

# Aplicación a un proceso químico de la metodología de anidamiento latente para el diagnóstico de fallos

Recibido: marzo de 2011  
Arbitrado: noviembre de 2011

Leonardo Rodríguez Urrego\*, Emilio García Moreno\*\*,  
Francisco Morant Anglada\*\*\*

## RESUMEN / ABSTRACT

Este artículo presenta un nuevo enfoque para la detección y diagnóstico de fallos (SDDF) en sistemas híbridos denominado de Anidamiento Latente de Fallos. La misma está basada en el uso de Redes de Petri Coloreadas (RdPCs) que aportan su capacidad intrínseca de síntesis y de implementación en modelos realizables. Esta técnica se contrapone al clásico fenómeno de explosión combinatorial que se produce mediante la utilización de metodologías basadas en Máquinas de Estados Finitos (MEFs).

### Palabras clave

Detección y Diagnóstico de Fallos, Redes de Petri, Sistemas Híbridos.

This article presents a new approach for the Fault Detection and Diagnosis in Hybrid Systems (FDDHS) known as Latent Nestling Fault. It is based on the use of Coloured Petri Nets (CPNs) to bring their inherent capacity for synthesis and implementation models achievable. This technique is in contrast to the classic phenomenon of combinatorial explosion that occurs through the use of methodologies based on Finite State Machines (FSMs).

### Keywords

Fault detection and diagnosis, Petri Nets, Hybrid Systems

## I. INTRODUCCIÓN

El diagnóstico y detección de fallos es una temática en la que se ha trabajado intensamente en los últimos 30 años y que cuenta hoy con un número importante de resultados teóricos y prácticos. Estos resultados se han expuesto y publicado en numerosos congresos y revistas, siendo algunos ejemplos 1, 2, 3 lo que demuestra que esta área ha recibido considerable atención, tanto del mundo industrial como del académico, por el gran impacto económico y de seguridad que trae consigo.

\* Ingeniero Mecatrónico, MSc Investigador, Grupo de Supervisión y Diagnóstico de Fallos, Instituto de Automática e Informática Industrial, Camino de Vera S/N 46022, Tel: (+34) 96 387 7000 ext 88448, leorodur@doctor.upv.es. Es candidato a Doctor de la UPV, y hace parte del Grupo de Investigación de Diagnóstico de Fallos del ai2, trabajando en el área de diagnóstico de fallos, seguimiento del estado, energías alternativas y Redes de Petri.

\*\* Ingeniero Electrónico, PhD Titular de Universidad, Grupo de Supervisión y Diagnóstico de Fallos, Instituto de Automática e Informática Industrial, Camino de Vera S/N 46022, Tel: (+34) 96 387 7000 ext 5767, egarciam@isa.upv.es. Profesor Universitario, el Director del Grupo de Investigación de Diagnóstico de Fallos del ai2, trabajando en el área de diagnóstico de fallos, seguimiento del estado, energías alternativas y Redes de Petri.

\*\*\* Ingeniero Industrial, PhD Catedrático de Universidad, Grupo de Supervisión y Diagnóstico de Fallos, Instituto de Automática e Informática Industrial, Camino de Vera S/N 46022, Tel: (+34) 96 387 7000 ext 5760, fmorant@isa.upv.es. Director del Grupo de Investigación de Diagnóstico de Fallos del ai2, trabajando en el área de diagnóstico de fallos, seguimiento del estado, energías alternativas y Redes de Petri.

En la última década se ha profundizado entre la comunidad investigadora de ingeniería de sistemas, el estudio del diagnóstico de fallos de sistemas de control automático, basados en modelos de sistemas dinámicos de eventos discretos (SDEDs) y los sistemas híbridos (SH).

La mayor parte de estos estudios se han centrado en el uso de las MEFs para el desarrollo del análisis y diagnóstico de los sistemas. No obstante, pese al notable interés de los resultados alcanzados, los modelos resultantes han tenido su principal debilidad en el fenómeno de explosión combinacional con el resultado de la obtención de modelos intratables en su aplicación a sistemas complejos.

Herramientas como las Redes de Petri (RdP), han probado su eficacia en el modelado de sistemas de eventos discretos y más recientemente su extensión al modelado de sistemas híbridos<sup>4</sup>. El formalismo aportado en conceptos tales como sincronismo, concurrencia, exclusión mutua, y compartición de recursos son de especial interés y han aportado una mayor capacidad y potencia de representación en los modelos resultantes que los realizados mediante MEFs. Adicionalmente las RdP, aportan la capacidad de aplicar técnicas de fusión de lugares que permite reducir el tamaño de los modelos resultantes.

En una RdP ordinaria, no se pueden hacer distinciones respecto de las diferentes marcas existentes en un mismo modelo. Sin embargo en las denominadas RdPCs, la información es contenida mediante el par <lugar; colordemarca>, y dicho color permite la representación de información correspondiente a subprocesos distintos. Esta capacidad de síntesis en la representación de modelos, se acentúa en las RdPCs, que aportan la posibilidad de aplicar

técnicas de fusión para poder representar distintos subprocesos concurrentes que coexisten en la misma estructura gráfica de la RdP. La capacidad de introducir en los modelados identificadores coloreados, permite disminuir drásticamente el tamaño final de los modelos resultantes. Esta capacidad de síntesis, aporta una clara ventaja comparativamente con otras técnicas basadas en MEFs y permite su aplicación a sistemas complejos.

En este artículo se propone la aplicación de un método que se ha denominado Anidamiento Latente de fallos y que se basa en las ventajas que aportan las RdPCs para la detección y el diagnóstico de fallos. El método se aplica a un sistema híbrido que son sistemas complejos al combinar variables de estados discretas y continuas.

En la sección 2 se presentan las características generales de los sistemas híbridos. En la sección 3 se presentan las características generales de las RdPCs y la metodología del diseño del diagnosticador de fallos mediante el Anidamiento Latente de Fallos. En la sección 4 se aborda un ejemplo de diseño de un diagnosticador para un sistema híbrido y finalmente se presentan las conclusiones.

## II. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SISTEMAS HÍBRIDOS

Un sistema híbrido es un sistema dinámico con variables de estado que toman valores continuos y discretos con lo que se logra una representación mucho más general para los sistemas dinámicos a partir de determinado nivel de complejidad.

La teoría de sistemas híbridos ha desarrollado muchos modelos y técnicas de análisis y síntesis, encontrando aplicación en numerosas áreas entre las que se encuentran el manejo del tráfico aéreo<sup>5</sup> y el control de automóviles<sup>6</sup> por solo citar dos de ellas.

Entre las ventajas que tiene representar los sistemas mediante modelos híbridos se pueden enunciar:

- Reducción del grado de complejidad en la representación del comportamiento dinámico de los mismos,

gracias a la partición que puede hacerse del modelo global en diferentes niveles de abstracción.

- Se evita el trabajo con un conjunto de ecuaciones no lineales, debido a la posibilidad de escoger conjuntos de ecuaciones más simples (lineales) y conmutar entre modelos más simples.

Lo anterior es fundamental en diagnóstico de fallos para lograr el objetivo de que la generación de los diferentes residuos sea lo menos sensible posible a los errores del modelado y a las perturbaciones externas que afectan al sistema y por lo tanto lograr una buena robustez en el SDDF.

El autómata híbrido se ha convertido en un modelo estándar para sistemas dinámicos híbridos y es en esencia un autómata de estados finitos aumentado con un vector de variables de estado continuas y una ecuación de estados continuos para cada estado discreto<sup>7</sup>.

Un autómata híbrido se define como<sup>8</sup>. Para los autómatas híbridos que pueden representar sistemas cuyos comportamientos presenten restricciones de tiempo se define el autómata cronometrado<sup>9</sup>. En ambos casos la representación se hace a través de MEFs.

Sin embargo, para la detección y el diagnóstico de fallos esta representación adolece de las dificultades mencionadas anteriormente de la explosión combinatorial.

Para tratar de resolver este problema se ha acudido a al uso de las RdP y las RdPC<sup>10, 11</sup>.

### III. REDES DE PETRI COLOREADAS PARA DIAGNÓSTICO DE FALLOS

Las redes de Petri, han sido profusamente utilizadas en aplicaciones para el diagnóstico de fallos con una gran variedad de enfoques. Dos de ellos son<sup>12, 13</sup>. Otros enfoques han utilizado las RdPC como es el caso de <sup>14, 15</sup>. Para utilizar de forma provechosa este tipo de herramienta de modelado en sistemas híbridos, en el presente trabajo se propone el uso de las RdP coloreadas para aplicaciones de diagnóstico de fallos (RdPCDF) en sistemas automáticos de control de complejidad creciente. La idea subyacente

consiste en representar mediante cada uno de las diferentes identificadores (marcas coloreadas), los diversos tipos de fallos a diagnosticar en el sistema híbrido. Una RdP coloreada para el diagnóstico de fallos (RdPCDF) 15,16 es una 9-tupla.

$$D = (P, T, Pre, Post, M0, C, PLNf, Tf, PV f)(1)$$

donde P es un conjunto de lugares, T es un conjunto de transiciones, Pre y Post son las funciones de entrada y de salida, M0 es el marcado inicial, C es el conjunto de marcas coloreadas, dividido en dos subconjuntos.

$$C = N \cup f \quad (2)$$

donde N es el subconjunto de marcas coloreadas que representan el comportamiento dinámico normal de las distintas subredes,  $\langle \bullet q \rangle$ , donde dicha marca es perteneciente a la red q.  $f = f1, f2, \dots, fn$ , es el subconjunto de marcas coloreadas representativas del conjunto de fallos a diagnosticar. PLNf es el subconjunto de lugares de anidamiento latente de fallos. PV f, es el subconjunto de lugares que verifican el suceso de fallos de tipo  $f_i, f_k, \dots, f_{i,k}$ . Estos últimos lugares, son del tipo P temporizados, representados por el par  $\langle R, Tempo \rangle$ , tal que R es una RdP marcada; Tempo  $(P_i) = d_i =$  temporización asociada con el lugar PVf. En el caso general  $d_i$  será una variable temporal, susceptible de ser utilizada para el cálculo de parámetros cuantitativos relacionados con el suceso/recuperación de fallos de carácter intermitente o bien permanente. Tf, es el subconjunto de transiciones, que admiten funciones coloreadas que forman junto con PLNf y PVf trayectorias o secuencias de fallo. La capacidad de poder asociar distintas receptividades "coloreadas" en las mismas transiciones, nos permite simplificar la legibilidad del modelo final.

## A. Modelado inicial

Inicialmente se elabora un modelo de RdP de comportamiento dinámico normal del sistema, aplicando las mismas técnicas de modelado que las utilizadas en el uso de las RdP interpretadas. Para sistemas complejos se puede desde un inicio, aplicar la capacidad de fusión estructural de las RdPC, haciendo que una misma estructura básica común sea compartida por varias subredes correspondientes a los distintos subprocesos que en un modelo global, mantienen entre sí distintos tipos de cooperación. Esto exige un compromiso entre la reducción del tamaño del modelo, y su pérdida de legibilidad. Algunos sistemas ya analizados utilizando esta técnica se pueden ver en <sup>17,18, 19</sup>.

## B. Determinación del conjunto de fallos

En segundo lugar, se determina el conjunto de fallos a diagnosticar en el sistema y se realiza una asignación de los mismos respecto de las marcas coloreadas del tipo  $f = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ . Cada uno de estos elementos del conjunto de fallos  $f$ , representa un fallo asociado a un determinado dispositivo de los que conforman el sistema. Por tanto, caso de que el fallo se verifique, se garantiza su aislamiento por estar asociado a un tipo de fallo específico, de un dispositivo concreto.

El suceso de fallos individuales  $f_i$  o simultáneos (no necesariamente correlacionados) del tipo  $f_{ik}$ , vendrá determinado por las condiciones dinámicas establecidas en cada marcado y el conjunto de lecturas de señales normalmente no esperadas obtenidas de los sensores.

## C. Lugares de anidamiento de fallo PLNf

Seguidamente, teniendo en cuenta el conocimiento heurístico del sistema, se realiza un procedimiento de anidamiento de las marcas representativas de fallo que pudieran

tener su ubicación en dicho lugar. Este procedimiento consiste en la deposición en cada lugar  $p$ , de un subconjunto de indicadores de marca "coloreados", representativos de cada tipo de fallo. Estos indicadores son susceptibles de dispararse a partir de dicho lugar mediante la activación de una secuencia de eventos asociada a una lectura anormal de valores no esperados de los sensores del sistema. Con objeto de aportar adicionalmente información al supervisor, las marcas representativas del fallo se representarán en modo texto indicando el tipo de fallo  $f_i$ . Sea  $PLNf_k(f_{qj})$  el lugar  $k$ ésimo de anidamiento del fallo tipo  $i$ , perteneciente a la subred  $q$ . Se les supone lugares de inicio de una secuencia de fallo, en los cuales, la marca representativa del fallo  $f_i$  permanecerá latente hasta el momento de la activación de una lectura de valores no esperados de los sensores.

Las marcas con representación tradicional (neutro circular)  $\langle \bullet q \rangle$ , las reservaremos para representar la dinámica de comportamiento normal de los distintos subprocesos concurrentes que conforman las distintas subredes. La deposición de las marcas asociadas a fallos en cada uno de los lugares, debe realizarse mediante el análisis de las condiciones de comportamiento dinámico del sistema, esto es, estableciendo una relación precisa entre las marcas de fallo a depositar y el marcado de comportamiento normal de la RdP. El subconjunto de fallos a depositar en cada uno de los lugares, depende del tipo de lecturas anómalas disponibles y diferenciables que se puedan obtener desde dichos dispositivos sensores.

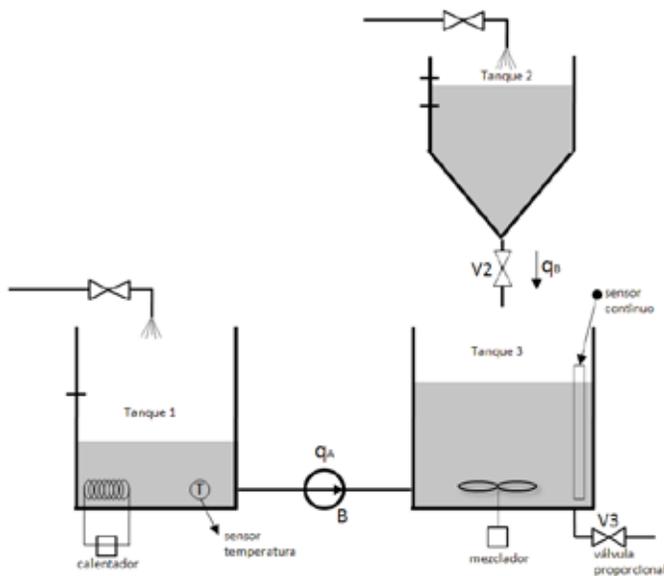


Figura 1. Procesos de mezclado químico

## IV. EJEMPLO DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE FALLOS EN UN SISTEMA HÍBRIDO

### A. Descripción del sistema híbrido y modelado utilizando RdPC

El proceso en consideración para el modelo y diagnóstico es un sistema de tanques para el mezclado de dos sustancias químicas, este proceso es descrito en<sup>20</sup>, donde se consideran tres tanques según la figura 1. El sistema está compuesto por unas entidades continuas y otras discretas así:

Entidades continuas:

- El flujo de  $q_A$  del tanque 1
- El flujo de  $q_B$  del tanque 2
- El volumen del tanque 3
- Resistencia calefactora del tanque 1

Entidades discretas

- Estado de la bomba tanque 1 (on,off)
- Estado de la válvula de salida del tanque 2 (on,off)
- Estado de salida de la válvula del tanque 3 (on,off)
- Agitador (on,off)

Para definir el volumen total  $V(t)$  del tanque 3 en modo de llenado según los flujos de entrada por parte del tanque 1 y tanque 2 tenemos que  $V(t) = V_A(t) + V_B(t)$ , donde los volúmenes parciales de estos tanque son.  $V_A(t) = q_A(t)$  y  $V_B(t) = q_B(t)$ , la reducción del volumen en el tanque 3 se define como  $V = -q_C$ , donde  $-q_C$  es el flujo de descarga de este tanque. Además de esto hay unas especificaciones del sistema híbrido que se deben cumplir así:

Para la condición de frontera en un tiempo final  $t_f$ ,  $V_A(t_f) = V_{Af}$  y  $V_B(t_f) = V_{Bf}$ . Asumiendo que el flujo de  $q_A = 1.5$  y el flujo de  $q_B = 1$  y que el proceso es de tipo batch, se diseña el sistema en cinco estados, el primer estado verifica la temperatura deseada y luego activa tanto la bomba B como la válvula V2 para la mezcla de los dos productos y así cumplir la condición  $V_B(t) \geq k_2 * V_A(t)$ .

En el estado 2 se apaga la bomba por lo que solo queda presente el flujo  $q_B$ , esto es para cumplir que  $V_B(t) \leq k_1 * V_A(t)$  o cuando  $V_A(t_f) \geq V_{Af}$ . En el estado 3 se cierra la válvula V2 de salida del tanque 2 por lo que solo el flujo  $q_A$  está presente, para cumplir con la condición  $V_B(t_f) \geq V_{Bf}$ . En el estado 4 se enciende el agitador y después de un tiempo  $t$ , se pasa al estado 5 para el vaciado o descarga de la mezcla por lo que el flujo  $q_C$  se hace presente. El proceso comienza al activar la resistencia y esperar la temperatura  $T_A$  máxima de la sustancia 1, esta temperatura se debe mantener entre 18 y 22 C°.

En la figura 2 se observa el modelo de RdPC utilizando el software CPNTools21 para la simulación y comprobación del funcionamiento correcto del proceso. Las declaraciones correspondientes para la simulación en el software son:

```
colset normal = with C1|C|V2|B|N;
colset e_temp = with T18|T22;
colset e_vol = with
cond1|cond2|cond3|cond4|cond5;
colset entradas = product e_temp * e_vol;
colset un = union n1 : normal + e : entradas;
var x : entradastemp;
var x1 : entradasvol;
var na, nb : normal;
```

Siendo N la marca de comportamiento normal  $\langle \bullet n \rangle$  y  $\langle \bullet C \rangle$ ,  $\langle \bullet V2 \rangle$ ,  $\langle \bullet B \rangle$  las marcas que referencian el comportamiento de activo-desactivo del calentador, válvula del tanque 2 y bomba respectivamente, así como:

```
cond1 = (V_B(t) ≤ k1 * V_A(t)) ∨ (V_A(t_f) ≥ V_Af)
cond2 = V_B(t_f) ≥ V_Bf
cond3 = V_B(t) ≥ k2 * V_A(t)
cond4 = (V_A(t_f) = V_Af) ∧ (V_B(t_f) = V_Bf)
```

En la figura 2 se muestra la potencia y simplicidad de realizar el modelo utilizando Redes de Petri Coloreadas, donde los estados 2 y 3 antes mencionados se fusionan en un único lugar P2. También se observa la concurrencia de estados para los cuales la temperatura activa y desactiva la resistencia calefactora así como la proporción

de volúmenes de acuerdo a la mezcla, esto se hace en los 2 primeros lugares P1, P2. En otro modo se observa el marcado M2 en el lugar P2 el cual se encuentra con la marca de comportamiento normal  $\langle \bullet V2 \rangle$  indicando que la válvula del tanque 2 está abierta en ese momento, tres transiciones se encuentran sensibilizadas por este lugar P2, cada una llevando un marcado según el disparo de esta transición al lugar P1, P3 o al mismo P2.

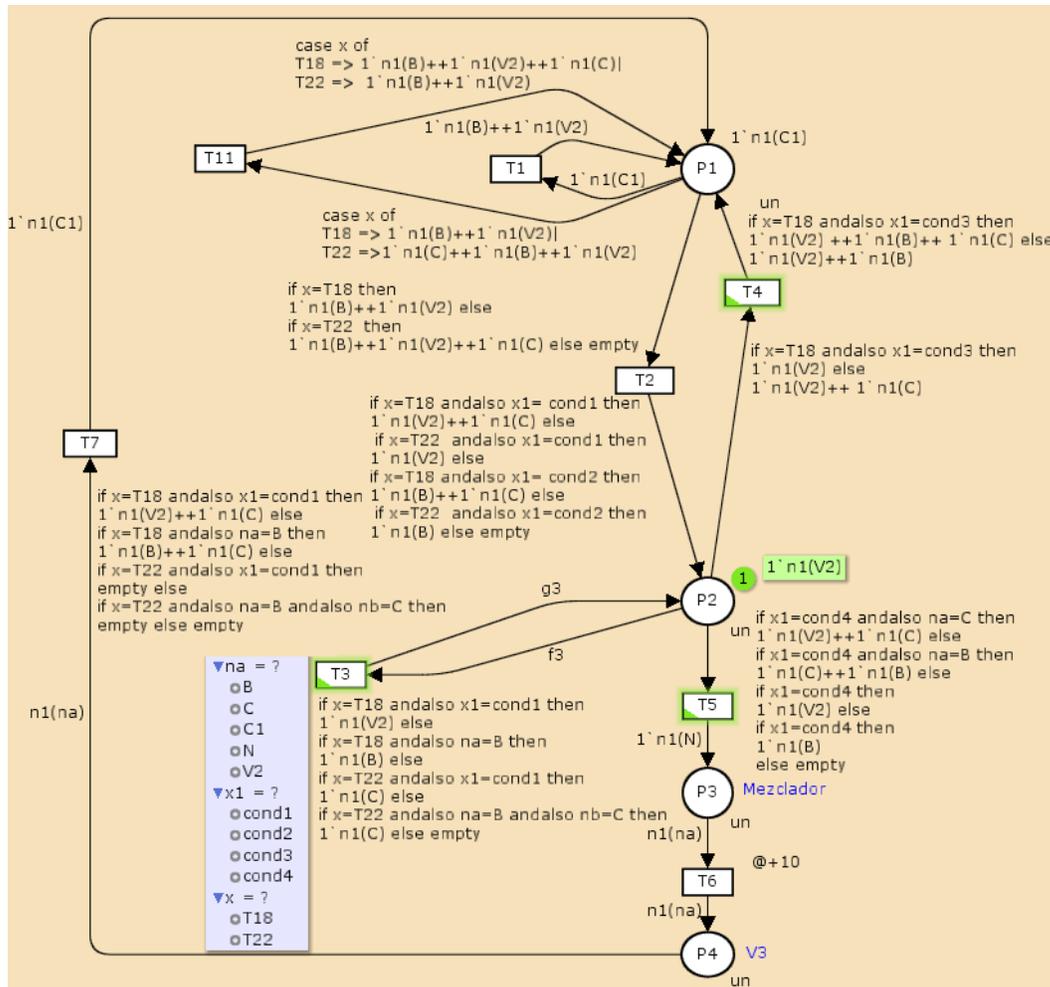


Figura 2. Modelo del sistema utilizando RdPC

A continuación se formulará un ejemplo solo para la transición T3 donde las funciones de los arcos f3 y g3 denotan la relación de color asociada con la transición para así obtener las siguientes combinaciones lineales en los arcos según el marcado de P2:

Funciones de relación:

$$\begin{aligned}
 [f3(\langle \bullet V2 \rangle, \langle \text{cond1} \rangle, \langle \text{TA}=18 \rangle)] &= \text{Id} \\
 [g3(\langle \bullet V2 \rangle, \langle \text{cond1} \rangle, \langle \text{TA}=18 \rangle)] &= \langle \bullet C \rangle + \langle \bullet V2 \rangle \\
 [f3(\langle \bullet V2 \rangle, \langle \text{cond2} \rangle, \langle \text{TA}=22 \rangle)] &= \langle \bullet C \rangle \\
 [g3(\langle \bullet V2 \rangle, \langle \text{cond2} \rangle, \langle \text{TA}=22 \rangle)] &= \text{empty} \\
 [f3(\langle \bullet B \rangle, \langle \text{TA}=18 \rangle)] &= \text{empty} \\
 [g3(\langle \bullet B \rangle, \langle \text{TA}=18 \rangle)] &= \langle \bullet C \rangle \\
 [f3(\langle \bullet C \rangle, \langle \bullet B \rangle, \langle \text{TA}=22 \rangle)] &= \langle \bullet C \rangle
 \end{aligned}$$

$[g3(<\bullet C>, <\bullet B>, <TA=22>)] = \text{empty}$

Funciones de correspondencia de color Pre y Post:

Pre (P2,T3/<\bullet V2>, <cond1 >, <TA=18>)  
 = f3 (<\bullet V2>, <cond1 >, <TA=18>)  
 Post (P2,T3/<\bullet V2>, <cond1 >, <TA=18>)  
 = g3 (<\bullet V2>, <cond1 >, <TA= 18 >)  
 Pre (P2,T3/<\bullet V2>, <cond2>, <TA=22>)  
 = f3 (<\bullet V2>, <cond2>, <TA=22>)  
 Post (P2,T3/<\bullet V2>, <cond2>, <TA=22>)  
 = g3 (<\bullet V2>, <cond2>, <TA=22>)  
 Pre (P2,T3/<\bullet B>, <TA=18>) = f3 (<\bullet B>, <TA=18>)  
 Post (P2,T3/<\bullet B>, <TA=18>) = g3 (<\bullet B>, <TA=18>)  
 Pre (P2,T3/<\bullet C>, <\bullet B>, <TA=22>)  
 = f3 (<\bullet C>, <\bullet B>, <TA=22>)  
 Post (P2,T3/<\bullet C>, <\bullet B>, <TA=22>)  
 = g3 (<\bullet C>, <\bullet B>, <TA=22>)

En el caso de la figura 2, siendo que el lugar P2 está marcado con  $M2 = <\bullet V2 >$ , la transición se sensibiliza en T3 solo para  $<\bullet V2 >, <cond1 >$  y en el caso de que se cumpla por el descenso de la temperatura que  $<TA=18 >$ , la transición T3 es disparada pasando a otro estado en el mismo lugar P2, de acuerdo a las funciones de los arcos correspondientes f3 y g3. En este caso el marcado final por este disparo sería:

$M2[T3 > M2' \text{ donde } M2' = <\bullet V2 > + <\bullet C >$

## B. Diseño de diagnosticador con RdPCDF

Para realizar el correcto diseño del sistema de diagnóstico utilizando el análisis previo de RdPC, se procede a obtener el conjunto de fallos del sistema. Para esto se utiliza la labor de un experto humano así como históricos en bases de datos para fallos. De acuerdo al sistema a analizar, los fallos más comunes son:

f1= Fallo bomba bloqueada en parado  
 f2= Fallo bomba en bloqueada en marcha  
 f3= Fallo válvula V2 bloqueada en cerrado  
 f4= Fallo válvula V2 bloqueada en abierto  
 f5= Fallo mezclador bloqueado en parado

f6= Fallo mezclador bloqueado en marcha  
 f7= Fallo válvula V3 bloqueada en cerrado  
 f8= Fallo válvula V3 bloqueada en abierto  
 f9= Fallo sensor de Temperatura TA no funciona  
 f10= Fallo calentador bloqueado en parado  
 f11= Fallo calentador bloqueado en marcha  
 f12= Fallo fuga tanque 3

Los lugares P1...P4 pasan a ser lugares de anidamiento de fallos PLNf1...PLNf4, donde el marcado inicial está compuesto tanto de marcas de comportamiento normal, como de marcas asociadas a fallos, las cuales son asignadas a cada lugar de acuerdo al conocimiento empírico del experto. Según la figura 3 las marcas asociadas al lugar PLNf1 son:

$M(\text{PLNf1}) = <\bullet C1 > + <\bullet N > + <\bullet f1 > + <\bullet f3 > + \dots <\bullet f8 > + <\bullet f9 > + <\bullet f10 > + <\bullet f11 >$

Las trayectorias de verificación de fallos están representadas gráficamente por la transición Tf que pasa únicamente marcas del tipo fallo del lugar PLNf al lugar de verificación de fallos PV f, estas trayectorias de verificación de fallos, así como de recuperación de los mismos se cumplirán de acuerdo a las lecturas esperadas o no por parte de los sensores del sistema.

De acuerdo a la definición para sensorización del sistema según 18, tenemos la siguiente información de señales de medición.

rov1(Mk) = {q,Nq} flujo  
 rov2(Mk) = {High,Med,Low} Temperatura  
 rov3(Mk) = {CK,NCK} Tiempo  
 rov4(Mk) = {Nivel} Nivel  
 rov5(Mk) = {on, off} presencia señal del mezclador

Con la siguiente información de sensorización instalada:

srov11(Mk) = {q1,Nq1} Fluviómetro qA  
 srov12(Mk) = {q2,Nq2} Fluviómetro qB  
 srov13(Mk) = {q3,Nq3} Fluviómetro qC  
 srov21(Mk) = {High1,Med1, Low1} Temperatura setpoint 18  
 srov22(Mk) = {High2,Med2, Low2} Temperatura setpoint 22  
 srov31(Mk) = {CK1,NCK1} Reloj tiempo calentamiento  
 srov32(Mk) = {CK2,NCK2} Reloj tiempo vaciado  
 srov33(Mk) = {CK3,NCK3} Reloj tiempo mezclado  
 srov4(Mk) = {Nivel} Sensor de nivel  
 srov5(Mk) = {on, off} Presencia señal del mezclador

Además de esta información de sensorización, se tienen en cuenta unos parámetros de medida de acuerdo a las especificaciones dinámicas del sistema, para estos parámetros se utiliza la información del sensor de nivel y de los dos flujómetros:

$$\begin{aligned}
 PM1 &= V A(tf) \\
 PM2 &= V B(tf) \\
 PM3 &= V B(t) \leq k1 * V A(t) \\
 PM4 &= V B(t) \geq k2 * V A(t)
 \end{aligned}$$

Obteniendo como resultado las siguientes matrices de fallo:

$$\begin{aligned}
 \{TF_1\} &= \left\{ \begin{array}{l} Med_2, Nq_1 \rightarrow f_1 \\ Med_2, Nq_2 \rightarrow f_3 \\ q_3 \rightarrow f_8 \\ Ck_1, Low_2 \rightarrow f_9, f_{10} \\ Low_1 \rightarrow f_9, f_{10} \\ High_2 \rightarrow f_{11} \end{array} \right\} \\
 \{TR_1\} &= \{NCK_1, High_1, Low_1\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \{TF_2\} &= \left\{ \begin{array}{l} PM_4, Nq_1 \rightarrow f_1 \\ PM_3, q_1 \rightarrow f_2 \\ PM_3, Nq_2 \rightarrow f_3 \\ PM_4, q_2 \rightarrow f_4 \\ q_3 \rightarrow f_8 \\ Ck_1, Low_2 \rightarrow f_9, f_{10} \\ Low_1 \rightarrow f_9, f_{10} \\ High_2 \rightarrow f_{11} \end{array} \right\} \\
 \{TR_2\} &= \left\{ \begin{array}{l} NCK_1, High_1, Low_2, NPM_3, Nq_1 \rightarrow f_2, f_9, f_{10}, f_{11} \\ NCK_1, High_1, Low_2, NPM_4, Nq_2 \rightarrow f_4, f_9, f_{10}, f_{11} \\ NCK_1, High_1, Low_2, NPM_3, q_2 \rightarrow f_3, f_9, f_{10}, f_{11} \\ NCK_1, High_1, Low_2, NPM_4, q_1 \rightarrow f_1, f_9, f_{10}, f_{11} \end{array} \right\} \\
 \{TF_3\} &= \left\{ \begin{array}{l} PM_1, q_1 \rightarrow f_2 \\ PM_2, q_2 \rightarrow f_4 \\ PM_1, PM_2, off \rightarrow f_5 \\ PM_4, q_2 \rightarrow f_4 \\ q_3 \rightarrow f_8 \\ High_2 \rightarrow f_{11} \end{array} \right\} \\
 \{TR_3\} &= \{NQ_1, NQ_2, on\} \\
 \{TF_4\} &= \left\{ \begin{array}{l} PM_1, q_1 \rightarrow f_2 \\ PM_2, q_2 \rightarrow f_4 \\ CK_3, on \rightarrow f_6 \\ CK_3, Nq_3 \rightarrow f_7, f_{12} \\ NCK_2, Nq_3 \rightarrow f_7, f_{12} \\ High_2 \rightarrow f_{11} \end{array} \right\} \\
 \{TR_4\} &= \{q_3, NCK_2\}
 \end{aligned}$$

Realizando el análisis de la figura 3, se observa cada uno de los marcados iniciales para los lugares PLNf, así como las diferentes trayectorias de fallo y recuperación representadas por las matrices correspondientes. En la figura, sólo se muestra la simulación de comportamiento para la anidación de fallos en el lugar PLNf1 debido al tamaño de la figura, donde se puede observar claramente que la transición Tf1 está sensibilizada para cualquier tipo de evento de fallo según la matriz correspondiente en este caso {Tf1}, siendo este el conjunto de valores no

esperados por parte de los sensores que producirían el fallo para el marcado M0, denotado así:  $SROV_{nev}(M0) = \{Tf1\}$  donde se verifican los fallos de tipof1, f3, f8, f9f10, f11 en PV f, según la figura se ha aislado en PVf el fallo f8 donde la notación de esta verificación sería:

$$M(PLNf1(<\bullet n >, <f8>)) \\ [Tf1/SROV_{nev}(M(PLNf1(<\bullet n >, <f8>)))] \\ M(PV f(<f8>))$$

Y la recuperación del fallo,

$$M(PV f(<f8>)) \\ [Tr1/SROV_{ev}(M(PLNf1(<\bullet n >)) \wedge M(PV f(<f8>)))] \\ M(PLNf1(<\bullet n >, <f8>))$$

Las declaraciones correspondientes según el software CPNtools<sup>21</sup> para la figura son:

colset normal = with C1|C|V 2|B|N;

colset fault = with

f1|f2|f3|f4|f5|f6|f7|f8|f9|f10|f11|f12;

colset entradastemp = with T18|T22;

colset entradasvol = with

cond1|cond2|cond3|cond4;

colset entradas = productentradastemp \* entradasvol;

colset lect\_sens = with "matrices de fallo";

colset un = union n1 : normal + f : fault + e : entradas;

var x : entradastemp;

var x1 : entradasvol;

var na, nb : normal;

var tf2, tf1, tr1, tf3, tf4, tr2, tr3, tr4 : un;

var s : lect\_sens;

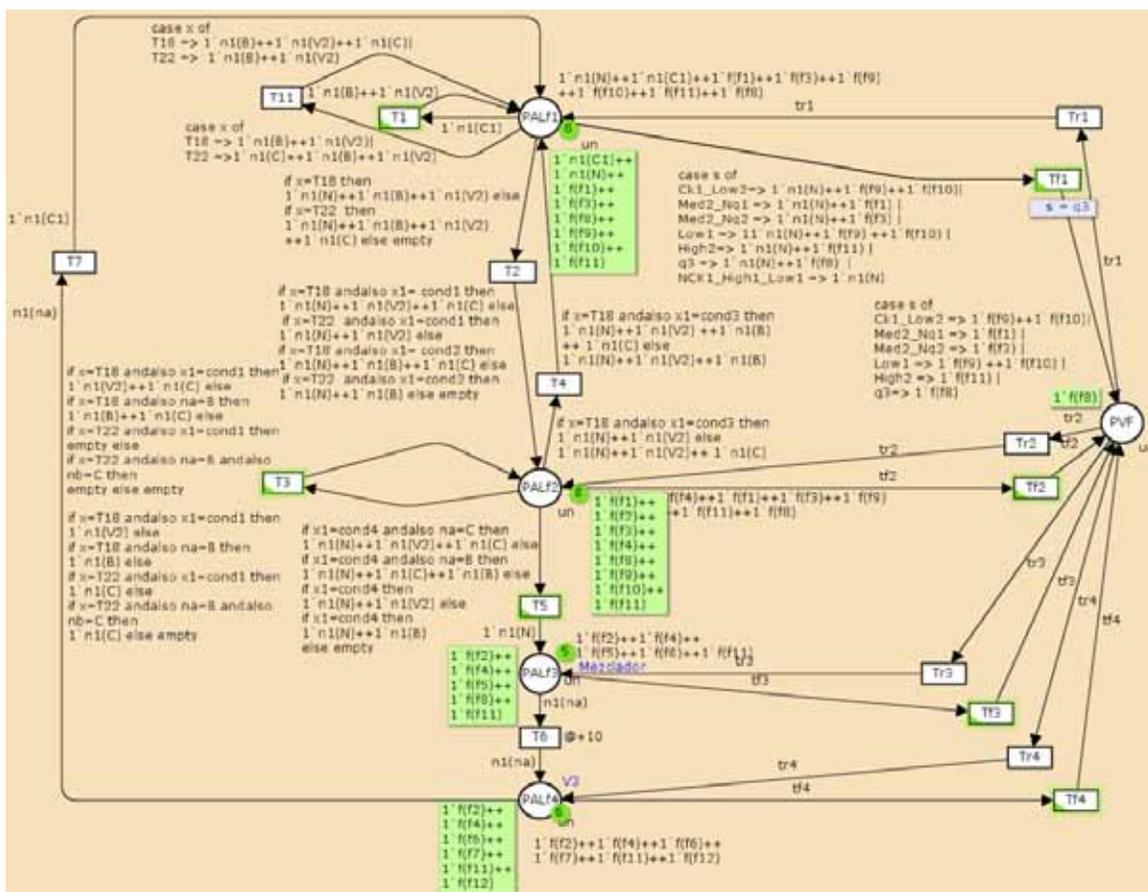


Figura 3. Modelo final RdPCD

Donde se definen el set o conjunto de marcas coloreadas del tipo: "faul" marcas del tipo fallo, "normal" marcas del tipo normal, "entradas" marcas del tipo condición o señales de entrada. Uno de los conjuntos coloreados más importantes es el de tipo "un" ya que es la unión de los conjuntos anteriores. Finalmente se observa de forma clara los tipos de fallos aislados del sistema tanto de tipo individual como simultaneo

así:

$f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_8, f_{11}, f_{9f10}, f_{7f12}$ .

La diagnosticabilidad para éste método está dada en<sup>15, 18</sup>.

La diagnosticabilidad para éste método está dada en<sup>15, 18</sup>.

## CONCLUSIONES

Los modernos sistemas de control y el carácter híbrido de la mayoría de los procesos industriales requieren estrategias nuevas de análisis de fallos donde se simplifique y adapten los modelos a los diferentes tipos de sistemas complejos existentes en la industria aportando claridad, simplicidad, diagnóstico y aislamiento eficiente. La metodología presentada permite ver la reducción y simplicidad del sistema modelado, dándole características de legibilidad, tratabilidad e implementabilidad, así como la potencia del uso de las Redes de Petri como herramienta de modelado le da la complejidad a la hora de representar estrategias de concurrencia, sincronismo, exclusión mutua, compartición de recursos y representación de lugares de carácter continuo para así incorporar modelos de carácter híbrido donde algoritmos del tipo PID o representados en ecuaciones diferenciales pueden ser implementados junto a los de carácter discreto.

Para el diagnóstico de fallos en el sistema híbrido del ejemplo de mezclado de sustancias químicas, se presenta una excelente y clara solución mostrando la fácil implementación de los modelos continuos en la Red de Petri con las entidades discretas que hacen parte del proceso, caracterizando además el comportamiento continuo y discreto de forma versátil para realizar el diagnóstico utilizando el método de anidamiento latente. Es importante observar la ventaja de tener en un mismo modelo el sistema de diagnóstico de fallos y el modelo de dinámica de funcionamiento normal del sistema o control del mismo. También es muy importante la labor del experto humano para la adquisición de la experiencia en cuanto a fallos se refiere.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SAFEPROCESS'97. 3th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes., 1997.
- [2] SAFEPROCESS'00. 4th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes., 2000.
- [3] SAFEPROCESS'03. 5th IFAC/IMACS Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes. 2003.
- [4] R. Champagnata, P. Estebana, H. Pingaudc, and R. Valettea: Petri net based modeling of hybrid systems. *Computers in Industry*, 36(1.2):139.146, April 1998.
- [5] C. Tomlin, G. Pappas, and S. Sastry: Conflict resolution in multi-agent systems: A case study in air traffic control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 43(4):509.521, 1998.
- [6] A. Balluchi, L. Benvenuti, M. Benedetto, C. Pinello, A. Luigi, and Sangiovanni-Vincentelli: Automotive engine control and hybrid systems: Challenges and opportunities. In *Proceedings of the IEEE*, volume 88, 2000.
- [7] B. H. Krogh: Recent advances in discrete analysis and control of hybrid systems. In *WODES '02: Proceedings of the Sixth International Workshop on Discrete Event Systems (WODES'02)*, page 311, Washington, DC, USA, 2002. IEEE Computer Society.
- [8] T. A. Henzinger: The theory of hybrid automata. In *Proceedings of the 11th Annual IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS '96)*, pages 278.292, Los Alamitos, CA, USA, 1996. IEEE Computer Society.
- [9] R. Alur: Timed automata. In *Computer Aided Verification*, pages 8.22, 1999.
- [10] X. Koutsoukos, K. He, M. Lemmon, and P. Antsaklis: Timed petri nets in hybrid systems: Stability and supervisory control, 1998.
- [11] L. Llano-Zuleta, G. Zapata-Madrigal, and D. Ovalle-Carranza: Hybrid system based on fuzzy inference and colored petri nets to identify electrical fault events in real time. In *(Fourth Congress of Electronics, Robotics and Automotive Mechanics CERMA '07)*, pages 400.4005, Los Alamitos, CA, USA, 2007. IEEE Computer Society.
- [12] N. Viswanadham and T. Johnson: Fault detection and diagnosis of automated manufacturing systems. In *Proc. 27th Conference Decision Control*, pages 2301.2306, Austin, Texas, 1988. IEEE Control Society.
- [13] C. Ciufudean, A. Graur, C. Filote, and C. Turcu: A new formalism for failure diagnosis: Ant colony decision petri nets. In *Proceedings of the IEEE International Conference on ARES, Vienna, Austria, 2006*.
- [14] L. Amorim, M. Nogueira, R. Barreto, and E. Tavares: Mapping live sequence chart to coloured petri nets for analysis and verification of embedded systems. *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, 31(3):1.25, 2006.

- [15] E. García., L. Rodríguez., F. Morant., A. Correcher., E. Quiles: Fault diagnosis with coloured petri nets using latent nestling method. Proceedings of ISIE08 Cambridge UK, June 2008.
- [16] E. García., L. Rodríguez., F. Morant., E. Quiles., A. Correcher.: Latent nestling method: A new fault diagnosis methodology for complex systems. IECON08, The 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Orlando, Florida, U.S.A., November 2008.
- [17] L. Rodríguez., E. García., F. Morant., A. Correcher., E. Quiles: Aplicación del método de anidamiento latente de fallos usando Redes de Petri Coloreadas para el diagnóstico de fallos en el sistema de refrigeración y lubricación de un aerogenerador. XXIX Jornadas de Automática, Septiembre 2008.
- [18] L. Rodríguez., E. García., F. Morant., A. Correcher., E. Quiles: Application of latent nestling method using coloured petri nets for the fault diagnosis in the wind turbine subsets. Proceedings of ETFA'08, Hamburg, Germany, 2008.
- [19] L. Rodríguez., E. García., F. Morant., A. Correcher., and E. Quiles: Método de anidamiento latente de fallos usando RdPC aplicado a los subsistemas de un aerogenerador. XIII Congreso Latinoamericano de Control Automático / VI Congreso Venezolano de Automatización y Control, Mérida, Venezuela, November 2008.
- [20] B. J. C. Jimenez: Modelación y análisis de un sistema híbrido: Un caso de estudio con un sistema de tanques. Revista Académica de la FI-UADY, pages 5.15, 2006).
- [21] D. University of Aarhus. Cpn tools version 2.2.0. 1999-2004.



**UNIVERSIDAD DE  
SAN BUENAVENTURA  
SEDE BOGOTÁ**

*Calidad humana y profesional*

PREGRADOS

- Ingeniería Aeronáutica
- Ingeniería de Sonido
- Ingeniería Mecatrónica
- Ingeniería de Telecomunicaciones
- Ingeniería de Sistemas
- Ingeniería Electrónica
- Tecnología en Mantenimiento y Gestión Electrónica
- Tecnología en Programación y Desarrollo de Software
- Tecnología en Redes y Comunicación de Datos
- Tecnología en Automatización Industrial
- Licenciatura en Teología
- Licenciatura en Filosofía
- Licenciatura en Educación Preescolar (Acreditada con Alta Calidad)
- Licenciatura en Educación Básica con énfasis en Lengua Inglesa
- Psicología (Acreditada con Alta Calidad)
- Administración de Empresas (Doble titulación internacional)
- Economía
- Contaduría Pública
- Derecho
- Ciencia Política
- Relaciones Internacionales

POSTGRADOS

**Maestrías**

- Maestría en Estudios del Hecho Religioso (Única en Colombia)
- Maestría en Neuropsicología Clínica
- Maestría en Ciencias de la Educación

**Especializaciones**

- NOVEVA Especialización en Evaluación y Diagnóstico Neuropsicológico
- NOVEVA Especialización en Filosofía Contemporánea
- NOVEVA Especialización en Servicios y Negocios en Telecomunicaciones
- Especialización en Aviónica
- Especialización en Navegación Satelital
- Especialización en Didácticas para Lecturas y Escrituras con énfasis en Literatura
- Especialización en Pedagogía y Docencia Universitaria

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA, SEDE BOGOTÁ**  
 Carrera B H n.º 172-20 • PBX: 687 1090 • Línea gratuita nacional: 01 8000 123 151  
 Correo electrónico: [informacion@usbog.edu.co](mailto:informacion@usbog.edu.co) • [www.usbbog.edu.co](http://www.usbbog.edu.co)