Aplicación de las redes de Petri a la simulación discreta de sistemas

Lic. Ana María Huayna D.[1], Mg. Augusto Cortez Vásquez[2], Mg. Hugo Vega Huerta[3]

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Facultad de Ingeniería de Sistemas e Informática

Av. German Amézaga s/n Ciudad Universitária, Lima 01, Lima, Perú
[1]ahuaynad@unmsm.edu.pe, [2]acortezv@unmsm.edu.pe, hugovegahuerta@hotmail.com

Resumen

El presente artículo presenta una revisión bibliográfica del uso de las Redes de Petri y sus posibilidades de aplicación a la simulación de sistemas. Además muestra las ventajas que tienen las Redes de Petri en el tratamiento individual de los procesos independientes, procesos paralelos o concurrentes y en los recursos compartidos. También se describe un panorama general de las Redes de Petri extendidas donde resulta difícil modelar algunas condiciones o eventos de sistemas mediante una red de Petri convencional.

Palabras clave: Red de Petri, modelación, procesos concurrentes.

Abstract

The present article does a bibliographical review of the use of Petri's Networks and yours possibilities of application to the system simulation. In addition it shows the advantages that have Petri's Networks in the individual treatment of the independent processes, parallel processes ó competing and in the shared resources. Also there is described a general panorama of the Networks of widespread Petri where it turns out difficult to shape some conditions ó system events by means of a network of conventional Petri.

Keywords: Petri's network, modeling, competing processes.

1. INTRODUCCIÓN

La red de Petri constituye una herramienta para el estudio de sistemas. La teoría de las redes de Petri permite modelar un sistema mediante una red de Petri, una representación matemática del sistema. Por lo tanto, el análisis de la red de Petri puede revelar informaciones importantes acerca de la estructura y el comportamiento dinámico del sistema modelado. Esta información puede entonces ser utilizada para evaluar el sistema modelado y sugerir mejoras o cambios. Así, el desarrollo de la teoría de las redes de Petri está basado en la aplicación de las redes de Petri a la modelación y diseño de sistemas.

> *De acuerdo con la definición más común, la simulación discreta es una técnica numérica que se utiliza para realizar experimentos en una computadora digital, a partir de la construcción de un modelo lógico-matemático que describe el comportamiento de los componentes del sistema y su interacción en el tiempo [1,2].*

Un programa de computadoras se constituye como una secuencia de instrucciones, confeccionadas a partir de un algoritmo. Es bien sabido en el ámbito computacional que la confección de un algoritmo es una tarea que está lejos de ser trivial. En términos generales nos referimos a programas como la codificación de un algoritmo en algún lenguaje de programación.

Si un programa corresponde a un modelo de simulación resulta mucho más difícil su preparación, ya que un programa ordinario describe un proceso simple, mientras que un programa en simulación normalmente describe varios procesos paralelos que interactúan en el transcurso del tiempo. Los nuevos lenguajes de orientación específica hacia la simulación vienen a aliviar estas dificultades. Así se pueden mencionar el GPSS, GASP, SLAM, SIMAN, SIMSCRIPT, SIMULA, etc. Sin embargo, aun con estos productos de software se percibe que las herramientas utilizadas en la programación normal no son directamente aplicables en el diseño de programas de simulación. Esta situación provoca con frecuencia programas, es decir, modelos de simulación que no corresponden con el sistema objeto de estudio sin que esto se logre detectar por su diseñador.

Resulta necesario una herramienta que permita representar a los componentes del sistema y la interacción que ocurre entre ellos, antes de concebir el programa de computadora que será el modelo definitivo del sistema. En otras palabras, hace falta lograr un modelo intermedio, en el que se puedan estudiar los principales aspectos del sistema, es decir, los elementos que lo componen y su interrelación estática y dinámica.

En los trabajos [3, 4, 5, 6], el profesor Aimo Torn propone el uso de las redes de Petri y extensiones de esta para la modelación de sistemas a simular. Este tipo de redes puede servir para facilitar un enfoque de prototipo, con el que se logre un modelo del sistema previo al programa de computadora que refleje sus características fundamentales de manera gráfica de fácil comprensión.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. DEFINICIÓN DE UNA RED PETRI

Definimos un grafo como una estructura de datos conformada por el par G = (V, E), donde V constituye el conjunto finito de vértices o nodos[2,3]. Cualquier arista e en E es incidente en un miembro de P y un miembro de T.

En particular, una red de Petri posee dos tipos de nodos: los círculos representan lugares y las barras representan las transiciones. De esta manera podemos decir que una red de Petri está constituida por lugares y transiciones. Formalmente la denotamos como el grafo G = (P, T), donde V = P U T y P ∩ T = ø. El conjunto P es el conjunto de lugares y el conjunto T es el conjunto de transiciones.

Los arcos dirigidos conectan los lugares y las transiciones. Así algunos arcos se orientan desde los lugares hacia las transiciones y otros se dirigen desde las transiciones hacia los lugares. Un arco dirigido desde un lugar Pj hacia una transición Tj define que ese lugar es una entrada a esa transición. Cuando a una transición entran múltiples arcos se dice que esta transición tiene entrada múltiple y se expresa por la función de entrada I (Pj). De la misma forma, los arcos que parten de una transición Pj indican los lugares que constituyen salida de la transición y matemáticamente se representan por la función O (Pj) [7, 8].

2.2. ESTRUCTURA DE UNA RED PETRI

En la fig. N.º 1 se muestra una red de Petri compuesta por cuatro lugares P1, P2, P3, P4 y tres transiciones T1, T2 y T3. Definiciones rigurosas del grafo de red de Petri desde el punto de vista matemático pueden encontrarse en dos excelentes trabajos de James Peterson [7, 8].

La estructura de una red de Petri se define por sus lugares, transiciones, la función de entrada y la función de salida. Por definición la estructura C de una red de Petri es una cuaterna (o una 4 tupla), C = (P, T, I, O), donde

$P = \{P_1, P_2, \ldots P_n\}$ es un conjunto finito de lugares $n \geq 0$

$P = \{t_1, t_2, \ldots t_n\}$ es un conjunto finito de transiciones $n \geq 0$

Los conjuntos P y T son disjuntos $P \cap T = ø$

$I : T \rightarrow p^\infty$ es la función de entrada que aplica las transiciones a los acopios de posiciones.

$O : T \rightarrow p^\infty$ es la función de salida que aplica las transiciones a los acopios de posiciones o lugares.

La estructura de la red de Petri de la figura N.º 1 es la siguiente:

$C = (P, T, I, O)$

$P = \{P_1, P_2, P_3, P_4\}$

$T = \{t_1, t_2, t_3\}$

$I(t_1) = \{P_1\}$ $\quad O(t_1) = \{P_2\}$

$I(t_2) = \{P_2, P_3\}$ $\quad O(t_2) = \{P_4\}$

$I(t_3) = \{P_4\}$ $\quad O(t_3) = \{P_3, P_1\}$

La estructura tiene una amplia fundamentación teórica que se basa en la teoría de conjuntos y de acopios y sobre ella se estructuran importantes técnicas de análisis de la red de Petri.

Resulta importante señalar que el grafo de una red de Petri es equivalente a su estructura C, es decir, dado un grafo G se puede obtener la estructura de la red de Petri y viceversa, dada una estructura de la red de Petri C se puede obtener su correspondiente grafo G.

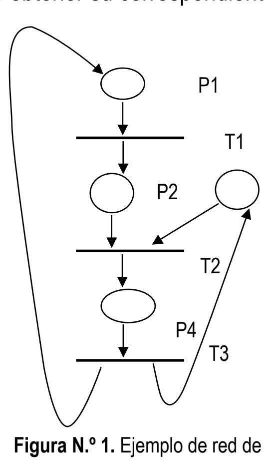


Figura N.º 1. Ejemplo de red de Petri

Estos conceptos permiten definir la estructura estática de la red. Las propiedades dinámicas se determinan utilizando el concepto de marcación.

2.3. MARCACIÓN DE UNA RED DE PETRI

La ejecución de una red de Petri es controlada por la posición y el movimiento de las marcas (llamadas también fichas o puntos) "tokens" en la red. Las fichas, reflejadas por puntos negros, residen en los lugares de la red, es decir, en los nodos – círculos. Una red de Petri con fichas es una red marcada.

Estas son las reglas de ejecución de una red de Petri básica: las fichas se mueven con el disparo de las transiciones de la red. Una transición tiene que estar permitida o activada para poderse disparar. Una transición es permitida cuando todos sus lugares de entrada tienen fichas. El efecto del disparo de una transición o la descarga es la eliminación de una ficha en los lugares de entrada por cada arco de entrada a la transición y la generación de nuevas fichas que son depositadas en los lugares de salida de la transición en una cantidad correspondiente a la cantidad de arcos de salida de la transición hacia cada lugar de salida.

En la fig. N.º 2 (a) por ejemplo, la transición T2 es permitida, dado que existe una ficha en su lugar de entrada P1. Por otra parte la transición T5 no está permitida, ya que en P3, entrada de T5 no hay ficha. Si T2 se dispara, resultará la red de Petri marcada que se muestra en la fig. N.º 2 (b). Este disparo elimina la ficha del lugar P1 y coloca fichas en P2 y P3 que son las dos salidas de T2.

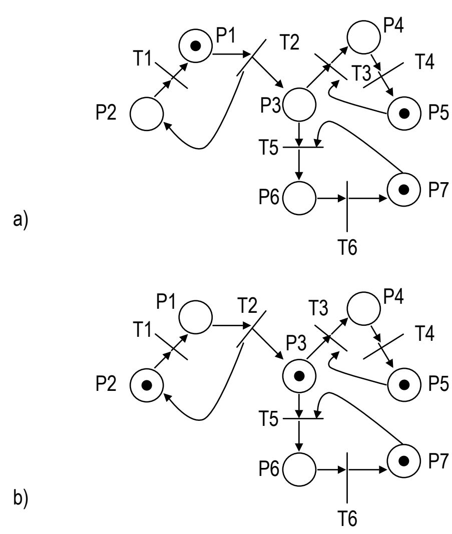


Figura N.º 2. Marcación de red de Petri.

Como se observa, el marcaje de una red de Petri puede cambiar como resultado del disparo de una transición y así aparecerán nuevas transiciones permitidas. Así, en la marcación de la fig. N.º 2 (b) se tienen tres transiciones permitidas: T1, T3 y T5 ninguna de las cuales era permitida en la marcación de la fig. N.º 2 (a).

La representación de la marcación μ de la red de Petri C = (P, T, I, O) es la función que aplica el conjunto de las posiciones P en el conjunto de los números enteros positivos. La marcación se representa empleando fichas (marcas o puntos) dentro de las posiciones. El número y posición de las fichas pueden cambiar durante la ejecución de la red de Petri. Las fichas son usadas para definir la ejecución de una red de Petri.

Las marcaciones se representan mediante un vector $\mu = (\mu_1, \mu_2, \ldots, \mu_n)$, donde n es la cantidad de posiciones que posee la red, y cada μ_i representa el número de fichas en la posición p_i.

La definición de una marcación como función y como vector se encuentra relacionada por $\mu(p_i) = \mu_i$. Esta notación es la más general y por lo tanto la más usada. Una red de Petri C con una marcación μ se le denomina red marcada de Petri.

James Peterson en sus trabajos [7, 8] afirma que las redes de Petri fueron concebidas para la modelación de una clase específica de problemas, la clase de sistemas de eventos discretos con eventos concurrentes ó paralelos. Las redes de Petri modelan sistemas y principalmente dos aspectos de sistemas: eventos, condiciones y las relaciones existentes entre ellos. Al modelar una situación, los lugares representan condiciones, las transiciones representan eventos, y la presencia de al menos un elemento en un lugar (condición) indica que tal condición se cumple [10]. Desde este punto de vista, en el sistema, en cualquier instante de tiempo tendrán lugar determinadas condiciones. El hecho de que tengan lugar estas condiciones puede causar la ocurrencia de determinados eventos. A su vez la ocurrencia de estos eventos puede cambiar el estado del sistema, causando que algunas de las condiciones previas cesen, y aparezcan otras condiciones.

Un ejemplo simple puede ser que la aparición simultánea de dos condiciones:

"Es necesario el procesador de la computadora", y la condición

"El procesador de la computadora está disponible"

debe producir la ocurrencia del evento: *"Cargar el procesador de la computadora".*

La ocurrencia de este evento provoca el cese de la condición *"El procesador de computadora está disponible"* y *"Es necesario el procesador de la computadora"* produciendo la condición *"El procesador está ocupado".* Estos eventos y condiciones son modelados en la red de Petri de la fig. N.º 3.

Una versión más completa de este problema se ve en la fig. N.º 4.

2.4. MARCADOS ALCANZABLES

Si una serie de descargas transforma un marcado M en un marcado M', decimos que M' es alcanzable desde M. En la fig. N.º 5 M'' es alcanzable desde M, descargando primero la transición T1 y luego descargando la transición T2.

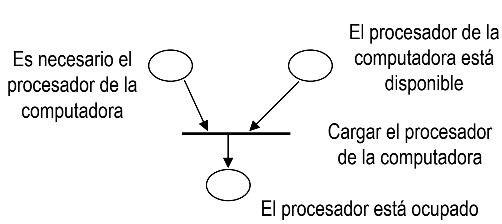


Figura N.º 3. Aparición simultánea de dos condiciones para una transición.

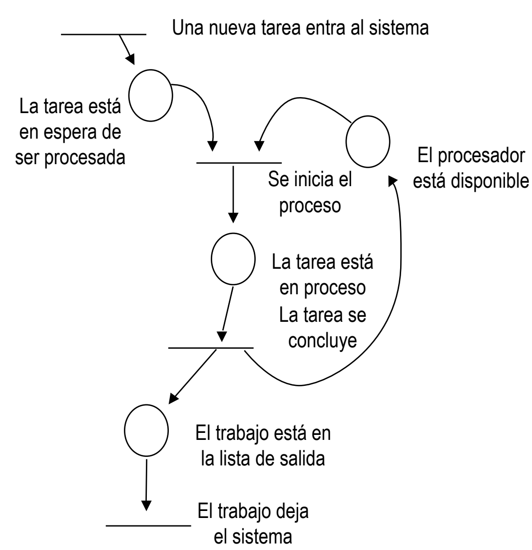


Figura N.º 4. Versión más completa del proceso.

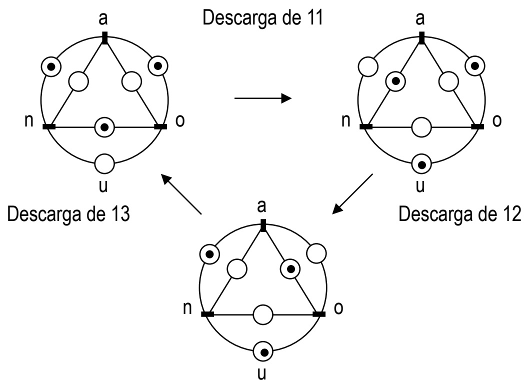
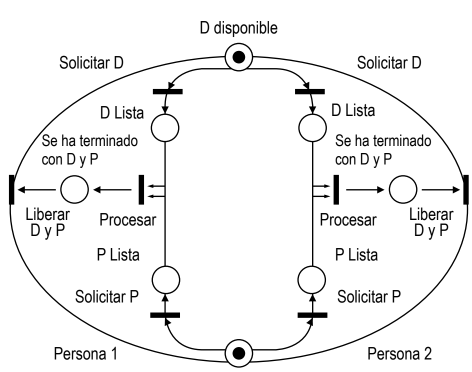


Figura N.º 5. El marcado M'' es alcanzable desde M, descargando primero T1 y luego T2.

Al modelar una situación, la descarga de una transición simula la ocurrencia de ese evento. Por supuesto, un evento puede ocurrir solo si se cumplen todas las condiciones para su ejecución; es decir, la transición se puede descargar solo si está permitida o activada. Entre las propiedades más importantes estudiadas en la teoría de las redes de Petri están la supervivencia y la seguridad. La supervivencia se refiere a la ausencia de estancamientos y la seguridad se relaciona con la capacidad limitada de la memoria.

2.5. SUPERVIVENCIA

Formalmente, decimos que una red de Petri marcada está **estancada** si ninguna transición se puede descargar. Una preocupación fundamental en los ambientes de procesamiento concurrentes es la forma de evitar los estancamientos. En la fig. N.º 6, se muestra que ha ocurrido un estancamiento para un modelo de red Petri para un Sistema de Cómputo compartido. Donde dos personas comparten un sistema que contiene una unidad de disco D y una impresora P.



En la **Figura N.º 6. a)** nos indica que las 2 unidades están disponibles

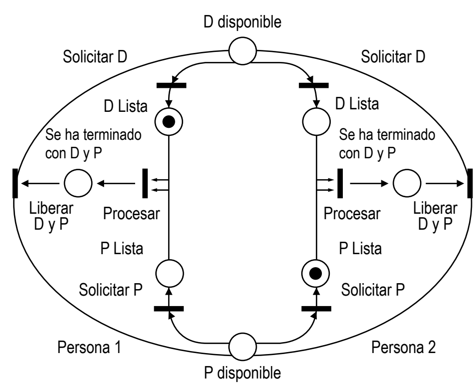
En este punto, la red de Petri está estancada; es decir, ninguna transición se puede descargar.

MARCADO VIVO

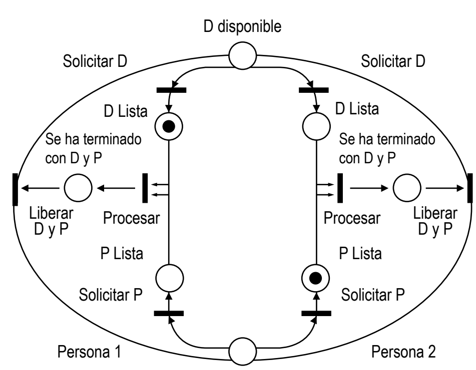
Un marcado M de una red de Petri esta vivo si, partiendo de M, sin importar la serie de descargas realizadas, es posible descargar cualquier transición dada mediante alguna secuencia de descargas adicionales.

Si un marcado M está vivo para una red de Petri P, entonces, sin importar la serie de descargas de transiciones, P nunca se estancará. De hecho, podemos descargar cualquier transición mediante cierta secuencia de descargas adicionales [10].

El marcado M de la red de la Fig. N.º 5 está vivo. Para ver esto, observe que la única transición del marcado M que se puede descargar es T1, la cual produce el marcado M'. La única transición del marcado M' que puede descargarse es T2, la cual produce el marcado M''. La única transición del marcado M'' que se puede



En la **Figura N.º 6. b)** Después de descargar "Solicitar D" y luego "Solicitar P" para la persona 1.



En la **Figura N.º 6. c)** Después de descargar "Solicitar D" para la persona 1 y luego "Solicitar P" para la persona 2.

descargar es T3, la cual nos regresa al marcado M. Así, cualquier secuencia de descarga, que parta del marcado M produce uno de los marcados M, M' M'', y de ahí podemos descargar cualquiera de las transacciones T1, T2 o T3 procediendo como en la Fig. N.º 5.

2.6.SEGURIDAD

Si se considera que un lugar tiene capacidad limitada, el hecho de que la red sea ***acotada*** nos garantiza que no habrá un desbordamiento de los lugares.

MARCADO SEGURO

Un marcado M para una red de Petri está acotado si existe algún entero positivo n con la propiedad de que, en cualquier secuencia de descarga, ningún lugar recibe más de n elementos. Si un marcado M está acotado y en cualquier secuencia de descarga ningún lugar recibe más de un elemento, decimos que M es un marcado seguro.

Si cada lugar representa un registro capaz de guardar una palabra de computadora y si un marcado inicial es seguro, tenemos garantizado que no se excederá la capacidad de memoria de los registros.

Los marcados de la fig. N.º 5 son seguros. El marcado M de la fig. N.º 7 no es seguro pues, como se muestra, si se descarga la transición T1, el lugar P2 entonces tendrá dos elementos. Al enumerar todos los marcados alcanzables desde M, se puede verificar que M está acotada y viva.

2.7. PROPIEDADES DE LAS REDES PETRI

Concurrencia y paralelismo: En un sistema existen varias entidades independientes. En la fig. N.º 4 podríamos mencionar las tareas y el procesador. En la red de Petri, los eventos que concurren solo a uno de los tipos de entidades, pueden ocurrir independientemente; no hay ninguna necesidad de sincronizar las acciones de las tareas y del procesador. Así, las tareas pueden entrar o abandonar el sistema en cualquier instante de forma independiente de la acción del procesador. Sin embargo, cuando se requiere la sincronización, por ejemplo cuando la disponibilidad del procesador y la aparición de una tarea deben tener lugar para iniciar el procesamiento, dicha situación se puede modelar sin dificultad.

Naturaleza asincrónica: No existe una dimensión del tiempo inherente a la red de Petri. Esto refleja la filosofía del tiempo que establece que la única propiedad importante del tiempo, desde el punto de vista lógico, es la definición del orden parcial de la ocurrencia de los eventos. Los eventos toman magnitudes de tiempo, variables en la vida real. El modelo de red de Petri refleja esta variabilidad mediante la no dependencia de la noción del tiempo para controlar la secuencia de eventos. Por consiguiente, la estructura de la red de Petri en sí tiene que contener toda la información necesaria para definir las secuencias posibles de eventos en el sistema modelado. Por otra parte, los eventos que no están restringidos en términos de su orden de ocurrencia relativa, no se encuentran restringidos.

No determinismo: La red de Petri, al igual que el sistema que ella modela, es vista como una secuencia de eventos discretos, cuyo orden de ocurrencia es uno de los muchos permitidos por su estructura básica. Esto apunta a un carácter no determinístico de la ejecución de la red de Petri. Si en un momento determinado puede ocurrir más de una transición, entonces cualquiera

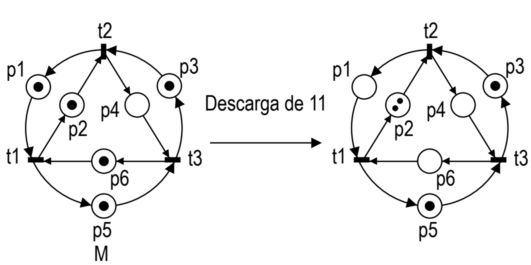


Figura N.º 7. El marcado M no es seguro. Después de descargar T1, P2 tiene 2 elementos.

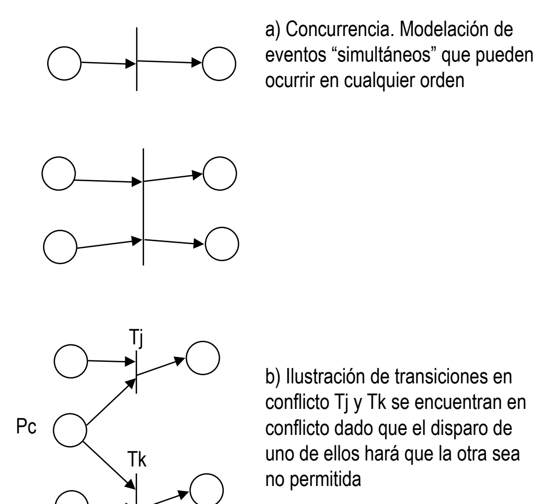


Figura N.º 8. Concurrencia y conflicto entre transiciones.

de las transiciones permitidas pueden dispararse. La selección de la transición que se dispara se hace de una manera no determinística.

Carácter instantáneo de los eventos: El disparo de las transiciones se considera instantáneo (toma un tiempo igual a cero). Se estima que la probabilidad de ocurrencia de dos o más eventos de forma simultánea es igual a cero. Los eventos que se modelan se consideran primitivos. Esta propiedad permite dar respuesta a dos situaciones que se resuelven mediante el denominado “free choice” (opción libre): concurrencia y conflicto (Fig. N.º 8)

Modelación jerárquica de un sistema: Esta es una de las propiedades más útiles de las redes de Petri para la modelación. Se trata de posibilitar diferentes niveles de abstracción en la modelación de un sistema. Una red entera puede ser sustituida por un lugar o una transición al modelar un nivel más abstracto del sistema. Asimismo un lugar o una transición puede ser sustituido por una subred para una modelación más detallada. En la siguiente figura se muestra esta capacidad de modelación jerárquica, que en el análisis de sistemas de información tiene el nombre de análisis “top – down” de lo general a lo particular.

Existe un número determinado de técnicas de análisis de las redes de Petri que pueden estudiarse en los trabajos antes referidos de James Peterson y entre ellas se destaca el árbol de alcance con el que se puede reflejar la secuencia de estados representados por las marcaciones consecutivas que logra el sistema en la medida en que se ejecutan los disparos de las transiciones permitidas.

3. REDES DE PETRI EXTENDIDAS

Realmente existen puntos de vistas controversiales respecto al poder de modelación de las redes de Petri. “Resulta difícil modelar algunas condiciones o eventos de sistemas mediante una red de Petri” dice Peterson [8] y se ha demostrado que resulta imposible modelar correctamente algunos tipos de sistemas. De aquí que hayan aparecido algunas extensiones del poder de modelación de las redes de Petri, que a continuación se resumen.

Red de Petri generalizada: La primera extensión elimina la restricción que establece que el disparo de una transición eliminará una y solo una ficha de los lugares de entrada y aportará una y solo una ficha a los lugares de salida. Con la eliminación de esta restricción cada lugar puede tributar o recibir más de una ficha al dispararse la transición correspondiente. La representación de la cantidad de fichas que se mueven se hace mediante la ubicación de múltiples arcos entre el lugar y la transición correspondiente, o mediante la señalización del número de fichas sobre un arco resaltado con doble línea.

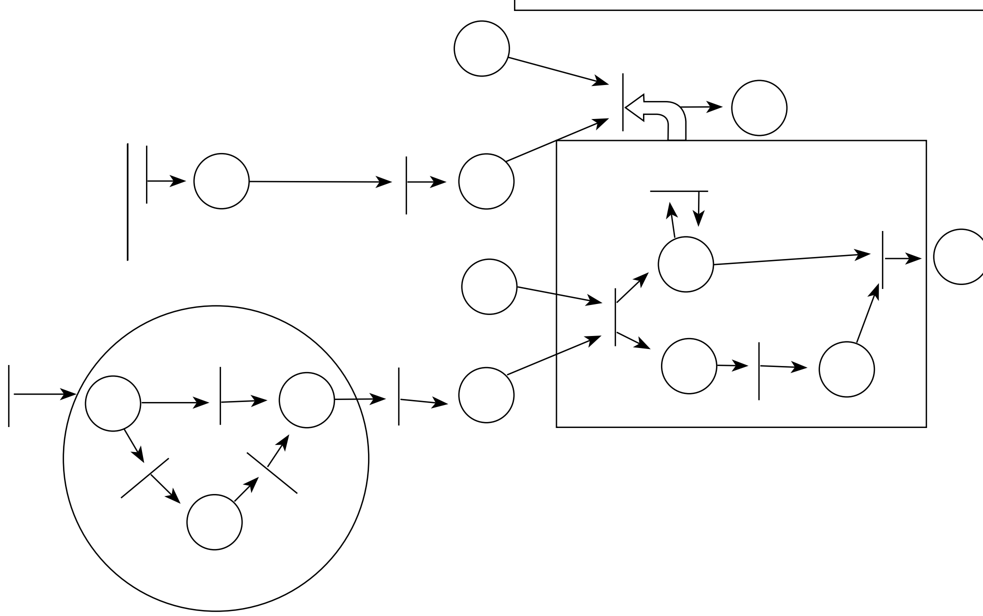


Figura N.º 9. Modelación jerárquica en una red de Petri mediante la sustitución de posiciones y transiciones por subredes. (Tomado de Peterson [9]).

La existencia de arcos generalizados impone una rectificación en la regla de disparo de una transición. En este caso una transición se disparará cuando la cantidad de fichas en cada posición de entrada sea igual o mayor a la cantidad de arcos entre dicha posición y la transición. En el caso de la Fig. N.º 10, se tiene que para que la transición T1 pueda encontrarse habilitada, la posición P1 deberá contener al menos 3 fichas. Cuando la transición se dispara, se deberán eliminar 3 fichas de la posición P1, una de la posición P2 (dado que el arco de salida de P2 a T1 es simple), y ubicarse 2 fichas en la posición P3, ya que el arco que une la transición T1 con la posición P3 es un arco generalizado con el número 2 asociado.

Redes con tiempo (Timed Net): Aimo Torn [3, 4, 5, 6] investigó mucho sobre la aplicación de las redes de Petri a la obtención de modelos de problemas a simular por computadoras. Se plantea que una red en la que se admiten los tiempos se denomina red con tiempo. El tiempo se ubica al lado de la transición y se entiende que ese será el tiempo que transcurra entre el momento que se dispara la transición (instante en que se eliminan las fichas de los lugares de entrada) y el momento en que se obtiene la salida de ella (en que se depositan las fichas en los lugares de salida). En nuestra opinión esta extensión oscurece en determinada medida la sencillez de funcionamiento de una red de Petri, sin embargo, su definición puede ser la base para el empleo de las redes de Petri en la modelación de un sistema a simular con técnicas estocásticas.

Redes de Petri con arcos inhibidores: Cuando se pretende modelar sistemas de prioridades, las redes de Petri básicas presentan dificultades. Estas se contrarrestan insertando los denominados arcos inhibidores. Para que una transición que tenga un arco inhibidor como entrada sea permitida, debe cumplirse que en el lugar de entrada correspondiente no haya ninguna ficha. El arco inhibidor se representa con un pequeño círculo en lugar de la punta de la flecha.

En la Fig. N.º 11, aparece un arco inhibidor, mediante el cual se conecta la posición P1 con la transición T1. Por este motivo, para que la transición T1 quede habilitada, será necesario que en la posición P2 exista al menos una ficha, mientras que en la posición P1 no puede existir ficha alguna.

Colas: Al igual que la extensión anterior las colas se exponen como extensión de las redes de Petri en los trabajos de Aimo Torn. Una cola se representa mediante un lugar (o posición) diferenciado por un segmento de recta horizontal que lo atraviesa. No se han hallado diferencias en el tratamiento de una cola con respecto a un lugar común, salvo el valor informativo que aporta.

4. LAS REDES DE PETRI Y LA SIMULACIÓN DISCRETA DE EVENTOS

Prácticamente todos los ejemplos expuestos en los trabajos de Peterson [7, 8], así como en el libro de Gorbatov sobre Matemática Discreta, el español Vaca y otros, son problemas cuya solución más natural a los efectos de su estudio es mediante la simulación discreta. Sin embargo, no se hace mención de un posible encadenamiento o simbiosis de estas herramientas de modelación. Ya en los trabajos de Torn [3, 4, 5, 6] se enfoca esta posibilidad, e incluso la necesidad que tiene la simulación de una herramienta como las redes de Petri para elevar la calidad de los modelos a simular. El mismo Torn propone un grupo de extensiones para elevar –de acuerdo con su criterio– el poder de modelación de las redes de Petri y su utilidad para los diseños de simulación.

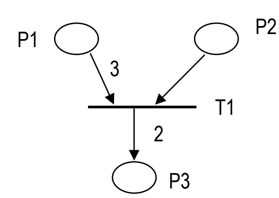


Figura N.º 10. Red de Petri generalizada.

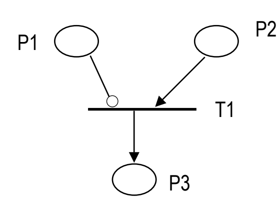


Figura N.º 11. Arcos inhibidores.

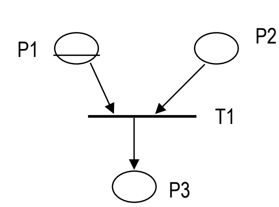


Figura N.º 12. Representación de una cola en una red de Petri.

En la aplicación de las redes de Petri a la simulación, los lugares se deben interpretar como condiciones o actividades, mientras que las transiciones representan los eventos. Una ficha en una posición significa que la condición en cuestión tiene lugar. Luego entonces, la modelación consiste en la conexión de los eventos con la ayuda de sus *pre* y *poscondiciones*.

En nuestra opinión las redes de Petri pueden utilizarse como modelo previo al programa de simulación con el cual se realizarán las corridas necesarias. Las redes de Petri permitirán alcanzar una plena comprensión del funcionamiento del sistema a simular antes de iniciar los trabajos de programación e incluso antes de definir el conjunto de atributos y componentes del modelo. En otras palabras, las redes de Petri permitirán reflejar gráficamente el conjunto de relaciones entre los eventos y condiciones que identifican el sistema. Esta posibilidad contribuirá ineludiblemente a elevar la calidad del modelo de simulación, es decir, una mayor correspondencia entre modelo y sistema simulado. En cierta forma se logra una maqueta gráfica del modelo que debe diseñarse posteriormente como programa de computadora.

En la siguiente figura se muestra gráficamente esta idea:

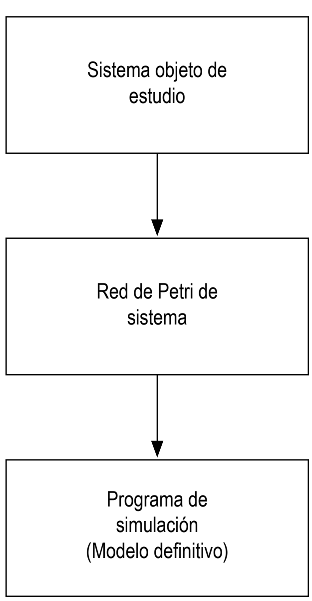


Figura N.º 13. Integración de las Redes de Petri y la simulación discreta por computadora

5. CONCLUSIONES

Una Red de Petri es una representación matemática de un sistema distribuido discreto. El uso de redes de Petri representa una alternativa para modelar sistemas, sus características hacen que, para algunos problemas las redes de Petri funcionen de una manera natural. Consideramos que las redes de Petri pueden utilizarse como modelo previo al programa de simulación con el cual se realizarán las corridas necesarias.

El carácter jerárquico que poseen las redes de Petri facilita un incremento paulatino de la complejidad del modelo y la ejecución de corridas manuales de chequeo de cada nivel de abstracción que se logra con el modelo. Permite prácticamente trabajar con un prototipo del modelo de simulación sin incurrir en gastos de tiempo y recursos de programación.

A los efectos técnicos el empleo de la red de Petri no acelera de manera directa la obtención del programa de simulación. Es mediante una mayor comprensión y comprobación del funcionamiento del sistema objeto de estudio antes de desarrollar el trabajo de programación, que se ganará en calidad del modelo de simulación, es decir del programa de computadora. Por otra parte la sencillez en la confección de la red de Petri permite enfrentar en un ámbito docente la solución de problemas de simulación mucho más complejos que los que se realizan en estos momentos, aspecto que elevará la calidad de los conocimientos que adquiere el estudiante.

Queda aún por descubrir un amplio camino para lograr una explotación totalmente madura de las redes de Petri como prototipo de modelo a simular por computadora, pero queda evidenciada la potencialidad de esta herramienta para lograr una mayor calidad en los modelos de simulación discreta por computadora.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Álvarez-Buylla Valle, M.: *Modelos Económico Matemático II.* Tomo 2. Editora I.S.P.J.A.E . Ciudad de la Habana. 1987.

[2] Ravindran, A. y otros: *Operations Research. Principles and Practice,* Editora John Wiley and Sons, New York, 1987.

[3] Torn, A.: Simulation graph: A general tool for modeling simulation designs. *Revista SIMULATION* 37:6.1981.

[4] Torn, A.: Simulation nets, a simulation modeling and validation tool. *Revista Simulation* 45:2.1985.

[5] Torn, A.: Simulation nets – an application of Petri nets to system simulation. Transactions on scientific computing – '85, Vol. 2, Computer systems : Performance and simulation 1986.

[6] Torn, A.: Systems modelling and analysis using Simuletion Nets, *Revista Artificial Intelligence, Expert Systems and Languages in Modelling an Simulation.* Elsevier science Pubs. 1988.

[7] Peterson, J.: *Petri Nets Computing Surveys,* Vol. 9. No. 3. Sept. 1977.

[8] Peterson, J.: *Petri Nets Theory and The Modeling of Systems Prentice.* Hall Englewood Cliffs, 1981

[9] Gonzáles,A.: *The engineering of knowledge-based systems.* Prentice-Hall, 1993.

[10] Johnsonbaug, R.: *Matemáticas Discretas stems Prentice* Hall – Pearson. México, 1999.