

# Diagnóstico de fallos: Caso de estudio aplicado a máquinas automáticas empleando Redes de Petri

G. Sandoval, V. López

Departamento de Mecatrónica, Campus Estado de México – TEC de Monterrey

Estado de México 52929, México

gsandova@itesm.mx

Teléfono: (52)-55-58644444 Ext.:2430

**Resumen**— En el presente documento se hace una propuesta para el diagnóstico de fallos, de máquinas que operan en forma automática, describiendo ciclos. La operación de la máquina, tanto en su estado normal como en estado de fallo son representadas utilizando Redes de Petri, con la propiedad de ser ésta fuertemente conexa, viva, segura y reversible. Se trabaja con dos tipos de fallo: los que pueden ser autorecuperables y los que, a pesar de la existencia de fallo, la máquina sigue operando hasta llegar a un estado seguro, nominalmente la condición inicial (Home). El diagnóstico y clasificación del fallo se realiza utilizando un modelo de referencia, incorporando los conceptos de circuitos cerrados elementales, o semiflujos, y la secuencia de observaciones de entrada y salida. Como una segunda contribución, se propone una metodología para el control del disparo de las transiciones, utilizando una referencia exógena de secuencia de transiciones, las transiciones observables y medibles y las transiciones del modelo de referencia.

**Palabras Clave:** Redes de Petri, Sistemas a eventos Discretos, Diagnóstico de fallas.

## I. INTRODUCCIÓN

Una Red de Petri (RP) es una herramienta, tanto gráfica como analítica, para la descripción y diseño de sistemas simples y complejos. En especial, las interacciones lógicas entre partes de un proceso o sistema pueden ser tratadas de una forma natural aplicando RP. De esta forma, situaciones como concurrencia y sincronización pueden ser determinadas o sugeridas, así mismo, las situaciones de conflicto y *self loops* pueden ser localizadas a tiempo en el modelo propuesto y removidas por una mejor opción. Por otro lado, aún y cuando algoritmos robustos de control han sido aplicados para la correcta operación de una máquina, existe el axioma de que los fallos son inevitables. En este sentido el Diagnóstico de Fallos en el contexto de los Sistemas a Eventos Discretos (*Discrete Even Systems, DES*, por sus siglas en inglés) fue introducido por Sampath [5], empleando máquinas de estado. Como alternativa, las RP han sido una mejor opción debido a su simplicidad. Métodos tales como la relación entrada – salida cuando el modelo se expresa como una Red de Petri Interpretada [4]; utilizando propiedades estructurales del diagnosticador [1]; empleando métodos tabulares cuando existen transiciones no observables [2], entre otras, han sido de especial interés para los investigadores.

Uno de los objetivos de este documento es el de presentar una metodología alternativa a las anteriores, que además de ser efectiva resulta simple de implementar, utilizando el comportamiento de operación normal como modelo de referencia y la relación entrada – salida para determinar la existencia de fallo, empleando el concepto de circuito

cerrado elemental, semiflujo, para clasificarlo acorde a las dos posibilidades: fallo con posibilidades de recuperación o fallo a paro en fin de ciclo.

En cuanto al control de la evolución de la Red, diversas alternativas han sido aplicadas: uso de controladores modelados con redes de Petri que se adaptan acorde al tipo de error detectado [6]. En este caso, el controlador se “adapta”, esto es, la Red de Petri del Controlador debe de estar cambiando conforme a cada uno de ellos. Otros métodos utilizados son los de descomposición estructural [8], máxima permisividad y teoría de regiones [9] o controladores tolerantes a falla que utilizan un mínimo de recursos para inicializar el estado [10].

Dos tipos de fallo serán considerados en el presente trabajo, los que pueden ser auto-recuperables y los que, a pesar del fallo, éste no es grave y la máquina puede seguir operando hasta el fin del ciclo.

La principal desventaja de los métodos mencionados con anterioridad radica en el hecho de que su aplicación se ve limitada en gran medida a procesos relativamente pequeños debido a la gran cantidad de operaciones que tienen que ser resueltas en línea, para que el controlador tome la decisión correcta. Como alternativa de mejora, en este documento proponemos una metodología que es viable de ser implementado debido al bajo consumo de tiempo que se requiere en el procesamiento de la lógica de control, ya que esta se manifiesta de manera sencilla; sólo algunas condiciones de operación lógica son procesadas al comparar las transiciones habilitadas del modelo de referencia con la secuencia de referencia exógena y la información leída u observada del proceso físico, a través del conjunto de sensores. El consumo máximo de tiempo se lleva a cabo fuera de línea, durante el proceso de síntesis, al calcular las secuencias exógenas de referencia para el disparo de las transiciones.

El documento está organizado como sigue: la sección II describe los conceptos básicos de las Redes de Petri y las ideas principales del Diagnóstico de Fallos. En la sección III se establece el modelo de la RP a considerar y se muestra la metodología necesaria para determinar la naturaleza del fallo, en dado caso de que éste exista. En la Sección IV se determina el control de disparo de las transiciones de la red. El ejemplo de aplicación se muestra en la sección V. Las conclusiones correspondientes quedan establecidas en la sección VI.

## II. REDES DE PETRI, CONCEPTOS BÁSICOS

En esta sección se presentan los conceptos básicos de las Redes de Petri.

*Definiciones básicas y notación de RP.*

Definición 1: Una estructura de una Red de Petri  $G$  es un grafo bipartita representado por  $G = (P, T, I, O)$ , en donde:  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  y  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  son conjuntos finitos de vértices, denominados *Lugares* y *Transiciones*.  $I(O): P \times T \rightarrow Z^+$  es una función que representa el arco de los pesos que van de los lugares hacia las transiciones;  $Z^+$  es el conjunto de los enteros no negativos. La Fig. 1 muestra un ejemplo de una estructura de Red de Petri, en donde los círculos representan los lugares y los rectángulos las transiciones.

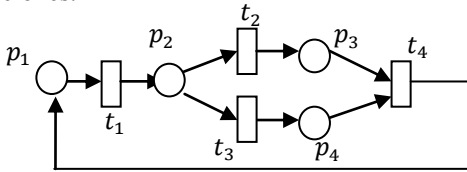


Fig 1. Estructura de una Red de Petri

El símbolo  $\bullet t_j (t_j \bullet)$  denota el conjunto de lugares  $p_i$  tal que  $I(p_i, t_j) \neq 0 (O(p_i, t_j) \neq 0)$ . De forma análoga,  $\bullet p_i (p_i \bullet)$  representa el conjunto de transiciones  $t_j$  tal que  $O(p_i, t_j) \neq 0 (I(p_i, t_j) \neq 0)$ .

La matriz de preincidencia de  $G$  es  $C^- = [c_{ij}^-]$  donde  $c_{ij}^- = I(p_i, t_j)$ ; la matriz de postincidencia de  $G$  es  $C^+ = [c_{ij}^+]$ ; la matriz de incidencia de  $G$  es  $C = C^+ - C^-$ .

La función de marcado  $M: P \rightarrow Z^+$  representa el número de marcas residentes en cada lugar. El marcado de RP se expresa, usualmente, como un vector  $n$ - dimensional.

Definición 2: Una Red de Petri es el par  $N = (G, M_0)$ , donde  $G$  es una estructura RP y  $M_0$  es el marcado inicial.

En un sistema RP, una transición  $t_j$  es habilitada en el marcado  $M_k$  si  $\forall p_i \in P, M_k(p_i) \geq I(p_i, t_j)$ ; una transición habilitada  $t_j$  puede ser disparada, alcanzando un marcado nuevo  $M_{k+1}$ , el cual puede ser calculado de acuerdo a  $M_{k+1} = M_k + Cv_k$ , donde  $v_k(i) = 0, i \neq j, v_k(j) = 1$ ; esta ecuación es denominada ecuación de estado. El conjunto de alcanzabilidad de la RP es aquel conjunto posible de marcados alcanzados desde  $M_0$  disparando sólo las transiciones habilitadas; este conjunto es denotado por  $R(G, M_0)$ .

Definición 3: Se dice que una transición es habilitada por estado, según el modelo de referencia, si  $m(p) \geq |p^{(t)} \cap T|$  para  $p \in {}^{(p)}t$ .

Definición 4: Una secuencia de disparo de transiciones de una RP es  $\sigma = t_i t_j \dots t_k \dots$  tal que  $M_0 \xrightarrow{t_i} M_1 \xrightarrow{t_j} M_2 \dots M_r \xrightarrow{t_k} \dots$  El conjunto  $\mathcal{E}(Q, M_0)$  de todas las secuencias de disparo de transiciones es llamado *lenguaje*:

$$\mathcal{E}(Q, M_0) = \left\{ \sigma = t_i t_j \dots t_k \wedge M_0 \xrightarrow{t_i} M_1 \xrightarrow{t_j} \dots M_r \xrightarrow{t_k} \dots \right\}$$

El conjunto de todas los posibles secuencias de disparo de transiciones que puede generar la palabra  $\omega$  es definida como  $\Omega(\omega) = \{\sigma | \sigma \in \mathcal{E}(Q, M_0) \wedge \text{el disparo de } \sigma \text{ produce } \omega\}$ .

Definición 5: Se dice que el marcado  $M_n$  es Alcanzable desde el marcado  $M_0$  si existe una secuencia de disparo de transiciones que transforma  $M_0$  en  $M_n$ .

Definición 6: Se dice que una RP es Reversible si, por cada marcado  $M$  en  $(G, M_0)$ ,  $M_0$  es alcanzable desde  $M$ .

Definición 7: Se dice que es Consistente si existe un marcado  $M_0$  y una secuencia  $\sigma$  tal que  $M_0 \xrightarrow{\sigma} M_0$ , y cada transición ocurre al menos una vez en  $\sigma$ .

Definición 8: Se dice que el marcado  $M'$  es *Home State* si, para cada marcado  $M$  en  $R(G, M_0)$ ,  $M'$  es Alcanzable desde  $M$ .

Definición 9: Se dice que una RP es Cíclica si y solo si su marcado inicial es *Home State*.

Definición 10: Una RP es Fuertemente Conexa si y solo si existe al menos una trayectoria dirigida de cualquier nodo a cualquiera otro.

Utilizando como ejemplo la secuencia de marcado ilustrada en la Fig. 2, algunas de las definiciones previas son explicadas en las siguientes líneas y su correspondiente importancia en una máquina automática.

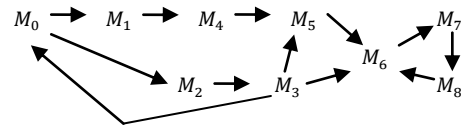


Fig. 2. Evolución de marcado de una Red de Petri.

- i. El marcado  $M_6$  es el único que cumple con ser *Home State*;
- ii. La Red no es Reversible, ya que, por ejemplo, a partir de  $M_6, M_7$  ó  $M_8$  ya no es posible retornar a ningún otro marcado, diferente de ellos mismos.
- iii. La Red no es Cíclica, ya que  $M_6$  (*Home State*), no es la condición inicial.
- iv. Es factible que sea Consistente si, a través de  $M_0 \rightarrow M_2 \rightarrow M_3 \rightarrow M_0$  todas las transiciones son disparadas, al menos una vez cada una.

Cuando se trabaja en el diseño de algoritmos para máquinas o sistemas, de tal forma que estas operen en modo automático realizando ciclos, se deben de hacer cumplir al menos dos tareas: garantizar que la máquina regrese a su posición inicial (*Home position*) y que no exista fallo. Sin embargo, si existe fallo debe de haber posibilidad de tomar una decisión: 1) que la máquina se detenga en su totalidad, 2) que ésta siga su operación realizando paro de fin de ciclo o 3) que pueda autorrecuperarse del fallo. La metodología que se plantea en este trabajo, para cumplir con las dos tareas mencionadas, se compone de tres partes: diseño del modelo; identificación y clasificación del fallo; disparo correcto de las transiciones. Los fallos de interés corresponden a las opciones 2) y 3).

En la siguiente sección se estudia la estructura del diseño del modelo de la Red de Petri correspondiente. En las secciones posteriores se hará mención al diagnóstico del fallo y al disparo de las transiciones.

### III. MODELO DE LA RED Y DIAGNÓSTICO DE FALLO.

#### A. El Modelo.

Para el análisis y diseño de la Red de Petri, resultará de primordial importancia establecer tres definiciones fundamentales, las cuales se expresan en las siguientes líneas.

Definición 11: Una transición  $t_j$  es Viva para un marcado inicial  $M_0$  si por cada marcado alcanzable  $M_i \in R(G, M_0)$  existe una secuencia de disparo  $\sigma = t_i t_j \dots t_k \dots$  desde  $M_i$ .

Definición 12: Una RP es Viva para un marcado inicial  $M_0$  si todas sus transiciones son vivas.

Definición 13: Un circuito cerrado elemental es un circuito dirigido en el cual no hay nodos que aparezcan más de una vez, sean transiciones o lugares, exceptuando el nodo inicial. El correspondiente conjunto que lo define es  $D_i = \{p_i, p_j \dots, p_l\} \cup \{t_i, t_j, \dots, t_l\}$ .

Para que la máquina pueda evolucionar por las rutas establecidas por la conexión fuerte, es necesario que se garantice que la red sea Viva. Éste hecho, aseguraría la existencia de un conjunto, no vacío, de condiciones iniciales que proporcionen la viveza de la red; la condición inicial de operación de la máquina, la cual es un elemento de este conjunto inicial, se considerará como  $M_0 = (M(p_1) = 1, M(p_i) = 0, i \neq 1)$ . En cuanto a los estados de fallo, estos se unen a la operación normal, en forma de circuitos cerrados elementales, para garantizar la condición cíclica de la Red. Una definición, indicada a continuación, ayudará para clarificar el procedimiento de identificación del tipo de fallo.

Definición 14: Se denomina Circuito cerrado de condición inicial a aquel circuito cerrado elemental que contiene a  $M_0$ ; caso contrario se dice que el circuito no es de condición inicial. A manera de ejemplo, se emplea la RP que aparece en la Fig. 3 para explicar algunas de las definiciones establecidas. En ella se han incluido transiciones de fallo y lugares no medibles, en color oscuro. Se identifican dos circuitos cerrados elementales de condición inicial, cuyas secuencias de transiciones son:  $\sigma_1 = t_1 t_2 t_3 t_4 t_5 t_6 t_7$  y  $\sigma_2 = t_1 t_8 t_9 t_7$ , de operación normal y en modo fallo, respectivamente. Así mismo, se cuenta con dos circuitos cerrados elementales de no condición inicial:  $\sigma_3 = t_2 t_{10} t_{11}$  y  $\sigma_4 = t_4 t_{12} t_{13}$ , de operación normal y en modo fallo, respectivamente. A manera de ejemplo, la evolución de la máquina en modo normal puede tomar dos caminos 1) por la secuencia de transiciones  $\sigma_1$  o 2) por una composición de esta última con con la secuencia  $\sigma_3$ , resultando en  $\sigma_5 = t_1 t_2 t_{10} t_{11} t_2 t_3 t_4 t_5 t_6 t_7$ .

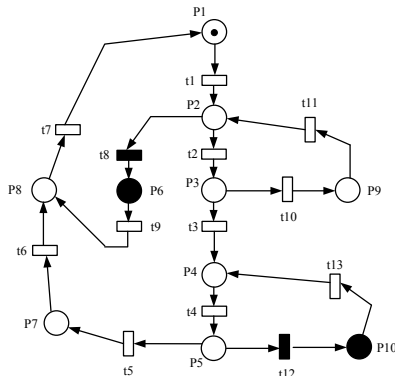


Fig. 3. Red de Petri Fuertemente Conexa, Viva, con lugares y transiciones no medibles u observables.

La siguiente definición y teorema ayudarán para construir una Red que sea Fuertemente Conexa.

Definición 15: Un circuito cerrado elemental es no conexo (no conectado) cuando  $D_i \cap D_j = \emptyset, j = 1, 2, \dots, \# \text{circuitos dirigidos} - 1, i \neq j$ .

Teorema: Una Red es Fuertemente Conexa si

- i) Cada lugar y cada transición pertenece al menos un circuito directo elemental,  $D_i$
- ii)  $D_i \cap D_j \neq \emptyset, i \neq j$

Prueba. Suponga que no existe  $D_i$  ni  $D_j$  en el cual ningún  $p$  ni  $t$  formen parte. Entonces, no hay trayectoria de regreso a  $p$  o a  $t$ , lo cual significa que la definición 15 no se cumple.

Ahora suponga que cada  $p$  y  $t$  forman parte de al menos un Circuito cerrado elemental y que  $D_i \cap D_j = \emptyset$ , esto significa que al menos un Circuito tiene por lo menos una transición en dirección hacia dentro o hacia fuera de él, pero no hay trayectoria de regreso. El mismo razonamiento se aplica a los lugares, así entonces  $D_i \cap D_j \neq \emptyset$  debe de cumplirse para tener trayectorias entrantes o salientes al Circuito elemental.

En el caso de la Red de la Fig. 3 los conjuntos de los circuitos cerrados elementales son:

$$\begin{aligned} D_1 &= \{p_1, t_1, p_2, t_2, p_3, t_3, p_4, t_4, p_5, t_5, p_7, t_6, p_8, t_7\} \\ D_2 &= \{p_1, t_1, p_2, t_8, p_6, t_9, p_8, t_7\} \\ D_3 &= \{p_2, t_2, p_3, t_{10}, p_9, t_{11}\} \\ D_4 &= \{p_4, t_4, p_5, t_{12}, p_{10}, t_{13}\} \end{aligned}$$

En donde:  $D_1 \cap D_2 = \{p_1, t_1, p_2, p_8, t_7\}$ ,  $D_1 \cap D_3 = \{p_2, t_2, p_3\}$  y  $D_1 \cap D_4 = \{p_4, t_4, p_5\}$ ,  $D_2 \cap D_3 = \{p_2\}$ ,  $D_2 \cap D_4 = \{\emptyset\}$ ,  $D_3 \cap D_4 = \{\emptyset\}$

Todos los nodos de la RP forman parte de al menos un Circuito cerrado elemental y existe al menos una intersección por cada uno de ellos que genera conjuntos no vacíos de intersecciones, por lo tanto la RP es Fuertemente Conexa.

Desafortunadamente, para garantizar viveza, no es posible establecer un método en concreto que brinde la certeza de que todas las transiciones podrán ser habilitadas, y en su caso disparadas, debido a las infinitas soluciones que arroja

la ecuación de estados. Por otro lado, es importante mencionar que, aunque normalmente, la condición inicial de una máquina es única, ésta debe de garantizar la viveza de las transiciones. Por ejemplo, en el caso particular de la RP de la Fig. 3 se garantiza que la red es Viva, Reversible y Consistente. Su interpretación física puede corresponder al hecho de que la máquina realiza una sola tarea a la vez, evolucionando de estado en estado; en este caso los lugares dos y cinco quedan sujetos a ser observados con detenimiento, ya que en ellos existe la posibilidad de que la máquina pueda tomar los caminos de fallo en la operación. A estos lugares los denominaremos *Lugares de Riesgo*. Manipular, o controlar, las transiciones dos y cinco evitarían en gran medida que las marcas de los lugares de riesgo evolucionaran hacia los circuitos de falla. La siguiente definición establece formalmente al lugar de riesgo.

Definición 16. Sea  $(Q_N, M_0)$  la RP de comportamiento normal, tal que  $(Q_N, M_0) \subseteq (Q, M_0)$ . El conjunto de lugares de riesgo  $P^r$  se define como:

$$P^r = \{p_i \in P^N | p_i \in (\cdot(t_i^N) \wedge \cdot(t_i^F)), | \cdot(t_i^F) | = 1\}$$

En la siguiente sección se exponen los conceptos de diagnóstico y clasificación del fallo, considerando el modelo diseñado, y los lugares de riesgo. Posteriormente se estudiará el manejo de las transiciones asociadas a los lugares de riesgo.

### B. Diagnóstico y clasificación del fallo.

Defínase el ciclo  $F_1 = A_1 - F_1 - D_3 - A_2 - A_1$  generado a partir de la guía GEMMA [11]; en éste se establece que la producción se ejecuta en modo de fallo ( $D3$ ), y que la máquina debe de llegar hasta el *Paro en estado inicial* ( $A1$ ). Este ciclo se debe de cumplir con la ayuda o no del operador humano. Bajo esta circunstancia se admite que existe un fallo en la producción, más sin embargo, sacrificando la calidad del producto final, la producción continua hasta el paro de fin de ciclo; en el contexto de este documento las *Fallas no recuperables* son aquellas que quedan definidas por  $F_1$  bajo la condición de que no exista factor humano en la ejecución del ciclo.

Fallas recuperables son aquellas en las que es posible hacer corrección de manera automática, para posteriormente continuar en modo normal [6].

Usualmente, cuando se realizan estudios sobre diagnóstico de fallas, se cuenta con información parcial de los eventos del sistema, esto es, la Red de Petri cuenta con lugares y transiciones que pueden ser no observables (medibles) [2], [7].

En términos generales el conjunto de transiciones puede ser clasificado como transiciones de comportamiento normal,  $T_N$ , y transiciones de falla,  $T_F$ , con  $T = T_N \cup T_F$ ,  $T_F \cap T_N = \emptyset$ . Al mismo tiempo pueden ser separadas en transiciones observables,  $T_o$ , y no observables,  $T_{uo}$ . De manera similar,  $T = T_o \cup T_{uo}$ ,  $T_o \cap T_{uo} = \emptyset$ . Comúnmente las transiciones no observables son las transiciones de fallo, esto es,  $T_F \cap T_o = \emptyset$ . Para el caso del presente trabajo  $T_F = T_{F_1} \cup T_{F_2}$ , siendo  $T_{F_1}$  las relativas a los fallos  $F_1$ , y  $T_{F_2}$  a los fallos autorecuperables,  $F_2$ ; esto es, el conjunto de fallos queda determinado por  $\Delta_F = \{F_1, F_2\}$ . En cuanto a los lugares, estos se clasifican en observables (medibles) y no observables (no medibles), en el sentido de que la cantidad de marcas de los correspondientes lugares puedan ser

medibles o no. De esta forma, se tiene que  $P = P_o \cup P_{uo}$ , siendo  $P_o$  el conjunto de lugares observables y  $P_{uo}$  el conjunto de los lugares no observables. Esta característica conlleva a entender que la ecuación de estados de la Red de Petri evoluciona de marcados observables a marcados observables:  $\tilde{M}: N^P \rightarrow N^{P_o}$ . Esto significa que del conjunto de lugares de la red,  $N^P$ , sólo se observará, o medirá, el conjunto  $N^{P_o}$ .

Ushio [7] utiliza una adecuación de las ideas de Sampath [5], correspondientes a las condiciones necesarias para el diagnóstico de fallas, haciendo las modificaciones pertinentes cuando el modelo es realizado utilizando Redes de Petri. Como alternativa a esas propuestas en el presente trabajo se utilizan los conceptos de circuito cerrado elemental, lugar de riesgo y modelo de referencia, para determinar la ocurrencia, o no, de un fallo y en su caso debido, clasificar al mismo.

Como modelo de referencia se considera a la red en operación normal; en este caso para la detección del fallo se hace un comparativo de las marcas que hay entre el modelo y las enviadas por el sistema. Con la incorporación del concepto de lugar de riesgo se define cuál de los dos tipos de fallo es el que ha ocurrido.

El procedimiento sugerido para determinar la existencia de fallo es como se menciona a continuación:

- i. Determine los circuitos cerrados de la Red total:  $X = X_N \cup X_{F_1} \cup X_{F_2}$ , siendo  $D_N$ ,  $D_{F_1}$  y  $D_{F_2}$  los conjuntos respectivos.
- ii. Construya los conjuntos de nodos para cada uno de los circuitos cerrados. Se tendrán conjuntos de operación normal,  $X_N$ , conjunto de operación de fallo tipo uno,  $X_{F_1}$  y operación de fallo tipo dos,  $X_{F_2}$ . En caso de fallo, éste se determina de acuerdo al evento  $\alpha$  observado

$$F_i = \begin{cases} F_1 & \text{si } \alpha \in D_N \cup D_{F_1} \setminus D_N \\ F_2 & \text{si } \alpha \in D_N \cup D_{F_2} \setminus D_N \end{cases}$$

## IV. CONTROL DEL DISPARO DE LAS TRANSICIONES.

A diferencia de [6], [8], [9] y [10], en donde el diseño del controlador aumenta la complejidad de la red, debido al incremento de lugares al número original, en este documento, la estrategia de control se orienta hacia el disparo de las transiciones. El control para el disparo de las transiciones involucra una entrada exógena de referencia y una secuencia de disparo de transiciones, construida fuera de línea, a partir de los circuitos cerrados elementales de la red. La dinámica de disparo se condiciona de acuerdo a la secuencia de referencia, el modelo de referencia y las transiciones de salida observables del sistema, en un operando lógico tipo AND, teniendo como punto de referencia al lugar de riesgo. Cuando sucede un fallo, el controlador entra en operación, obligando a la Red a evolucionar, ya sea en la recuperación del fallo o a través de una ruta a modo de condición inicial de la máquina.

Considerando que con la señal exógena de referencia se desea evolucionar sobre una secuencia de lugares, obtenida a partir de un conjunto  $P$ , se define una trayectoria cerrada en la Red de Petri como  $\pi = (p_0, \dots, p_n) \in P^*$ , siendo  $p_0 = p_n$ , considerando que  $p_{i-1}^{(t)} \cap p_i^{(t)} \neq \emptyset$  para  $0 \leq i \leq n$ .

La secuencia exógena es la encargada de hacer que esta trayectoria se cumpla.

Definición 17. Se dice que una señal exógena de secuencia de transiciones es Señal de Referencia (SR) cuando se obtienen a partir de las secuencias de disparo de transiciones en modo normal, de acuerdo a los circuitos cerrados elementales con condición inicial.

Estas secuencias cerradas deben de iniciar y terminar en la condición inicial:  $\sigma_{ref} = t_i^{ref} t_j^{ref} \dots t_r^{ref}$ . Dado entonces los conjuntos  $\{t_o\}$ ,  $\{t_h\}$  y  $\{t^{ref}\}$ , como transiciones observadas, transiciones habilitadas por estado del modelo y la transición de Señal de referencia en el  $k$ -ésimo paso, el control de disparo de transiciones queda establecido como  $D = \{t_o\} \cap \{t_h\} \cap \{t^{ref}\}$ . Se dice entonces que una transición  $t_i \in T$  se dispara bajo control en el  $k$ -paso si  $D = \{t_o\} \cap \{t_h\} \cap \{t^{ref}\} \neq \emptyset$ .

Es factible que una secuencia correspondiente a un ciclo deseado de operación de la máquina, pase más de una vez por la condición inicial de marcado. Para distinguir cuándo esta condición inicial corresponde, o no, al fin de ciclo es necesario medir la longitud de la palabra de las secuencia de disparo de transiciones. La definición siguiente ayuda en esta tarea.

Definición 18: Se dice que una secuencia es Secuencia Cíclica Dirigida de Transiciones (SCDT) cuando

- $M_0 \xrightarrow{\sigma_{ref}} M_0$
- $|\sigma| = |\sigma_{ref}|$

La Fig. 4 muestra el esquema completo para el control de disparo de las transiciones de la Red de Petri.

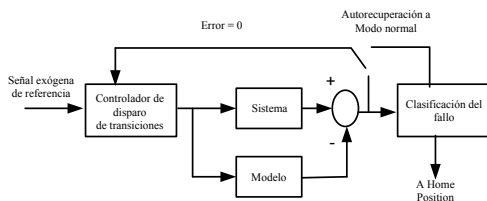


Fig. 4. Modelo para el control y diagnóstico de fallo correspondiente

#### V EJEMPLO DE APLICACION

La descripción de las situaciones de marcha y paro de una máquina pueden ser establecidas utilizando la guía GEMMA (*Guide d'Études des Modes de Marches et d'Arrêts*)[11]. En términos generales, los estados se clasifican en tres partes: Familia A, estado de paro; Familia F, estado de funcionamiento; Familia D, estados de fallo. De forma particular, el estado, o familia de funcionamiento, se divide en estados normalizados. Uno de ellos es F6, Marcha de prueba. Esta operación se lleva a cabo previo al modo de Producción normal, con el fin de verificar las condiciones del equipo, y, en su caso, realizar algún procedimiento de calibración en actuadores o sensores; ajuste de tiempos o avances, entre otras tareas. La rutina de prueba puede ser diseñada en forma libre, de tal forma que se puedan ejecutar operaciones en modo manual o automático; pueden ser en orden o en desorden. Bajo estas consideraciones, suponga que se cuenta con la máquina taladradora de la Fig. 5. Antes

de ejecutar el ciclo normal de operación, en modo automático, se desea hacer una prueba de verificación; cada taladro ejecuta sus desplazamientos de avance y retroceso como consecuencia del hecho de estar montados sobre actuadores lineales de doble efecto.

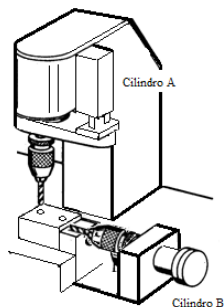


Fig. 5. Taladradora de dos grados de libertad.

El proceso de verificación o prueba debe de cumplir al diagrama espacio – fase que se muestra en la Fig. 6.

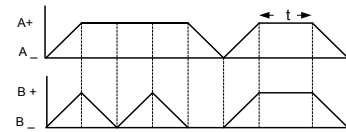


Fig. 6. Diagrama espacio – fase para los actuadores de doble efecto, que desplazan a los taladros.

Los estados de los actuadores se definen como: Cilindro A en posición retraída,  $A_-$ ; cilindro A en posición extendida,  $A_+$ ; cilindro A en carrera de avance,  $A \uparrow$ ; cilindro A en carrera de retroceso,  $A \downarrow$ . De manera similar se establecen los estados del actuador B. Sólo se pueden medir las posiciones extremas de los actuadores; no existe posibilidad de medir los estados de avance y de retroceso. La Fig. 7 muestra la Red de Petri total, considerando la operación normal y los circuitos de fallo.

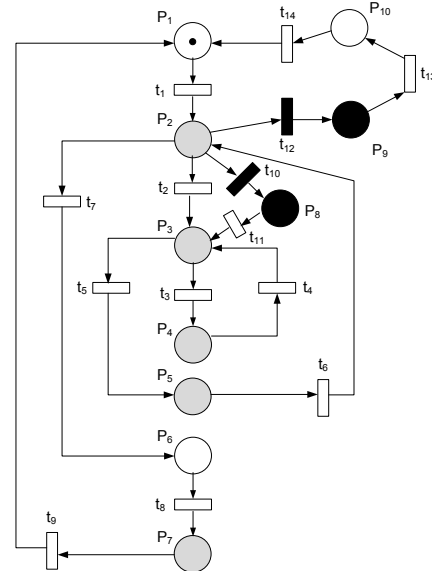


Fig. 7. RP que muestra la operación normal con los semiflujos de fallo. Los nodos en fondo negro representan los lugares y/o transiciones no medibles u observables de fallo.

La RP de operación normal queda definida por el conjunto de lugares:  $P_1: A_- B_-$ ;  $P_2: A \uparrow B \uparrow$ ;  $P_3: A_+ B \downarrow$ ;  $P_4: A_+ B \uparrow$ ;  $P_5: A \downarrow B_-$ ;  $P_6: A_+ B_+$ ;  $P_7: A \downarrow B \downarrow$ .

Para el caso de la verificación, se espera que el avance del cilindro A sea a mayor velocidad que el avance de B; esto es, se considerará como una falla, no mayor, el hecho de que B posea una velocidad de avance mayor a la de A; esto sugiere que la operación, aunque en fallo, no amerita detener la máquina. En todo caso se espera un paro de fin de ciclo. El lugar  $P_8$  sería el indicativo de este estado con la transición  $t_{11}$  como su etiqueta de identificación.

Por otro lado, aunque la velocidad de avance de A es mayor, esta no debe de ser de tal forma que A logre su extensión total cuando B todavía se encuentre dentro del rango de operación del detector inicial de carrera. Este sería un error de recuperación automática, siendo el lugar  $P_9$  el asociado a este hecho. Sólo  $P_1$  y  $P_6$  son medibles; todas las

transiciones de operación normal son observables. Los circuitos cerrados elementales que se identifican en la RP total son:

$X_1: \{p_1, t_1, p_2, t_7, p_6, t_8, p_7, t_9\}$ ;  $X_2: \{p_3, t_3, p_4, t_4\}$ ;  $X_3: \{p_2, t_2, p_3, t_5, p_5, t_6\}$   
 $X_4: \{p_2, t_{10}, p_8, t_{11}, p_3, t_5, p_5, t_6\}$ ;  $X_5: \{p_1, t_1, p_2, t_{12}, p_9, t_{13}, p_{10}, t_{14}\}$ , en donde  $X_1$  es circuito de condición inicial;  $X_2$  y  $X_3$  son de no condición inicial;  $X_4$  es circuito asociado a  $F_1$  y  $X_5$  es el que define a  $F_2$ . Para calcular las trayectorias exógenas de transiciones de referencia, se determina primero las intersecciones entre los diferentes conjuntos de circuitos cerrados de operación normal:  $X_1 \cap X_2 = \emptyset$ ;  $X_1 \cap X_3 = \{p_2\}$ ;  $X_2 \cap X_3 = \{p_3\}$ . El significado de este resultado se puede expresar de la manera siguiente: la referencia inicia en la primera transición de  $X_1$ , que es quien contiene a la condición inicial; a partir de ese momento la secuencia exógena puede evolucionar por cualquiera de las siguientes posibilidades: sólo por  $X_1$ ; iniciando en  $X_1$  y continuando  $N_1$  veces por  $X_3$ , a través de  $p_2$ , para finalmente regresar a  $X_1$ ; por  $X_1$ , continuando  $N_1$  veces por  $X_3$  el cual puede continuar  $N_2$  veces por  $X_2$ , mediante  $p_3$ , para posteriormente regresar a  $X_3$  y posteriormente a  $X_1$ . En todos ellos, el circuito se cierra en el lugar  $p_1$ .  $\sigma_{ref1} = t_1 t_7 t_8 t_9$ ;  $\sigma_{ref2} = t_1 (N_1 X_3) t_7 t_8 t_9$ ;  $\sigma_{ref3} = t_1 (N_1 X_3 (N_2 X_2)) t_7 t_8 t_9$ . De esta forma, el caso particular acorde al diagrama espacio fase corresponde a  $\sigma_{ref3} = t_1 t_2 t_5 t_6 t_2 t_3 t_4 t_5 t_6 t_7 t_8 t_9$  con  $N_1 = N_2 = 1$  y no es posible tener comunicación directa entre  $X_1$  y  $X_2$ .

Particularmente para  $p_2^*$ , la evolución de la red en modo de operación normal puede se explica a continuación. A partir de la condición inicial, el primer evento que se identifica es  $k_1 = t_1$  de tal manera que el modelo de referencia evoluciona a  $p_2 = 1$ , siendo este lugar de riesgo, y no medible. Como la red evoluciona en condiciones normales, el segundo evento será  $k_2 = t_2$ . En general, en operación normal, el disparo se de la manera siguiente:

$$t_{disp} = \{t_{k=2}^{ref} \cap t^{modelo} \cap t^{obs} \neq \phi\} = \{t_2\}$$

$$t_{disp} = \{t_{k=7}^{ref} \cap t^{modelo} \cap t^{obs}\} = \{t_7\}$$

Ahora, supóngase que eventualmente pueda suceder un fallo del tipo  $F_2$ , esto es cuando se tiene  $p_2 = 1$ . En ese instante,  $\{t^{modelo}\} = \{t_2, t_7\}$ ,  $\{t^{ref}\} = \{t_2\}$ , siendo:

$t_{k=2}^{ref} \cap t^{modelo} = \{t_2\}$ . Si la observación  $k_2 = t_{13}$  se determina que el fallo es  $F_2$  ya que  $t_{13} \in X_5 \wedge \notin X_i, i \neq 5$ . Entonces no existe disparo de la red en modo normal ya que  $t_{disp} = (t_{k=2}^{ref} \cap t^{modelo} \cap t^{obs} = \phi)$ . En ese momento el ciclo de recuperación automática ejecuta su secuencia hasta llegar de nuevo  $p_1$ . De manera similar se puede expresar la determinación del fallo  $F_1$ , considerando que el evento observado sea  $t_{11}$ .

Es así como el disparo de las transiciones se realiza de manera inequívoca. Si ocurre un fallo, el sistema toma, automáticamente, el camino correspondiente según el circuito de fallo detectado.

## CONCLUSIÓN

La alternativa para el diagnóstico de fallos y del disparo de las transiciones para máquinas que operan en forma

automática, ejecutando ciclos, propuesta en este documento tiene la ventaja de que la operación en línea es sencilla y rápida de ejecutar al tratarse de aplicaciones industriales. La detección de fallo, en caso de existir, se lleva a cabo de utilizando el principio de circuito cerrado elemental. Los cálculos fuera de línea se orientan hacia la determinación de las secuencias de referencia permitidas, a partir de la condición inicial, en este caso determinado por la condición inicial específica de la máquina.

## REFERENCIAS

- [1] Antonio Ramírez-Treviño, Israel Rivera – Rangel, E. López-Mellado, "Online Fault Diagnosis of Discrete Event Systems. A Petri Net – Based Approach," Proc. of the IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Vol. 4, pp. 31 -39, Jan 2007.
- [2] Giua, A.; Seatzu, C., "Fault detection for discrete event systems using Petri nets with unobservable transitions," Proc. of the 44th IEEE European Control Conference on Decision and Control, Pp. 6323 – 6328, Dec 2005.
- [3] M. Manyari- Rivera, J.Basilio, A. Bhaya, "Integrated Fault Diagnosis Based on Petri Net Models," Proc. of the 16<sup>th</sup> IEEE International Conference on Control applications, Pp. 958 – 963, Oct 2007.
- [4] Ruiz-Beltran, E.; Jimenez-Ochoa, I.; Ramirez-Trevino, A.; Lopez-Mellado, E.; Meda-Campana, M., "Fault Detection and location in DES using Petri Nets," Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 2, Pp. 1645 – 1650, Oct 2005.
- [5] M. Sampath, R. Sengupta, S. Lafortune, K. Sinnamohideen, and D. Teneketzis, "Diagnosability of discrete event systems," IEEE Trans.Autom. Control, vol. 40, no. 9, pp. 1555–1575, Sep. 1995.
- [6] C. Zhou, F. DiCesare, "Adaptive design of Petri Net controllers for automatic error recovering," Proc. of the IEEE International Symposium on Intelligent control, pp. 652 – 657, Aug 1988.
- [7] T. Ushio, I. Onishi, and K. Okuda, "Fault Detection Based on Petri Net Models with Faulty Behaviors," IEEE Transactions on System, and Cybernetics, pp. 113-118,1998.
- [8] L. Jiliang, "Decentralized control approach of Petri Nets based on net structure decomposition methods," Proc. CIE, International Conference on Computers and Industrial engineering," pp. 1560 – 1567, July 2009.
- [9] A. Ghaffari, N. Rezg, X. Xiaolgan, "Design of Live and maximally permissive Petri Net controller using the theory of regions,". IEEE Transactions on Robotic and Automation, Vol. 19, pp. 137 – 141, Feb 2003.
- [10] Y. Qu, L. Li, , Y. Dai, "Fault- Tolerant Controller Design Using Petri Nets with minimum Initial State Specifications," Proc. ICNSC, International Conference on Networking, Sensing and Control, pp. 189 – 194, USA, April 2010.
- [11] G. Cloutier, J. Paques, "GEMMA, The complementary tool of the GRAFCET," Proc. of the 4th Annual Canadian Programmable Control and Automation Technology Conference and Exhibition, Pp. 12A1 - 5/1-10, 1988.