Artículos

OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN: ESQUEMAS DE OPTIMIZACIÓN EN DOS FASES

Diego Rodríguez
Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas
Universidad de Zaragoza

RESUMEN

La optimización es una cuestión clave en el diseño de fabricación de grandes sistemas. Para ello es necesario un formalismo que modele y exprese de manera adecuada las relaciones de competición y de cooperación. Por otra parte, las técnicas de optimización robusta y eficiente son necesarias. Este papel presenta una herramienta integrada para la optimización automatizada de Sistemas de Eventos Discretos, en el entorno de aplicación de los sistemas de fabricación. Después de una descripción muy rápida de la optimización así como los problemas en los sistemas de fabricación, se presenta la integración de dos herramientas existentes para modelar y evaluar con redes de Petri y un paquete de uso general la optimización basada en "Simulated Annealing" (Aarts y Korst, 1989). La consideración de un "cache" y de una técnica de dos fases para la optimización permite acelerar la optimización en un factor de 35. Durante la primera fase de preoptimización, una primera aproximación del sistema al conjunto de parámetros óptimo se calcula basándose en el cómputo de cotas de prestaciones. Una segunda fase estándar es después implementada. Algunas mejoras para resolver algunos de los problemas detectados en los esquemas de dos fases son considerados en dicho trabajo.

1.- INTRODUCCIÓN

El diseño de los sistemas de fabricación modernos es una tarea compleja. Las altas inversiones realizadas hacen necesario cerciorarse de que el sistema satisface los requisitos. Métodos y herramientas para modelar, evaluar el funcionamiento y optimizar de la fabricación de los sistemas son por lo tanto importantes.

Los Sistemas de Eventos Discretos (SEDs) corresponden a una vista de los sistemas donde el espacio de estados es discreto (es decir los estados son contables) y los cambios del estado son conducidos por eventos (externos o internos). El diseño de los sistemas de fabricación y su operación es uno de los campos tecnológicos donde los SED son extensamente usados.

La complejidad del comportamiento de SEDs requiere de los medios formales para su modelado. En este trabajo consideramos las redes de Petri (RdP) (Balbo y Silva 1998) para esta tarea. Como es habitual en los sistemas de fabricación, este paradigma permite modelar sistemas con la interpolación intrincada de la cooperación y competición, gracias a la capacidad de estas redes a resolver los conflictos del modelo y sincronizaciones. Combinado con una apropiada interpretación las extensiones de RdPs conducen a diversos formalismos útiles en diversas fases del ciclo vital del sistema bajo diseño o operación. La interpolación compleja de elecciones y sincronizaciones en sistemas de fabricación pueden conducir a los sistemas a comportamientos paradójicos. Por ejemplo, el aumento en número de los recursos (es decir símbolo en el modelo de red) puede conducir a un "deadlock" en el sistema, y sustituir una máquina por otra más rápida puede disminuir la productividad global. Es clara la necesidad de tanto las técnicas formales, como las herramientas en la computadora para el diseño y la optimización. La contribución principal de este trabajo es metodológico: una estrategia de optimización bifásica que conduce a la mejora razonable de la eficacia.

2. - PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

En este punto se pretende dar una idea completa de cuales son los problemas de optimización con los que nos vamos a enfrentar así como de los espacios de soluciones posibles sobre los cuales estará la solución "óptima". En primer lugar analizaremos cual es la función a optimizar comentando cada uno de sus elementos componentes. Posteriormente se verán los espacios de búsqueda habituales analizando la naturaleza de las variables, que tendrán que ver con elementos definidos dentro del modelo de RdP.

2.1.- Tipos de Funciones a Optimizar

El modelado en planta de los sistemas de fabricación se fija para obtener beneficio produciendo y vendiendo piezas. La función de beneficio que tiene que ser especificada y maximizada más adelante por la optimización contendrá una serie de elementos que pasamos a describir a continuación. Se puede considerar una función de Beneficio típico como aquella que contenga funciones que consideran entre sus elementos aditivos el dinero ganado tras vender partes acabadas. Sus partes negativas son aquellas que representan los costes que suponen piezas en el proceso de producción, el precio de los materiales previos, el dinero correspondiente a el trabajo-en-proceso, los costes de las máquinas y los sistemas de transporte, la amortización, y los costes dependientes de la utilización son algunos ejemplos de costes de un modelo. La complejidad de la función del beneficio depende de las necesidades del modelador y deberá incluir cada influencia significativa.

Las funciones podrían ser más complejas si incluyeran otras elementos como por ejemplo los factores humanos y los costes de la contratación de obreros especializados.

A modo de explicación y para una mas fácil comprensión de el formato de las funciones beneficio presentamos a continuación una de las usadas en los ejemplos de la literatura.

Profit: 1440(70*Thr(PiezasA) (beneficios producción)*
*+60*Thr(PiezasB)) (beneficios producción)*
-10(Buf1+Buf2) (coste recursos)*
-3000 (costes fijos)

2.2.- Espacios de Búsqueda

A continuación se verán los tipos de problemas de diseño que tratamos de resolver en los sistemas de producción a optimizar. Dichos problemas a resolver serán los que darán las variables a optimizar al plantear el problema.

1. *Problemas de Selección de Máquinas*
En este tipo de problemas incluimos tres tipos de problemas que son: problemas relacionados con el tipo de máquinas (coste de las máquinas con velocidades altas o bajas), problema del fallo en las máquinas (máquinas con diversos tiempos de fallo y reparación) y problema de insertar diversas máquinas idénticas en un sistema. El problema del tipo de máquina será representado en nuestro problema con una variable real. También, el problema del fallo se representa con una variable real y posiblemente lógica que indica la posibilidad de fallos en las máquinas. El equilibrio de las máquinas no será representado en nuestro problema de la optimización, este problema es solamente un problema del diseño que es representado por otras variables. El número de máquinas idénticas presentes en el sistema será una variable entera.

2. *Mix de la producción*
Este problema aparece cuando deseamos optimizar la producción relativa los índices de varios pieza tipos. El problema es encontrar el porcentaje óptimo de cada tipo del producto. Puede ser representado por medio de variables verdaderas, con valores entre 0 y 1 para cada tipo de producto (es evidente que la suma de todos los valores de la mezcla de la producción serán 1).

3. *Problema de la ubicación del Buffer Intermedio*
El problema del Buffer Intermedio es un problema muy extendido en sistemas de fabricación. Dividimos este problema en tres subproblemas que son: el problema de la necesidad/ubicación de Buffers Intermedios donde decidimos si los Buffer Intermedios se necesitan en nuestro sistema; tamaño de Buffer Intermedio que es un problema numérico donde tenemos que elegir la óptima capacidad del Buffer Intermedio; y selección del número de pallets en nuestro sistema que hacen el sistema "óptimo". Este problema es similar al problema del tamaño de Buffer Intermedio. El problema del tamaño de Buffer Intermedio y el número de pallets en el sistema serán representados con una variable numérica entera. La localización del buffer intermedio no tendrá una representación dentro del problema de optimización, este problema será representado en el modelo de red de Petri del sistema.

4. *Sistema De Transporte Material*
Se refiere a los diversos problemas que podemos tener cuando nuestro sistema está utilizando STM para transportar las partes sin producir desde un proceso a otro. Nosotros distinguiremos tres problemas. El primer problema es la elección del tipo de STM. Segundo es el que esta' de poner la velocidad derecha dentro el STM y tercero es el problema del número (óptimo) correcto de artículos (AGV, cintas transportadoras,...) en el sistema. También tenemos que considerar la posibilidad de elegir diferentes tipos de STM y del número de ellos que necesitamos para optimizar el sistema. La velocidad del STM es una variable real que será representada en nuestro problema. Y el número de STM que tenemos que utilizar en nuestros modelos se representa con variables de tipo entero.

5. *Política de Producción*
Este tipo de problema hace referencia a como serán producidas las piezas. Estas políticas pueden ser por ejemplo: push, pull, kanban. Estas políticas dentro del problema de optimización podrán ser representadas con una variable lógica. A nivel de representación dentro del modelado, se tendrán diferentes modelos de RdP para las diferentes políticas aplicables a los ejemplos.

3.- ESQUEMAS DE OPTIMIZACIÓN DE DOS FASES

Los modelos de sistemas de fabricación complejos son no lineales en principio. Éste es especialmente el caso de los problemas de selección donde los parámetros determinan las diversas disposiciones del sistema, estrategias o tipos la máquinas. Por otra parte hay problemas relacionados con la selección de la velocidad óptima de un sistema del transporte, el número de pallets dentro del sistema de transporte, y similares.

Sin embargo, no es posible concretar la forma de la función a optimizar, lo cuál haría los métodos estándares más simples (e.g. búsqueda del Gradiente de Newton) aplicables. Por lo tanto se decide utilizar la paquete de software ASA (adaptive simulated annealing) (Ingber 1996). La metaheurística "Simulated Annealing" (Aarts y Korst 1989) es un método relativamente simple y robusto para optimizar sistemas complejos no lineales (multivariable). El paquete ASA fue desarrollado en 1987 como mejora del algoritmo estándar, siendo más rápido que éste. Es especialmente útil para la optimización global de sistemas complejos con una cierta componente estocástica en su comportamiento y por ello fue seleccionado para nuestro tipo de problemas. Otra ventaja es que es fácilmente adaptable a nuevas áreas de aplicación ya que únicamente se deben introducir la función de coste y las correspondientes condiciones del problema. Un esquema del modo de interacción entre un optimizador general y una herramienta de RdP's se muestra en la figura 1.

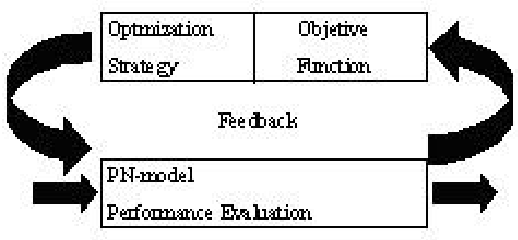

Figura 1. Esquema de optimización

Para modelar y evaluar prestaciones de forma automatizada en los sistemas de fabricación usando el paradigma de las redes de Petri una herramienta es necesaria. Un interfaz gráfico para especificar, y cambiar de modelos es requerido así como la simulación robusta y rápida además de técnicas de análisis para la obtención de las medidas de prestaciones necesarias.

Las Redes de Petri que se usan son por lo general, estocásticas ya que en el entorno de aplicación de los sistemas de fabricación los tiempos de transformación y los tiempos del transporte son sobre todo exponenciales, además los tiempos de procesado manual así como los tiempos entre fallos son considerados exponenciales.

3.1.- Necesidad de esquemas de optimización en dos fases

Dadas las premisas anteriores referentes al método de optimización a utilizar así como el modo de inicialmente modelar, y posteriormente obtener las medidas de prestaciones se procede a la implementación de dicho método de una fase. Tras esta primera aproximación se observa que la complejidad del espacio de búsqueda así como la homogeneidad de los valores de la función de beneficio hace que los resultados sean costosos desde el punto de vista del tiempo de cómputo. Por otra parte los resultados obtenidos no son del todo satisfactorios desde el punto de vista de la calidad de la solución (comparándolos con evaluaciones exhaustivas del problema de optimización) por lo que se decide realizar una optimización en dos fases. Dicho proceso consistirá en una primera fase rápida que nos servira como percepción del problema afrontado y dará información a la segunda fase para que esta pueda ser ejecutada de una forma más rápida y precisa.

3.2.- Implementación de esquemas de dos fases

La filosofía de estos métodos se basa en distribuir nuestro problema de optimización en dos fases. Una primera fase muy rápida que nos dará la solución que será la semilla de la segunda fase, más lenta pero con resultados más fiables.

La primera fase, en nuestro caso, se usará para obtener el máximo de la función de optimización, dicho óptimo será una aproximación basada en el cómputo de las medidas de prestaciones obtenidas mediante el cálculo de cotas (superior e inferior) de dichas medidas (Campos et al. 1991). Dichas cotas son obtenidas de forma rápida simplemente resolviendo un problema de programación lineal. La obtención de las cotas esta limitada a una propiedad estructural de la red de Petri que modela el sistema, con lo que no podemos asegurar que dicho método sea aplicable a cualquier sistema de producción, pero en la mayoría de los ejemplos presentes en la literatura los modelos se ajustan a dicha propiedad estructural. El coste computacional de esta primera fase es de unos segundos. La solución obtenida será la solución inicial de la segunda fase. El algoritmo de optimización usado en esta primera fase es "Simulated Annealing" en ejecución normal.

La segunda fase toma como solución inicial la obtenida tras la ejecución de la primera fase. En esta fase la obtención de las medidas de prestaciones se realiza mediante la simulación del modelo de Rdp usando la herramienta TimeNET (German et al. 1995). El método de optimización usado en esta fase es una versión del "Simulated Annealing" acelerada para que su ejecución sea mas rápida.

Se puede observar en la figura 2 un esquema del proceso de optimización en dos fases. En la parte superior de dicho esquema se situa el optimizador mientras que en la parte inferior están los evaluadores que dependiendo de la fase en la que nos encontremos será uno u otro. La parte intermedia se corresponde con la correspondiente interfaz implementada entre la herramienta de optimización y las herramientas de evaluación.

La mejora de estos métodos de dos fases comparados con los de una fase es de 5 veces más rápidos y la calidad de la solución obtenida no se ve sacrificada por dicha eficiencia en la ejecución.

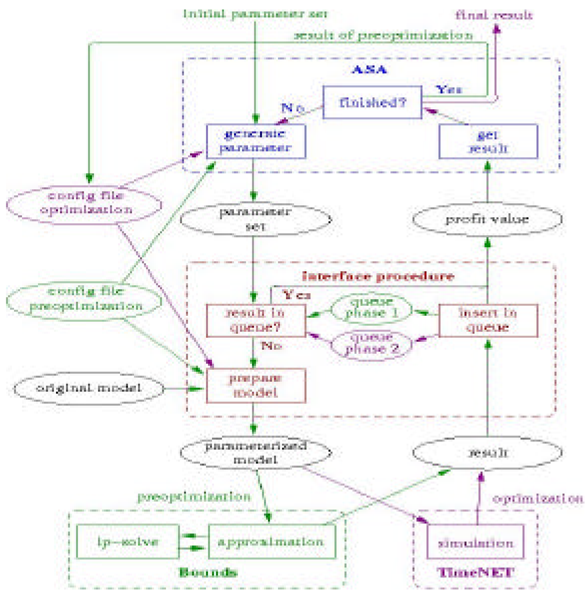

Figura 2. Esquema de optimización en dos fases

Se pueden considerar algunas mejoras de estos esquemas de dos fases o algunas variantes que pueden mejorar en algunos casos la calidad de la solución y en otros el coste computacional del problema. Entre estas mejoras/alternativas podemos enumerar las siguientes:

1.- Considerar en la primera fase simulaciones rápidas del modelo de RdP.

2.- Analizar las soluciones de la primera fase de forma que en la segunda fase se pueda reducir la complejidad del problema de optimización a resolver desde dos puntos de vista:

a) Reducir el espacio de búsqueda para la segunda fase tras un análisis de las soluciones visitadas durante la primera fase.

b) Acelerar la segunda fase dependiendo de las soluciones visitadas en la primera fase relacionando esta aceleración con el coeficiente de variación de las variables del problema de optimización para las soluciones visitadas en la primera.

3.- Considerar otros métodos de optimización para la segunda fase como puedan ser algoritmos del estilo de "Hill Climbing" o búsqueda tabú.

4.- EJEMPLO, RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este punto se presenta un ejemplo así como algunos resultados y conclusiones sobre la utilidad de los métodos explicados en este trabajo.

El ejemplo que se presenta aquí corresponde a un sistema de producción en el que se in inicialmente existen dos tipos de piezas (A y B). El recorrido que siguen las piezas durante el proceso de producción es el que se expresa en la figura 3. En dicha figura se observa que una vez la pieza penetra en el proceso de producción es transportado por un sistema de vehículos autoguiados que la transportan a las maquinas M1 y M2. La máquina M1 puede operar sobre piezas de los dos tipos mientras que la máquina M2 solo es capaz de operar con piezas del tipo A. Después las piezas son trasladadas por un par de cintas transportadoras de capacidad 2. Después se producen una serie de operaciones manuales en las que se chequean si alguna de las piezas es defectuosa de tipo B. Una vez comprobada la calidad de las piezas una tercera cinta transportadora las lleva a la estación de ensamblado donde se ensamblan con otras piezas procedentes de otra zona (que no esta modelada) y son transportadas a la estación de descarga para posteriormente ser almacenadas en el buffer de salida.

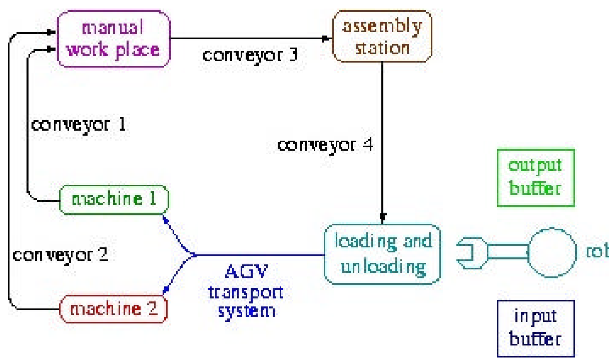

Figura 3. Layout ejemplo

La red de Petri que modela este ejemplo es la que se tiene en la figura. Este modelo será el que se optimizará variando determinados parámetros del modelo de RdP.

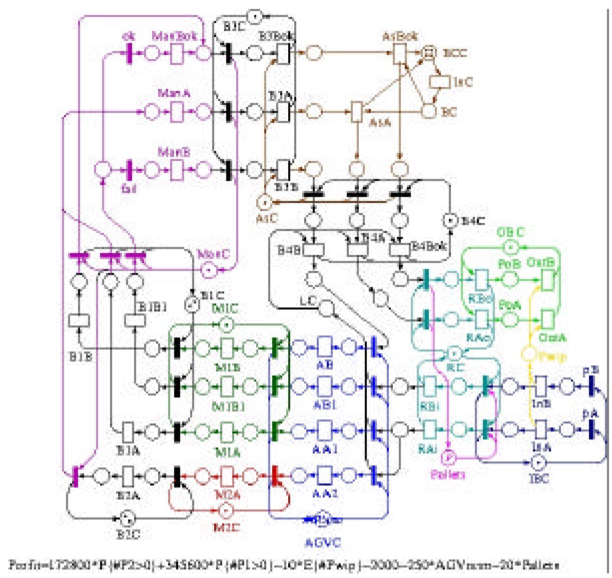

Figura 4. Modelo de Red de Petri

Los parámetros que cambian en este caso son los siguientes:

1 – *AGVnum.* Variable que nos indica el número de vehículos autoguiados presentes. Dicha variable es entera dentro del intervalo 1 y 4

2 – Pallets. Variable que representa el número máximo de elementos en el que puede haber en el sistema. El mínimo es 2 y el maximo es 30. Su representación dentro del

problema de optimización es mediante una variable entera.
3 – PartsB. Numero de piezas de tipo B que inicialmente se producen por unidad de tiempo. Dicho elemento es representado por una variable real con valores comprendidos entre 0.20 y 4.
4 – AtoM1. Número de piezas de tipo A que se dirigen a la maquina M1 por unidad de tiempo. Este dato se representa mediante una variable REAL fluctuando entre 0.20 y 4 piezas.

La función de beneficio a maximizar es:

*172800*Throughput("T1")+*
*345600*Throughput("T4")*
*-10*AvMarking("Pwip")*
*-250*ParValue("AGVnum")-20*ParValue("Pallets")*
-2000

La primera de las componentes se corresponde con las ganancias obtenidas tras producir las piezas. La segunda componente muestra el WIP (trabajo en proceso) de modelo que es penalizado. La tercera componente se corresponde con los costes asociados al número de vehículos autoguiados y el de pallets. La cuarta y última componente corresponde con una serie de costes fijos.

	ASA (Cache)	*Fase 1*	*Fase 2*	*Fase 2*	*Fase 2*
T (Acel. ASA)	100	100	10	5	1
Veh. Aut.	2	1	2	1	1
Pallets	9	5	9	10	6
% Prod. (B)	79%	78%	78%	74%	78%
% Maq. 1 (A)	22%	10%	16%	10%	10%
Beneficio	**6338**	**5069**	**6326**	**5575**	**5388**
Tiempo (min.)	**802**	**2**	**89**	**38**	**14**

Tabla 1. Resultados obtenidos para ejemplo.

La tabla 1 presenta los resultados para el ejemplo presentado aquí con la solución obtenida para diferentes experimentos. La primera columna se corresponde con en esquema de optimización de una fase, las siguientes cuatro columnas se corresponden con tres experimentos de dos fases en los que la primera columna se corresponde con el resultado obtenido tras la primera fase (rápida) y las otras tres columnas se corresponden con tres niveles diferentes de aceleración del proceso de optimización. Se puede observar como la ganancia computacional es importante y la calidad de la solución no se ve excesivamente expuesta.

La optimización de sistemas complejos es en cómputo costoso, incluso cuando metaheurísticas como “Simulated Annealing” se aplican. Esto es debido al coste necesario para la evaluación usando métodos de simulación. El método bifásico agrega una reducción del esfuerzo de 5, obteniendo una solución aceptable . El método demuestra las ventajas de está técnica con un sistema de fabricación que se modela con una red de Petri estocástica.

REFERENCIAS

E. Aarts, J. Korst: Simulated Annealing and Bolzmann Machines, *Wiley,* 1989

G. Balbo, M. Silva (eds.): Performance Models for Discrete Events Systems with Synchronizations: Formalism and Analysis Techniques" (Vols. I and II). *MATCH Summer School, Jaca, September*, 1998

J. Campos, G. Chiola, M. Silva: Properties and Performance Bounds for closed Free Choice synchronized Monoclass Networks. *IEEE Transactions on Automatic Control (special issue on Multidimensional Queueing Networks) Vol. 36 Num. 12 pp. 1368-1382.* 1991

L. Ingber: Adaptive simulated annealing (ASA): Lessons learned. *Journal of Control and Cybernetics Vol. 25 No. 1 pp. 33—5.* 1996

A. Zimmermann, D. Rodriguez, and M. Silva: A Two Phase Optimisation Method for Petri Net Models of Manufacturing Systems. *Journal of Intelligent Manufacturing* , 12(5/6) pp. 409-420, October 2001.

A. Zimmermann, D. Rodriguez, and M. Silva: Ein effizientes Optimierungsverfahren für Petri-Netz-Modelle von Fertigungssystemen. *Engineering komplexer Automatisierungssysteme* (EKA 2001) Braunschweig, April 25-27, 2001, pp. 133-151 (in german).

A. Zimmermann, D. Rodriguez and M. Silva: A Two Phase Optimisation Strategy for DEDS: Application to a Manufacturing System. *5th Workshop on Discrete Event Systems* (WODES'2000), Ghent, Belgium, August 2000. In: R. Boel and G. Stremersch (eds.): *Discrete Event Systems - Analysis and Control* (Kluwer Academic Publishers) pp. 291-298.

A. Zimmermann, D. Rodriguez, and M. Silva: Modelling and Optimisation of Manufacturing Systems: Petri Nets and Simulated Annealing. *European Control Conference* (ECC'99), Karlsruhe, 1999.

R. German, C. Kelling, A. Zimmermann, G. Hommel: TimeNET - A Toolkit for Evaluating Non-Markovian Stochastic Petri Nets. *Journal of Performance Evaluation No. 24 pp. 69-87.* 1995