

ENTORNO PARA LA PLANIFICACION DE LA PRODUCCION DE SISTEMAS DE FABRICACION FLEXIBLES

Mercedes E. Narciso Farias, Miquel Angel Piera i Eroles
Unidad de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad Autónoma de Barcelona,
Bellaterra 08193 (Barcelona) España.
mnarciso@sunaut.uab.es, miquel@sunaut.uab.es

Resumen

Actualmente existen diversas herramientas [1,2,5] de software que podrían utilizarse para obtener políticas de planificación de la producción de manera automática mediante la simulación y análisis del comportamiento de los sistemas de manufactura. Sin embargo, su utilización no garantiza la evaluación de las distintas posibles políticas de gestión y priorización de los recursos compartidos en un sistema de producción, así como tampoco facilitan la adaptación del modelo ante variaciones en el sistema. En este artículo se presenta una herramienta de simulación basada en Redes de Petri Coloreadas que permite explotar las características de representación y análisis de esta técnica de modelado de sistemas, en la generación automática de esquemas de planificación de la producción.

Palabras Clave: Sistemas Flexibles de Producción, Redes de Petri Coloreadas, Sistemas Orientados a Eventos Discretos.

1 INTRODUCCION

En la actualidad, y cada vez más, las industrias se han visto en la necesidad de adaptarse a una gran variedad de requerimientos de producción. Esto se debe, en gran medida, al corto tiempo de vida de los productos, lo cual es fruto de las innovaciones tecnológicas que obligan a las empresas a ser más competitivas y en consecuencia más productivas.

Es de esperar que en la medida que las industrias puedan adaptarse a requerimientos cambiantes de producción su productividad y competitividad se acrecienten. Para alcanzar este objetivo es esencial una eficaz asignación y priorización de tareas en los sistemas de fabricación a fin de optimizar los tiempos de producción, así como a cambiar constantemente el tipo y ritmo de producción para satisfacer la demanda de los clientes en el menor tiempo posible.

Para ello es necesario disponer no solo de **sistemas de fabricación flexibles**, sino también de **políticas**

flexibles de planificación de la producción que permitan adaptarse, sin pérdida de tiempo, a los diferentes requerimientos de producción.

En este sentido, existen numerosas herramientas computacionales para el modelado y simulación de sistemas de manufactura, las cuales tienen gran aplicabilidad como herramientas de análisis de sistemas. Generalmente estos paquetes proporcionan la facilidad de realizar simulaciones gobernadas manualmente o de forma automática [1,2,5], permitiendo, en el primer caso, que el modelador pueda dirigir el proceso de simulación escogiendo los eventos que desea que tengan lugar, o bien, en el segundo caso, dirigiendo el proceso mediante la selección automática de los eventos que pueden ocurrir.

Si bien tales herramientas son de mucha utilidad para evaluar el rendimiento de un sistema bajo ciertas condiciones de operación, para poder ser utilizadas como herramienta de planificación la representación del sistema debería contemplar no sólo la arquitectura del mismo sino también las infinitas maneras en que éste se puede comportar. En la actualidad los simuladores comerciales no facilitan la experimentación con todas las posibles alternativas de operación del sistema sin la intervención de un experto.

Existen campos de aplicación en los que se requiere explorar todas las posibles combinaciones de eventos a fin de poder determinar cual es la mejor secuencia de ocurrencia, o alternativas de operación, según un objetivo predeterminado. Un ejemplo son precisamente los sistemas de planificación de la producción, en los cuales se requiere un análisis exhaustivo de las posibles alternativas de *scheduling* y *routing* que permitan mejorar el rendimiento y aprovechamiento de los recursos del proceso productivo.

En este artículo se propone una alternativa para atacar este campo de aplicación que consiste en el desarrollo de una herramienta computacional basada en Redes de Petri Coloreadas [4] (CPN: Coloured Petri Nets) como herramienta para el modelado y

análisis del sistema de producción, toda vez que las CPN son consideradas una de las técnicas más completas para el modelado de sistemas de producción [6].

En la sección 2 se presenta una breve comparación entre las Redes de Petri ordinarias (PT-nets: Place/Transition Nets), o redes de Petri no coloreadas, y las CPN que justifica la elección de estas últimas como base para el modelado de los sistemas de producción. En la sección 3 se explica como el modelo de una CPN puede ser usado como herramienta en la planificación de la producción. En la sección 4 se describe el funcionamiento del prototipo de simulación desarrollado. Finalmente en la sección 5 se muestra un ejemplo del funcionamiento de esta herramienta así como los resultados obtenidos en la generación del esquema de planificación o *scheduling* de una célula flexible de manufactura (FMS: Flexible Manufactured System), académica, modelada mediante una CPN.

2 REDES DE PETRI COLOREADAS VERSUS REDES DE PETRI

A pesar de las ventajas que ofrece el uso de las redes de Petri ordinarias o PT-nets para describir sistemas del mundo real, existe un conjunto de limitaciones que ponen de manifiesto la necesidad de tipos de redes más poderosas para describir sistemas complejos de forma más manejable.

Uno de los problemas típicos de muchas de las aplicaciones de las PT-nets es que los sistemas del mundo real a menudo contienen muchas partes similares, aunque no idénticas. Usando redes de Petri no coloreadas, esas partes deben ser representadas mediante subredes disjuntas con una estructura bastante similar. Esto significa que la red de Petri puede llegar a ser muy grande, con el correspondiente problema de mantenimiento de modelos.

El desarrollo de redes de Petri de alto nivel, tales como las CPN, constituye una mejora significativa en este aspecto, ya que permiten una representación más compacta. Más concretamente, las CPN combinan la potencia de las redes de Petri ordinarias con los beneficios de los lenguajes de programación de alto nivel, al proporcionar primitivas para la interacción de procesos, de la misma forma que los lenguajes de programación proporcionan las primitivas para la definición de tipos y manipulación de valores de datos [4].

Manteniendo el beneficio de la representación gráfica de las PT-nets, se añade una representación matemática formal con una sintaxis y una semántica

bien definidas que permiten la especificación de diferentes propiedades de comportamiento y los métodos de análisis formales.

Las CPN permiten entonces describir tanto la estructura completa de los sistemas, como el comportamiento de los mismos, y facilitan el mantenimiento de los modelos, lo cual significa que pequeñas modificaciones en el sistema modelado no siempre conllevan a cambios en la estructura de la CPN.

En la actualidad, las CPN son ampliamente usadas en la descripción de aplicaciones industriales, y han demostrado ser especialmente idóneas para modelar procesos de manufactura y particularmente procesos de fabricación flexibles.

3 EXPERIMENTAR CON EL MODELO

Uno de los métodos de análisis formal que permite llevar a cabo las CPN son los grafos de ocurrencia o árbol de cobertura [1,3]. La idea básica de este análisis consiste en la construcción de un grafo dirigido el cual contiene un nodo por cada estado alcanzable del sistema, y un arco por cada posible cambio de estado.

El árbol de cobertura de una CPN se puede representar como un árbol cuya raíz representa el estado inicial del sistema, a partir del cual se van generando los distintos estados que el sistema puede alcanzar dependiendo de los eventos que pueden ser disparados en un momento determinado.

De esta manera, las CPN permiten realizar el análisis del comportamiento del sistema por medio de la construcción del árbol de cobertura el cual permite evaluar el comportamiento del sistema, mediante la representación de todos los posibles estados que el sistema puede alcanzar y todos los posibles eventos que pueden ocurrir.

Esta facilidad que ofrecen las CPN puede ser aprovechada para obtener un esquema de planificación de la producción y, en el mejor de los casos, el “mejor” esquema de planificación. Así entonces, a partir de un modelo de una FMS representado mediante una CPN se puede obtener su correspondiente árbol de cobertura y en consecuencia determinar a partir del “mejor camino” la mejor asignación de tareas o *scheduling* y *routing* de producción.

Debido a restricciones computacionales, específicamente en lo que se refiere a recursos de memoria, obtener el árbol de cobertura completo es

prácticamente improbable para sistemas de fabricación flexibles, ya que el número de posibles estados de un árbol completo crece exponencialmente en la medida que aumenta la flexibilidad del modelo.

El programa desarrollado emplea una política de “poda” que permite reducir el número de estados a explorar y por consiguiente el número de ocurrencias de eventos mediante una apertura del árbol por niveles. Esto es, dado un número de niveles y un número de soluciones a encontrar, el árbol se explora hasta el número de niveles indicados (profundidad del árbol), si en este punto no se han hallado tantas soluciones como el número especificado, se escogen un número de hojas, igual al número de soluciones indicadas, si las hay, como raíces de nuevos subárboles.

Cada uno de los subárboles se abre a su vez hasta el número de niveles indicado, y para cada uno de ellos se repite la selección anterior hasta que se encuentre el número de soluciones especificado, o hasta que no puedan ocurrir más eventos, o se hayan explorado suficientes subárboles según un criterio de finalización.

Los nodos del árbol de cobertura representan los distintos valores que pueden tomar los parámetros del sistema en los diferentes estados, y constituyen los valores de color de los tokens de la CPN [4]. El estado inicial de un sistema quedaría entonces representado por los valores iniciales de sus parámetros (condiciones iniciales del sistema: estado de las unidades de producción y transporte, así como estado de los stocks.), de la misma manera que el estado final representaría los valores que se espera que alcancen estos parámetros al finalizar la ejecución del proceso modelado.

La figura 1 ilustra la construcción del árbol de cobertura de una CPN para hallar 3 soluciones con un número de niveles igual a 3. El programa inicia la construcción del árbol partiendo del estado inicial del sistema (raíz o nivel 0). En este estado se evalúan todas las transiciones, que en una CPN representan las actividades del sistema, y se disparan aquellas que están habilitadas. Cada disparo de una transición da lugar a la ocurrencia de un evento que conduce al sistema a otro estado, cada uno de los cuales es un nuevo nodo del árbol en el siguiente nivel (nivel 1).

Para cada nuevo estado, se evalúan todas las transiciones y se disparan aquellas que están habilitadas, generando nuevos nodos en el próximo nivel (nivel 2), los cuales darán origen, mediante el disparo de transiciones habilitadas, a los nodos del nivel 3.

En el nivel 3 (número de niveles especificado), se escogen 3 nodos (número de soluciones especificadas), como raíces de los nuevos subárboles, los cuales se generan de la misma manera descrita anteriormente. Este proceso continúa hasta que se hayan encontrado tantas soluciones como el número especificado.

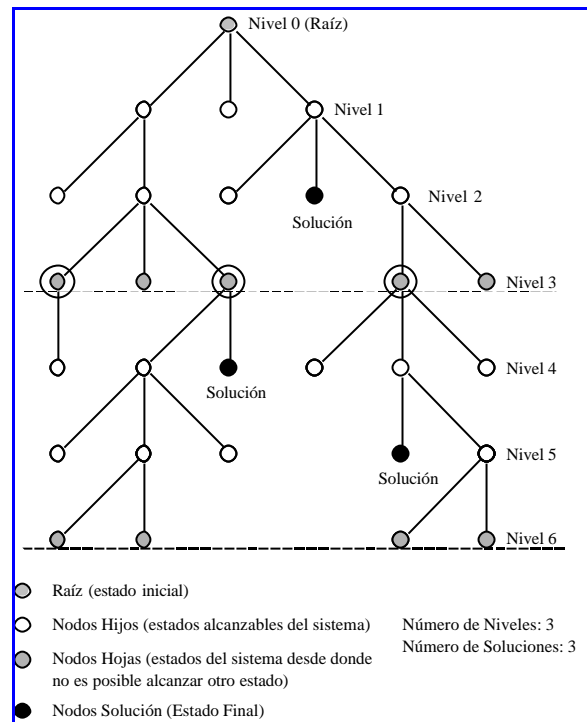


Figura 1: Exploración del árbol de cobertura.

Es de hacer notar que durante la construcción del árbol de cobertura, se pueden generar estados que ya han sido alcanzados previamente (nodos *old*). En estos casos el programa escoge el estado que ha sido alcanzado en menor tiempo (de simulación), si es necesario actualiza los tiempos de sus nodos hijos que ya hayan sido generados, y se devuelve o “rebota” hasta su nodo padre para continuar el proceso de apertura del árbol.

Esta política reduce considerablemente el número de estados a explorar y permite obtener nuevos resultados en la búsqueda de una solución. En la figura 1. se muestran tres soluciones, una en el nivel 2, otra en el nivel 4 y la última en el nivel 5. Cada una de ellas constituye un *scheduling* diferente de planificación de la producción.

4 ENTORNO DESARROLLADO

El funcionamiento de la herramienta de planificación de la producción está basado en la construcción,

recorrido y análisis automático del árbol de cobertura de una CPN que representa el sistema de producción.

A partir del estado inicial del sistema, el programa explora el árbol de cobertura y determina cual es la mejor secuencia de operaciones a realizar para alcanzar, en el menor tiempo posible, un estado final deseado, o lo que es lo mismo, obtiene el “mejor” camino del árbol de cobertura de la CPN.

Bajo este contexto, la ocurrencia de los eventos del sistema representan la ejecución de las actividades de producción asociadas a las transiciones de la CPN. Un reloj, inicialmente en 0, es actualizado cada vez que se dispara una transición, es decir, cada vez que ocurre un evento que conduce al sistema a un nuevo estado, siendo así posible determinar la secuencia de operaciones de producción que conducen al sistema al estado final deseado en el menor tiempo, lo cual equivale a obtener el esquema de planificación de la producción o *scheduling*.

El modelo que representa el sistema es suministrado al programa mediante un archivo de texto donde se describe la CPN del sistema en su totalidad, y la cual consiste en las siguientes partes (ver apéndice B) :

- Número de niveles.
- Número de subárboles.
- Definición de constantes.
- Definición de conjuntos color.
- Definición de variables.
- Definición de Funciones.
- Definición de Lugares.
- Definición de Transiciones.
- Definición de arcos.

Este archivo es suministrado como entrada al programa simulador, el cual se encarga de generar el árbol de cobertura y suministrar como salida las soluciones requeridas.

La ventaja de este entorno es que cualquier modificación o cambio en el modelo del sistema puede hacerse directamente en el archivo de texto, lo cual permite la flexibilidad de experimentar para diferentes condiciones y características del sistema a simular, así como especificar cualquier estado inicial y/o final para el mismo sistema según varíen los requerimientos de producción.

5 EJEMPLO

Una FMS es un sistema de fabricación flexible constituido por máquinas de control numérico CNC (Computer Numerical Control), un sistema de control y un sistema automático de transporte de material.

Las posibilidades de *scheduling* y *routing* de un sistema de producción de estas características pueden ser diversas y dependen, en gran medida, de los objetivos de producción.

Sin embargo la efectividad de los sistemas de fabricación flexibles depende no sólo de la capacidad de adaptarse a diferentes requerimientos de producción, sino también al empleo de políticas adecuadas de planificación que conduzcan a minimizar los tiempos de producción.

Para ilustrar el funcionamiento de la herramienta de planificación construida, se ha utilizado la FMS académica mostrada en la figura 2, la cual consta de tres robots que realizan actividades de carga y descarga, dos máquinas CNC reprogramables (unidades de procesamiento), y una cinta transportadora. El funcionamiento del sistema consiste en tomar piezas de tres tipos diferentes del *stock* inicial ($j=6$), transportarlas hasta cualquiera de las dos unidades procesamiento ($j=10$ o $j=11$), procesarlas, una vez procesadas colocarlas en los puestos de montaje correspondientes ($j=12$ o $j=13$), ensamblarlas en una sola pieza y transportarlas hasta el *stock* final ($j=9$).

El sistema, modelado mediante una CPN (ver apéndice A), ha sido suministrado como entrada al sistema automático de planificación de la producción, a fin de observar las diferentes posibilidades de *scheduling* que puede proporcionar la herramienta para determinadas condiciones iniciales del sistema.

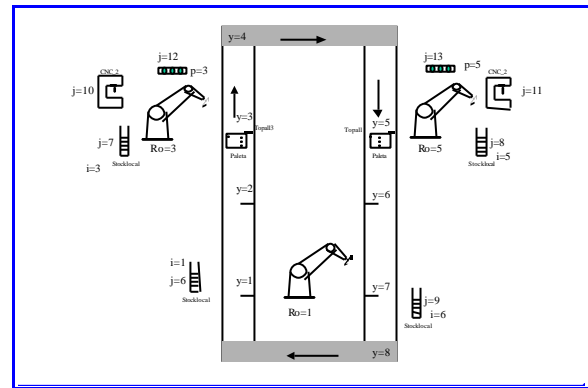


Figura 2: Sistema de fabricación flexible modelado.

Este sistema ha permitido experimentar con diferentes alternativas de *scheduling*, poniendo de manifiesto la utilidad y flexibilidad de la herramienta. Nótese que el número de combinaciones de eventos del sistema obedece a un problema NP-completo. Por ejemplo, considérense las siguientes situaciones:

1. Un solo pallet, y tiempo de procesamiento en las unidades mucho mayor que el tiempo de transporte del mismo a lo largo de la cinta transportadora.

En este caso el pallet se transforma en un recurso compartido y el sistema de transporte se convierte en el cuello de botella. El programa genera un esquema de planificación que le dará prioridad a la descarga de piezas desde los pallets hacia los stocks locales ($j=7$ o $j=8$), donde esperaran su turno para ser procesadas, y asignará cargas de trabajo a cada unidad en función de su rendimiento.

2. Tres pallets y tiempo de procesamiento en las unidades mucho mayor que el tiempo de transporte de pallets.

En esta situación el programa genera un *scheduling* que alterna la descarga de piezas desde los pallets hacia los *stocks* locales ($j=7$ o $j=8$), y de los *stocks* hacia las unidades de procesamiento, a fin de aprovechar al máximo los recursos disponibles, en este caso, el sistema de transporte.

3. Tiempo de procesamiento en unidad mucho menor que el tiempo de transporte de pallets.

El programa genera en este caso una política de planificación que da prioridad a la carga y descarga de piezas directamente desde el pallet, obviando los *stocks* locales $j=7$ y $j=8$.

Existen muchas otras alternativas de asignación de tareas en función de los parámetros del sistema: número de robots, tiempo de carga y descarga de empleado por cada robot, número de unidades de procesamiento, tiempo de procesamiento de cada unidad, número de pallets, etc.

El sistema puede proporcionar tantas alternativas como número de soluciones a encontrar se indiquen, cada una de ellas con los correspondientes tiempos de fabricación. Sin embargo, alcanzar la mejor solución dependerá de la combinación adecuada de **número de niveles/número de soluciones** que se indiquen como entradas al programa, y, lo más importante, de una representación fiel del sistema y de su comportamiento cuando es modelado mediante la CPN.

6 CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado el formalismo de las Redes de Petri Coloreadas como herramienta de

modelado para la descripción de la arquitectura de las líneas de producción.

El elevado número de variables de decisión presentes en los actuales sistemas de fabricación flexibles suelen comportar un árbol de cobertura lo "suficientemente grande" como para hacer prácticamente imposible su manejo computacional, y esto sin contar con las numerosas combinaciones de eventos que deben ser probadas si se quiere explorar todos los posibles estados del sistema.

Si bien el costo computacional para un sistema de esta naturaleza es bastante elevado, se ha logrado desarrollar un prototipo de esta herramienta que permite simular el comportamiento de un sistema de producción modelado mediante una CPN, el cual es capaz de generar esquemas de planificación de la producción, evaluando todas las posibles combinaciones de estados y eventos.

Actualmente se estudia la implantación distribuida de este prototipo a fin de aumentar su robustez y eficiencia, así como también reducir el tiempo de ejecución. Así mismo se contempla la incorporación de técnicas heurísticas que permitan la obtención del *scheduling* de manera más eficaz.

Referencias

- [1] Gambin, A. J., Piera, M. A., Riera, D., (1999) "A Petri Net Based Object Oriented Tool For The Scheduling Of Stochastic Flexible Manufacturing Systems", *Proceedings of IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*.
- [2] <http://home.arcor-online.de/wolf.garbe/petrsoft.html>
- [3] <http://www.daimi.au.dk/CPnets/intro/analysis.html>
- [4] Jensen, K., (1997) *Coloured Petri Nets: Basics Concepts, Analysis Methods and Practical Use*, Vol. 1,2,3, Springer-Verlag. Berlin.
- [5] Piera, M. A., Gambin A. J., Vilanova R., (1998) "Object Oriented Stochastic Petri Net Simulator: A Generic Kernel for Heuristic Planning Tools", *Lecture Notes in Artificial Intelligence 1415*, pp. 244-253.
- [6] Zimmermann, A., Dalkowski, K., Hommel, G., (1996) "A Case Study In Modeling And Performance Evaluation Of Manufacturing Systems Using Colored Petri Nets" in *8th European Simulation Symposium (ESS '96)*, pp. 282-286.