

OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS LOGÍSTICOS MEDIANTE SIMULACIÓN: UNA METODOLOGÍA BASADA EN REDES DE PETRI COLOREADAS

Mercedes E. Narciso Farias, Miquel Angel Piera i Eroles
Departamento de Telecomunicación e Ingeniería de Sistemas. Universidad Autónoma de Barcelona.
Bellaterra 08193 (Barcelona) España.
Mercedes.Narciso@uab.es, MiquelAngel.Piera@uab.es

Antoni Guash Petit
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, IRI.
Universidad Politécnica de Cataluña, 08034, (Barcelona), España.
guasch@esaii.upc.es

Resumen

Los modelos de simulación han demostrado ser útiles para evaluar el rendimiento de diferentes configuraciones y/o procedimientos de operación alternativos para sistemas logísticos complejos y sistemas de producción. Es cada vez más aceptado que la simulación es una poderosa herramienta de apoyo a la toma de decisiones en empresas e industria, que permite mejorar la eficiencia operacional y organizacional. Sin embargo, cuando aplicamos las técnicas de simulación para incrementar el rendimiento de esos sistemas, surgen varias limitaciones debido a la incapacidad de evaluar más de una fracción del inmenso rango de opciones disponibles. Los actuales paquetes de software de simulación comerciales han integrado herramientas de optimización tratando de dar una respuesta adecuada como herramientas de apoyo a la toma de decisiones para hacer frente a las demandas industriales donde la toma de decisiones usualmente involucra algún riesgo económico o tecnológico. La Simulación/Optimización es uno de los enfoques más populares para mejorar el uso de los modelos de simulación como herramienta para obtener los mejores valores (óptimos o cuasi-óptimos) de las variables de decisión que minimice una cierta función objetivo. Sin embargo, a pesar de los logros de varios paquetes de Simulación/Optimización, muchas barreras técnicas aún permanecen. En este artículo se describe un nuevo enfoque para integrar métodos de evaluación (simulación) con métodos de búsqueda (optimización) basados no solo en resultados de simulación, sino también usando la información que proporciona el modelo de simulación.

Palabras Clave: *Scheduling*, optimización, planificación de la producción, Redes de Petri Coloreadas, herramientas de apoyo a la toma de decisiones.

1 INTRODUCCION

La competitividad en el mercado mundial, los altos requerimientos de calidad de los productos, junto con demandas aleatorias en lugar de demandas fijas, son algunos de los factores que han forzado cambios en la industria:

- De arquitecturas de producción rígidas y/o no automatizadas (tales como Flow Shop, Job Shop) hacia Sistemas Flexibles de Manufactura (*FMS: Flexible Manufacturing Systems*).
- De metodologías de planificación de la producción convencionales hacia metodologías basadas en heurísticas, con las cuales poder hacer frente a la gran cantidad de variables de decisión inherentes a las actuales arquitecturas de producción.

La solución óptima exacta de un problema de planificación en sistema de producción, distribución o transporte, es bastante compleja y difícil, y hasta imposible de obtener.

Las limitaciones de la simulación surgen de la incapacidad de evaluar más de una fracción del inmenso rango de opciones disponibles. La mayoría de los paquetes comerciales de simulación orientada a eventos discretos están diseñados para ser usados como herramientas de análisis. Esto es, el sistema a bajo estudio es modelado, perturbado, parametrizado y simulado para predecir que cambios causarían en el sistema real las perturbaciones o las diferentes configuraciones de los parámetros. La figura 1 ilustra este enfoque.

Los problemas de optimización tradicionales han sido diseñados para buscar las soluciones óptimas cuando el sistema está adecuadamente estructurado

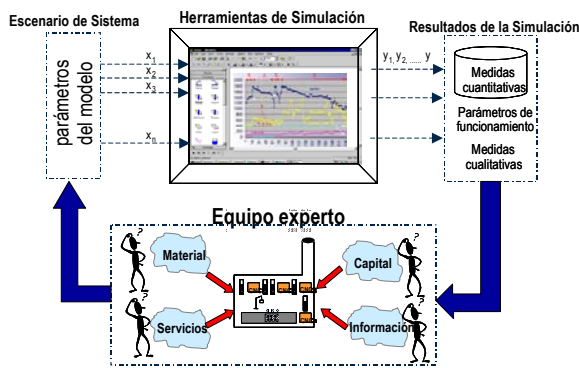


Figura 1: Enfoque de Simulación.

en términos de una función objetivo $F(x)$, un conjunto de restricciones, requerimientos y límites:

<i>Maximizar o Minimizar:</i>	$F(x)$
<i>Restricciones:</i>	$Ax < b$
<i>Requerimientos:</i>	$gl < G(x) < gu$
<i>Límites:</i>	$l < x < u$

Los problemas prácticos a menudo suelen presentar un comportamiento no lineal, relaciones combinatorias e incertidumbres que no pueden ser formalizadas fácilmente como un conjunto de restricciones junto con una función objetivo. Además, es de hacer notar que la simplificación de algunas de esas dinámicas complejas en un factor matemático o en una expresión matemática demasiado simplificada conducirá a las herramientas de simulación a resultados muy pobres cuando sean aplicadas al sistema real.

Algunas características particulares de los sistemas logísticos que han forzado el uso de metodologías específicas para representar la dinámica suelen estar relacionadas con aspectos asociados a los servicios que ofrecen:

- Los servicios se diferencian de los materiales a manipular ya que ellos son: intangibles, heterogéneos (no estandarizados), inseparables (significa la dificultad de separar la producción del servicio del consumo), y perecedero (imposible de almacenar) [12].
- Los servicios logísticos también tienen esas características singulares, sin embargo, también difieren en gran parte de los servicios descritos en la literatura de servicios. Por ejemplo, los servicios logísticos principalmente involucran relaciones negocios-negocios, donde no solo el comprador es el apostador crítico, sino también su cliente el cual puede ser directamente agraviado debido a un mal servicio. Además,

hay en muchos casos una necesidad de interacción estrecha tanto con los procesos de los clientes como con los procesos de sus compradores [1].

La simplificación y reformulación del modelo de simulación de acuerdo a unas estructuras de optimización matemática predefinidas ha sido un enfoque ampliamente usado para ciertos sistemas. Sin embargo, cuando aplicamos ese enfoque de simplificación / reformulación a sistemas logísticos y de manufactura, las soluciones resultantes usualmente están drásticamente lejos de ser óptimas o incluso fracasan en satisfacer los requerimientos de factibilidad.

Por otra parte, modelar todos los detalles del sistema objetivo mediante un programa matemático puede ser inapropiado o computacionalmente imposible.

1.1 NECESIDAD DE ESTRUCTURAS MATEMÁTICAS TRATABLES

Las restricciones lógicas entre los recursos de manufactura (máquinas de procesamiento, unidades de transporte y *stocks* locales), operaciones de producción, junto con sus relaciones temporales y de precedencia son algunos de los elementos claves que usualmente deben ser formalizados en un contexto de simulación como una secuencia de eventos, cada uno con un código computacional asociado que actualice las variables de estado y los contadores estadísticos.

Los actuales paquetes de *software* de simulación ofrecen poderosas herramientas de modelado para describir en el nivel de abstracción deseado todas las relaciones entre operaciones, procesos, recursos, condiciones y tiempos o estados del sistema. Sin embargo, aunque los fabricantes han demostrado ofrecer precisión suficiente para representar cualquier comportamiento del sistema, los modelos de simulación carecen de una estructura matemática tratable.

La combinación de métodos de evaluación y métodos de búsqueda es un enfoque atractivo ya que intenta tomar ventaja del potencial combinado de ambos mundos.

1.2 SIMULACIÓN/OPTIMIZACIÓN

El uso de algoritmos de búsqueda efectivos para seleccionar evaluaciones alternativas candidatas es esencial para tratar el crecimiento exponencial de posibles *schedulings*. Una solución obvia es el uso de rutinas de optimización que puedan guiar una búsqueda buscando mejorar las asignaciones de los parámetros de usuario con respecto a ciertas medidas de rendimiento de interés [7, 9].

La metodología Simulación/Optimización trata de combinar los métodos de evaluación y los métodos de búsqueda para proporcionar soluciones que deben ser conseguidas rápida y fiablemente.

La Simulación/Optimización puede ser definida [2] como el uso de métodos de búsqueda para encontrar asignaciones de parámetros de entrada que mejoren las mediciones de salida de un sistema simulado (la figura 2. ilustra este enfoque). Principalmente, en ausencia de estructuras matemáticas tratables este enfoque usa un paquete de “optimización” para organizar la simulación de una secuencia de configuraciones del sistema a fin de que eventualmente pueda obtenerse una configuración del sistema óptima o cercana a la óptima. Es de hacer notar que cada configuración del modelo corresponde a una asignación particular de las variables de decisión, de tal modo que las rutinas están adaptadas y desarrolladas para alcanzar la solución óptima mediante simulación solo para un pequeño porcentaje de las configuraciones que serían requeridas por una evaluación exhaustiva.

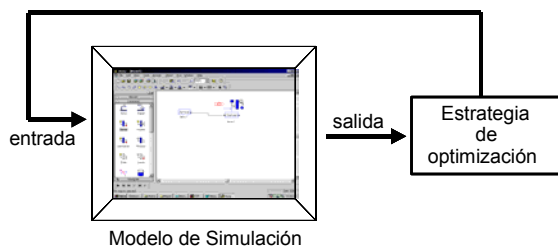


Figura 2: Enfoque Simulación/Optimización.

Avances recientes por parte de la comunidad de optimización han permitido combinar rutinas de optimización matemáticas tradicionales con métodos de Inteligencia Artificial (IA) con el objetivo de guiar satisfactoriamente una serie de evaluaciones y tratar de encontrar valores óptimos para las variables de decisión. Sin embargo, aunque la optimización basada en simulación parece ofrecer un enfoque apropiado para mejorar el rendimiento de ciertos sistemas, aparecen brechas significativas entre la teoría y la práctica en el campo logístico. Cuando se aplica este enfoque a algunos sistemas logísticos complejos, no siempre parece encontrar su camino cómodamente en la práctica, donde el uso de métodos heurísticos relativamente simples se imponen [4]. Por otra parte, el enfoque Simulación/Optimización es usado mayormente para el diseño de capacidades o diseño estratégico. Rara vez es usado en *scheduling* donde el gran número de posibilidades a explorar a través de la simulación podría ser demasiado grande para propósitos prácticos.

La metodología de Simulación/Optimización se basa principalmente en las salidas de los modelos de simulación orientados a eventos discretos estocásticos, y no toma ninguna información del modelo, ni información histórica sobre la evolución de los estados del sistema. En opinión de los autores, el uso del conocimiento sobre el comportamiento del sistema es esencial para clasificar la mayor parte de las alternativas de configuración a ser evaluadas.

Dado que uno de los objetivos claves es automatizar las tareas de toma de decisión por medio de rutinas de optimización, se propone una metodología que pueda combinar la información almacenada en el modelo de simulación (identificación de alternativas) junto con los resultados obtenidos mediante diferentes estrategias de evaluación, permitiendo de esta forma automatizar un ciclo completo de un sistema de apoyo a la toma de decisiones (*DSS: Decisión Support System*): definición del problema, identificación de alternativas, análisis, y evaluación de alternativas, seguido de la prescripción de la mejor alternativa.

En sección 2 de este artículo se introduce conceptualmente las Redes de Petri Coloreadas (*CPN: Coloured Petri Nets*) como herramienta para el modelado de sistemas logísticos o de manufactura. La sección 3 describe un *DSS* desarrollado bajo un nuevo enfoque de Optimización mediante el uso de Simulación, que integra métodos de evaluación (simulación) con métodos de búsqueda (optimización) mediante la construcción del árbol de cobertura de un modelo CPN. Finalmente, la sección 4 ilustra el uso de la metodología sobre dos ejemplos (*benchmarking*) tratados en la literatura: un problema clásico de *scheduling* en un sistema de producción *Job-Shop*, y un ejemplo de optimización para sistemas de manufactura multi-etapas.

2 REDES DE PETRI COLOREADAS

Las Redes de Petri Coloreadas han demostrado ser herramientas acertadas para el modelado de sistemas logísticos debido a las diversas ventajas tales como la capacidad de contener tanto la estructura estática como la dinámica de un sistema, disponibilidad de técnicas de análisis matemático, y su naturaleza gráfica [6, 11, 13]. Además, las CPN son adecuadas para modelar y visualizar patrones de comportamiento que muestran concurrencia, sincronización y recursos compartidos, los cuales son factores claves cuando se trata de optimizar el rendimiento de sistemas logísticos o de manufactura.

Las CPN permiten un alto nivel de modelado, mediante el uso de colores los cuales permiten la representación de los atributos de las entidades de los

paquetes de *software* de simulación comercial. Tanto las Redes de Petri (*PN: Petri Nets*) [10] como las CPN [13] han sido usadas extensivamente para la evaluación del rendimiento de sistemas de producción, ya que el modelo contiene todos los eventos y sus interacciones, así como el tiempo consumido por cada evento.

Las principales características de las CPN, que ofrecen un formalismo adecuado para describir modelos de simulación orientados a eventos discretos son:

- Todos los eventos que pueden aparecer a partir de un estado particular del sistema pueden ser fácilmente determinados a partir del espacio de estados de la CPN (árbol de cobertura).
- Todos los eventos que pueden originar la ocurrencia de un evento particular pueden ser detectados visualmente.

Una metodología de modelado que pueda soportar ambas características para cualquier tipo de sistema orientado a eventos discretos, es esencial para abordar la mejora en el funcionamiento de sistemas complejos; desde el modelo conceptual que describe todas las relaciones entre eventos, hasta la codificación del modelo de simulación que pueda soportar la tarea de toma de decisiones de las rutinas de optimización en cualquier momento del proceso de evaluación.

Otras características de las CPN que hacen adecuado el uso de este formalismo para especificar sistemas logísticos o de producción:

- Permiten la especificación de un sistema a diferentes niveles de abstracción, de acuerdo a los objetivos de modelado.
- Permiten la especificación de un sistema complejo por medio de técnicas *bottom-up* o técnicas de ingeniería del *software* más avanzadas, tales como: un proceso de desarrollo incremental e iterativo en lugar de un ciclo de cascada.
- Puede ser considerada una herramienta de modelado gráfico con pocas reglas sintácticas.

3 UN SISTEMA DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES PARA DETERMINAR PLANES OPTIMOS

El espacio de estados de un sistema logístico o de manufactura puede crecer de forma exponencial con respecto al número de eventos que pueden ser

disparados en paralelo. Debido a las restricciones computacionales, no es posible construir, analizar y mantener el árbol de cobertura completo de una CPN en la memoria del ordenador.

Un algoritmo ha sido implementado para examinar el árbol de cobertura completo almacenando en memoria solamente una estructura estática (objetos) que describe la CPN del sistema, y una estructura dinámica (árbol binario de búsqueda) que almacena en cada elemento (nodo):

- Descripción de la marcación: Información asociada a los tokens (estado del sistema).
- Información sobre la transición disparada (ocurrencia de un evento).
- Información de tiempo de los tokens usados por la transición disparada.
- Información de tiempo sobre la marcación.
- Costo de alcanzar un estado.
- Un identificador que indica la marcación a partir de la cual fue generada la marcación actual (nodo padre).

El algoritmo comienza con una marcación inicial (estado o configuración inicial del sistema), y determina todas las transiciones habilitadas para ese estado. Una transición es seleccionada, un nuevo estado es generado y se chequea su existencia en el árbol binario. Si la nueva marcación ha sido generada previamente en algún otro nivel del árbol de cobertura (nodo *old*), el algoritmo no explora las transiciones habilitadas asociadas con el nuevo estado.

No obstante, si el tiempo de llegada de la nueva marcación es menor que el tiempo de llegada de del nodo *old*, el algoritmo actualiza sus tiempos asociados por los tiempos del nodo generado. La misma actualización se realiza para todas las marcaciones generadas a partir del nodo *old*. Por otra parte, si la marcación generada corresponde a un nuevo estado no alcanzado previamente, un nuevo nodo es añadido al árbol, y todas las transiciones habilitadas a partir de este nuevo estado son calculadas y procesadas en una forma iterativa similar.

Cuando una marcación generada coincide con el estado final, la rama del árbol es almacenada desde el estado inicial hasta el estado final, con la correspondiente información sobre las transiciones, tiempos y costos de cada marcación en la ruta.

Por cada nodo del árbol binario, la identificación del nodo padre junto con la transición de llegada a la marcación es toda la información requerida para retroceder a la marcación previa y analizar otra

marcación por medio de la selección de otra transición habilitada. De este modo, es posible generar el árbol de cobertura completo de un sistema y determinar la mejor secuencia de acciones que conducen al sistema del estado inicial al estado final deseado.

La figura 3. muestra los elementos requeridos por el DSS implementado para conseguir la mejor política de scheduling [8]:

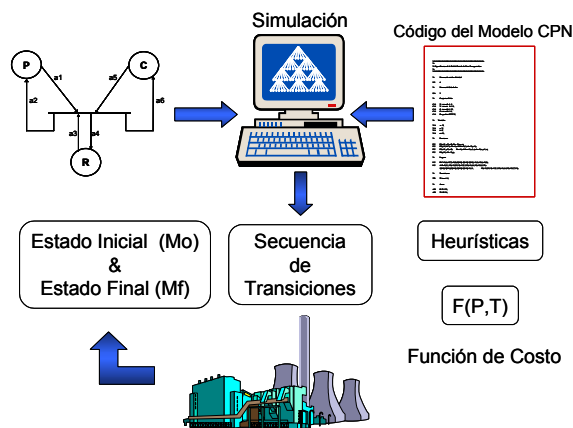


Figura 3: Principales elementos requeridos por el DSS implementado.

- El modelo CPN: se describe sintácticamente en un fichero ASCII.
- El Estado Inicial: las condiciones iniciales del sistema se especifican mediante el estado inicial de la CPN.
- El Objetivo de Scheduling: el objetivo se especifica mediante el estado final de la CPN.
- La Función de Costo: para evaluar el costo de alcanzar ciertos estados.
- Simulador: el sistema de apoyo a la toma de decisiones implementado construye y analiza el árbol de cobertura de la CPN descrita en el fichero del modelo, y poda el árbol de acuerdo a la función de costo especificada por el usuario. Como resultado, el simulador proporcionará la secuencia obtenida para alcanzar el estado final a partir del estado inicial.

La ejecución de la herramienta da como resultado, en el caso de abrir todo el árbol de cobertura, la mejor secuencia de transiciones (actividades) para conducir el sistema desde el estado inicial hasta el estado final (*scheduling*). En el caso del uso de heurísticas la herramienta suele ofrecer resultados bastante próximos al óptimo.

4 CASOS DE ESTUDIO

4.1 SISTEMA *BENCHMARKING* JOB-SHOP 6x6

Este sistema es un problema *benchmarking* bien conocido por la comunidad de optimización [3] que consiste en solucionar el problema de programar 6 tareas (*jobs*) en 6 máquinas en un sistema de producción Job-Shop. La figura 4. muestra los principales recursos del sistema de producción (6 máquinas de control numérico CNC).

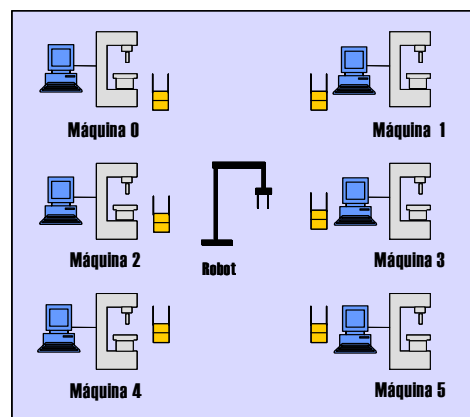


Figura 4. Recursos del problema Job-Shop 6x6.

La secuencia de máquinas para cada tarea y el tiempo requerido por cada tarea en cada una de las máquinas es conocida (ver tabla 1):

Job 1		Job 2		Job 3		Job 4		Job 5		Job 6	
Maq	Tpo	Maq	Tpo	Maq	Tpo	Maq	Tpo	Maq	Tpo	Maq	Tpo
2	1	1	8	2	5	1	5	2	9	1	3
0	3	2	5	3	4	0	5	1	3	3	3
1	6	4	10	5	8	2	5	4	5	5	9
3	7	5	10	0	9	3	3	5	4	0	10
5	3	0	10	1	1	4	8	0	3	4	4
4	6	3	4	4	7	5	9	3	1	2	1

Tabla 1: Secuencia de operaciones de cada Job.

El objetivo de optimización consiste en la minimización del *makespan* para finalizar todos los *jobs*. El *makespan* óptimo para este problema es conocido como 55 unidades de tiempo cuando se desecha el tiempo de transporte y se consideran tiempos determinísticos.

Las tablas 2, 3 y 4 describen los colores, lugares y transiciones del modelo CPN del sistema de producción Job-Shop.

Tabla 2: Descripción de colores del modelo CPN del sistema Job_Shop 6x6.

Color	Definición	Descripción
J	Int 1..6	Identificador de <i>Job</i>
M	Int 0..5	Máquina en la cual la tarea n° O del <i>job</i> J debe ser procesada.
T	Int 1..10	Unidades de tiempo requeridas para procesar cierto <i>job</i> en cierta máquina.
O	Int 1..7	Posición de secuencia del <i>job</i> O en la máquina M.
Ma	Int 0..5	Identificador de máquina.
Jo	Product J*M*T*O	Información que describe las características de cada <i>Job</i>

Tabla 3: Descripción de lugares del modelo CPN del sistema Job-Shop 6x6.

Lugar	Color	Descripción
Job	Jo	Los tokens almacenados en el lugar Job representan la información asociada con cada Job en el sistema de producción: identificador del <i>Job</i> , máquina en la cual la próxima tarea debe ser ejecutada, tiempo requerido por cada operación, y el orden de la tarea en la secuencia de operaciones para finalizar el <i>Job</i> .
Maq	Ma	Información asociada con cada máquina.

Tabla 4: Descripción de transiciones del modelo CPN del sistema Job-Shop 6x6.

Transición	Descripción
T ₁	Ejecución de una tarea de un <i>Job</i> en una máquina.

La CPN del sistema (ver figura 5) consiste en solo dos nodos lugar (máquinas y *Jobs*) y una transición que representa el procesamiento de un *job* mediante una máquina. La única precondition para disparar la transición es la disponibilidad de la máquina (expresión de arco $1'(m)$) requerida por el *job* (m valor de la expresión de arco $1'(j,m,t,o)$). Cada vez que la transición es disparada, se actualiza el reloj de simulación junto con la información de tiempo asociada con cada token en el sistema (tanto los tokens que representan las máquinas, como los tokens que representan los *jobs*). Así, aunque la transición está siempre habilitada, el simulador actualiza los tiempos asociados con los tokens de las máquinas incrementando de esta forma el tiempo asociado con los tokens de los *jobs*. La expresión de

arco F2 es usada para actualizar la información del *job* de acuerdo a su estado actual. Si consideramos que por ejemplo que el *job* 3 ha finalizado la segunda operación ($M=3, O=2$) sus colores serán actualizados a $J=3, M=5, T=8, O=3$ (ver tabla 1). De forma similar, puesto que la próxima operación debe ser ejecutada en la máquina 0, los nuevos valores de color serán $J=3, M=0, T=9, O=4$.

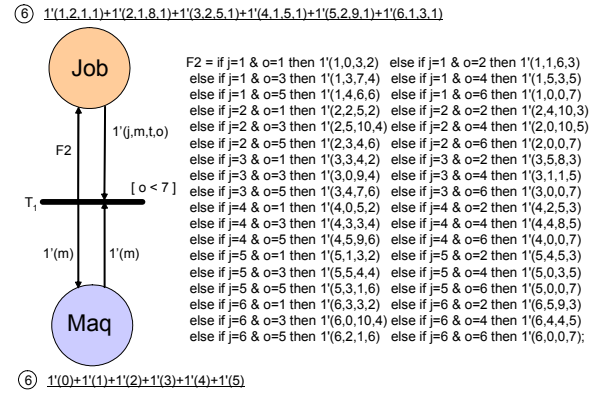


Figura 5: CPN del sistema Job-Shop 6x6.

El estado inicial del sistema 6x6 se describe mediante las expresiones subrayadas asociadas con cada nodo lugar las cuales describen los colores de los tokens. Así, el lugar *Job* contiene 6 tokens, cada uno describe un *job* que espera para realizar la primera operación. La raíz del árbol de cobertura será el vector:

$$M_0=[1'(1,2,1,1)+1'(2,1,8,1)+1'(3,2,5,1)+1'(4,1,5,1)+1'(5,2,9,1)+1'(6,1,3,1),1'(0)+1'(1)+1'(2)+1'(3)+1'(4)+1'(5)].$$

El estado final que se desea alcanzar consiste en que todos los *jobs* hayan finalizado el procesamiento de su última tarea. Este objetivo se especifica mediante el vector:

$$M_f=[1'(1,0,0,7)+1'(2,0,0,7)+1'(3,0,0,7)+1'(4,0,0,7)+1'(5,0,0,7)+1'(6,0,0,7),1'(0)+1'(1)+1'(2)+1'(3)+1'(4)+1'(5)].$$

La Figura 6 ilustra mediante un diagrama de Gantt los resultados obtenidos.

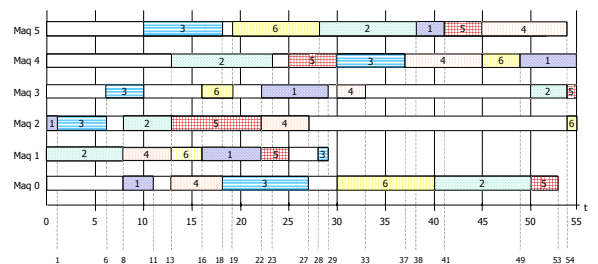


Figura 6: Diagrama de Gantt del scheduling solución.

4.2 PLANIFICACION DE LA PRODUCCIÓN PARA SISTEMAS DE MANUFACTURA MULTI-ETAPAS

El estudio descrito en [5] formula un problema cíclico de *scheduling* por lotes para fabricación multi-etapas en un sistema de producción Job-Shop. Este tipo de problema consiste en la organización de la producción en sistemas de fabricación de familias de productos a partir de ciertos productos intermedios comunes, a través de varias etapas de procesamiento y ensamblaje. La naturaleza cíclica del problema se obtiene bajo el supuesto de tasas de demanda constantes para todos los productos finales, y la hipótesis de un ciclo común para todos los productos (primarios, intermedios y finales). La descripción de un producto del sistema de manufactura se obtiene a través de un análisis entrada-salida de la estructura de los productos: productos primarios son transformados en productos finales a través de varias etapas que combinan y transforman los productos en las diferentes etapas.

Este problema es considerado *NP-Hard*, y la búsqueda de un procedimiento óptimo es aún un problema de estudio. La figura 7 muestra un grafo que describe dos trabajos genéricos: uno asociado con el producto final D, y compuesto de las tareas 2, 4, 6, 9, 10, y otro asociado con el producto final E, y compuesto por las tareas 1, 3, 5, 7, 8. En el grafo, los arcos corresponden a las restricciones de precedencia, y los nodos representan las restricciones de los recursos compartidos: el recurso 1 es usado para producir D y E, el recurso 2 es utilizado para producir B y C, y el recurso 3 es usado para producir A. El estado final para este problema consiste en minimizar la duración total del plan genérico, es decir, el *makespan* del período genérico.

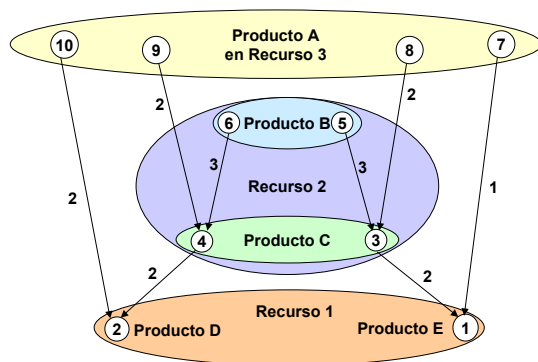


Figura 7: Grafo de una estructura de producción multi-etapas.

Las tablas 5, 6 y 7 describen la semántica del modelo CPN que permite simular este sistema de producción,

a fin de encontrar un *scheduling* óptimo utilizando la herramienta desarrollada.

Tabla 5: Descripción de colores del modelo CPN del sistema de producción multi-etapas.

Color	Definición	Descripción
Mp	int 8,10,20,30,32,48	Cantidad de productos agregados para cada tipo de producto.
X1	int 7..10	Identificador de tarea genérica para fabricar el producto agregado A.
Y1	int 0..1	Indica si el producto agregado A ha sido fabricado mediante la tarea genérica x1 (0: no ha sido fabricado, 1: ha sido fabricado).
X2	int 5,6	Identificador de tarea genérica para fabricar el producto agregado B.
Y2	int 0..1	Indica si el producto agregado B ha sido fabricado mediante la tarea genérica x2 (0: no ha sido fabricado, 1: ha sido fabricado).
X3	int 3,4	Identificador de tarea genérica para fabricar el producto agregado C.
Y3	int 0..1	Indica si el producto agregado C ha sido fabricado mediante la tarea genérica x3 (0: no ha sido fabricado, 1: ha sido fabricado).
X4	int 1,2	Identificador de tarea genérica para fabricar el producto agregado final.
Y4	int 0..1	Indica si el producto agregado A ha sido fabricado mediante la tarea genérica x4 (0: no ha sido fabricado, 1: ha sido fabricado).
Pa	Product X1,Y1	Información sobre producto A
Pb	Product X2,Y2	Información sobre producto B
Pc	Product X3,Y3	Información sobre producto C
Pf	Product X4,Y4	Información sobre producto final
Ma	int 1..3	Identificador de recurso (máquinas)

Tabla 6: Descripción de lugares del modelo CPN del sistema de producción multi-etapas.

Lugar	Color	Descripción
P	Mp	Representa la información asociada a la cantidad de materia prima requerida para fabricar el producto final.
A	Pa	Representa la información asociada al producto A: identificación de la tarea genérica mediante la cual se fabrica (7..10) y producto fabricado (1) o no fabricado (0).
B	Pb	Representa la información asociada al producto B: identificación de la tarea genérica mediante la cual se fabrica (5,6) y producto fabricado (1) o no fabricado (0).
C	Pc	Representa la información asociada al producto C: identificación de la tarea genérica mediante la cual se fabrica (3,4) y producto fabricado (1) o no fabricado (0).
F	Pf	Representa la información asociada al producto final: identificación de la tarea genérica mediante la cual se fabrica (1,2) y producto fabricado (1) o no fabricado (0).
M	Ma	Representa la información asociada a la máquina o recurso de procesamiento: recurso 1 (1), recurso 2 (2), recurso 3 (3).

Tabla 7: Descripción de transiciones del modelo CPN del sistema de producción multi-etapas.

Transición	Descripción
T ₁	Fabricación de producto agregado A.
T ₂	Fabricación de producto agregado B.
T ₃	Fabricación de producto agregado C.
T ₄	Fabricación de producto agregado final.

Las figuras 7, 8, 9 y 10 muestran los diferentes subsistemas que componen el modelo del sistema de producción.

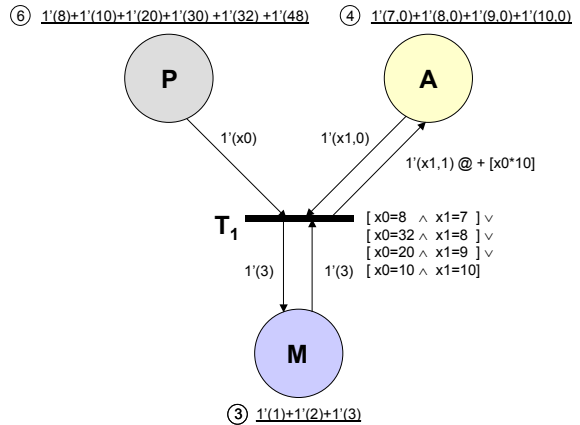


Figura 7: Subsistema de Fabricación de Producto A.

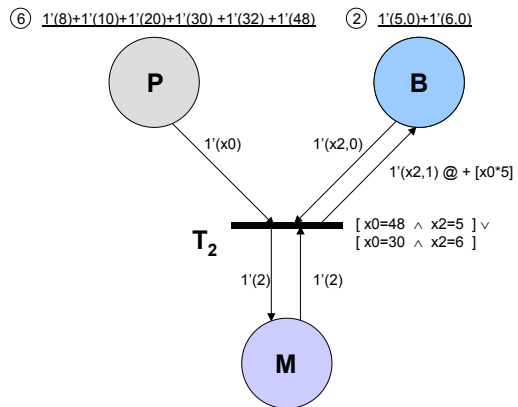


Figura 8: Subsistema de Fabricación de Producto B.

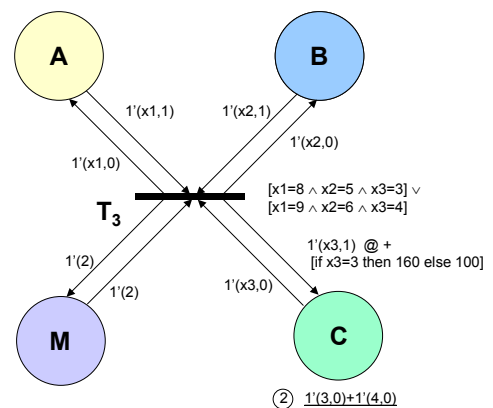


Figura 9: Subsistema de Fabricación de Producto C.

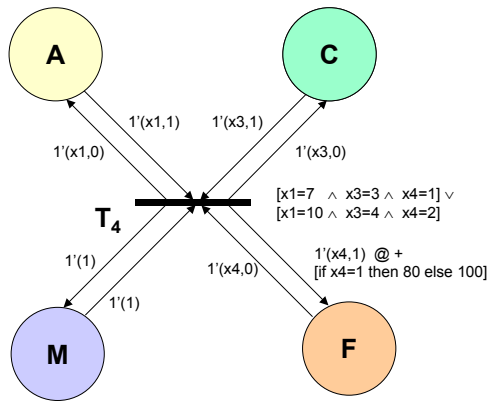


Fig. 10: Subsistema de Fabricación de Producto Final.

El esquema de producción obtenido por el DSS se muestra en la figura 11. El valor del *makespan* obtenido mediante el método propuesto es de 800 unidades de tiempo, el cual mejora el resultado disponible en la literatura [5] de 830.

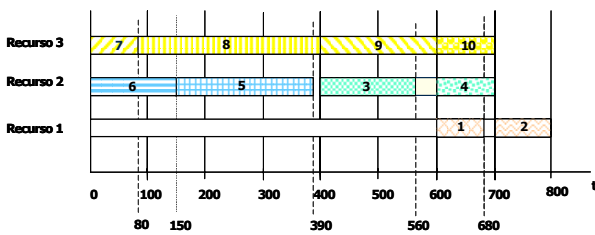


Figura 11: Diagrama de Gantt del esquema de producción obtenido.

5 CONCLUSIONES

Un Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones basado en un nuevo enfoque de Optimización mediante el uso de Simulación ha sido desarrollado. El enfoque de generación de un plan a partir de la exploración del espacio de estados, implementado mediante el árbol de cobertura de una Red de Petri Coloreada, permite generar políticas de *scheduling* a fin de satisfacer ciertos objetivos de funcionamiento de sistemas logísticos complejos.

El elevado número de variables de decisión en los actuales sistemas logísticos, suele dar origen a un espacio de estados de tamaño considerable, lo cual hace prácticamente imposible su manejo computacional. El DSS ha sido desarrollado de forma tal que diferentes algoritmos heurísticos pueden ser implementados para guiar al simulador de CPN desde un estado inicial del sistema modelado hasta un estado final deseado.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer el apoyo financiero recibido del programa Español CICYT DPI2001-2051-C01/C02.

Referencias

- [1] Andersson, D., Norrman, A., (2002) "Procurement of logistics services – a minutes work or a multi-year project?", *European Journal of Purchasing & Supply Management*, Vol. 8, Issue 1, pp. 3 - 14.
- [2] Carson, Y., Maria, A., (1997) "Simulation Optimization: Methods and Applications", in *Proceedings of the 1997 Winter simulation Conference, WSC'97*, pp. 118 -126.
- [3] Dauzère-Péres, S., Lasserre, J-B., (1994) An Integrated Approach in Production Planning and Scheduling, *Lecture Notes and Mathematical Systems*, Springer-Verlag, Berlin.
- [4] Glover, F., Kelly, J. P., Laguna, M., (1999) "New Advances for wedding optimization and Simulation", in *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, WSC'99*, Vol. 1, pp. 255 - 260.
- [5] Henet, J-C., (2001) "A Common Cycle Approach to Lot-Scheduling in Multistage Manufacturing Systems", *Production Planning & Control*, Vol.12, No. 4, pp. 362 - 371.
- [6] Jensen, K., (1997) *Coloured Petri Nets: Basics Concepts, Analysis Methods and Practical Use*, Vol. 1,2,3, Springer-Verlag. Berlin.
- [7] Law, M., McComas, M. G., (2002) "Simulation Based optimization", in *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, WSC'02*, pp. 41- 44.
- [8] Narciso, M.E., Piera, M.A., (2001) "Coloured Petri Net Simulator: A Generic Tool for Production Planning", in *Proceedings of the 2001 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA'2001*, Volume 2, pp.139 - 147.
- [9] Pichitlamken, J., Nelson, B. L., (2001) "Selection of the best procedures for optimization via simulation", in *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference, WSC'01*, pp. 401 - 407.

- [10] Piera, M.A., Guasch, T., (2001) "Coloured Petri Net for Simulation FMS Model Maintenance", in *Proceedings of the EUROSIM 2001 - the 4th International EUROSIM Congress: Shaping Future with Simulation*.
- [11] Silva, M., Valette, R., (1989) "Petri Nets and Flexible Manufacturing", *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 424, Advances in Petri Nets, pp. 374 - 417.
- [12] Zeithaml, V.A., Parasuraman, A., Berry, L.L., (1985) "Problems and Strategies in Service Marketing", *Journal of Marketing*, Vol. 49. pp. 33 - 46.
- [13] Zimmermann, A., Dalkowski, K., Hommel, G., "A Case Study In Modelling And Performance Evaluation Of Manufacturing Systems Using Colored Petri Nets", in *Proceedings of the 8th European Simulation Symposium (ESS '96)*, pp. 282 - 286.