Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería. Vol. 14,2, 127-144(1998)

ANÁLISIS DE REDES DE PETRI MEDIANTE SU ÁRBOL DE COBERTURA

A. RECUERO*
M. ÁLVAREZ**
M. CALDERÓN**
e
I. MORENO**

* *Instituto Eduardo Torroja - CSIC*
Serrano Galvache, s/n, 28033 Madrid, España
Tel.: + 34-91-302 0440 Fax: + 34-91-302 0700

** *Facultad de Informática - UPM*
Campus de Montegancedo, 28660 Boadilla del Monte, Madrid, España
Tel: + 34-91-336 6937, Fax: + 34-91-336 6942

RESUMEN

Las redes de Petri son una herramienta muy importante para el análisis de sistemas dinámicos, que debiera ser conocida por cualquier experto en ciencias de la computación. Dentro del campo de la construcción sus aplicaciones más claras están en la fabricación de materiales y elementos y en el intercambio de mensajes electrónicos entre los distintos participantes en el proceso constructivo.

En este trabajo se presenta una sucinta descripciónde las redes de Petri, y se muestra su aplicación al intercambio de mensajes.

ANALYSIS OF PETRI NETS USING COVERAGE TREE

SUMMARY

Petri nets is a very important tool for the analysis of dynamic systems. It should be known by all experts in Computational Science. Their most important applications in building are in fabrication processes and in the exchange of electronic messages among the different participants in the building process.

In this work, a brief description of Petri nets is presented, and their application to message interchange is shown.

Recibido: Agosto 1996

 ISSN 0213-1315

REDES DE PETRI

Las redes de Petri se han desarrollado a partir de los trabajos de Carl Adam Petri en su tesis doctoral "Kommunikation mit Automaten"[1], presentada en 1992. En ella formulaba las bases de una teoría de comunicación entre componentes asíncronos de un sistema informático, en la que prestaba especial atención a la descripción de relaciones causales entre sucesos. Desde este momento, la teoría de la redes de Petri ha tenido un desarrollo considerable.

Sin embargo, la mayor parte de estos desarrrollos sólo están disponibles en forma de informes internos, tesis doctorales, o en presentaciones a congresos, pese a lo cual su uso es cada vez más extendido. De hecho, se considera que es una herramienta que debe ser conocida por cualquier investigador en ciencias de la computación.

Existen libros que abordan el tema de forma organizada y didáctica, Brahms[2], Silva[3], Peterson[4], Reisig[5], etc, así como proceedings de conferencias anuales dedicadas específicamente al tema Jensen[6], Rozenberg[7,8].

Una red de Petri es un grafo orientado en el que intervienen dos clases de nudos, las "plazas" o "lugares" (representadas por circunferencias) y las "transiciones" (representadas por rectángulos o barras), unidos alternativamente por arcos valorados. Cuando todos los arcos son unitarios se dice que la red no es valorada. Un arco une una plaza con una transición y viceversa, pero nunca dos transiciones o dos plazas. Esto constituye la parte estructural o fija de la red.

Una plaza puede contener un número entero positivo o nulo de marcas. Una marca se representa por un punto en el interior del círculo correpondiente a la plaza. El conjunto de marcas asociadas en un instante dado a cada una de las plazas constitutye un marcado de la red. La evolución de estos marcados constituye el funcionamiento de la red, y es lo que permite representar sistemas dinámicos mediante redes de Petri.

Para la descripción funcional de sistemas concurrentes, a las plazas se les asocian acciones o salidas del sistema que se desea modelar. A las transiciones se les asocian los eventos (funciones lógicas de las variables de entrada del sistema) y acciones o salidas.

Las redes de Petri se utilizan con el objeto de modelar el comportamiento dinámico de sistemas discretos. El conjunto de plazas permite representar los estados del sistema y el conjunto de transiciones representan el conjunto de sucesos cuya aparición provoca la modificación de los estados del sistema. Más precisamente: las plazas juegan el papel de variables de estado. De forma figurada, a cada plaza se le asigna el mismo número de marcas que su correspondiente valor entero. Así pues, a un estado del sistema le corresponde un marcado que define el número de marcas asociadas a cada plaza (o contenidas en ella).

A la aparición de un suceso, ligado a condiciones externas a la red, que depende del cumplimiento de unas precondiciones, le correponde el franqueo o disparo de una transición. Estas precondiciones se refieren al número de marcas contenidas en aquellas plazas que están unidas a la transición asociada al suceso considerado. El franqueo de un transición tiene como efecto modificar el marcado: se quitan todas las marcas que han satisfecho la precondición correspondiente a la transición y se añaden marcas a las plazas de salida de la transición. Debe resaltarse que el cumplimiento de la precondición para una transición no implica que esta deba franquearse; es preciso que además se produzca el suceso exterior.

Mediante una red de Petri puede modelarse un sistema de evolución en parelelo compuesto de varios procesos (o agentes) que cooperan para la realización de un objetivo común. En general la presencia de marcas en una plaza se interpreta como la presencia de recursos de un cierto tipo. El franqueo de una transición representa una acción que puede tener lugar cuando esta disponible un número suficiente de recursos, es decir cuando se satisfacen las precondiciones. La acción emplea estos recursos para producir otros que son depositados en las plazas de salida.

Las redes de las Figuras 1 y 2 son un ejemplo sencillo. Pueden interpretarse como se indica a continuación.

En el caso de la Figura 1:

P1 puede ser un director de fábrica, P2 un jefe de producción, P4 un almacén de elementos simples, P5 un alamacén de elementos empaquetados de 4 en 4, y P3 un embarcadero donde se despachan los paquetes de 10 en 10.

Mediante T1, P1 ordena a P2 que actúe, bien fabricando un nuevo elemento (franqueando T3) que deposita en P4 al tiempo que se lo comunica a P1 y queda en espera de órdenes, o bien empaquetando de 4 en 4 los elementos almacenados en P4, siempre que haya suficientes elementos, y almacenando los paquetes en P5 (mediante el franqueo de T4). Cuando haya suficientes paquetes en P5, P1 puede decidir (franquendo T2) hacer un embarque de 10, lo que con la red actual provoca el bloqueo del proceso.

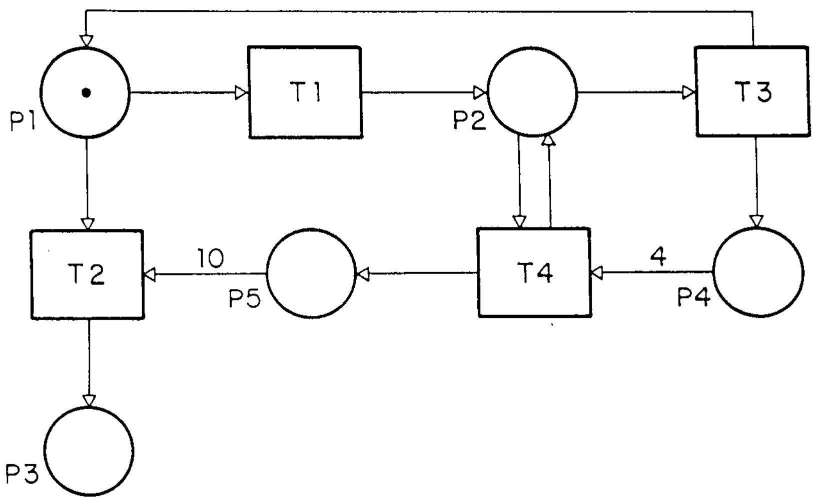


Figura 1

Para el caso de la red de la Figura 2:

P1 es el embarcadero de un alamcén, P2 el lugar donde se procesa el albarán y se examina el inventario, en P3 todas las cintas transportadoras se mueven desde el embarcadero al almacén, en P4 todas las cintas transportadoras se mueven desde el almacén al embarcadero con los productos pedidos y P5 representa el embarcadero donde se cargan los productos.

Mediante T1, un conductor de un camión ordena a P2 que actúe pulsando un botón al llegar al embarcadero. Los productos se trasladan al almacén mediante la cinta transportadora (T3), una vez que se ha entregado el albarán correspondiente (T2). De la misma forma, se transportan los productos que salen desde el almacén y que van a ser distribuidos por camiones a distintos lugares (T4).

Las redes de valoración **1** fueron históricamente las primeras que se introdujeron y las más facilmente realizables. Una red cualquiera puede simularse por una de estas redes y, recíprocamente, cualquier red puede obtenerse por simplificación de una red de valoración **1**. Las redes generales permiten una modelización más natural y más concisa.

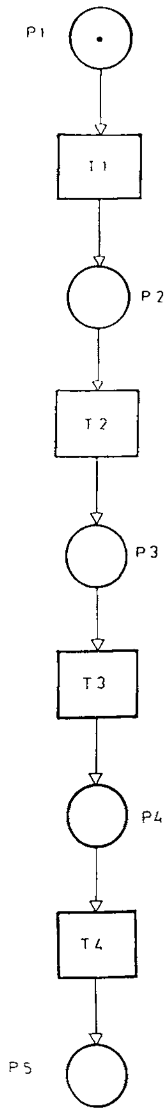


Figura 2

Vemos ahora algunos casos simplificados de interés de redes de Petri.

Una máquina de estados es una red de Petri en la que toda transición está unida exactamente a una plaza de entrada y a una plaza de salida. Las máquinas de estados modelizan de forma adecuada los autómatas de estados finitos en incluso los procesos secuencias. Si una plaza de entrada de un conjunto de transiciones está marcada entonces todas ellas son franqueables. Si el marcado inicial tiene una sola marca ésta se desplaza de plaza en plaza y designa el estado en curso del autómata (en el caso de un programa señala la siguiente instrucción a ejecutar). Si se admiten varias marcas éstas se desplazan de forma completamente independiente (simulando así un conjunto de procesos independientes que tienen el mismo programa). Sin embargo, las máquinas de estados no permiten por sí solas la expresión de sincronizaciones entre procesos. La Figura 3 muestra un ejemplo de máquinas de estados.

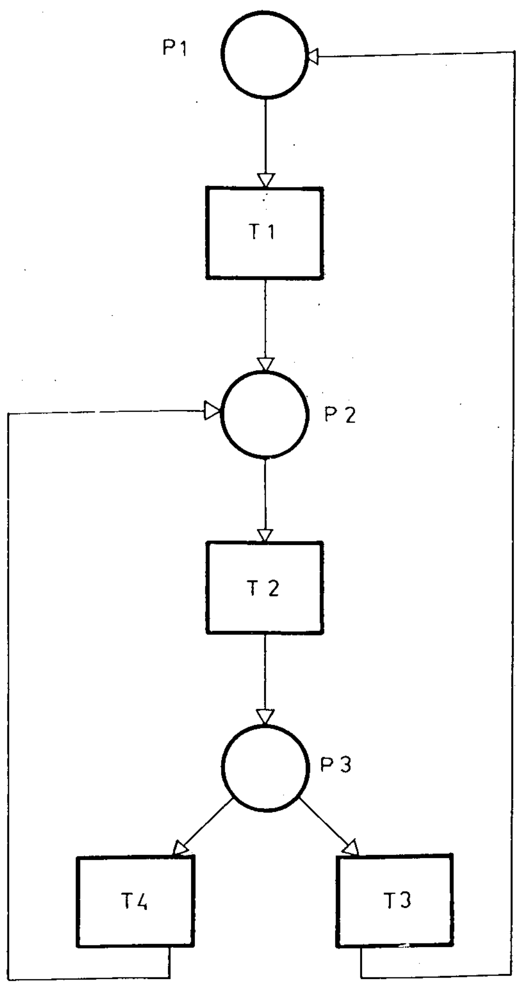


Figura 3

Un grafo de sucesos es una red de Petri en la que toda plaza está unida exactamente a una transición de entrada y a una transición de salida. Los grafos de sucesos modelan de forma adecuada los sistemas de ordenación de tareas. Estas tareas cooperan sin conflicto transmitiéndose resultados. Puede haber reciclaje, Lo que proporciona una mayor generalidad que las redes PERT clásicas. Sin embargo, los grafos de sucesos no permiten modelar ni elecciones ni conflictos de asigancián de recursos entre procesos. La Figura 4 muestra un ejemplo de grafos de sucesos. Se puede interpretar como una red formada por un productor y un consumidor que intercambian mensajes mediante un mensaje de capacidad 5.

Por último, si una red es a la vez una máquina de estados y un grafo de sucesos entonces se reduce a un conjunto de circuitos distintos.

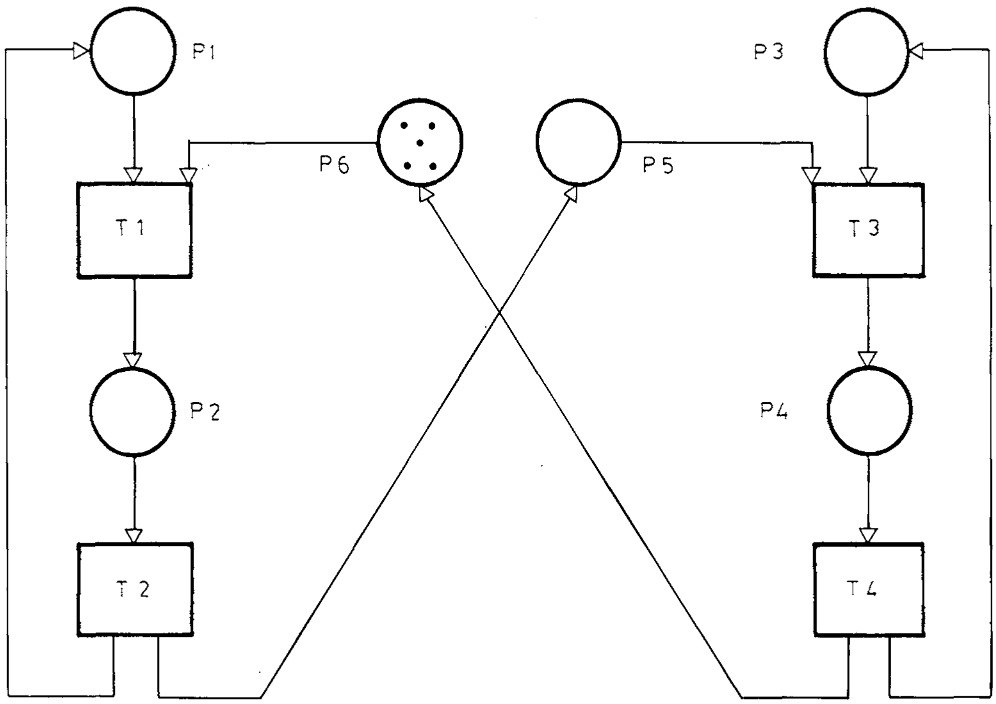


Figura 4

PROPIEDADES DE LAS REDES DE PETRI

En http: //zape.fi.upm.es/~ malvarez se presenta un conjunto de subrutinas, escritas en Qbasic, que permiten el análisis de una red de Petri en función de sus propiedades. Se ha elegido un lenguaje de programación de fácil comprensión, empleando técnicas de programación estructurada, lo que permite su transcripción a otros lenguajes de forma simple. Se ha elegido un esquema de almacenamiento de datos compacto, pues sólo se almacenan los valores significativos, y que resulta muy eficiente a la hora de manejarlos. Mediante el uso de dichas subrutinas, Figura 5,

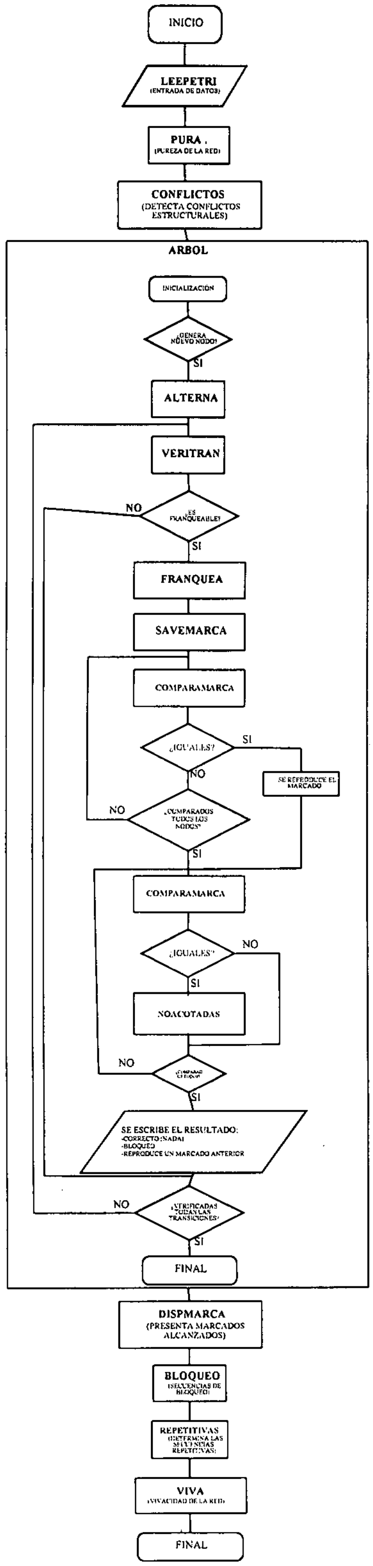

INICIO
LEEPETRI
(ENTRADA DE DATOS)
PURA
(PUREZA DE LA RED)
CONFLICTOS
(DETECTA CONFLICTOS ESTRUCTURALES)
ARBOL
INICIALIZACION
¿GENERA NUEVO NODO?
SI
ALTERNA
VERITRAN
NO
SI
FRANQUEA
SAVEMARCA
COMPARAMARCA
¿IGUALES?
SI
NO
NO
SI
COMPARAMARCA
¿IGUALES?
NO
SI
NOACOTADAS
NO
SI
SE ESCRIBE EL RESULTADO:
NO
SI
FINAL
DISPMARCA
(PRESENTA MARCADOS ALCANZADOS)
BLOQUEO
REPETITIVAS
VIVA
FINAL

Figura 5

pueden analizarse las principales propiedades de las redes de Petri, que aquí sólo se van a enunciar.

Distinguiremos dos tipos de propiedades: aquellas que dependen sólo de la estructura de la red, propiedades estructurales y aquellas que se relacionan con su funcionamiento, propiedades funcionales.

A) PROPIEDADES ESTRUCTURALES

Pureza de la red

Una red se denomina pura cuando ninguna transición tiene arcos de entrada y de salida con una misma plaza. Para comprobar la pureza de una red basta verificar este extremo revisando su estructura.

Conflictos estructurles

Se dice que la red presenta conflictos estructurales cuando existen transiciones que comparten alguna plaza de entrada. Nuevamente basta con revisar la estructura de la red para comprobar su existencia.

B) PROPIEDADES FUNCIONALES

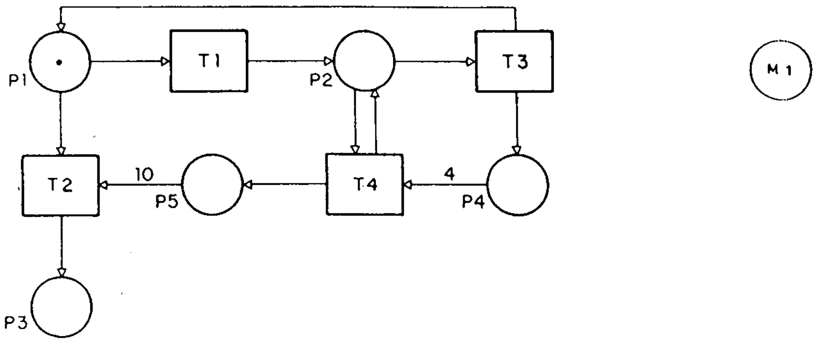
La herramienta elegida para el análisis de las propiedades dependientes del funcionamiento de una red de Petri es el llamado árbol de cobertura.

Generación del árbol de cobertura

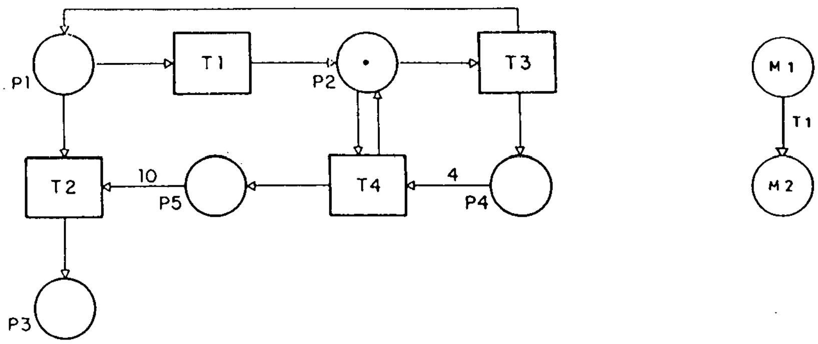
Cada uno de los nodos del árbol representa un marcado accesible y cada arco la transición que permite pasar de un nodo padre a uno descendiente. En el primer nivel se coloca el marcado inicial, y se procede a generar el árbol en anchura. Para ello se recorren todos los nodos de un nivel, se comprueba que no son terminales, y se generan todos los nodos descendientes, franqueando todas las transiciones accesibles desde ese marcado. Cuando no se genera ningún nodo de un nuevo nivel el árbol de cobertura queda completado.

Cuando a un nodo del árbol de cobertura le corresponde un marcado mayor que el correspondiente a un nodo antecedente (en la misma rama), las plazas del mismo con marca mayor que la del antecedente no están acotadas, pues la secuencia de transiciones que los une puede repetirse indefinidamente. Esto daría lugar a un árbol infinito, para evitarlo se sustituye la marca de dichas plazas en el marcado mayor por un valor W que no es afectado por el franqueo de transiciones.

Las Figuras 6a), b) y c) muestran los pasos seguidos en la generación del árbol de cobertura de la red de la Figura 1, obteniéndose como resultado final el árbol de la Figura 7.



Paso 1°



Paso 2°

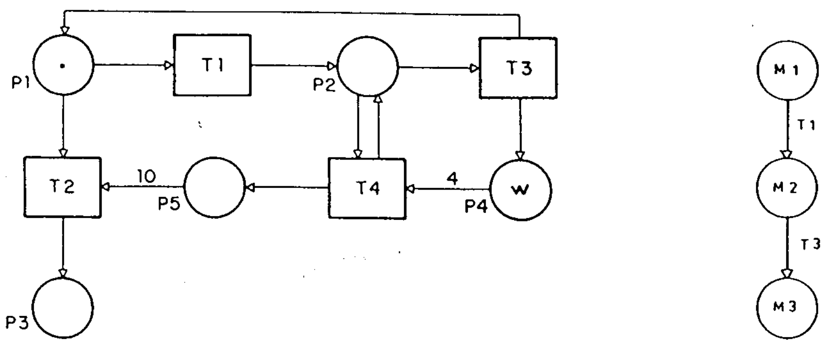
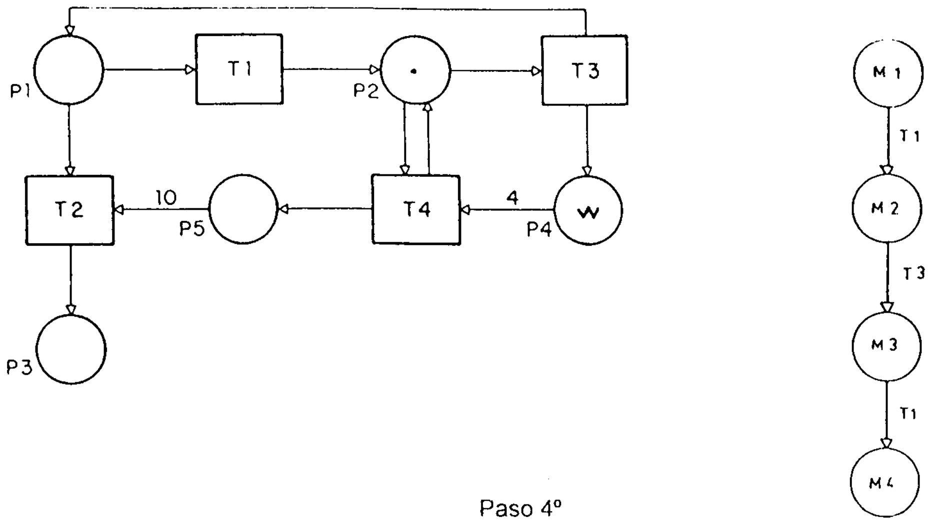
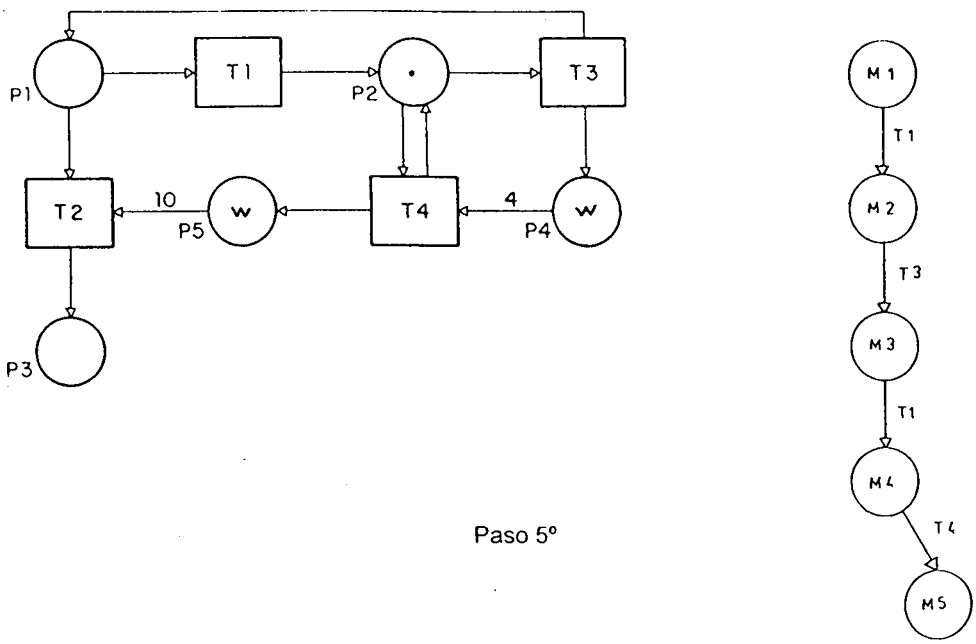


Figura 6a)

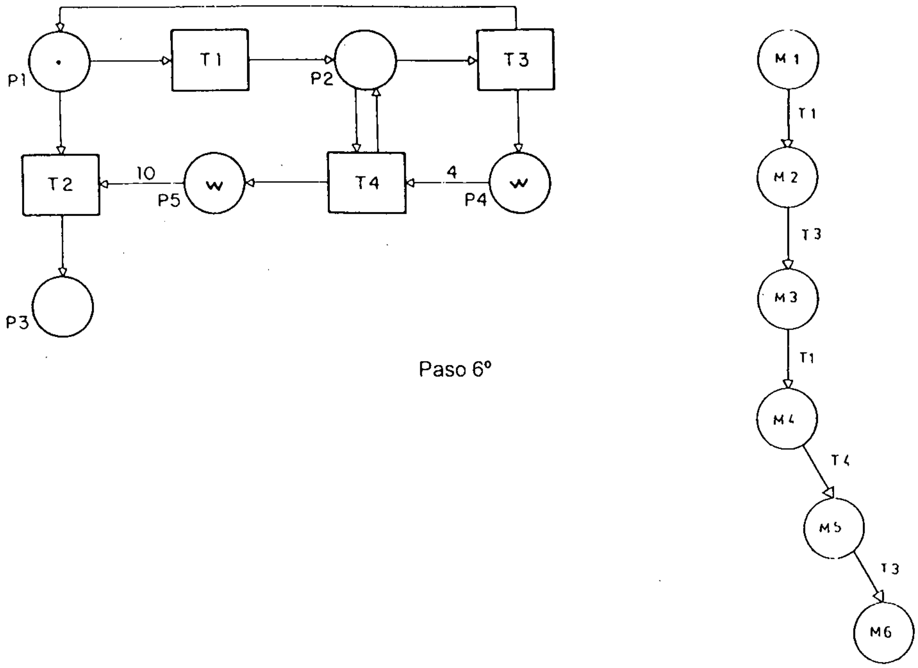


Paso 4°

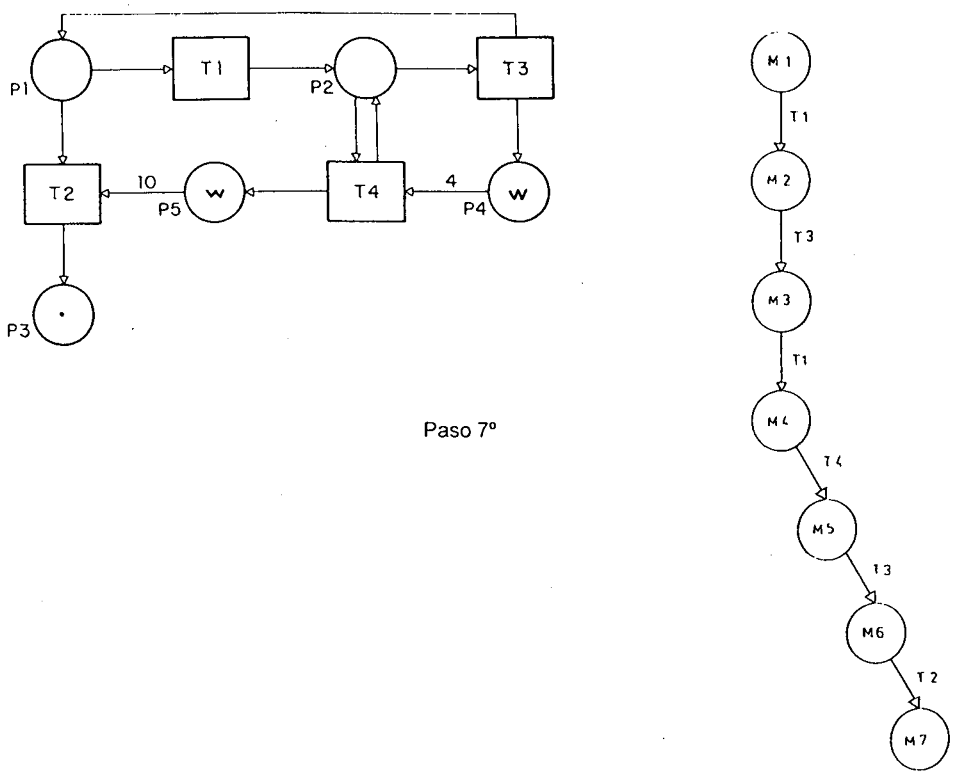


Paso 5°

Figura 6b)



Paso 6°



Paso 7°

Figura 6c)

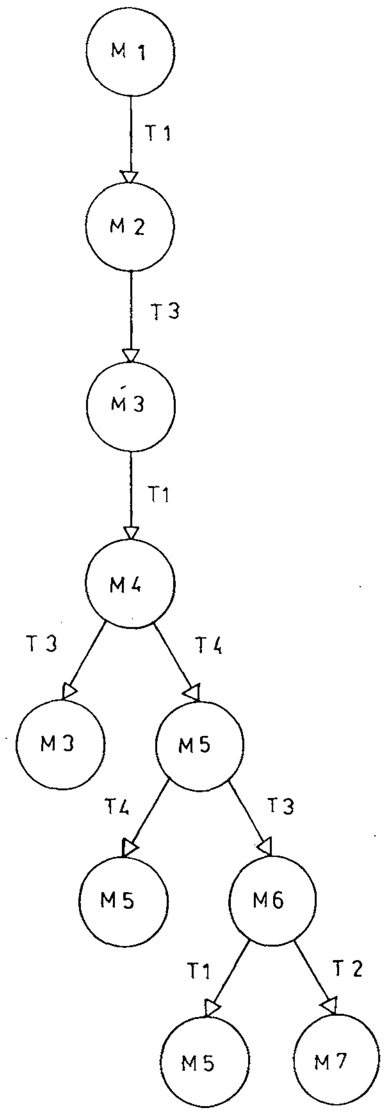


Figura 7

Secuencias de bloqueo

Cuando se alcanza un marcado que no permite franquear ninguna transición, se ha alcanzado una situación de bloqueo. Se denominan secuencias de bloqueo a las secuencias de transiciones que permiten pasar del marcado inicial a la situación de bloqueo.

Secuencias repetitivas

Cuando en un misma rama del árbol de cobertura aparecen dos marcados iguales, la secuencia de franqueos que permite pasar de uno a otro puede repetirse indefinidamente. La convención utilizada para marcar las plazas no acotadas permite detectar también las secuencias que, en caso de repetirse indefinidamente, conducen a marcados infinitos en dichas plazas. A estas secuencias de franqueos se las denomina "secuencias repetitivas".

Vivacidad de la red

Una transición se dice cuasi-viva para un marcado inicial cuando es posible franquearla al menos una vez. De no ser así la transición sería inútil para dicho marcado. Si todas las transiciones son cuasi-vivas la red se dice que es cuasi-viva[9]. Evidentemente una red no puede ser cuasi-viva para cualquier marcado, y también puede siempre encontrarse un marcado para el que la red sea cuasi-viva. Más importante es el concepto de vivacidad. Se dice que una red es "viva" para un marcado inicial cuando es cuasi-viva para cualquier marcado accesible a partir del inicial.

ANÁLISIS DEL EJEMPLO 1

La red de la Figura 1 es un ejemplo sencillo pero ilustrativo, ya que permite ver la aplicación de todas las subrutina presentadas en http://zape.fi.upm.es/~malvarez. Los resultados del análisis se muestran a continuación.

5 PLAZAS, 4 TRANSICIONES VALORADA 1
T1 IN: 1 , 1\ OUT: 2 , 1\
T2 IN: 1 , 1\ 5 , 10\ OUT: 3 , 1\
T3 IN: 2 , 1\ OUT: 1 , 1\ 4 , 1\
T4 IN: 2 , 1\ 4 , 4\ OUT: 2 , 1\ 5 , 1\

PUREZA DE L RED
LA TRANSICIÓN 4 PRODUCE EN BUCLE EN LA PLAZA 2

CONFLICTOS ESTRUCTURALES
LAS TRANSICIONES 1 Y 2 COMPARTEN LA PLAZA DE ENTRADA 1
LAS TRANSICIONES 4 Y 3 COMPARTEN LA PLAZA DE ENTRADA 2

GENERACIÓN DEL ÁRBOL DE COBERTURA
M1 (T1> M2 NODO 1 -> 2
M2 (T3> M3 NODO 2 -> 3
M3 (T1> M4 NODO 3 -> 4
M4 (T3> M3 NODO 4 -> 5 REPRODUCE UN MARCADO ANTERIOR
M4 (T4> M5 NODO 4 -> 6
M5 (T3> M6 NODO 6 -> 7
M5 (T4> M5 NODO 6 -> 8 REPRODUCE UN MARCADO ANTERIOR
M6 (T1> M5 NODO 7 -> 9 REPRODUCE UN MARCADO ANTERIOR
M6 (T2> M7 NODO 7 -> 10

MARCADOS ALCANZADOS
M1:P1 = 1
M2:P2 = 1
M3:P1 = 1 P4 = W
M4:P2 = 1 P4 = W
M5:P2 = 1 P4 = W P5 = W
M6:P1 = 1 P4 = W P5 = W
M7:P3 = 1 P4 = W P5 = W

SECUENCIAS REPETITIVAS
S1: T1> T3 >
S2: T4>
S3: T3> T1 >

SECUENCIAS DE BLOQUEO
S1: M1 (T1> M2 (T3> M3 (T1> M4 (T4> M5 (T3> M6 (T2> M7

VIVACIDAD DE LA RED, PARA EL MARCADOR INICIAL
LA RED ES CUASI-VIVA PARA EL MARCADOR INICIAL
T1 NO ES ACCESIBLE DESDE M7
T2 NO ES ACCESIBLE DESDE M7
T3 NO ES ACCESIBLE DESDE M7
T4 NO ES ACCESIBLE DESDE M7

Si se agregase un arco unitario de salida T3 a P1, el proceso no se bloquearía al realizar un embarque. Cuando se vean las posibles ampliaciones a las redes de Petri básicas se indicarán otras formas de interés para modificar el funcionamiento de la red del ejemplo.

EXTENSIONES DE LAS REDES DE PETRI

Hasta aquí se ha tratado de las redes de Petri en sentido estricto. Numerosos autores han propuesto distintas extensiones que permiten mejorar su funcionamiento, lo que permite representar sistemas que no pueden ser modelados por medio de redes de Petri estrictas. A continuación se describen alguna de estas extensiones, concretamente la utilización de arcos inhibidores, la priorización de transiciones en conflicto, las redes coloreadas, y las redes temporizadas.

UTILIZACIÓN DE ARCOS INHIBIDORES

Cuando se desea que una transición T tenga como condición para ser franqueada que la marca de una plaza P sea O, puede utilizarse un arco inhibidor que conecte a P como plaza de entrada de T. De forma más general[4,11], pueden establecerse arcos inhibidores condicionados a que la marca tenga un valor igual o menor que uno concreto que no se modifique por el franqueo de T.

El esquema utilizado permite representar este tipo de arcos. Para ello, la red debe ser valorada, e incluir el arco inhibidor (con el valor de marca máxima con signo negativo) como arco de entrada de T. Llamaremos plazas inhibidoras a aquellas que son origen de un arco inhibidor. No se debe aplicar a tales plazas el criterio adoptado para la plazas no acotadas, pues hay que hacer en ellas comprobaciones sobre el número exacto de marcas que contienen.

Si en el ejemplo de la Figura 1 deseásemos limitar a 4 elementos la capacidad de almacén P4 haciendo que fuesen empaquetados al alcanzar dicho número, y cuando tuviésemos 10 paquetes en P5 fuesen embarcados antes de recibir nuevos paquetes, podríamos introducir un arco inhibidor con valor **-3** de P4 a T3 y otro de valor **-9** de P5 a T1, tal como se muestra en la red de la Figura 8, en la que los arcos inhibidores se dibujan como una línea continua con un pequeño círculo en el extremo de llegada a la transición.

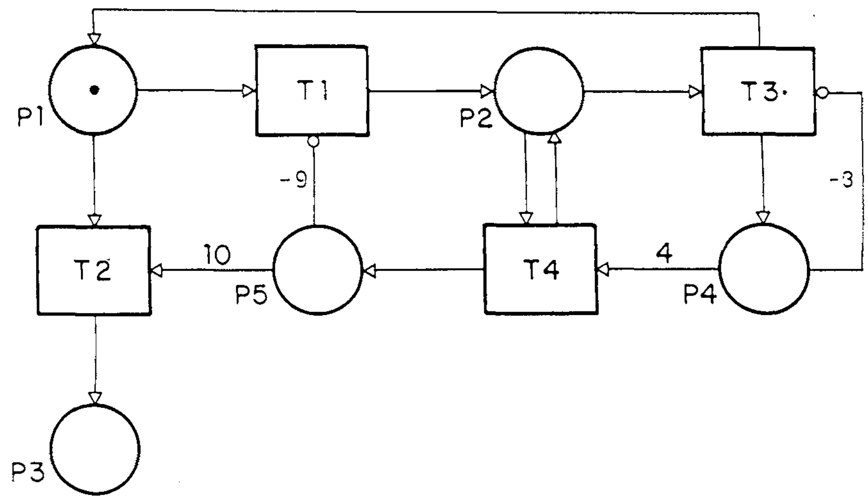


Figura 8

Sin embargo, al analizar esta red se detecta un problema. Cuando se alcanza la situación de tener 10 paquetes en P5, para que P1 pueda dar orden de embarcarlos (franqueo de T2) ha de estar marcada. Para ello ha de franquearse T3, lo que deposita un elemento en P4.

Una generalización más amplia de este tipo, es la propuesta por Vala (Self modifying nets)[11] en la que las reglas de franqueo pueden modificarse de modo que una transición quita o pone un número de marcas que depende del contenido de ciertas plazas.

REDES PRIORIZADAS

Cuando una red presenta conflictos estructurales, estos pueden convertirse en conflictos efectivos para ciertos marcados. Esto es, cuando una plaza es de entrada para más de una transición, puede ocurrir que el número de marcas de la plaza no sea suficiente para permitir el franqueo simultáneo de todas ellas. Tales situaciones pueden resolverse estableciendo prioridades de franqueo entre las transiciones en conflicto.

Así, si en el ejemplo estableciésemos que la transición T4 tiene preferencia sobre la T3 y que la T2 la tienen sobre la T1, se producirán cambios en su funcionamiento análogos a los descritos en el apartado anterior mediante la introducción de arcos inhibidores. El esquema propuesto permite considerar este tipo de extensión.

REDES COLOREADAS

Algunos autores han propuesto otros tipos de extensiones que afectan al contenido de las plazas o al modo de franqueo de las transiciones[12,13]. Las plazas en lugar de un número, pueden contener objetos con una estructura más rica, tal como una lista, o pila o distinguirlas mediante un "coloreado", y las transiciones pueden modificar estos objetos con reglas adaptadas.

Las redes de Petri coloreadas han sido introducidas para condensar la descripción de sistemas en los que se identifican diversos subsistemas con estructura y comportamiento similares, pero que trabajan en paralelo. En una red de Petri coloreada, cada marca puede portar un color que la identifique.

A cada plaza y a cada transición se le asigna un conjunto de colores. Una transición puede franquearse respecto a cada uno de sus colores. El franqueo de una transición elimina y añade marcas como en las redes normales, pero respetando la dependencia funcional especificada entre el color del franqueo de la transición y los colores de las marcas. El color de cada marca puede ser cambiado por el franqueo de una transición.

REDES TEMPORIZADAS

Otro tipo de extensiones son aquellas en las que el funcionamiento de la red se hace depender del entorno y no sólo de las condiciones propias de la red (redes no autónomas). Puesto que las redes son un modelo para la descripción de un flujo de control, puede ser necesario aumentar y enriquecer este modelo cuando se quiere utilizar para describir programas o sistemas paralelos. Con esta finalidad, se añade un entorno formado por un conjunto de variables y de operadores que "dialoga" con la red separando el sistema en una parte de control y en una parte operativa.

Las redes de Petri temporizadas son redes no autónomas cuyo entorno suministra una referencia de tiempo común[14]. Se utilizan para estudiar el comportamiento dinámico de los sistemas teniendo únicamente en cuenta la duración de sus acciones (y no la manera como transforman el estado del entorno). En este caso, la presencia de una marca en una plaza controla una acción a la que se asocia una direción. Ésta, que puede ser variable en el caso general, viene representada por una constante no negativa asociada a la plaza que controla la acción.

Para tener en cuenta la duración de las acciones, se modifican las reglas de franqueo de las transiciones. Así, si una marca llega a una plaza "p" en un instante "t" y si a partir de esta plaza se controla una acción de duración "z", esta marca no puede abandonar la plaza "p" antes del instante "t + z".

A causa de ello se supone que las marcas en las redes temporizadas tienen dos estados; disponible e indisponible. El paso del estado disponible al indisponible se efectúa en el momento del franqueo de las transiciones, de manera que las marcas colocadas en las plazas de salida de una transición después de su franqueo se encuentran en el estado indisponible. Este corresponde a la situación en que por su sola presencia una marca controla una acción que se está ejecutando. Las marcas pasan del estado indisponible al estado disponible en una plaza "p" a partir del momento en que la acción asociada a "p" ha terminado. Entonces pueden utilizarse para el franqueo de las transiciones.

El funcionamiento de una red temporizada puede simularse, aplicando el principio de separación entre parte de control y parte operativa, de la siguiente manera: la parte operativa contiene un conjunto de contadores sincronizados por un reloj común. Cada plaza de la red tiene asociado un contador en el entorno. La llegada de una marca a una plaza inicializa el contador en un valor que corresponde a la duración de la acción controlada. Los contadores bajan en una unidad de tiempo en cada impulso de reloj, siempre que sus valores sean positivos. Cuando el valor de un contador es cero se envía a la parte de control un aviso de fin de acción. Este aviso convierte en disponible las marcas que controlaba la acción.

APLICACIONES DE LAS REDES DE PETRI

Las redes de Petri pueden utilizarse para especificar, validar e implementar todo sistema discreto con evoluciones simultáneas, y es recomendable su uso cuando estos sistemas se comunican con el exterior.

Como posible dominio de aplicación puede citarse la implementación de la dinámica de los sistemas de información, o bien la gestión de producción. Se utilizan ya desde algunos años en la concepción de mecanismos de asignación de recursos y de procedimientos de sincronización de tareas en sistemas centralizados o repartidos, así como para la elaboración de cuadernos de carga de sistemas de control de procesos industriales[15,16].

Dentro de la construcción, aparte de las aplicaciones en fabricación de materiales y en la prefabricación de elementos, se está trabajando actualmente en la estandarización del intercambio de información por vía electrónica entre los distintos participantes en el hecho constructivo[17] utilizando las redes Petri para moldear los sistemas.

Presenta un modelo de procesos de intercambio de información en la industria de la construcción, en el que los participantes envían y reciben mensajes. Cuando se recibe un mensaje, se ejecuta una actividad siempre que se disponga de toda la información necesaria. En caso contrario, se envía un mensaje a otro participante para obtener la información que falta. Tras la ejecución de una actividad, se envía una respuesta con los datos que se desee, teniendo en cuenta que en el proyecto de construcción, se define un acuerdo sobre todas las actividades a ejecutar por cada uno de los participantes.

CONCLUSIONES

Las redes de Petri se utilizan con el objeto de modelar el comportamiento dinámico de sistemas discretos. Pueden utilizarse para especificar, validar e implementar todo sistema discreto con evoluciones simultáneas, y es recomendable su uso cuando estos sistemas se comunican con el exterior. Como posible dominio de aplicación puede citarse la implementación de la dinámica de los sistemas de información, o bien la gestión de producción. Son una herramienta muy importante que debiera ser conocida por cualquier experto en ciencias de la computación.

Dentro del campo de la construcción sus aplicaciones más claras están en la fabricación de materiales y elementos y en el intercambio de mensajes electrónicos entre los distintos participantes en el proceso constructivo.

Se describen las redes de Petri básicas así como distintas extensiones de las redes de Petri, tales como utilización de arcos inhibidores o del marcado de plazas, la priorización de transiciones, las redes multicoloreadas, y las redes temporizadas.

REFERENCIAS

1. C.A. Petri, "Kommunication mit automaten", Ph. D. Disertation, Universidad de Bonn, (1962).
2. G.V. Brahms, "*Las redes de Petri. Teoría y práctica* ", , Vol. **1**, **2**, Editorial Masson, Barcelona, (1986).
3. M. Silva, "*Las redes de Petri: En la automática y la informática*", Editorial AC, Madir, (1985).
4. J.L. Peterson, "*Petri Net Theory and the Modelling of Systems*", Prentice-Hall, USA, (1981).
5. W. Reisig, "*Petri Nets an Introduction*", Springer-Verlag, Berlín, (1982).
6. K. Jensen y G. Rozemberg, "*High-level Petri Nets*", Springer-Verlag, Berlín, (1991).
7. G. Rozemberg, "*Advances in Petri Nets*", Springer-Verlag, Berlín, (1990).
8. Proceedings of *International Workshop on Petri Nets and Performance Models*, (1985).
9. M. Hack, "Decidability Questions for Petri Nets", *Mac. Techm.*, Report **161**, USA, (1976).
10. P. Huber, A.M. Jensen, L.O. Jepren y K. Jensen, "Reachibility Trees for High Level Petri Nets", *Theorical Computer Science*, **45**, pp. 261–292, (1986).
11. T. Agerwala y M. Flynn, "Comments on Capibilities, Limitations and Correctness of Petri Nets", *First Annual Symposium on Computer Architecture*, pp. 81–86, Florida, (1979).
12. P. Huber, K. Jensen y R.M. Shapiro , "Hierchies in coulored Petri Nets", *Computer Science*, Vol. **483**, pp. 342–416, Berlín, (1990).
13. G. Chiola, C. Dutherlet y G. Frances, "On Well-Formed Coloured Nets and their Symbolic Reachability Graphs", *11th Int. Conference on Applications and Theory of Petri Nets*, París, (1990).
14. C. Lin y D.C. Marinescu, "Stocahastic High-Level Petri Nets and Applications", *IEEE Transactions on Computer*, Vol. **37**, No. 14, pp. 815 825, (1988).
15. A.A. Desrochers, "*Applications of Petri Nets in Manufacturing Systems: Modelling, Control and Performance Analysis*", IEEE Press, New York, (1995).
16. A.S. Tanenbaum, "*Computer Networks*", Prentice-Hall International, USA, (1996).
17. B. Vries y L.J. Somers, "Messsage Exchange in the Building Industry ", *Automation in Construction*, Vol. **4**, pp. 91–100, (1995).
18. F. Dicesare et al, "*Practice of Petri Nets in Manufacturing* ", Chapman-Hall, Londres, (1993).