METODOLOGÍA PARA LA SOLUCIÓN DE SUPERVISIÓN DE UNA CÉLULA DE ENSAMBLAJE CON BASE EN LA TÉCNICA DE LUGARES INVARIANTES.

Methodologies for solution of supervision of an assembly cell based in the place invariant technique

MAURICIO HOLGUÍN LONDOÑO
Magister en Ingeniería Eléctrica
Ingeniero Electricista,
Profesor Transitorio
Universidad Tecnológica de Pereira
ma_hol@ohm.utp.edu.co

DIEGO FERNANDO CARMONA S.
Estudiante Ingeniería Eléctrica.
Universidad Tecnológica de Pereira
diegofcarmona@gmail.com

NATHALIA CARMONA Z.
Estudiante Ingeniería Eléctrica.
Universidad Tecnológica de Pereira
natycar60@hotmail.com

RESUMEN
Se presenta y resalta la importancia de la supervisión sobre los comportamientos de sistemas de eventos discretos y se muestra una metodología para la realización de la supervisión con base en la teoría de lugares invariantes de las redes de Petri. La supervisión se realiza para asegurar el comportamiento del sistema con base en la observación de diferentes estados que alcanza el mismo y con el fin de cumplir ciertas restricciones impuestas. La teoría de lugares invariantes, plantea el manejo de las restricciones a través de desigualdades lineales y permite rediseñar sistemas con base en un modelo previo sin restricciones.

PALABRAS CLAVES: Lugares invariantes, Redes de Petri, Sistemas discretos, Supervisión.

ABSTRACT
It is presented and emphasizing the importance of supervision on the behavior of discrete event systems and a methodology for conducting monitoring based on the theory of invariant sites of Petri nets. The monitoring is done to ensure the system's behaviour based on observation of different states it reaches and in order to verify certain constrains. The theory of invariant places establishes the management of restrictions through linear inequalities and permit redesign systems based on a previous model without restrictions.

KEYWORDS: *Discreet systems, Petri nets, Places Invariants, Supervision*.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el sector productivo posee una inmensa necesidad de desarrollar e implementar actividades programadas que permitan convertir el trabajo en acciones automáticas y que lleven a la industria a mejores rangos de competitividad, pero el crecimiento en la complejidad de los sistemas industriales y el afán por reducir tiempo en diseño y costos de planteamiento, exige herramientas de diseño y verificación en varios niveles de aplicación.

Es aquí en donde se encuentra un nuevo campo de estudio en busca de nuevas técnicas que hagan posible los rediseños y que sean verificables. Los Lugares Invariantes en las redes de Petri, permiten realizar rediseños de modelos existentes a través de un supervisor de red, con el objetivo de garantizar la compatibilidad entre un comportamiento antiguo del sistema y nuevas especificaciones restrictivas, sin necesidad de rediseñar [1, 2, 3].

La supervisión de una red, en nuestro contexto, es aplicada a un sistema de eventos discretos (SED) a ser controlado y consiste en restringir el grupo de entradas que pueden ser aplicadas al sistema; esta restricción se realiza dinámicamente basándose en la observación del funcionamiento de dicho sistema y plantea el manejo de dichas restricciones a través de desigualdades lineales en términos del vector de marcado en la forma:

$$L\mu_P \leq b$$

La función de la supervisión radica en observar la secuencia del vector de marcado y distinguir las restricciones a cumplir, teniendo presente que no siempre se cuenta con esta información o que el sistema presenta eventos que no se pueden controlar, siendo una excepción el marcado inicial [4, 5].

2. CONTENIDO

2.1. REDES DE PETRI

Las Redes de Petri son una metodología para el modelado y el estudio de diversos sistemas, ya que a diferencia de otros modelos gráficos de comportamiento dinámico, son una herramienta matemática que admite una representación gráfica que facilita el análisis y las modificaciones locales del modelo; permitiendo la representación clara y condensada del paralelismo y la

Fecha de Recepción: 15 de Septiembre de 2009.
Fecha de Aceptación: 22 de Noviembre de 2009

sincronización, llevando el modelo a condiciones límite, las cuales en un modelo real serían difíciles de lograr o con alto costo de implementación.

Una Red de Petri puede ser denotada como la cuádrupla [6, 7]

$$R=\left\{P,T,D^{-},D^{+}\right\} \tag{2.1}$$

Siendo:
P : grupo de lugares de la red
T : grupo de transiciones de la red
D^{-} : matriz de incidencia previa
D^{+} : matriz de incidencia posterior. Además $D=D^{+}-D^{-}$ matriz de incidencia para redes puras

2.2. SUPERVISIÓN DE REDES DE PETRI CON BASE EN LUGARES INVARIANTES

Con esta técnica se busca realizar un rediseño del modelo actual del sistema; el nuevo modelo tiene como objetivo cumplir con las restricciones deseadas. Este objetivo se alcanza adicionando una subred de supervisión a la red original, la cual inhabilita el disparo de algunas transiciones para que la red no alcance un estado que pueda violar alguna de las restricciones. Para la descripción del método se realiza previamente las siguientes definiciones [5, 8]:

Matriz de incidencia de la red a supervisar: representa la topología original y se representa por $D_P \in ¢^{\,n \text{ x } m}$.

Marcado inicial red a supervisar: vector que representa el estado inicial de la red original y se nota $\mu_{P0} \in ¢^{\,n}$.

Conjunto de restricciones a cumplir: nuevas condiciones a cumplir y en términos del vector de marcado.

$$L\mu_P \le b \tag{2.2}$$

Donde:
$\mu_P \in ¢^{\,n}$: vector de marcado de la red a supervisar.
$L \in ¢^{\,n_C \text{ x } n}$: matriz de restricciones a cumplir.
$b \in ¢^{\,n_C}$: matriz constante de las restricciones.

Matriz de incidencia del supervisor: representa la conexión que tendrán los lugares del supervisor con las transiciones de la red original.

$$D_C=-LD_P \in ¢^{\,n_C \text{ x } m} \tag{2.3}$$

Marcado inicial del supervisor: vector que representa el estado inicial del supervisor conectado a la red original.

$$\mu_{C0}=b-L\mu_{P0} \in ¢^{\,n_C} \tag{2.4}$$

Matriz de incidencia de la red supervisada: representa la topología de la nueva red al conectar el supervisor.

$$D=\begin{bmatrix} D_P \\ D_C \end{bmatrix} \in ¢^{\,(n+n_C) \text{ x } m} \tag{2.5}$$

Marcado inicial de la red supervisada: vector que representa el estado inicial de la nueva red.

$$\mu_0=\begin{bmatrix} \mu_{P0} \\ \mu_{C0} \end{bmatrix} \in ¢^{\,n+n_C} \tag{2.6}$$

De acuerdo a la evolución del marcado en la Red de Petri, el supervisor inhabilita las transiciones en el momento cuando su disparo genera un estado que no cumple con las exigencias propuestas. Dentro de la teoría de lugares invariantes existen dos tipos de supervisión que difieren principalmente según el tipo de controlabilidad y observabilidad del sistema.

2.3. RED DE PETRI TOTALMENTE CONTROLABLE Y OBSERVABLE

En este tipo de redes el supervisor busca cumplir con un grupo de restricciones lineales, e impidiendo que la red obtenga un marcado que no se pueda satisfacer.

El grupo de restricciones a cumplir son de la forma (1.2)

$$L\mu_P \le b$$

Los componentes del supervisor se obtienen de (1.3, 1.4).

$$D_C=-LD_P \qquad\qquad \mu_{C0}=b-L\mu_{P0}$$

Al cumplir con las restricciones anteriores se obtiene la supervisión menos restrictiva dando como resultado una red supervisada que se caracteriza por (1.5 y 1.6)

2.4. RESTRICCIONES ADMISIBLES O INADMISIBLES

Una transición en una Red de Petri es incontrolable si el supervisor no tiene la capacidad de inhibirla directamente, y es inobservable si no da a los supervisores la capacidad de descubrir la secuencia de disparo directamente, estas transiciones se deben a eventos en el sistema que son incontrolables e inobservables, respectivamente. De ello se define:

Matriz conformada por las columnas de la matriz de incidencia de la red original, que corresponden a las transiciones incontrolables de la red:

$$D_{uc} \in ¢^{n \times m_{uc}}$$

Matriz compuesta por las columnas de la matriz de incidencia de la red origina, que corresponden a las transiciones inobservables de la red.

$$D_{uo} \in ¢^{n \times m_{uo}}$$

Al considerar un conjunto de restricciones, la red supervisora debe asegurar que todas las restricciones en ningún momento serán violadas ya sea directamente o por el disparo de transiciones incontrolables o inobservables, por lo tanto algunas restricciones deben ser transformadas para que la nueva aplique tanto para la incontrolabilidad como para la inobservabilidad de la red.

Un marcado μ_P se considera admisible con posibles transiciones incontrolables o inobservables, sólo si [5] el marcado satisface (1.1) para todo μ'_P tal que $\mu_P \xrightarrow{t_j} \mu'_P$, donde t_j es una transición incontrolable o inobservable:

$$L\mu'_P \leq b \tag{2.7}$$

En el caso que una de las condiciones anteriores no se cumpla, el marcado es inadmisible para la red.

Un conjunto de restricciones $L\mu_P \leq b$, se considera admisible con posibles transiciones incontrolables o inobservables, sólo si cumple [5] que el marcado inicial de la red a supervisar satisface:

$$L\mu_{P0} \leq b \tag{2.8}$$

para todo $\mu_{P(k)}$ tal que $\mu_{P(k)}$ es un marcado admisible y $\mu_{P(0)} \xrightarrow{\sigma} \mu_{P(k)}$:

$$L\mu_{P(i)} \leq b, \text{ donde } 1 \leq i \leq k \tag{2.9}$$

En el caso en que una de las condiciones anteriores no se cumpla, el conjunto de restricciones es inadmisible para la red. Un vector de restricciones $l\mu_P \leq b$, se considera admisible con posibles transiciones incontrolables o inobservables, sólo si cumple [5]:

- Para la matriz de transiciones incontrolables:

$$lD_{uc} \leq 0 \tag{2.10}$$

- Para la matriz de transiciones inobservables:

$$lD_{u0} = 0 \tag{2.11}$$

Cuando se cumplen las dos condiciones anteriores se garantiza que los lugares del supervisor no tendrán arcos dirigidos a las transiciones incontrolables ni a las transiciones inobservables de la red.

En el caso que una de las dos condiciones anteriores no se cumpla, el vector de restricciones $l\mu_P \leq b$ es inadmisible para la red, por lo cual debe ser transformado en una restricción admisible obteniendo un nuevo conjunto de restricciones de la forma:

$$l'\mu_P \leq b' \tag{2.12}$$

Las definiciones anteriores son expresadas con desigualdades individuales ya que cada desigualdad de $L\mu_P \leq b$ puede ser manejada de forma separada, por lo tanto ciertas restricciones pueden ser admisibles mientras que otras pueden ser inadmisibles.

2.5. RED DE PETRI PARCIALMENTE CONTROLABLE Y OBSERVABLE

En este tipo de redes se tienen m_{uc} transiciones incontrolables y m_{uo} transiciones inobservables, por lo el supervisor busca cumplir con un grupo de restricciones lineales n_c, enfocándose en impedir que la red obtenga un marcado que no se pueda satisfacer [8].

El grupo de restricciones a cumplir son de la forma (1.2). Para manejar las transiciones incontrolables e inobservables, es necesario asegurar que ningún lugar de la red supervisora intente inhibir una transición incontrolable de la red a supervisar, y que el marcado de los lugares del supervisor no sea afectado por el disparo de transiciones inobservables de la red a supervisar. Para esto el conjunto de restricciones debe ser admisible y cumplir con las dos siguientes condiciones:

$$LD_{uc} \leq 0 \qquad LD_{u0} = 0 \tag{2.13}$$

Si las dos condiciones se cumplen, el conjunto de restricciones es admisible y el supervisor se puede calcular con (1.3) y (1.4)

Si alguna de las dos condiciones no se cumple, el conjunto de restricciones es inadmisible y se debe transformar el conjunto de restricciones a uno admisible:

$$L'\mu_P \leq b' \qquad (2.14)$$

Siendo: $L' = R_1 + R_2 L$ y $b' = R_2\left(b+1\right)-1$ (2.15)

Donde: $R_1 \in \text{¢}^{\,n_C \text{ x } n}$ y $R_2 \in \text{¢}^{\,n_C \text{ x } n_C}$

Las componentes del supervisor y de la red supervisada son:

$$D_C = -L'D_P \qquad \mu_{C0} = b' - L'\mu_{P0} \qquad (2.16)$$

Las restricciones inadmisibles se transforman de la siguiente forma: sea R_1 tal que $R_1\mu_P \geq 0 \; \forall \mu_P$ y R_2 una matriz diagonal positiva. La restricción $L\mu_P \leq b$ puede ser transformada en (1.14), según (1.14) y (1.15).

Para una Red de Petri con una matriz de incidencia D_P con un conjunto de transiciones incontrolables descritas por D_{uC} y con un conjunto de transiciones inobservables descritas por D_{u0}; se impone un conjunto de restricciones lineales en el marcado de la forma (1.2) [5].

Con $R_1 + R_2 L \neq 0$, se obtiene:

$$\begin{bmatrix} R_1 & R_2 \end{bmatrix} \left[\begin{vmatrix} D_{uc} & D_{u0} & -D_{u0} & \mu_{P0} \\ LD_{uc} & LD_{u0} & -LD_{u0} & L\mu_{P0} - b - 1 \end{vmatrix} \right] \leq \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

(2.17)

En la desigualdad anterior:

- La primera columna indica que:

$$R_1 D_{uc} + R_2 LD_{uc} \leq 0 \qquad L'D_{uc} \leq 0 \qquad (2.18)$$

Lo cual implica que no existen arcos dirigidos hacia las transiciones incontrolables.

- La segunda y tercera columna indica que:

$$R_1 D_{u0} + R_2 LD_{u0} \leq 0$$
$$-R_1 D_{u0} - R_2 LD_{u0} \leq 0 \qquad L'D_{u0} = 0 \qquad (2.19)$$

Lo cual implica que no existen arcos dirigidos hacia las transiciones inobservables.

- La cuarta columna indica que se satisface la condición:

$$R_1\mu_{P0} + R_2\left(L\mu_{P0} - b - 1\right) \leq -1 \qquad (2.20)$$

Lo cual implica que la restricción transformada se cumple para la Red de Petri.

El termino $\begin{bmatrix} R_1 & R_2 \end{bmatrix}$ es un multiplicador de izquierda en la desigualdad, por lo tanto la matriz representa el uso de las filas de D_{uc} para eliminar los elementos positivos de LD_{uc} y el uso de las filas de D_{u0} para llevar a cero los elementos de LD_{u0}; aplicando el método para calcular los lugares invariantes de la red (anulador izquierdo Δ) se encuentran R_1 y R_2.

3. APLICACIÓN EN CELULA DE ENSAMBLAJE

Se tiene en una célula de ensamblaje de motores, en donde cada parte requiere del trabajo de dos robots diferentes. El número de marcas en cada lugar representa el número de robots ocupados en cada una de las actividades descritas a continuación [2]:

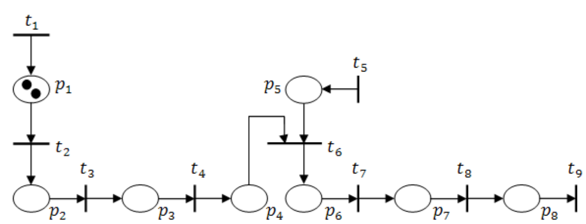

Figura 1. RdP controlable y observable a supervisar.

p_1: Bloque del motor y eje listos a ser procesados

p_2: El robot S alinea el eje.

p_3: El robot S recoge nuevo pistón y lo posiciona

p_4: Bloque motor preparado y listo para robot M-1

p_5: El robot M-1 recoge el pistón de pulimento

p_6: El robot M-1 pule el bloque del motor girando el pistón de pulimiento

p_7: El robot M-1 coloca cerrojo sobre el pistón

p_8: El robot M-2 asegura cerrojo al pistón

Las restricciones consisten en los recursos que presenta la célula de ensamblaje, de la siguiente forma:

Existen tres robots S disponibles
Existen tres robots M-1 disponibles

Existen dos pistones de pulimiento

- La matriz de incidencia de la red es:

$$D_P = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

- El marcado inicial de la red es:

$$\mu_{P0} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

- El conjunto de restricciones es:

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad b = \begin{bmatrix} 3 \\ 3 \\ 2 \end{bmatrix}$$

- La matriz de incidencia del supervisor es:

$$D_c = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- El marcado inicial del supervisor es

$$\mu_{c0} = \begin{bmatrix} 3 \\ 3 \\ 2 \end{bmatrix}$$

- Las características de la red supervisada son:

$$D_P = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mu_0 = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 3 & 2 \end{bmatrix}^T$$

Ahora se asume que M-1 es gobernado por otro controlador, así que las transiciones t_6, t_7 y t_8 son transiciones a las que el supervisor no puede controlar ni puede predecir su disparo, es decir, estas tres transiciones son incontrolables e inobservables.

Las matrices de incidencia de las transiciones incontrolables e inobservables son:

$$D_{uc} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad D_{u0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Se evalúa el conjunto de restricciones:

$$L\,D_{uc} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \leq 0$$

$$L\,D_{u0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \neq 0$$

Cuando el sistema presente sólo transiciones incontrolables el conjunto de restricciones sería admisible, pero para el caso expuesto el conjunto de restricciones es inadmisible, por lo tanto debe ser transformad de acuerdo con (2.17):

- Aplicando anulador izquierdo se obtiene:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \mathrm{M} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \mathrm{M} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & \mathrm{M} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \mathrm{M} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \mathrm{M} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- Las únicas filas que cumplen la desigualdad son:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \mathrm{M} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \mathrm{M} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & \mathrm{M} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3 \end{bmatrix}$$

- Por lo tanto los valores de R_1 y R_2 son:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \qquad R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Los valores del conjunto de restricciones admisibles son:

$$L' = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \qquad b' = \begin{bmatrix} 3 \\ 3 \\ 2 \end{bmatrix}$$

- La matriz de incidencia del supervisor es:

$$D_c = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Vector del marcado inicial del supervisor:

$$\mu_{c0} = \begin{bmatrix} 3 \\ 3 \\ 2 \end{bmatrix}$$

Obteniendo así:

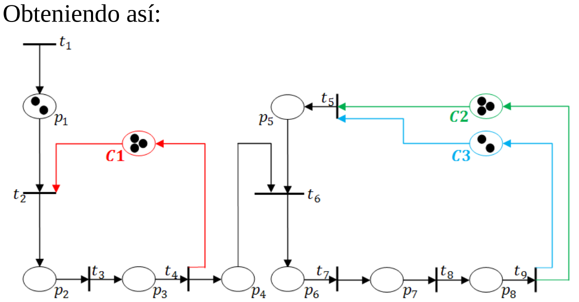

Figura 2. RdP parcialmente controlable y observable supervisada.

En la figura 2 se observa como la restricción impuesta sobre p_2 y p_3 al representar la existencia de tres recursos, o robots, se modela por el nuevo lugar *C1*. Igualmente, como otra de las restricciones es la existencia de tres robots M-1 pero con las transiciones t_6, t_7 y t_8 incontrolables e inobservables, el lugar del controlador *C2* modelan dicha restricción. Finalmente el lugar *C3* modela la restricción relacionada con la existencia de dos pistones de pulimiento.

3. CONCLUSIONES

La supervisión de la conducta de sistemas discretos se realiza con el fin de buscar siempre el cumplimiento de los criterios y asegurar que el comportamiento del sistema no viole una serie de limitaciones y pueda llegar a su estado final. Se presentaron métodos para la construcción de redes de Petri supervisadas, las cuales difieren en las características de la red, que tiene como base la observación de los comportamientos deseados de la planta.

La red supervisada consiste en la red de Petri original más un grupo de lugares y otro de transiciones invariantes donde su tamaño es proporcional al número de limitaciones. Donde el tipo de restricciones se identifican con base en la admisibilidad de las mismas.

Las características del supervisor dependen del tipo de controlabilidad y observabilidad del sistema. Sin embargo, existe una metodología de representación, análisis y supervisión para cada uno de ellos.

La metodología presentada es capaz de construir una descripción de la información del sistema sin necesidad de su enumeración, lo cual permite supervisar sistemas de gran tamaño. El modelo del supervisor de la red de Petri se adjunta a la red de Petri original y cierra en un único sistema que cumple el conjunto de restricciones propuesto.

4. BIBLIOGRAFÍA

[1] CAPKOVIE, Frantisek. Modelling and control of discrete event dynamic systems. Denmark: Brics, 2000. 61 p. ISSN 0909-0878.

[2] IORDACHE, Marian V., ANTSAKLIS, Panos J. Supervision based on place invariants: A survey. Discrete event Dyn Syst. (2006). P. 451-492.

[3] IORDACHE, Marian V., ANTSAKLIS, Panos J. Supervisory control of concurrent systems: A Petri net structural approach. Berlin: Birkhäuser Boston. ISBN 100-8176-4357-5.

[4] MOODY John. Control of Petri nets using invariants. Notre Dame: Department of Electrical Engineering, University of Notre Dame. 42 p.

[5] MOODY, John O., ANTSAKLIS, Panos J. Petri net supervisors for DES in the presence of uncontrollable and unobservable transitions. Notre Dame: Department of Electrical Engineering, University of Notre. 10 p.

[6] OROZCO, Álvaro Á, GUARNIZO, Cristian, HOLGUÍN, Mauricio. Automatismos Industriales. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2008. 254 p. ISBN 978-958-8272-99-3.

[7] SILVA, Manuel. Las redes de Petri: En la automática y la informática. Sevilla: Editorial AC. 1985.

[8] YAMALIDOU, Katerina, MOODY John, LEMMON, Michael, ANTSAKLIS Panos. Feedback control of Petri nets based on place invariants. Notre Dame: Department of Electrical Engineering University of Notre Dame, 1994. 33 p. NSF 92-16559, IRI 91-09298.