delta t) &= \text{cusum}(t_1 + (k - 1)\Delta t) + e(t_1 + k\Delta t) \\ &= \sum_{j=0}^k e(t_1 + j\Delta t) \end{aligned} \quad (1)$$

Donde $e(t_1 + k\Delta t) = y(t_1 + k\Delta t) - \hat{y}(t_1 + k\Delta t)$ es la diferencia entre la medición y la extrapolación.

La decisión al tiempo $t_1+k\Delta t$ es realizada usando dos límites predefinidos:

- Si $|\text{cusum}(t_1 + k\Delta t)| < th1$: el modelo actual es aceptable.
- Si $|\text{cusum}(t_1 + k\Delta t)| > th1$: $y(t_1 + k\Delta t)$ y t_1 son memorizados.
- Si $|\text{cusum}(t_1 + k\Delta t)| > th2$: el modelo no es aceptable. Un nuevo modelo es calculado utilizando los datos memorizados.

Un segmento i queda entonces definido por cuatro parámetros: el momento de inicio del segmento t_b^i , el valor de la variable al inicio del segmento y_b^i , el tiempo final del segmento t_e^i el valor de la variable al final del segmento y_e^i .

Una vez que un nuevo modelo ha sido calculado, el valor de *cusum* es puesto a cero.

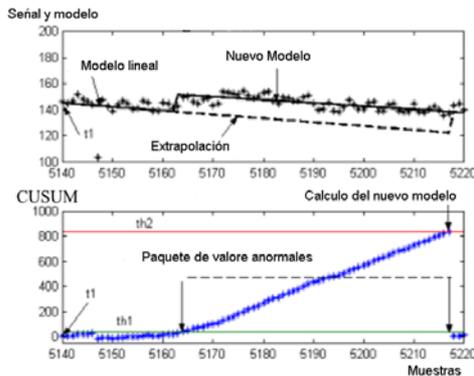


Figura 1. La segmentación de datos

2.2 Clasificación del nuevo segmento en una forma temporal

El nuevo segmento es utilizado junto con el anterior para formar una forma compuesta. Esta forma es clasificada en 7 posibles formas: creciente, decreciente, estable, escalón positivo, escalón negativo, transitorio cóncavo, transitorio convexo. Una forma temporal es clasificada según tres características (Figura 2):

- $I =$ la variación total producida por la forma compuesta:

$$I(i) = y_e(i) - y_b(i) \quad (2)$$

- $I_d =$ la variación debida a la discontinuidad entre dos segmentos:

$$I_d(i) = y_o(i) - y_b(i) \quad (3)$$

- $I_s =$ la variación debida a la pendiente del nuevo segmento:

$$I_s(i) = y_e(i) - y_o(i) \quad (4)$$

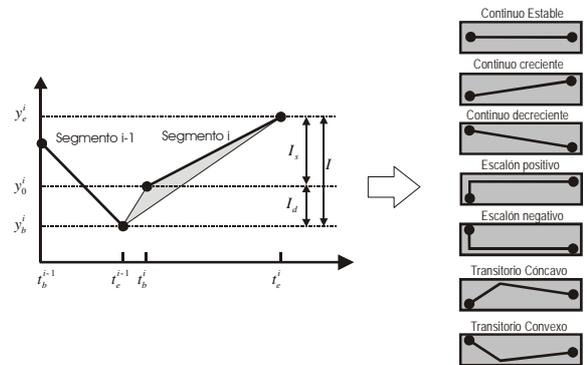


Figura 2. Forma compuesta con los segmentos i e $i-1$.

Una vez que las diferentes características de la figura han sido calculadas, es posible realizar la clasificación utilizando los límites predefinidos t_{hc} y t_{hs} y las siguientes reglas:

- Si $|I_d| > t_{hc}$ la figura es “discontinua”. Pudiendo ser un “escalón” o un “transitorio”.
- Si no, la figura es “continua”. Es “estable”, “creciente” o “decreciente”.
- Si la figura es “continua” y $|I| < t_{hs}$, entonces la figura es “estable”.
- Si no, es “creciente” o “decreciente”, dependiendo del signo de I .
- Si la figura es “discontinua” y $|I_s| < t_{hs}$ la figura es un “escalón”, positivo o negativo dependiendo del signo de I_d .
- Si no es un “transitorio” cóncavo o convexo.

La clasificación del segmento en formas temporales da al operador una información simbólica sobre un intervalo de tiempo que puede ser largo.

2.3 Transformación de las figuras en patrones semicualitativos de tendencia.

La información cuantitativa generada por la segmentación de datos, puede ser asociada con la información cualitativa con el propósito de obtener información semicualitativa. De esta forma, las nueve figuras pueden ser descritas por tres patrones de tendencia: “estable”, “creciente” y “decreciente”. La descripción de estos patrones hace uso de la información cuantitativa proveniente de la segmentación (t_b^i, y_b^i, y_e^i) .

Por ejemplo:

Un *escalón positivo* se convierte en:

$$\{ \text{Creciente}, t_b^i, y_b^i, y_o^i \} + \{ \text{Estable}, t_b^i + T_s, y_o^i, y_e^i \}$$

donde T_s es el periodo de muestreo.

2.4 Agregación de patrones de tendencia

La agregación de patrones de tendencia consiste en la asociación del patrón actual con el anterior con el propósito de obtener los episodios temporales más largos posibles. Las agregaciones entre dos episodios son:

- Creciente + Creciente = Creciente.*
- Decreciente + Decreciente = Decreciente.*
- Estable + Estable = Estable* si la aumentación global de la secuencia $|y_e^i - y_b^{i-1}| < t_{hs}$ (t_{hs} es un límite empleado para separa las formas "estables" y "crecientes/ decrecientes").

- Estable + Estable = Creciente (o Decreciente)* si la aumentación global de la secuencia $|y_e^i - y_b^{i-1}| > t_{hs}$. Esto permite la detección de tendencias lentas en la señal.

El algoritmo de agregación sigue la lógica siguiente:

Si el episodio precedente es $\{ \text{Creciente}, t_b^{i-1}, y_b^{i-1}, y_e^{i-1} \}$ y el modelo actual de tendencia es $\{ \text{Creciente}, t_b^i, y_b^i, y_e^i \}$

Entonces : el nuevo episodio es $\{ \text{Creciente}, t_b^{i-1}, y_b^{i-1}, y_e^i \}$.

Si el episodio precedente es $\{ \text{Creciente}, t_b^{i-1}, y_b^{i-1}, y_e^{i-1} \}$ y el modelo actual de tendencia es $\{ \text{estable}, t_b^i, y_b^i, y_e^i \}$ o $\{ \text{Decreciente}, t_b^i, y_b^i, y_e^i \}$

Entonces : no puede ser agregado y comienza un nuevo episodio: $\{ \text{Creciente}, t_b^{i-1}, y_b^{i-1}, y_e^{i-1} \}$; $\{ \text{Estable}, t_b^i, y_b^i, y_e^i \}$.

2.5 Utilización del análisis de tendencias para la predicción.

Los resultados del análisis de tendencia pueden ser empleados de diferentes formas para informar al operador sobre el comportamiento de una señal. La información cualitativa "Estable", "Creciente" o "Decreciente" es por ella misma interesante para ayudar al operador en su toma de decisiones. Aunado a esto, la información semicualitativa puede ser empleada en la predicción, en una ventana de tiempo, de valores de la variable supervisada. El algoritmo de segmentación provee un modelo lineal que describe de la mejor forma el comportamiento de la variable.

Si un límite de alarma a sido escogido, el modelo lineal $y(t) = p(t - t_o) + y_o$ es empleado para resolver el problema: ¿cuánto tiempo es necesario para que la señal llegue hasta este límite?

3. PREDICCIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE LA FALLA.

En caso de falla, un útil para la toma de decisiones es la predicción de la evolución del estado del proceso. Sin embargo, esta predicción es un tanto incierta debido a que la falla modifica el comportamiento del sistema. En el caso en el cual se cuente con un grafo causal y el comprende el modelo de comportamiento del componente en falla, un modulo de predicción puede dar al operador la información referente al conjunto de variables que pueden ser afectadas por el operador (si ninguna acción es realizada). De esta forma, las consecuencias de la falla pueden ser analizadas con referencia a las variables críticas posiblemente afectadas. Es entonces una forma de predicción cualitativa.

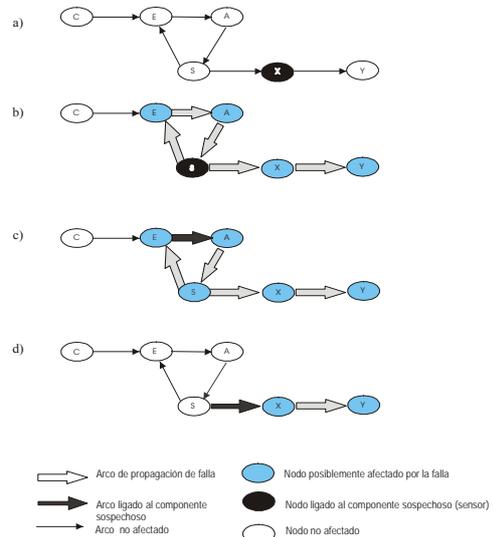


Figura 3. Predicción de la propagación de la falla

El análisis de la propagación de los efectos de la falla presentado aquí es un análisis pesimista, dado que da al operador el conjunto de variables ligadas mediante el grafo causal al componente en falla. Este análisis supone particularmente que la estructura del sistema no es modificada por la falla. Si no es el caso, habrá que hacer uso de modelos de falla. El algoritmo utilizado realiza una búsqueda hacia delante de los nodos que guardan una relación con los arcos o con los nodos ligados al componente. Esta información permite principalmente visualizar las variables críticas para las cuales existe el riesgo de desviación con referencia al funcionamiento normal.

La obtención de las variables con posibilidad de ser afectadas por la falla se realiza mediante una búsqueda hacia adelante en el grafo. Existen varios casos: a) una falla en un sensor fuera de un lazo de

regulación (Figura 3-a), la falla no se propaga en el proceso; b) falla en un sensor cuyos valores son usados en el lazo de regulación (Figura 3 b), la falla se propaga en el lazo; c) falla de un actuador en un lazo de regulación (Figura 3-c), en principio la falla no se propaga si admitimos que la regulación funciona normalmente, pero en caso de bloque o saturación la falla puede propagarse en el lazo; d) falla del sistema fuera del lazo de regulación (Figura 3-d), la falla es propagada por el proceso.

4. AYUDA AL OPERADOR EN LA OPERACION FRENTE A UNA FALLA

El modelo causal posee toda la información necesaria para la búsqueda de consejos de acción. Una lista de medios de acción puede ser ligada a cada nodo. De hecho, un medio de acción es una estructura ligada a cada variable que contiene la información siguiente:

- La referencia al nodo asociado a la variable de acción.
- El tiempo de reacción entre la variable de acción y un nodo.
- El sentido del medio de la acción: esta información permite mostrar si la evolución de la variable evoluciona en el mismo sentido de la variable de acción o en sentido inverso.

Un medio de acción esta asociado a la variable y no a la acción misma. De esta manera, si existen diferentes caminos entre un nodo de acción y otro nodo, esto tendrá como consecuencia diferentes medios de acción para este nodo.

La primera fase para la obtención de los medios de acción es una búsqueda hacia atrás en el grafo. Cada nodo es tratado de manera recursiva hasta que todos sus nodos antecesores hayan sido tratados. Cuando un nodo a sido escogido, existen diferentes posibilidades:

- El nodo tiene nodos padre: en ese caso, él hereda los medios de acción de sus padres, modificados por la información en el arco que los liga.
- El nodo es un nodo de acción (referencia o variable de control): en ese caso, él es su propio medio de acción.
- El nodo no es un nodo de acción y no tiene nodos padres. La variable es una perturbación al proceso y no existe ningún medio de acción para esta variable.

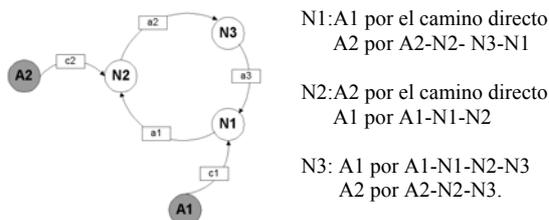


Figura 4. Ejemplo de medios de acción en un grafo con un lazo.

Un tratamiento específico es realizado si el grafo causal contiene lazos. En el ejemplo de la Figura 4 podremos encontrar los medios de acción de cada nodo.

4.1 Consejos de acción en línea.

El tratamiento en línea es lanzado por el sistema cuando un componente defectuoso ha sido localizado. El grafo causal permite dar al operador los consejos sobre que acciones puede tomar para hacer frente a la falla. El tratamiento fuera de línea da una lista de medios de acción potenciales en diferentes configuraciones que tienen un efecto sobre la variable perturbada.

En el grafo causal existe un lazo entre los nodos y arcos y los componentes físicos. Utilizando este lazo, un algoritmo realiza una búsqueda de los medios de acción sobre los nodos predecesores mas próximos. Todos los medios de acción que utilizan como camino los arcos ligados al componente en falla son eliminados. Si el origen de la falla es un medio de acción, el debe también ser eliminado de la lista de medios de acción. Si se encuentran diversos medios de acción, es el operador quien debe decidir sobre cual de ellos tomar, utilizando, por ejemplo, cual de ellos tiene el tiempo de reacción más pequeño.

En caso de varias variables sean afectadas por la falla y que los medios de acción sean comunes, pero con sentidos diferentes, un algoritmo de reducción de contradicciones es utilizado [Garcia-Beltran 2004].

5. EJEMPLO ACADEMICO.

Continuando con el ejemplo de la primera parte de esta pareja de artículos [Garcia-Beltran and Gentil 2004], presentaremos el uso de los diferentes útiles propuestos en este artículo. El escenario descrito en la Figura 5 corresponde al mismo presentado en el primer artículo [Garcia-Beltran and Gentil 2004].

La predicción de valores de cada variable es representada del lado derecho (con fondo gris). Esta predicción esta basada en el ultimo episodio mediante su extrapolación en una ventana de tiempo. La predicción permite ver que el nivel h1 permanecerá constante por un largo periodo gracias a la regulación, pero que esto no será el caso cuando la válvula se sature a 100%. El operador tiene una idea clara sobre el tiempo restante antes de esta saturación y de esta forma él puede planear una medida preventiva. Por ejemplo, el operador puede realizar una reducción en el valor de referencia de h2, o programar un paro para realizar una acción de mantenimiento.

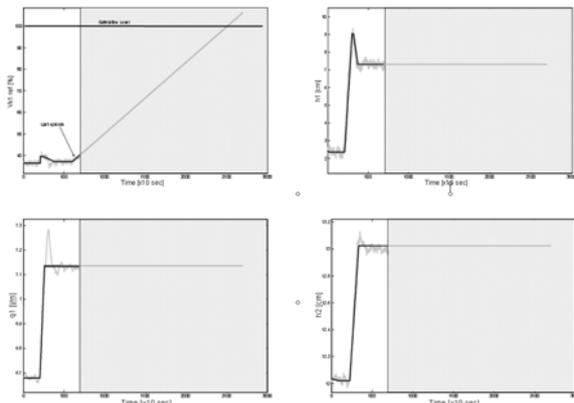


Figura 5. Predicción de variable a partir de una falla

6. IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS DE SUPERVISIÓN

Los métodos tradicionales de desarrollo de software para los sistemas de supervisión y control se concentran en los aspectos funcionales y de tiempo real. Cuando este tipo de sistemas se vuelven más complejos, los métodos de desarrollo sistemático se vuelven necesarios para manejar la complejidad. Como lo precisa Sanz [Sanz et al. 2001], el desarrollo de programas para los sistemas de control y de supervisión debe concentrarse igualmente en la calidad del programa, teniendo como base los conceptos de cohesión, calidad, reutilización y modularidad.

Tomando en cuenta la diversidad de tareas involucradas en la supervisión y el mantenimiento, uno de los aspectos principales de su desarrollo es la modularidad del sistema, lo cual permite obtener programas fiables y seguros.

Una evolución importante en la informática es la concepción y el desarrollo modular ejemplificado por la utilización de objetos o de componentes de software. Los métodos modernos en la construcción de sistemas basan su proceso de concepción en la identificación de funcionalidades y/o de responsabilidades y sobre la encapsulación de servicios en la forma de objetos o componentes para su implementación. Sin embargo, los sistemas de control y de supervisión son entidades que escapan al modelo de base de objetos. Cuando los objetos tienen responsabilidades autónomas, ellos se convierten en objetos activos o agentes [Brungali 1998]. Los modelos de agente brindan el mejor marco para la concepción de sistemas modulares y activos de control y supervisión. En el marco de múltiples agentes, los agentes actúan unos sobre los otros para alcanzar sus objetivos. Estos sistemas brindan una base para la solución distribuida de problemas.

Los algoritmos propuestos han sido implementados dentro de la arquitectura multiagentes de MAGIC [Köppen-Seliger et al. 2003]. El propósito de MAGIC (Multi-Agents-Based Diagnostic Data Acquisition And Management In Complex Systems) es brindar al operador información clara, y detallada

según las necesidades, sobre el estado del proceso. Esta información debe indicar la causa del estado anormal del proceso y sugerir acciones de remedio adecuadas.

La arquitectura distribuida de MAGIC está basada en el concepto de Multi Agentes Multi Nivel (Figura 6). La principal idea es distribuir, sobre un número de agentes inteligentes, las tareas relacionadas con la adquisición de datos, la detección de fallas, el diagnóstico y la ayuda al operador. La arquitectura modular de MAGIC permite aplicarla a diferentes procesos industriales.

Cada uno de los agentes de MAGIC desarrolla una tarea de manera individual y casi autónomamente y el conjunto de agentes se comunica mediante una infraestructura de comunicación. En este contexto, los agentes son componentes de software funcionando, sea en una misma computadora o separadamente en varias, cooperando unos con otros. Los agentes forman una arquitectura de elementos distribuidos funcionalmente, semánticamente y en el espacio, teniendo como resultado un sistema completo pero modular.

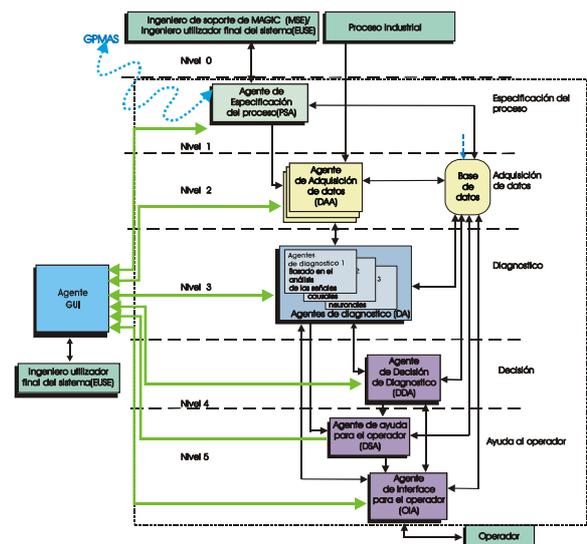


Figura 6. La arquitectura general de MAGIC.

En esta arquitectura, los Agentes de Diagnóstico (DAs) son el corazón del sistema. Es bien sabido que un solo método de diagnóstico es inadecuado para resolver todos los problemas de diagnóstico presentes en una instalación compleja [Isermann and Balle 1997]. Por lo tanto, los agentes de diagnóstico implementan varios métodos para la detección de fallas, como los métodos basados en observadores [Frank et al. 2000], en grafos causales [Montmain and Gentil 2000] y métodos basados en redes neuronales [Marcu et al. 2004]. Los Agentes de Diagnóstico elaboran los síntomas relacionados con el comportamiento de los subsistemas, donde la validez de la decisión y del modelo cuantifican su relevancia.

El Agente de Decisión de Diagnóstico (DDA) analiza la información proveniente de los Agentes de

Diagnóstico y determina el estado global del proceso. Enseguida, asocia el estado actual a uno o varios componentes sospechosos. Si los síntomas están relacionados con el mismo subsistema, este agente tiene que resolver los posibles conflictos. Dos métodos de decisión fueron implementados para la localización de las fallas [Ploix et al. 2003], el primero está basado en las tablas de firmas (signature tables) y el segundo en el razonamiento lógico.

El Agente de Ayuda a la Decisión (DSA) tiene como objetivo brindar ayuda al operador en sus tareas de toma de decisiones. En el caso de MAGIC, estos consejos no se refieren a los casos de paro de emergencia o acomodación de controladores, sino a los algoritmos presentados en la sección 4. Este agente también interviene en la predicción de variables, como parte de la ayuda a la decisión.

Los Agentes de Adquisición de Datos (DAA) se encarga de la comunicación con los sistemas de adquisición de datos tradicionales con el propósito de llevar los datos desde el proceso hacia el sistema MAGIC, principalmente hacia los Agentes de Diagnóstico y a la base de datos.

El Agente de Especificación del Proceso (PSA) debe claramente definir el proceso a ser supervisado. Este agente también se encarga de seleccionar y configurar los agentes que serán involucrados.

Finalmente, el sistema MAGIC cuenta con dos tipos de interfaces para el operador, la primera implementada dentro del Agente de Interfase para el Operador (OIA) dedicada al monitoreo, diagnóstico del proceso y ayuda al operador; y una segunda interfase dedicada al monitoreo del sistema informático MAGIC (Agente GUI).

7. CONCLUSIÓN

Esta pareja de artículos presenta la utilidad de los métodos cualitativos y semicualitativos como herramientas de los sistemas de supervisión de procesos. El problema de la fiabilidad, seguridad y disponibilidad de los sistemas es amplio, por tal motivo los diferentes aspectos de la ayuda a la supervisión reposan sobre diferentes tipos de conocimientos y de técnicas. Los sistemas de supervisión avanzados evolucionan de tal forma que ellos combinan las técnicas algorítmicas con aquellas de la inteligencia artificial con la finalidad de llegar a una mejor cooperación entre el operador humano y el sistema.

Los sistemas de supervisión avanzados deben analizar e interpretar así mismo grandes cantidades de datos, aplicando una gran diversidad de métodos, cada uno adaptado a la situación del subsistema de ayuda. Con la finalidad de coordinar la aplicación de esta diversidad de técnicas, la construcción de sistemas de control y de supervisión avanzados debe considerar la utilización de técnicas de desarrollo de

software intrínsecamente seguras, con la finalidad de evitar un aumento en la complejidad del sistema.

8. AGRADECIMIENTOS

El programa franco mexicano ECOS Nord-ANUIES y COSNET financian a C. Garcia-Beltran. Este proyecto se sitúa igualmente dentro del proyecto europeo MAGIC (EU-IST-2000-30009 MAGIC).

9. REFERENCIAS

- Brungali, D. (1998). From Objects to Agents: Software Reuse for Distributed Systems. Torino, Politecnico di Torino.
- Charbonnier, S., G. Becq, L. Biot, P. Y. Carry and J. P. Perdrix (2002). On line segmentation algorithm for ICU continuously monitored data. 15 th-IFAC World Congress, Barcelona.
- Frank, P. M., S. X. Ding and B. Köppen-Seliger (2000). Current Developments in the Theory of FDI. SAFEPROCESS 2000, Budapest.
- Garcia-Beltran, C. (2004). Outils pour l'aide à la supervision de procédés dans une architecture multiagent. Laboratoire d'Automatic de Grenoble. Grenoble, INPG.
- Garcia-Beltran, C. and S. Gentil (2004). Razonamiento cualitativo y semi cualitativo en la supervisión de procesos. Parte I. Conferencia de la AMCA, México, DF.
- Garcia-Beltran, C., S. Gentil and S. Charbonier (2003). Qualitative trends and Neural Network based symptom prognosis. Workshop on Advanced Control and Diagnosis, University Duisburg - Essen, Germany.
- Isermann, R. and P. Balle (1997). "Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes." Control Engineering practice 5(5): 709-719.
- Köppen-Seliger, B., T. Marcu, M. Capobianco, S. Gentil, M. Albert and S. Latzel (2003). MAGIC: An Integrated Approach For Diagnostic Data Management and Operator Support. IFAC-SAFEPROCESS 2003, Washington, D.C.
- Marcu, T., B. Köppen-Seliger and R. Stucher (2004). FDI System Design for A Hydraulic Loooper Using Dynamic Functional-Link Neural Networks. To Appear on : IFAC MMM 2004, Nancy, France.
- Montmain, J. and S. Gentil (2000). "Dynamic causal model diagnostic reasoning for on-line technical process supervision." Automatica(36): 1137-1152.
- Ploix, S., S. Gentil and S. Lesecq (2003). Isolation Decision for a Multi-Agent-Based Diagnostic System. IFAC SAFEPROCESS 2003., Washington, D.C.
- Sanz, R., C. Pfister, W. Schaufelberger and A. de Antonio (2001). Software for Complex Controllers. Control of Complex Systems. London, Springer-Verlag.