

Diagnóstico de fallas del sistema COSY mediante Redes de Petri Híbridas

José E. Martínez-Prieto¹, Carlos D. García-Beltrán¹, Dionisio A. Suárez-Cerda²

¹Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Interior Internado Palmira s/n, Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos,
México C.P. 62490 Tel. 01(777) 362-77-70

²Instituto de Investigaciones Eléctricas, Calle Reforma # 113,
Col. Palmira, 62490, Cuernavaca, Morelos, México,
(emartinez04e, cgarcia)@cenidet.edu.mx, suarez@iie.org.mx

Resumen. En la actualidad, la mayoría de los procesos industriales presentan una gran complejidad. La gran cantidad de variables y la complejidad de sus relaciones complican el diseño de los lazos de control como de supervisión. Esta complejidad se ve acentuada dada la necesidad de realizar numerosos cambios en los modos de operación, lo cual representa formalmente una dinámica híbrida (comportamientos continuos y discretos fuertemente ligados). En este artículo se presenta un esquema de diagnóstico de fallas, basado en redes de Petri, aplicado al sistema de tanques acoplados, de comportamiento híbrido, conocido como sistema COSY (*Complex System*).

1 Introducción

Con el tiempo, todo sistema físico manifiesta degradaciones en la dinámica de su comportamiento. Esto puede atribuirse a diferentes causas, como por ejemplo, desgaste por fricción, deterioro por sobrecalentamiento o envejecimiento natural. Estos cambios evolucionan gradualmente, hasta llegar a convertirse en fallas. En la actualidad, la mayoría de los procesos industriales presentan una gran complejidad. La gran cantidad de variables y la complejidad de sus relaciones complican el diseño de los lazos de control como de supervisión. Esta complejidad se ve acentuada dada la necesidad de realizar numerosos cambios en los modos de operación del proceso, lo cual representa formalmente una dinámica híbrida. Los sistemas dinámicos híbridos son sistemas dinámicos que integran de manera explícita y simultánea sistemas continuos y discretos, los cuales requieren para su descripción, el uso de modelos de tiempo continuo, modelos en tiempo discretos y la interfase entre ellos [1].

Debido al considerable incremento en el tamaño y a la complejidad de los procesos industriales, en la actualidad un operador está prácticamente imposibilitado para realizar

*M. A. Moreno, C. A. Cruz, J. Álvarez, H. Sira (Eds.)
Special Issue: Advances in Automatic Control and Engineering
Research in Computing Science 36, 2008, pp. 33-42*

las tareas de diagnóstico de fallas en línea. Aunado a esto, los riesgos físicos que pueden derivarse de las fallas, incrementan la necesidad de los sistemas automáticos de diagnóstico de fallas. Una manera de reducir el efecto de las fallas en un sistema de producción, consiste en tener el conocimiento de la existencia de una falla y subsecuentemente la puesta en marcha de las acciones correctivas o preventivas según sea el caso. El concepto de diagnóstico de fallas se relaciona con la primera etapa y comprende tanto la detección, como la localización de ésta.

En este artículo se presenta una estrategia de diagnóstico de fallas para sistemas híbridos. El contenido de este artículo es el siguiente: en la sección 2 se presentan las ideas principales del diagnóstico basado en modelo. En la sección 3, se resumen las bases de funcionamiento de las Redes de Petri, abarcando las redes discretas y continuas. En la sección 4 se presentan las Redes de Petri Híbridas, En la sección 5, se describe el sistema de tanques acoplados, conocido como sistema COSY, en la sección 6 se presentan algunas pruebas de diagnóstico de fallas para el sistema COSY y finalmente en la sección 7 se discuten algunas conclusiones.

2 Diagnóstico de Fallas

En la actualidad, existen numerosas técnicas para realizar el diagnóstico de fallas, ver por ejemplo la clasificación presentada en [2]. La idea básica del diagnóstico de fallas es verificar la consistencia entre el funcionamiento real del sistema y aquel para el cual fue diseñado. De esta forma, un *test de consistencia*, o *test de coherencia*, tiene por finalidad verificar si un conjunto de datos, representativos del estado real de un sistema físico, es coherente con el conocimiento previo del comportamiento de dicho sistema. De manera general, un *test de coherencia* se basa en un modelo de comportamiento en el que intervienen solamente variables y parámetros conocidos: este modelo es una agregación de relaciones de comportamiento elementales, llamados *Relaciones de Redundancia Analítica* (RRA). Efectuando la combinación adecuada de RRA con soportes diferentes (sensibles a fallas particulares y/o, verificando componentes físicos distintos) es posible localizar el o los componentes en falla, de acuerdo a los *test de coherencia* que produzcan un resultado de inconsistencia.

Los test de coherencia son concebidos de tal forma que faciliten su uso posterior mediante una etapa de decisión de diagnóstico, la cual permita la localización de los componentes en falla. Mediante la direccionalidad de los residuos o su estructuración es posible simplificar los procedimientos de diagnóstico. En el enfoque de estructuración, los residuos son pensados de tal forma que respondan a subconjuntos de fallas diferentes. Estos subconjuntos de fallas permiten estructurar una tabla de firmas, las cuales traducen la influencia de las fallas sobre los residuos.

La mayor parte de los trabajos publicados en el área de diagnóstico de fallas se enfocan al problema de diagnóstico de fallas para sistemas con dinámica continua, ver por ejemplo [3]. Sin embargo, el comportamiento bajo dinámicas híbridas ocurre en una gran

variedad de procesos. El sistema de diagnóstico de sistemas híbridos debe tomar en cuenta el cambio en el modo de operación del sistema. Los principales trabajo en este tipo de sistemas se deben a Biswas [4] cuya herramienta de base son los Bodgraphs Híbridos. Sin embargo, existen algunas alternativas que permiten el manejo de las dinámicas híbridas, tal como las Redes de Petri.

3 Redes de Petri Discretas y continuas

Las redes de Petri aparecieron en la literatura con la tesis doctoral de Carl Adam Petri en 1962, como una herramienta matemática que permite modelar eventos discretos de una manera gráfica y fácil de visualizar. En la década de los setenta, su estudio y aplicación se extendió debido a su versatilidad para el análisis y modelado de sistemas dinámicos. Más tarde, en [5] se presenta el concepto de Redes de Petri continuas, las cuales permiten modelar eventos continuos. Posteriormente, se desarrollan las redes de Petri híbridas que combinan los dos tipos de redes de Petri [4, 6].

3.1 Redes de Petri Discretas

Las redes de Petri son un tipo de grafo dirigido compuestas por dos tipos de nodos: los lugares y las transiciones. Los lugares son representados por círculos y las transiciones por rectángulos o por barras. Los lugares y transiciones se conectan entre sí por medio de arcos. El número de lugares y transiciones es finito y diferente de cero, aunque pueden existir redes degeneradas que no contengan a alguno de éstos. La Fig. 1 muestra una red de Petri formada por tres lugares, una transición y tres arcos. El conjunto de lugares se denota por P y el conjunto de transiciones es denotado por T , de donde, para este ejemplo: $P = \{p_1, p_2, p_3\}$ y $T = \{t_1\}$. El lugar p_1 es el lugar de entrada de la transición t_1 y el lugar p_3 es el lugar de salida de la misma transición. Una transición sin lugar de entrada se llama *transición fuente* y una transición sin lugar de salida se denomina *transición destino*.

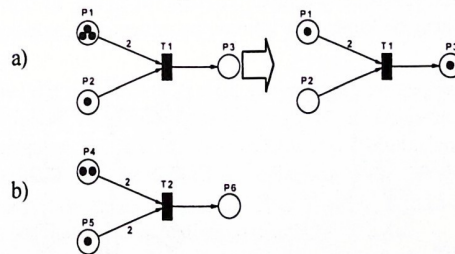


Fig. 1. Red de Petri Discreta

En la Fig. 1 a), a la izquierda de la flecha, se muestra una red de Petri con marcas en los lugares p_1 y p_2 , estas marcas se denominan *tokens*. El número de *tokens* es expresado como $M(P_i)$ o por m_i . En la red mencionada, se tiene que $m_1 = 3$, $m_2 = 1$ y $m_3 = 0$. El estado de la red está determinado por el vector de *tokens*, para la red es $M = (3, 1, 0)$. Los *tokens* pueden moverse por la red y así cambiar el estado de la misma. Para que un *token* vaya de un lugar a otro, se necesita que las transiciones sean disparadas.

Para disparar una transición, es necesario que en sus lugares de entrada exista al menos el mismo número de *tokens* que el valor del peso del arco de conexión. En la Figura 1 la transición t_1 está activada, llevando al estado de la red de la derecha. El disparo de una transición consiste en tomar tantos *tokens* del lugar de entrada como el peso del arco indique y agregarlos al lugar de salida.

3.2 Redes de Petri Continuas

Se puede aproximar la dinámica de sistemas continuos utilizando modelos basados en redes de Petri discretas, para la solución de estos modelos, se pueden utilizar aproximaciones como enumeración de estados, transformación de la red o técnicas estructurales. [7]. Sin embargo, las técnicas anteriores sólo pueden emplearse a algunas subclases de redes, además de que es factible que se presente el fenómeno conocido como explosión de estados. Conociendo estas limitantes y para obtener una mejor aproximación de la dinámica de los sistemas continuos, en 1987 David y Alla introdujeron el concepto de redes de Petri continuas [5].

El fundamento de las redes de Petri continuas se puede observar en la Fig. 2, y puede ser revisado en [8]. El espacio de estados de la red tradicional consiste sólo en tres estados discretos. Los dos *tokens* iniciales en el lugar P_1 pueden viajar por la red, cuando se cumplan las condiciones de disparo establecidas en las transiciones de la red de Petri. El modelo representado en la parte inferior de la figura, muestra una extensión utilizando lugares y transiciones continuas. En este caso, los *tokens* se dividen en una cantidad real de fragmentos, los cuales reciben el nombre de *marcas*. Las transiciones continuas, al ser disparadas, mueven estas *marcas* para cambiar el estado de la red. El espacio de estados se convierte en un espacio de dimensión infinita, permitiendo el modelado de eventos continuos.

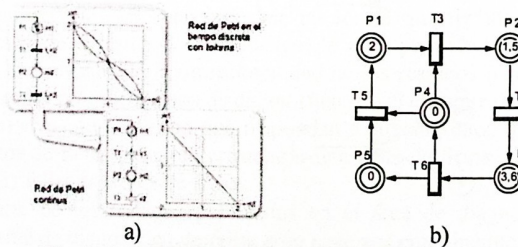


Fig. 2. Red de Petri discreta y red de Petri continua

Las redes de Petri continuas son un modelo en el cual las marcas en los lugares son representadas por números reales, esta consideración, permite un manejo de un número grande de marcas, relativamente más sencillo, comparado con el que se presenta en las redes de Petri discretas. Tomando como ejemplo la Fig. 2 b), su estado inicial es (2, 1.5, 3.6, 0, 0). En el caso de las redes continuas, no es usual que los arcos tengan peso, el flujo de las marcas esta determinado, generalmente, por la función de peso definida en las transiciones. En una Red de Petri continua, el grado de activación de una transición T_j para una marca m , denotado por q o $q(T_j, m)$, es un número real q tal que:

$$q = \min_{i \in P_i \bullet T_j} \left(\frac{m(P_i)}{\text{Pre}(P_i, T_j)} \right) \quad (1)$$

Una transición T_j estará activada si, para cualquier lugar P_i en oT_j , $M(P_i) > 0$. Dicho de otra forma, una transición T_j , está activada, si y sólo si, $M(P_i)/\text{Pre}(P_i, T_j) > 0$, para cualquier P_i . En la Fig. 2 b, las transiciones T_1 , T_2 , T_3 y T_5 , están activas. La transición T_3 está 2-activada, dado que $m_3/\text{Pre}(P_3, T_3) = 2$. Cuando una transición es q -activada es disparada, la cantidad de disparo es r , donde r es un número real, $r \leq q$. La cantidad de *tokens* que se toman del lugar anterior para llevarlos al siguiente, esta definida por la matriz de incidencia.

4 Redes de Petri Híbridas

El fundamento de las redes de Petri híbridas se resume en [8]: "si se puede describir la dinámica continua de un sistema con redes de Petri continuas, y si se pueden combinar los modelos obtenidos con el mundo discreto de las redes de Petri discretas, se puede modelar el complejo comportamiento híbrido de los sistemas con sólo una representación gráfica, en este caso, las redes de Petri híbridas". Los primeros estudios y el desarrollo de este tipo de redes se llevaron a cabo por René David, Hassane Alla y J. Le Baile en 1991 [9]

Formalmente, una *RdPH no marcada* es un par $H^* = \langle Q, h \rangle$, que cumple las siguientes dos condiciones [9]:

1. Q es una red de Petri no marcada, $Q = \langle P, T, \text{Pre}, \text{Post} \rangle$, donde $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ es un conjunto finito, no vacío, de lugares. $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ es un conjunto finito, no vacío, de transiciones. $P \cap T = \emptyset$, los conjuntos P y T son disjuntos. $\text{Pre} : P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ es la aplicación de la entrada de incidencia. $\text{Post} : P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ es la aplicación de la salida de incidencia. $h : P \cup T \rightarrow \{D, C\}$, es la función híbrida, indicada para cada nodo, ya sea continuo o discreto.
2. Pre y Post son funciones con el siguiente criterio: si P_i y T_j son lugares y transiciones tales que $h(P_i) = D$ y $h(T_j) = C$, entonces $\text{Pre}(P_i, T_j) = \text{Post}(P_i, T_j)$, debe verificarse.

Al igual que en las redes de Petri ordinarias, las redes híbridas son grafos bipartitas orientados. Los lugares son representados por círculos. Los lugares y las transiciones son unidos por medio de arcos orientados. El valor de la función de entrada *Pre* está asociado con cada arco que une un lugar con una transición; el valor de la función de salida *Post* está asociado con cada arco que une una transición con un lugar.

Una *RdPH marcada* es un par $H = \langle H^*, M_0 \rangle$, donde H^* es una red de Petri híbrida no marcada y M_0 es el vector de marcas inicial. Las marcas iniciales para los lugares discretos deben ser números enteros positivos o cero, y las marcas iniciales para los lugares continuos deben ser números reales o cero.

Como una extensión a las ideas presentadas en [9] y [10], en [11] se propone el concepto de redes híbridas dinámicas, las cuales son una extensión de las redes de Petri híbridas. Con las adecuaciones propuestas en [11], es posible modelar todas las partes dependientes del sistema con un solo lenguaje descriptivo. En una RdPH, los lugares discretos representan entidades que pueden ser numeradas y los lugares continuos representan entidades que no pueden ser numeradas. Un número real se asocia a cada lugar continuo. Las transiciones discretas disparan después de un retardo de tiempo dt . Las transiciones continuas se disparan continuamente a una velocidad $v(t)$.

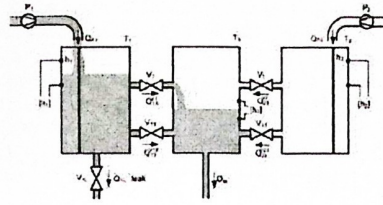
Para el modelado con redes híbridas dinámicas, además de los lugares y transiciones discretos y continuos, se incluyen 2 nuevos tipos de arcos, un arco inhibidor y un arco de prueba, Fig. 3.

TIPO DE ARCO	SÍMBOLO	PROPIEDADES
a) arco normal		Activan transiciones consumiendo recursos
b) arco inhibidor		Inhiben transiciones y consumen recursos
c) arco de prueba		Activan transiciones sin consumir recursos

Fig. 3. Tipos de arcos en las redes híbridas dinámicas

5 Descripción del sistema COSY

El caso de estudio es un sistema de tres tanques acoplados, conocido como COSY [12]. El sistema consiste de tres tanques acoplados, el cual se muestra en la Fig. 4. Estos tanques se interconectan mediante tuberías y el flujo que circula a través de ellas es controlado por un conjunto de válvulas. El líquido es vaciado en los tanques de la izquierda y de la derecha utilizando dos bombas, P1 y P2. Las mediciones disponibles son: el nivel continuo de agua h_i de los tanques T_1 y T_2 , y los niveles discretos *bajo*, *medio* y *alto* en el tanque T_3 .



Para todos los casos:

$$Q_{13}^{V_1} = a_z \cdot S \cdot \text{sgn}(h_1 - h_3) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot |h_1 - h_3|}$$

$$Q_N = a_z \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_3}$$

$$Q_{Leak}^{V_{IL}} = a_z \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_1} \cdot \text{Pos}(V_{IL})$$

Dependiendo de los niveles y aperturas de válvulas:

1. $h_1 < 0.3m; h_3 < 0.3m$ o V_1 cerrada

$$Q_{13}^{V_1} = 0$$

2. $h_1 < 0.3m; h_3 \geq 0.3m$ y V_1 abierta

$$Q_{13}^{V_1} = a_z \cdot S \cdot \text{sgn}(0.3 - h_3) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot |0.3 - h_3|}$$

3. $h_1 \geq 0.3m; h_3 < 0.3m$ y V_1 abierta

$$Q_{13}^{V_1} = a_z \cdot S \cdot \text{sgn}(h_1 - 0.3) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot |h_1 - 0.3|}$$

4. $h_1 \geq 0.3m; h_3 \geq 0.3m$ y V_1 abierta

$$Q_{13}^{V_1} = a_z \cdot S \cdot \text{sgn}(h_1 - h_3) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot |h_1 - h_3|}$$

Fig. 4. Esquema del sistema COSY y las ecuaciones que rigen su comportamiento cuando el tanque 2 está deshabilitado.

El objetivo principal de los tanques es proporcionar un flujo continuo Q_N a la salida del tanque T_3 . El nivel de este tanque debe ser mantenido en el nivel *medio*. El tanque T_1 es llenado mediante la bomba P_1 hasta un nivel nominal de $h_1^{nom} = 50$ cm. El flujo de agua entre los tanques puede ser controlado mediante las válvulas todo-nada V_1 , V_{13} , V_2 y V_{23} . Para el caso nominal, las válvulas V_{13} , V_2 y V_{23} están cerradas y no operan. La válvula V_1 se utiliza para controlar el nivel del tanque T_3 . La válvula V_{IL} , que puede utilizarse para simular una fuga en el tanque 1, permanece cerrada. La interconexión de tuberías en los tanques se localiza en el fondo y a una altura de 30 cm. Los términos Q_{P1} y Q_{P2} son los flujos de salida de las bombas P_1 y P_2 respectivamente. La altura máxima de cada tanque es de 60 cm. Dependiendo de la posición de las válvulas y el nivel de agua en cada uno de los tanques, es posible que el sistema tenga diferentes comportamientos. En este artículo se expone el caso en donde el tanque T2 no está en funcionamiento, sin embargo se incluye en el modelo. Bajo las siguientes condiciones: V_1 y V_{13} activa, V_{23} y V_2 cerradas y la bomba P_2 apagada, se tienen los comportamientos descritos en la Fig 4.

6 Diagnóstico de fallas del sistema COSY

En la Fig. 5 se presenta un modelo con redes híbridas de objetos del sistema de tanques acoplados. En la parte superior se modela la parte continua del sistema. Se consideran como conocidos (medidos) los tres niveles de los tanques, los cuales representan los tres lugares de la RdPH. Las entradas a la red son los flujos proporcionados por las bombas P_1

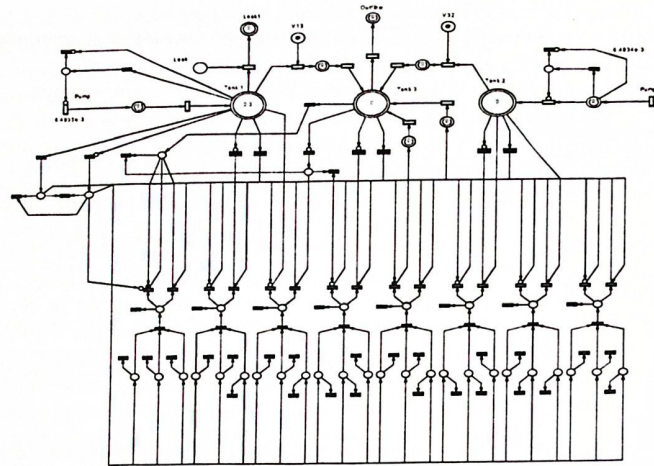


Fig. 5. Red de Petri Híbrida del sistema COSY

y P2. En la parte inferior se encuentra la RdP discreta, en donde se tiene las ocho posibles formas de operación del sistema. La interfase entre la parte continua y la parte discreta es llevada a cabo mediante los arcos inhibidores. En las siguientes subsecciones se presentan algunas simulaciones, tanto en estado de buen comportamiento como bajo condiciones de falla.

6.1 Operación nominal del sistema

En la Fig 6 se muestran los resultados de una prueba de validación del modelo obtenido con RdPH para el caso de buen comportamiento.

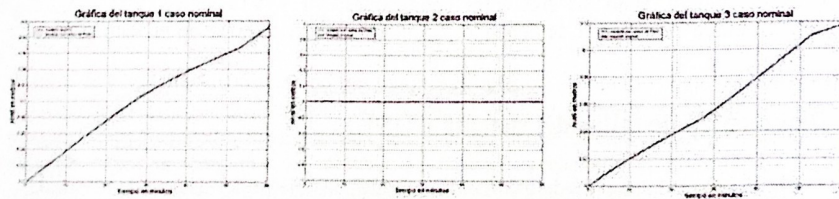


Fig. 6. Gráfica de los niveles en los tanques 1, 2 y 3 en operación normal, modelo y proceso

Pueden observarse los cambios en los niveles de los tanques 1 y 3, y ligeros cambios en el comportamiento al momento que el nivel del tanque 1 sobrepasa los 30 cm. Una vez que se obtiene el modelo de buen comportamiento con redes de Petri, se utilizan relaciones de redundancia analítica para realizar la etapa de diagnóstico de fallas, se consideran los niveles de los tanques para obtener los residuos que se utilizarán para fines de diagnóstico. En esta sección se consideran dos escenarios de falla: a) Bloqueo de la bomba P_1 , y b) Fuga en el tanque T_2 . El estado de las válvulas que se utilizó para realizar el estudio fue: V_{13} , V_{23} , V_{1L} cerradas, las demás válvulas se encuentran totalmente abiertas.

6.2 Operación del sistema bajo condiciones de falla

El primer tipo de fallas simulada es el bloqueo de la bomba P_1 , esta sucede al minuto 30. En la Fig. 7 se muestran los residuos obtenidos por el sistema de diagnóstico, se observa que los tres residuos generados son sensibles a la falla, por lo que tenemos una firma de falla $f_1 = [1 \ 1 \ 1]$.

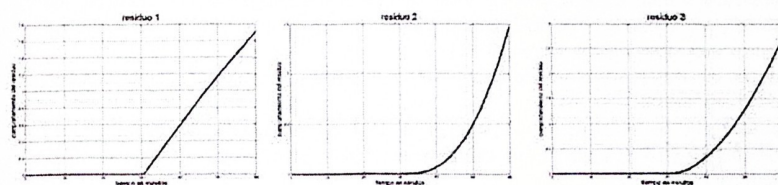


Fig. 7. Residuos para la falla bloqueo de la válvula P_1 .

Al igual que en el caso anterior, se simuló un bloqueo de la válvula V_{12} al minuto 30. Se aprecia en la Fig. 8 que el residuo 2 es insensible a esta falla, esto es debido a que este residuo se genera de acuerdo al nivel del tanque T_2 , el cual es llenado mediante la bomba P_2 , por lo que su nivel permanecerá en un valor muy cercano al valor en condiciones normales de operación. La firma para esta falla es $f_2 = [1 \ 0 \ 1]$.

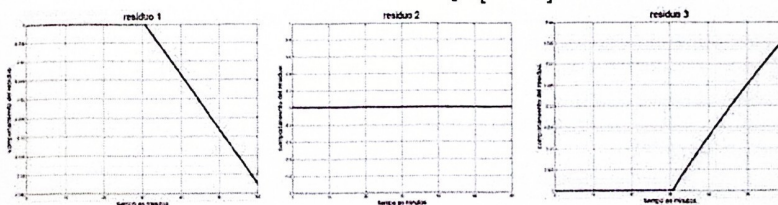


Fig. 8. Residuos obtenidos en la falla bloqueo de la válvula V_{13}

7 Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que el sistema de diagnóstico desarrollado permite la detección e identificación de las fallas consideradas en el diseño. En apariencia, el modelado gráfico por medio de RDP es muy similar a los modelos estructurales, lo cual pudiera permitir el paso a un lenguaje de simulación como las RdP. La inclusión tanto de dinámicas continuas como discretas en una RdPH permite abarcar una variedad mas grande de sistemas dinámicos, comunes en los procesos industriales.

Referencias

1. Pettersson, S., Lennartson, B.: Hybrid modelling focused on hybrid Petri nets. 2nd European workshop on real-time and hybrid systems, Grenoble, France, (1995) pp. 303-309
2. Venkatasubramanian, V.: "Process Fault Detection and Diagnosis: Past, Present and Future". 4th Workshop on On-Line Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industries, Seoul, Korea (2001)
3. Gertler, J.: Fault detection and Diagnosis in Engineering Systems. Marcel Dekker, New York: (1998)
4. Narasimhan, S., Biswas, G.: An Approach to Model-Based Diagnosis of Hybrid Systems. Hybrid Systems: Computation and Control (HSCC '02). Springer Verlag., Stanford, CA. (2002)
5. David, R., Alla, H.: Continuous Petri Nets. 8th European Workshop on Application and Theory of Petri Nets, Zaragoza, España (1987) 275-294
6. H. Alla: "Les réseaux de Petri: un outil particulièrement adapté à la modélisation des systèmes hybrides, ". Proc. of 2rd Int. Conf. on Automation of Mixed Processes, Brussels, Belgium (1994)
7. Silva, M., Recalde, L.: On fluidification of Petri Nets: from discrete to hybrid and continuous models. Annual Reviews in Control **28** (2004) 253-266
8. Drath, R.: Description of Hybrid Systems by Modified Petri Nets. Lecture Notes in Control and Information Science (LNCIS) **279** (2002) 1-15
9. Le Bail, J., Alla, H., David, R.: Hybrid Petri Nets. Proceedings of the ECC 91, Grenoble, Francia (1991)
10. David, R., Alla, H.: Petri nets and grafcet: tools for modeling discrete event systems. Prentice Hall (1992)
11. Drath, R.: Modeling Hybrid Systems Based on Modified Petri Nets. TU Ilmenau, Ilmenau (1999)
12. Astrom, K.J., Albertos, P., Blanke, M., Isidori, A., Schaufelberger, W.: Three-Tank Control Reconfiguration. Control of Complex Systems. Springer-Verlag, London (2001)