

Control jerárquico de un sistema industrial utilizando redes de Petri interpretadas.

V. Barajas-Zamora*, I. Barragán**

*Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V.

**CIATEQ de A.C.

Resumen—El presente artículo estudia la aplicación de redes de Petri interpretadas, aplicadas a control jerárquico de procesos industriales, utilizando especificaciones, y el árbol de alcanzabilidad para generar un modelo reducido dentro del controlador jerárquico; aplicándolo a un sistema de lubricación industrial, donde se contemplan el control de la temperatura, control de presión y control de nivel de líquido de lubricación.

Palabras Clave— Redes de Petri, Alcanzabilidad, alfabeto, Mapa, SED.

I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo presenta la aplicación del control por RPI de un sistema industrial, de forma jerárquica, el desarrollo del trabajo tiene las siguientes secciones.

Marco teórico, es donde se describe los elementos que conforman las redes de Petri interpretadas así como la construcción del árbol de alcanzabilidad y las diferentes formas de simplificación de redes.

Descripción del sistema industrial el cual se desea controlar y sus especificaciones de control, así como los elementos de detección de eventos, y los elementos de interconexión entre controladores.

Desarrollo del controlador es donde se modela cada componente de campo, y los controladores a diferentes niveles.

II. MARCO TEÓRICO.

En esta sección se resume los conceptos básicos de RP e introduce la definición de RPI, y algunos conceptos relacionados con el modelado de SED.

A. Redes de Petri.

Definición 1: Una estructura de red de Petri N es un gráfico bipartido definido por 4 elementos, (P, T, I, O) , donde $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ es un conjunto finito de elementos llamados lugares, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ es un conjunto finito de elementos llamados transiciones, $I = P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ es una función que representa los arcos de salida de un lugar a una transición, $O = P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ es una función que representa los arcos de salida de una transición a un lugar, gráficamente los lugares

son representados por círculos, las transiciones por rectángulos y los arcos como flechas dirigidas. La estructura de la red se puede representar de forma matricial por las siguientes matrices; la matriz de pre-incidencia $C^- = [c_{ij}^-] = I(p_i, t_j)$; la matriz de post-incidencia $C^+ = [c_{ij}^+] = O(p_i, t_j)$ y finalmente la matriz de incidencia $C = C^+ - C^-$. La función demarcado $M : P \rightarrow \mathbb{Z}^+$ representa el número de marcas (puntos), dentro de cada lugar, donde \mathbb{Z}^+ (enteros positivos).

Definición 2: Un sistema en RP, es el par (N, M_0) , donde N es una estructura de RP y M_0 es el marcado inicial distribuido en los lugares.

Definición 3: P-invariantes y T-invariantes, son soluciones racionales de la matriz de incidencia, los P-invariantes se define como $Y_i^T C = 0$, y $Y_i^T \neq 0$, y tienen la propiedad $Y^T m = Y^T m_0$, la cual indica que la suma de todas las marcas de los lugares que forman un P-invariante es constante. Los T-invariantes se define como $CX = 0$, y $X \neq 0$, los elementos de los T-invariantes indican las transiciones que se deben ejecutar para llegar al mismo marcado en la red.

Definición 4: El conjunto de lugares de entrada a una transición se define como ${}^o t_i = \{p | I(p, t_i)\}$ y el conjunto de lugares de salida $t_i^o = \{p | O(p, t_i)\}$.

Definición 5: Un sistema en RP (N, M_0) es una maquina de estados si para toda transición se cumple $|{}^o t| = 1 = |t^o|$.

B. Redes de Petri Interpretadas.

En este trabajo se utilizan las redes de Petri interpretadas RPI como una extensión de las redes de Petri para modelar los controladores, las entradas y salida, ya sea a dispositivos de campo como a controladores jerárquicos.

Definición 6: Una red de Petri interpretada (RPI) es un par (Q, M_0) , con $Q = (N, \Sigma, \lambda, \varphi)$, donde; N es una estructura de RP, $\Sigma = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s\}$ son el alfabeto de entrada de la red donde α_i es un símbolo de entrada y se relaciona a una transición en la red, λ es una función de etiquetado de las transiciones $\lambda : T \rightarrow \Sigma \cup \{\varepsilon\}$, donde ε indica que la transición es interna en el controlador y φ es una matriz de dimensiones $q \times m$ tal que realiza un mapeo del marcado M_k a un vector y_k de observación del sistema, definiendo esta relación como $y_k = \varphi M_k$.

Definición 7: Una transición $t_i \in T$ de un sistema RPI está habilitada si para todos sus lugares de entrada tienen marcas, cumpliendo $M_k(p) \geq I(p, t_i) \wedge p \in {}^o t_i$. Si una transición con

* {vbarajas@comimsa.com}, ** {Israel.barragan@ciateq.mx}

el símbolo ε (silencio) está habilitada, esta se debe disparar inmediatamente.

Definición 9: Ecuación de RPI, cuando una transición t_i es disparada, el marcado actual M_k lo lleva a un nuevo marcado M_{k+1} , conocido como alcanzable $M_k \xrightarrow{t_i} M_{k+1}$ y este marcado puede ser calculado con la ecuación de RPI.

$$M_{k+1} = M_k + C * v_k$$

$$y_k = \varphi M_k$$

Donde el vector $v_k(i) = 1$ cuando la transición t_i se dispara y $v_k(j) = 0$ cuando la transición t_j no se dispara.

Proposición 10: En este trabajo, se propone construir el mapa de salidas φ para accionar dispositivos de campo y transiciones de un modelo reducido en el controlador jerárquico del siguiente nivel, el lenguaje de salida es el conjunto Σ_o , y la función de relación $\lambda_o: (y_k(i) = \gamma_j) \rightarrow \Sigma_o \cup \{\varepsilon\}$; cada elemento $\gamma_k(i) \in \mathbb{Z}^+$ (enteros no negativos) y $\gamma_j = \sum_i^n \varphi(j, i)$.

Definición 11: Transiciones temporizadas, son aquellas transiciones que tiene asociado un valor de tiempo positivo diferente de cero θ_i , el cual introduce un tiempo entre la habilitación y el disparo.

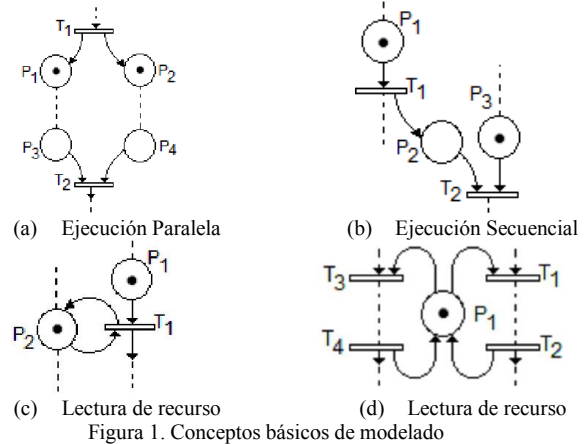
Definición 12: Red de Petri interpretada temporizada RPIT, se define como $G = (N, \Sigma, \lambda, \varphi, \Theta)$, donde los primeros cuatro elementos describen la RPI, y $\Theta: T \rightarrow \mathbb{R}^+ \cup \{0\}$ es una función de relación de valores de retardo de tiempo a cada una de las transiciones; gráficamente este valor se coloca cerca del rectángulo de la transición. Finalmente el sistema RPIT se escribe como (G, M_0) .

Definición 13: Árbol de alcanzabilidad, es una herramienta gráfica que explora el comportamiento de RPI, consiste en un grafo formado por nodos (marcados alcanzables), y ellos se conectan directamente entre sí mediante arcos etiquetados con la transición que se ha disparado, a continuación se presentan los pasos para construir el grafo de alcanzabilidad.

- El nodo de inicio es M_0 , a partir de este se comienza el grafo.
- Se identifican todas las transiciones habilitadas por el nodo y se calculan los nuevos marcados para cada transición
- Se trazan los arcos que unen el nodo actual con los nodos siguientes, Nota: si el nodo siguiente ya se encuentra en el grafo, el arco se dirige al nodo ya existente.
- Para cada uno de los nuevos nodos se repite el proceso, y se deja de explorar una rama cuando se llega a un nodo existente o a un nodo bloqueado (marcado que no habilita ninguna transición).

C. Conceptos básicos de Modelado.

A continuación se ilustran algunas estructuras de redes de Petri para controlar la ejecución de eventos, ver figura 1.



III. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.

En esta sección se presenta el sistema industrial a controlador de forma jerárquica, así como la agrupación de sensores y actuadores de acuerdo a la funcionalidad de cada uno de ellos.

La planta a controlar es un sistema de lubricación el cual está formado por, un tanque de aceite de lubricación, bomba principal (BMB1) y su contacto auxiliar (SW1), bomba secundaria (BMB2) y su contacto auxiliar (SW2), un Aero-enfriador que incluye un motor (M1) y un contacto auxiliar (SW3) y válvula enfriamiento (S1), además se tiene sensores de nivel de aceite de tanque (LT1), presión de aceite de lubricación (PT1) y temperatura de aceite (TT1), el diagrama DTI, se presenta en la figura 2.

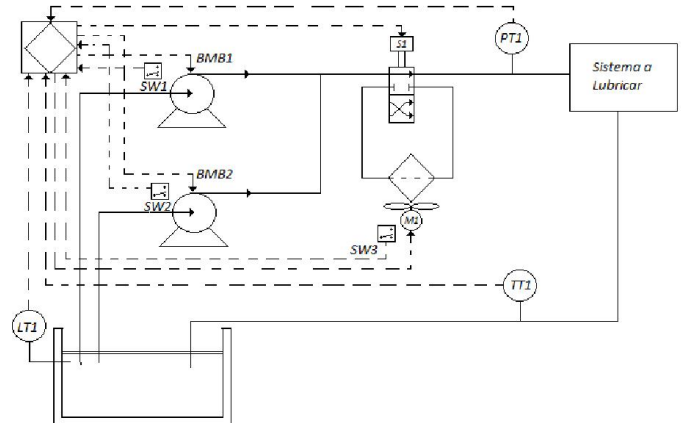


Figura 2. Sistema de Lubricación.

Las especificaciones de los elementos a controlar se presentan a continuación.

BMB1 y SW1:

- La bomba sólo se podrá encender si no tiene falla presente y el contacto auxiliar indica que está desenergizada.
- Se considera falla si se enciende la bomba, el contacto auxiliar indica desenergizada y se supera un tiempo σ_1 (debido a retardos por componentes electromecánicos) y se debe apagar la bomba.
- Sólo se podrá limpiar la falla si el operador indica limpiar falla.

BMB2 y SW2: Son las mismas que para BMB1 y SW1, al igual que el tiempo σ_1 .

M1, SW3 y S1 (enfriamiento):

- La válvula de enfriamiento, sólo se podrá encender si no tiene falla presente.
- Encendida la válvula se debe encender inmediatamente el motor del Aero-enfriador.
- Se considera falla si, el motor se enciende y su contacto auxiliar indica desenergizado y se supera un tiempo σ_2 y se debe apagar motor y apagar válvula de enfriamiento.

BMB1, BMB2, LTI, PT1 (subsistema de bombeo):

- La BMB1 sólo se podrá encender sí, el nivel del tanque del tiene un nivel normal y la presión es baja.
- La BMB1 se debe apagar sí; ocurre un fallo en la bomba o el nivel de aceite bajo o se alcanzó una presión muy alta.
- La BMB2 se puede encender sí; el tanque tiene un nivel normal, la presión es baja, la BMB1 está funcionando y se supera un tiempo σ_3 o cuando la BMB1 falla.
- La BMB2 se debe apagar sí; ocurre un fallo en la bomba o nivel de aceite es bajo opresión está muy alta, o alta.
- Si la presión es alta, sólo debe permanecer encendida la bomba BMB1.
- Se considera falla si no existe el nivel de aceite para operar las bombas, o fallan ambas bombas, o si se alcanza una muy alta presión, o cuando no se alcanza la presión normal después de un tiempo σ_4 .

M1, SW3, S1, TTI (Subsistema enfriamiento):

- Se encenderá el sistema de enfriamiento sí; la temperatura es alta y si el sistema de enfriamiento no tiene falla.
- Se debe apagar el sistema de enfriamiento, si éste falla, o la temperatura es normal.
- Se considera falla sí; el enfriamiento falla, o si se alcanza una temperatura muy alta.

Planta:

- Los subsistemas de enfriamiento y de bombeo, deben encender al mismo tiempo, y se deben detener ambos sí ocurre una falla en alguno de ellos. La única condición en la que no se debe parar el sistema es si la bomba BMB1 tiene falla, ya que BMB2 puede mantener el sistema.

IV. DESARROLLO DEL CONTROLADOR.

En ésta sección se realizarán los controladores y se clasificaran por sus niveles jerárquicos, en la figura 3, se presenta un diagrama general del controlador.

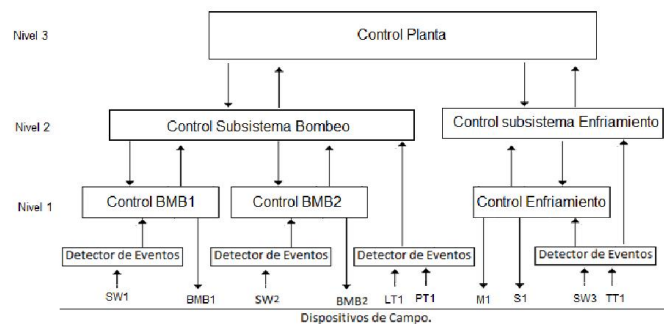


Figura 3. Controlador.

A. Control BMB1.

El primer paso es modelar en RP cada componente, y declarar sus lugares y transiciones, los elementos son; BMB1, SW1 y Estado (falla/ok), ver figura 4.

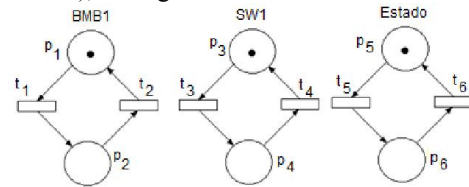


Figura 4. Modelo de elementos.

Dónde: p_1 es BMB1 apagada, p_2 BMB1 encendida, p_3 bomba desenergizada, p_4 bomba energizada, p_5 controlador BMB1 ok, p_6 controlador BMB1 en falla, y las transiciones t_1 encender BMB1, t_2 apagar BMB1, t_3 energizando BMB1, t_4 desenergizando BMB1, t_5 evento de falla y t_6 evento recuperar falla. La síntesis del controlador se presenta en la figura 5.

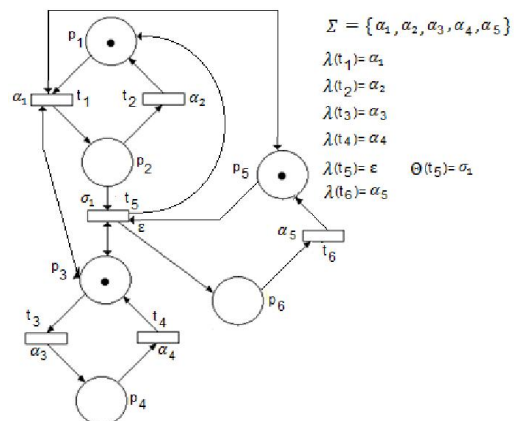


Figura 5. Controlador BMB1 en RPI.

La transición t_5 es una transición interna una vez habilitada y superado el tiempo asignado, se dispara. La determinación del mapa de salida φ se realiza identificando los lugares que activan los actuadores de campo, $\varphi(1, \cdot) = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ para la activación de BMB1, obteniendo el árbol de alcanzabilidad.

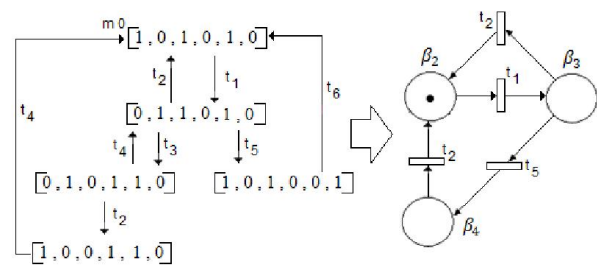


Figura 6. Árbol de alcanzabilidad y máquina de estados.

El alfabeto de salida es el conjunto $\Sigma_o = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4\}$, φ y su relación se muestra en la figura 7).

$$y_k = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * M_k \Rightarrow \begin{cases} y_k(1) = 1 \rightarrow \beta_1 \\ y_k(2) = 3 \rightarrow \beta_2 \\ y_k(3) = 2 \rightarrow \beta_3 \\ y_k(4) = 3 \rightarrow \beta_4 \end{cases}$$

Figura 7. Mapa de salida y su alfabeto.

El lenguaje de salida del Control BMB1 debe estar incluido en el lenguaje de entrada de Control de Subsistema de Bombeo; La máquina de estados de la figura 6, se utilizará como recurso en el controlador jerárquico.

B. Control BMB2.

El controlador de la bomba BMB2 tiene las mismas especificaciones que el Control BMB1, la diferencia son los lenguajes de entrada y salida, los cuales son; $\lambda(t_1) = \alpha_6$, $\lambda(t_2) = \alpha_7$, $\lambda(t_3) = \alpha_8$, $\lambda(t_4) = \alpha_9$, $\lambda(t_5) = \varepsilon$ y $\lambda(t_6) = \alpha_{10}$. El lenguaje de salida $\lambda_0(y_k(1)) = \beta_5$, $\lambda_0(y_k(2)) = \beta_6$, $\lambda_0(y_k(3)) = \beta_7$ y $\lambda_0(y_k(4)) = \beta_8$.

C. Control Enfriamiento.

Los elementos del control de enfriamiento son análogos a los de las bombas, pero se agrega un elemento, la válvula de enfriamiento. Utilizando las especificaciones de la sección III. La síntesis del controlador se presenta en la figura 8.

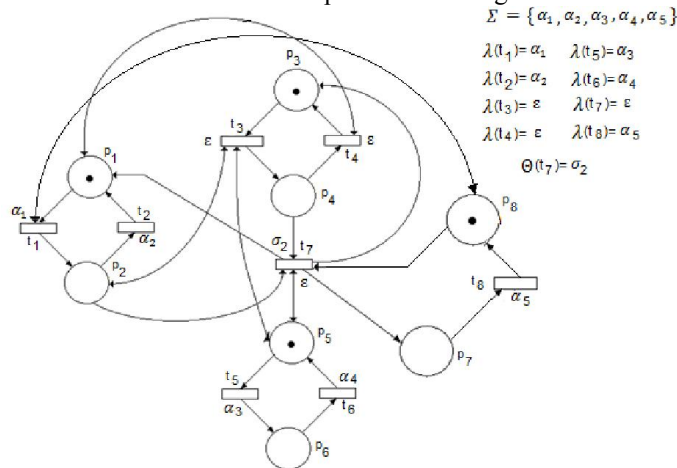


Figura 8. Controlador Enfriamiento en RPI.

Dónde: p_1 es S1 cerrada, p_2 es S1 abierta, p_3 motor M1 apagador, p_4 motor M1 encendido, p_5 motor M1 no energizado, p_6 motor M1 energizado, p_7 falla enfriamiento, p_8 enfriamiento en ok, y las transiciones: t_1 abrir S1, t_2 cerrar S1, t_3 encender M1, t_4 apagar M1, t_5 energizando M1, t_6 desenergizando M1, t_7 detectando falla, t_8 reconociendo falla.

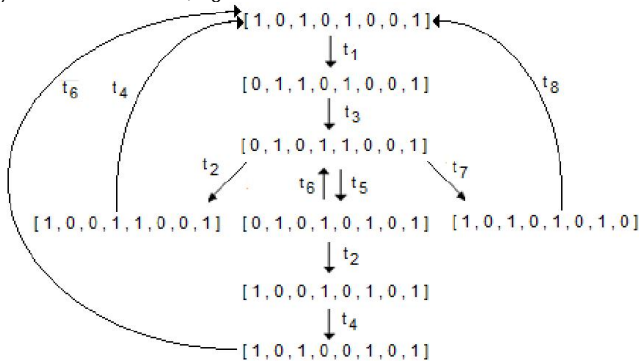


Figura 9. Grafo de alcanzabilidad.

Teniendo las secuencias implícitas: t_3, t_4 y $t_2 t_4 t_6$, el grafo se puede reducir al mostrado en la figura 10.

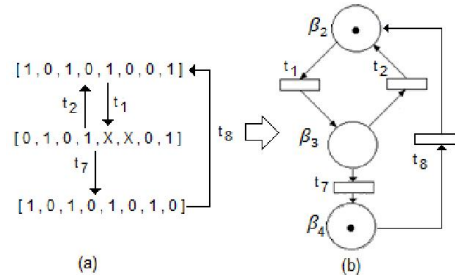


Figura 10. Máquina de estados control enfriamiento.

Donde el mapa de salida tiene los vectores renglón y su mapea: $\varphi(1, \cdot) = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ mapea $y_k(1) = 1 \rightarrow \beta_1$, $\varphi(2, \cdot) = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ mapea $y_k(2) = 1 \rightarrow \beta_5$, $\varphi(3, \cdot) = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1]$ mapea $y_k(3) = 4 \rightarrow \beta_2$, $\varphi(4, \cdot) = [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$ mapea $y_k(4) = 3 \rightarrow \beta_3$ y $\varphi(5, \cdot) = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0]$ mapea $y_k(5) = 4 \rightarrow \beta_4$.

D. Control Subsistema de Bombeo.

Para la síntesis del controlador, se dividió en 3 componentes, los cuales son; Bombeo BMB1, Bombeo BMB2, Estado Bombeo, de esta forma se simplifica más el controlador, y sólo se mapea los lugares de falla para el control del siguiente nivel.

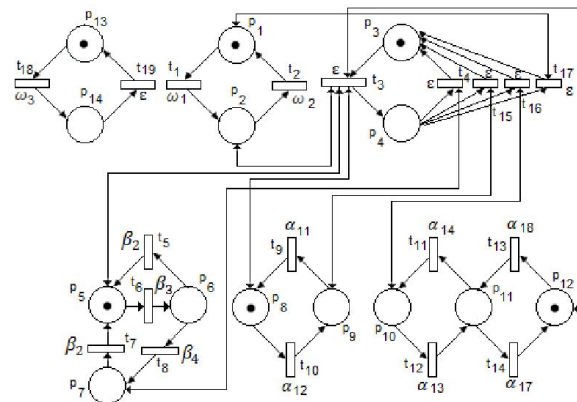


Figura 11. Bombeo BMB1.

Dónde: p_1 bombeo apagado, p_2 bombeo encendido, p_3 Ctrl. BMB1 apagado, p_4 Ctrl. BMB1 encendido, p_5 retroalimentación Ctrl. BMB1 apagado y ok, p_6 retroalimentación Ctrl. BMB1 encendido y ok, p_7 retroalimentación Ctrl. BMB1 apagado y falla, p_8 nivel normal de aceite, p_9 nivel bajo de aceite, p_{10} muy alta presión, p_{11} presión alta o normal, p_{12} presión baja, p_{13} no limpiar fallas, p_{14} limpiar fallas, t_1 encender bombeo, t_2 apagar bombeo, t_3 encender BMB1, t_4 apagar BMB1 por falla, t_5 retro apagando Ctrl. BMB1, t_6 retro encendiendo Ctrl. BMB1, t_7 retro limpiando falla Ctrl. BMB1, t_8 retro apagando BMB1 por falla, t_9 evento nivel aceite bajo a normal, t_{10} evento nivel aceite normal a bajo, t_{11} evento alta a muy alta presión, t_{12} evento muy alta a alta presión, t_{13} evento baja a presión normal, t_{14} evento presión normal a baja, t_{15} apagar Ctrl. BMB1 por bajo nivel aceite, t_{16} apagar Ctrl. BMB1 por alta presión, t_{17} apagar Ctrl. BMB1, t_{18} evento limpiar fallas Ctrl. BMB1, t_{19} evento interno. El mapa de salida sólo comprende las entradas a Ctrl. BMB1.

$$\begin{aligned} \varphi(1,\cdot) &= [0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ \dots\ 0] \text{ Mapea } y_k(1) = 1 \rightarrow \alpha_1. \\ \varphi(2,\cdot) &= [0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ \dots\ 0] \text{ Mapea } y_k(2) = 1 \rightarrow \alpha_2. \\ \varphi(3,\cdot) &= [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ \dots\ 1] \text{ Mapea } y_k(3) = 1 \rightarrow \alpha_5. \end{aligned}$$

El componente Bombeo BMB2, de acuerdo a las especificaciones debe contemplar además la retroalimentación de Ctrl. BMB1, se presenta en la figura 12.

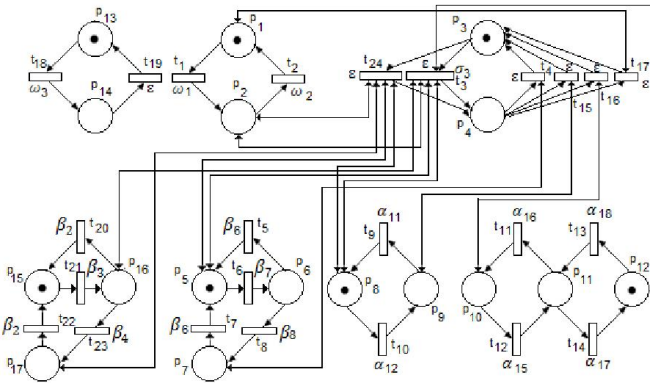


Figura 12. Bombeo BMB2

Dónde: p_1 bombeo apagado, p_2 bombeo encendido, p_3 Ctrl. BMB2 apagado, p_4 Ctrl. BMB2 encendido, p_5 retroalimentación. Ctrl. BMB2 apagado y ok, p_6 retroalimentación Ctrl. BMB2 encendido y ok, p_7 retroalimentación Ctrl. BMB2 apagado y falla, p_8 nivel normal de aceite, p_9 nivel bajo de aceite, p_{10} alta presión, p_{11} presión normal, p_{12} presión baja, p_{13} no limpiar fallas, p_{14} limpiar fallas, p_{15} retroalimentación. Ctrl. BMB1 apagado y ok, p_{16} retroalimentación Ctrl. BMB1 encendido y ok, p_{17} retroalimentación Ctrl. BMB2 apagado y falla, t_1 encender bombeo, t_2 apagar bombeo, t_3 encender Ctrl. BMB2 (Nivel aceite normal, BMB1 encendida, presión baja y tiempo σ_3 superado), t_4 apagar Ctrl. BMB2 por falla, t_5 retro apagando Ctrl. BMB2, t_6 retro encendiendo Ctrl. BMB2, t_7 retro limpiando falla Ctrl. BMB2, t_8 retro apagando BMB2 por falla, t_9 evento nivel aceite bajo a normal, t_{10} evento nivel aceite normal a bajo, t_{11} evento normal a alta presión, t_{12} evento alta a presión normal, t_{13} evento baja a presión normal, t_{14} evento presión normal a baja, t_{15} apagar Ctrl. BMB2 por bajo nivel aceite, t_{16} apagar Ctrl. BMB2 por alta presión, t_{17} apagar Ctrl. BMB2 por bombeo apagado, t_{18} evento limpiar fallas Ctrl. BMB2, t_{19} evento interno, t_{20} retro. apagando Ctrl. BMB1, t_{21} retro encendiendo Ctrl. BMB1, t_{22} retro limpiando falla Ctrl. BMB1, t_{23} retro apagando BMB1 por falla, t_{24} encender Ctrl. BMB2 (Fallo de Ctrl. BMB1 y nivel aceite normal). El mapa de salida sólo comprende las entradas a Ctrl. BMB2.

$$\begin{aligned} \varphi(1,\cdot) &= [0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ \dots\ 0] \text{ Mapea } y_k(1) = 1 \rightarrow \alpha_6. \\ \varphi(2,\cdot) &= [0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ \dots\ 0] \text{ Mapea } y_k(2) = 1 \rightarrow \alpha_7. \\ \varphi(3,\cdot) &= [0\ 0\ 0\ \dots\ 1_{13}\ \dots\ 0] \text{ Mapea } y_k(3) = 1 \rightarrow \alpha_{10}. \end{aligned}$$

El componente de Estado Bombeo, se encarga de notificar el estado del controlador, al nivel superior, basándose en las retroalimentaciones de los controladores de bajo nivel y de los sensores, ver figura 13.

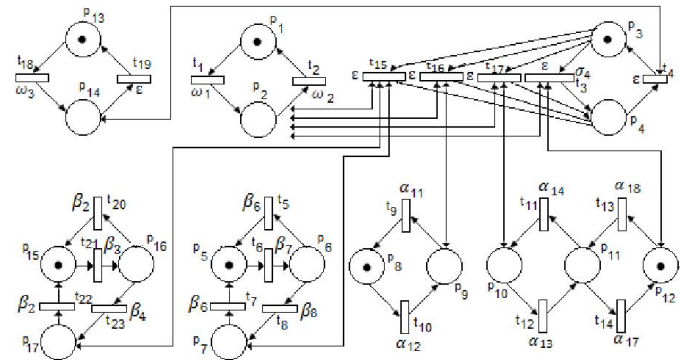


Figura 13. Estado Bombeo

La descripción de estados y transiciones son las mismas que las de la figura 12; exceptuando; p_3 Ctrl. Subsistema bombeo ok, p_4 Ctrl. Subsistema bombeo en falla, p_{10} presión muy alta, p_{11} presión alta o normal, t_{11} evento presión alta a muy alta, t_{12} evento presión muy alta a alta, p_{15} evento de falla por Ctrl. BMB1 y BMB2 en falla, p_{16} evento de falla por bajo nivel de aceite, p_{17} evento de falla por muy alta presión, p_4 evento de falla por no alcanzar la presión normal y superado un tiempo de espera σ_4 . El mapa de salidas, se presenta a continuación;

$$\begin{aligned} \varphi(1,\cdot) &= [0\ 0\ 1\ 0\ \dots\ 0] \text{ Mapea } y_k(1) = 1 \rightarrow \rho_1. \\ \varphi(2,\cdot) &= [0\ 0\ 0\ 1\ \dots\ 0] \text{ Mapea } y_k(2) = 1 \rightarrow \rho_2. \end{aligned}$$

E. Control Subsistema de Enfriamiento.

El controlador del subsistema de enfriamiento, se desarrolla en un solo componente, ver figura 14.

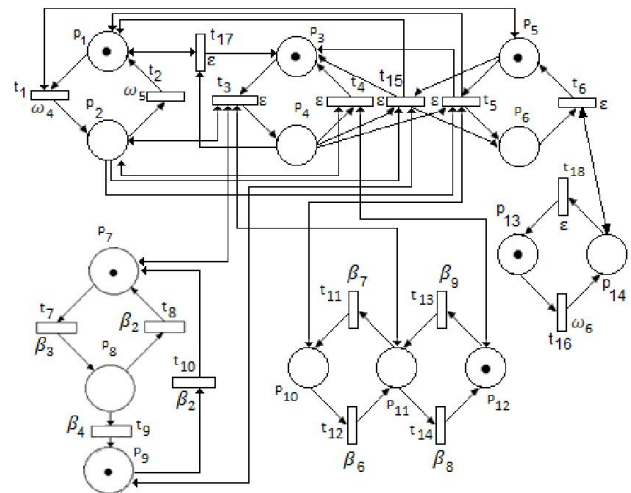


Figura 14 Subsistema enfriamiento.

Donde se definen las transiciones y estados como; p_1 subsistema apagado, p_2 subsistema encendido, p_3 enfriamiento apagado, p_4 enfriamiento encendido, p_5 subsistema ok, p_6 subsistema en falla, p_7 retro. Enfriamiento apagado y ok, p_8 retro. Enfriamiento encendido y ok, p_9 retro. Enfriamiento apagado y falla, p_{10} muy alta temperatura, p_{11} temperatura alta, p_{12} temperatura normal, p_{13} no limpiar falla, p_{14} memoria evento limpiar falla, t_1 encender subsistema, t_2 apagar subsistema, t_3 encender enfriamiento por temperatura

alta, t_4 apagar enfriamiento por temperatura normal, t_5 evento falla por alta temperatura, t_6 limpiando falla, t_7 retro. Encendiendo enfriamiento, t_8 retro. Apagando enfriamiento, t_9 retro falla enfriamiento, t_{10} retro limpiar falla, t_{11} evento temperatura alta a muy alta, t_{12} evento temperatura muy alta a alta, t_{13} evento temperatura normal a alta, t_{14} alta a normal, t_{15} falla por retro. Falla en enfriamiento, t_{16} evento reconocer falla, t_{17} apagar enfriamiento si subsistema apagado, t_{18} evento interno limpiar memoria. Realizando el grafo de alcanzabilidad y reduciendo los eventos implícitos tenemos, la siguiente maquina de estados, figura 15.

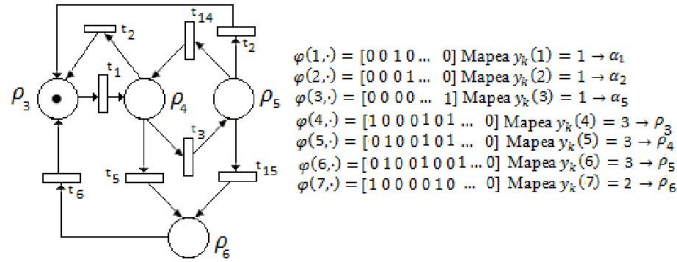


Figura 15. Subsistema enfriamiento.

La máquina de estado de la figura 15, representa los estados donde puede permanecer en el tiempo el sistema (eliminado transiciones implícitas), para fines prácticos es posible simplificarlo más.

F. Control Planta.

Este control, incorpora, las maquinas de estados de los Ctrl. Subsistema bombeo y Ctrl. Subsistema enfriamiento, al igual contiene un alfabeto de entrada, para encender y apagar el control y una señal para limpiar fallas, ver figura 16.

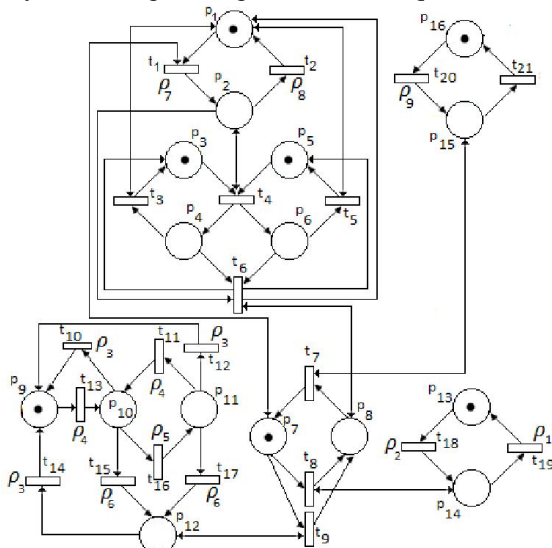


Figura 16. Controlador Planta.

Donde; p_1 Ctrl. Apagado, p_2 Ctrl. Encendido, p_3 Ctrl. Subsistema bombeo apagado, p_4 Ctrl. Subsistema bombeo encendido, p_5 Subsistema enfriamiento apagado, p_6 Subsistema enfriamiento encendido, p_7 Ctrl. Planta Ok, p_8 Ctrl. Planta en falla, del lugar p_9 al p_{12} observan la operación del sistema de enfriamiento, donde p_{12} es el estado de falla, del lugar p_{13} a p_{14} son los lugares de sistema de bombeo y p_{14}

es el lugar de falla, p_{15} limpiar fallas, p_{16} no limpiar fallas, t_1 encender Ctrl. Planta, t_2 apagar Ctrl. Planta, t_3 apagar subsistema bombeo, t_4 encender subsistemas, t_5 apagar subsistema enfriamiento, t_6 falla detectada en algún subsistema, t_7 limpiar falla planta, t_8 falla por subsistema bombeo, t_9 falla por subsistema enfriamiento, de t_{10} a t_{17} son transiciones de retroalimentación del subsistema enfriamiento, t_{18} y t_{19} son retroalimentación del subsistema de bombeo, t_{20} evento limpiar fallas, t_{21} borrado de memoria de limpiar fallas.

El mapa de salida para los controladores inferiores es:
 $\varphi(1,:) = [0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ \dots\ 0]$ Mapea $y_k(1) = 1 \rightarrow \omega_1$.
 $\varphi(2,:) = [0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ \dots\ 0]$ Mapea $y_k(2) = 1 \rightarrow \omega_2$.
 $\varphi(3,:) = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ \dots\ 1_{15}\ 0]$ Mapea $y_k(3) = 1 \rightarrow \omega_3$.
 $\varphi(4,:) = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ \dots\ 0]$ Mapea $y_k(4) = 1 \rightarrow \omega_4$.
 $\varphi(5,:) = [0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ \dots\ 0]$ Mapea $y_k(5) = 1 \rightarrow \omega_5$.
 $\varphi(6,:) = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ \dots\ 1_{15}\ 0]$ Mapea $y_k(6) = 1 \rightarrow \omega_6$.

El control planta, recibe de un nivel superior ρ_7 , ρ_8 y ρ_9 , si este controlador fuera aislado, las transiciones asociadas a las entradas de nivel superior se pueden declarar como transiciones implícitas y temporizadas, o un lugar de memoria para contabilizar fallas y una especificación para cantidad de fallas máximas alcanzadas.

V. CONCLUSIONES

Se presenta la aplicación de redes de petri interpretadas al control jerárquico de procesos industriales, donde se ve claramente que los controladores se pueden simplificar de acuerdo a las necesidades de las especificaciones, utilizando el grado de alcanzabilidad.

VI. AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo de la corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V., CIATEQ (campus Querétaro) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado.

VII. REFERENCIAS

- [1] Michal Doligalski and Marian Adamski, Exceptions handling in hierarchical Petri net based specification for logic controllers, *International Conference on Systems Engineering*, 2011.
- [2] Gen-ichi Yasuda, Bin Ge, Petri Net Model Based Specification and Distributed Control of Robotic Manufacturing Systems. *International Conference on Information and Automation*, 2010.
- [3] Zhang Qiqian, Zhou Guomin, Si jin. A Robot Architecture Validating Method with Agent Oriented Hierarchical Petri Net. *International Conference on Automation and Logistics*, 2008.
- [4] Marek Wergzyn, Marian Adamski, Hierarchical Approach for Design of Application Specific Logic Controller, *ISIE99 - Bled*, Slovenia, 1999 IEEE.