

LA OPTIMIZACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO BAJO INCERTIDUMBRE: EL PROYECTO SCHUMANN

Lario F.C.¹ Escudero L.² Pastor S.¹ García J.P.¹ Rodríguez A.¹

¹ Grupo GIP. Departamento de Organización de Empresas.

Universidad Politécnica de Valencia.

Correos electrónicos: fclario@omp.upv.es, spastor@com.upv.es, jpgarcia@upvnet.upv.es, arodriguez@omp.upv.es.

² Iberinco.

Iberdrola Ingeniería y Consultoría.

Correo electrónico: leb@iberdrolaingenieria.es.

RESUMEN

El objetivo del proyecto es desarrollar y comercializar software de Optimización y Planificación de la Cadena de Suministro - utilizando tecnología exclusivamente Europea -, que incorpore un modelo para la planificación de la producción: multi-producto, multi-nivel, multi-planta, y multi-periodo, con:

- *Múltiples fuentes de demanda,*
- *Listas de Materiales alternativas,*
- *Piezas de sustitución,*
- *Fechas efectivas de utilización,*
- *Restricciones de capacidad,*
- *Modos de obtención, de componentes, estándar y expeditivo.*

Y todo ello mediante Técnicas de Computación en Paralelo de Altas Prestaciones.

La Optimización de la Gestión de la Cadena de Suministro consiste en encontrar la mejor manera de utilizar los recursos disponibles en los proveedores, fábricas, almacenes y distribuidores, en el horizonte de planificación. En la preparación del modelo, deben tenerse en cuenta los parámetros sujetos a Incertidumbre. El Proyecto Schumann pretende enfocar el tratamiento de la Incertidumbre mediante el Análisis de Escenarios, y su conexión con las Técnicas de Computación en Paralelo.

Palabras Clave: Optimización, Planificación, Cadena de Suministro, Computación en Paralelo, Incertidumbre, Análisis de Escenarios.

1. ¿QUÉ ES EL PROYECTO SCHUMANN?

Schumann es un proyecto financiado por la Unión europea bajo el programa ESPRIT en el área Domaine 6, centrada en el desarrollo y aplicación de Redes de Computación de Altas Prestaciones (HPCN) a la optimización y planificación

industrial. La duración es de 30 meses; siendo la fecha de inicio el 1 de Enero de 1998. El sector piloto para su desarrollo es el de montaje de vehículos de automoción y los socios industriales son Daimler-Chrysler y Ford España. El proyecto está liderado por IBERINCO (Iberdrola Ingeniería y Consultoría), con el apoyo de la Universidad de Brunel (Reino Unido) y la Universidad Politécnica de Valencia (España). Logistics Consulting Partners (LCP), del Reino Unido, actúa como consultor en temas de gestión de la Cadena de Suministro.

2. LOS OBJETIVOS DE PROYECTO SCHUMANN

El objetivo del proyecto Schumann es desarrollar y comercializar un nuevo software de Optimización y Planificación de la cadena de Suministro, que incorpore funciones estocásticas para representar la incertidumbre, usando tecnología íntegramente europea referente a la cadena de suministro en el ámbito de la Fabricación, Montaje, Distribución y Servicio, conceptos a los que nos referiremos en lo sucesivo por sus siglas en inglés *MADS* (*Manufacturing, Assembly, Distribution and Service*).

La Gestión de la Cadena de Suministro en el entorno MAD se preocupa por determinar la producción y los niveles de inventario en las materias primas, ensamblajes situados en diferentes niveles de unas Listas de Materiales dadas, y productos finales. Además cubre intercambios de información a través de un conjunto de fábricas, depósitos y centros de distribución (o concesionarios) según una producción dada y con una red de servicio que debe ajustarse a requisitos de demanda fluctuante.

En muchos sistemas de Cadena de Suministro, el suministro de algunas materias primas está profundamente restringido, con largos plazos de entrega. La demanda de los productos fluctúa, tanto en volumen total como en la composición de su mezcla. Dentro de esta problemática pueden identificarse cuatro aspectos fundamentales:

- Tiempo
- Incertidumbre
- Coste Total
- Nivel de Servicio al Cliente

En estas circunstancias, la optimización de la Gestión de la Cadena de Suministro consiste en encontrar la mejor manera de utilizar los recursos disponibles en los proveedores, fábricas, almacenes y distribuidores, a partir de unos Escenarios dados para los parámetros estocásticos a lo largo del horizonte de planificación.

Los problemas que reúnen las características arriba mencionadas, se convierten en modelos matemáticos de optimización. Este tipo de modelo aplicado al problema global de la planificación logística presenta a menudo decenas de miles de restricciones y variables para una situación determinista. Los problemas pueden modelizarse como problemas lineales de gran tamaño. Con las herramientas

existentes hoy en día en la Investigación Operativa, los problemas de optimización aplicados a la logística en entorno determinista no deberían presentar mayores problemas de resolución.

Sin embargo, es un hecho suficientemente reconocido que la optimización determinista tradicional no es eficaz para capturar la conducta verdaderamente dinámica de la mayoría de las aplicaciones en el mundo real. La razón principal es que tales aplicaciones incorporan Incertidumbres que aparecen porque la información que se necesitará en las fases de decisión posteriores no está disponible para el decisor en el momento en que la decisión debe tomarse. Las aplicaciones de planificación de la Cadena de Suministro en entorno MAD como la que se describe en esta comunicación, aportan Incertidumbre en la demanda de los productos, así como en la disponibilidad, coste u otros aspectos, tanto de la obtención como de la producción de los componentes.

Uno de los propósitos de SCHUMANN es que sea fácil de integrar en la cartera de aplicaciones existentes y/o futuras:

- Que sea muy flexible y a la vez sencillo de instalar,
- Que pueda comunicarse con diferentes tipos de aplicaciones,
- Que se ajuste a los estándares actuales y a aquellos que puedan surgir.

Con más detalle, el software SCHUMANN debe contestar a preguntas como:

- ¿Cuál es el plan óptimo para abastecerse de diferentes componentes y ensamblajes en diferentes niveles de la Lista de Materiales de cada producto?
- ¿Cuál es el impacto global de un cambio en un lugar cualquiera de la cadena de suministro?
- ¿Cómo puede minimizarse el coste total?
- ¿Cuál es el compromiso entre el tiempo de respuesta y el coste?
- ¿Que política debe seguirse respecto a la producción propia y el aprovisionamiento externo?
- ¿Qué productos deben venir de qué fuentes?
- ¿Cuánto inventario debería mantenerse? ¿Dónde?

Las respuestas a las preguntas anteriores pueden responderse determinando el Plan de la Cadena de Suministro, que especifica la cuota de la producción para cada proveedor y la fábrica relacionada con cada materia prima, ensamblaje y producto final por periodo, y la localización y volumen de inventario que debe mantenerse a lo largo de toda la red (localización espacial) y a lo largo de todo el horizonte de planificación (localización temporal).

Los parámetros o variables sujetos a incertidumbre puede analizarse en su valor medio, en términos de distribución de probabilidad de cada ítem, o usando un conjunto representativo de Escenarios. Se han considerado los siguientes:

- Demanda externa por fuente y periodo.

- Demanda externa no servida.
- Disponibilidad en la obtención de los componentes en los modos estándar y expeditivo por componente y período.
- Coste unitario de obtención de los componentes y ensamblajes (modo estándar) por componente y período.
- Coste unitario de obtención (modo expeditivo) por componente y período.
- Coste unitario de producción (modo estándar) por producto y período.
- Segmento de Periodos Efectivos (EPS*) por componente y producto.

El objetivo de Schumann es considerar la distribución de probabilidad de los parámetros como parte de la definición del modelo, lo que origina un modelo muy complicado, puesto que requiere:

- Un conocimiento de gran cantidad de datos históricos.
- Una distribución de probabilidad asumida o estimada.
- El conocimiento de ciertos tipos de relaciones entre las variables.
- Conocimientos sobre complicados algoritmos para resolver el problema.
- Conocimientos de teoría estadística.

Un enfoque prometedor hoy en día parece ser el basado en Análisis de Escenarios. La definición de un árbol representativo de Escenarios puede hacerse de diferentes maneras, entre otras haciendo:

- Que el usuario defina todos los escenarios,
- Que el usuario defina el conjunto de escenarios, pero un sistema informático los seleccione,
- Que el usuario defina un escenario básico y la variabilidad de los parámetros, y el sistema informático cree el árbol de escenarios.

El esquema que propone el proyecto favorece la utilización de este último método, dada la complejidad de la definición y enumeración completa de todos y cada uno de los Escenarios, y los valores de los parámetros que los describen. Asimismo, de esta manera se facilita la Selección de los Escenarios más interesantes, no sólo los más probables. El enfoque basado en Análisis de Escenarios permite al usuario definir relaciones entre las ocurrencias de los parámetros así como entre periodos de tiempo consecutivos (o grupos de periodos).

3. ACTUAL ESTADO DEL ARTE

Los modelos tradicionales de optimización de la Gestión de la Cadena de Suministro en entorno MAD desarrollan planes de producción que minimizan los costes de mano de obra y de posesión de inventario a partir de demandas variables en el tiempo.

* EPS (Effective Periods Segment) o Período de Segmentos Efectivos: Aquel que engloba los periodos de tiempo enteros y consecutivos en los que un componente se utiliza en la fabricación de un producto dado. Viene dado por el primer y último periodo del segmento.

Kekre y Kekre (1985) desarrollaron un sistema de planificación de la capacidad, que modeliza explícitamente el trabajo en proceso (*work-in-progress*) y los plazos de entrega, y lo combina con un modelo de programación matemática discreto en el tiempo, con demandas variables deterministas. Eppen, Martin y Schrage (1989) proporcionan un excelente debate sobre la planificación de la capacidad. Utilizan un enfoque basado en Escenarios, pero ponen el énfasis en decisiones a largo plazo concernientes a la elección de instalaciones para la fabricación. Cohen y Lee (1989), Cohen y Moon (1991) y Shapiro (1993) presentan modelos para la optimización de la gestión de la cadena global en la fabricación.

Los problemas de Gestión de la Cadena de Suministro se han formulado en forma de modelos matemáticos de optimización deterministas, y han servido para resolver muchos ejemplos reales con ayuda del ordenador. Pero continua siendo un reto diseñar e implementar un modelo genérico que combine con precisión la planificación estratégica y las decisiones logísticas tácticas y que, asimismo, capture el factor tiempo y los elementos sujetos a incertidumbre en el aprovisionamiento y en la Cadena de Suministro. Se ha desarrollado, véase Escudero y Kamesan (1993, 1995) y Escudero (1994) una estructura de modelización para ocuparse de la optimización de la gestión de la Cadena de Suministro bajo incertidumbre.

La optimización estocástica mediante Análisis de Escenarios es una metodología potente que se propone en este Proyecto para la resolución de los problemas de gestión de la Cadena de Suministro en entorno MADS. En este momento, no tenemos constancia de que exista cualquier otro tipo de código que haya sido desarrollado con éxito para esta clase de problemas reales. Las alternativas disponibles basadas en procedimientos secuenciales son capaces de resolver la versión determinista del problema global para un Escenario dado, o bien la versión estocástica de un número reducido de Escenarios. Sin embargo, con frecuencia, la versión determinista no trata el problema en su conjunto, dadas las dimensiones y la complejidad del problema. En los sistemas de software existentes, las distintas partes del problema de la cadena de suministro, léase fabricación, ensamblaje, distribución y servicio, son optimizadas de manera secuencial en diferentes niveles de la lista de materiales.

La meta del proyecto es el estudio de un enfoque, basado en la optimización estocástica; no en vano, ya se han obtenido resultados muy interesantes en problemas de pequeño tamaño y en partes de problemas mayores, explotando las propiedades de descomposición del modelo estocástico. A éste respecto es importante señalar que los procedimientos matemáticos de selección para el manejo de la incertidumbre en el modelo de optimización, como por ejemplo el uso de esquemas de descomposición Lagrangianos Aumentados, se adaptan particularmente bien a un entorno de computación distribuido o en paralelo. Cuando se introducen problemas con escala temporal, el periodo de tiempo se convierte en una cuestión importante en términos de computación puesto que determina el tamaño del modelo a procesar. De ahí que el número de Escenarios

que se pueda considerar esté limitado por la técnica de resolución y la potencia de procesamiento computacional disponible. Este es la razón por la que extendemos nuestros métodos de resolución hacia desarrollos de algoritmos de descomposición que tengan en mente la implementación de los sistemas de computación en paralelo.

4. ASPECTOS CLAVE DE DISEÑO

El modelo Schumann responderá a cuestiones relacionadas con el Plan de la Cadena de Suministro. Determinará, entre otros:

- El inventario que proporciona bien el coste, el servicio, o el beneficio óptimos. La flexibilidad y capacidad de los proveedores, y por consiguiente los precios, vienen dados por programas, basados en la estrategia de fabricación y ensamblaje. Los programas erráticos provocan un suministro más incierto, un mayor coste de las piezas y una pérdida del servicio al cliente; sin embargo tienen inventarios más bajos de productos acabados. De lo anterior se deduce el interés de conectar los Programas de Fabricación/Montaje de los Constructores de Automóviles con los Programas de Compras a Proveedores.
- La demanda de suministro de cada tipo y en cada punto de montaje, así como la capacidad libre disponible para responder a cambios tanto en la demanda dependiente como independiente.

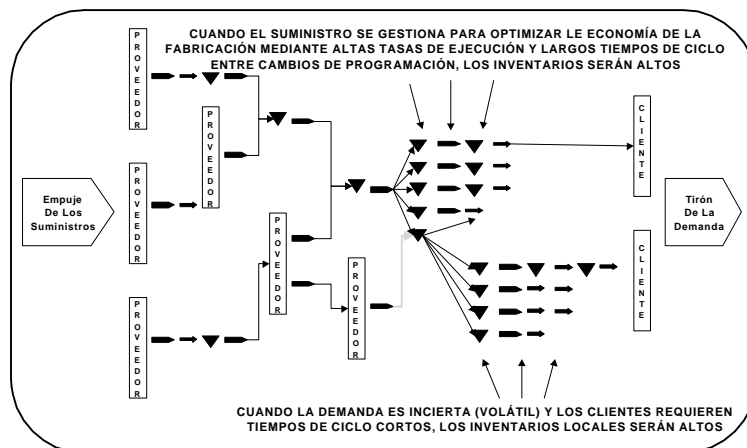


Figura 1: El efecto de la Tasa de Ejecución y de la Demanda en los Inventarios

- La capacidad óptima de cada tipo y en cada punto de montaje para optimizar bien el coste, el servicio o el beneficio de la Cadena de Suministro en su conjunto: Algunos puntos de la cadena estarán relativamente más restringidos en términos de capacidad y serán por tanto menos flexibles que otros; serán pues cuellos de botella, que normalmente son los lugares que utilizan más los envíos de carácter expeditivo. Será necesario disponer de inventario para proteger la integridad de la cadena frente a cuellos de botella en el suministro y hacer uso de fuentes alternativas de suministro. Deberán haber disponibles

piezas alternativas o sustitutas; no obstante, en el modelo de programación, estos alternados tendrán un coste distinto del de los alternados que se planificaron originariamente.

5. METAS, OBJETIVOS Y RESTRICCIONES

En primer lugar, debe tenerse en cuenta que en todo el enfoque subyace un planteamiento estocástico basado en el Análisis de Escenarios.

Las principales metas a considerar son las siguientes: a) Determinar la cuota de producción por producto y periodo, para minimizar una función de penalización del coste, satisfaciendo varias restricciones. b) Estimar las prestaciones y el comportamiento de una decisión referente a las cuotas de producción, dado un conjunto de restricciones tecnológicas y económicas. c) Determinar el uso de componentes alternados.

Las salidas básicas, serán, entre otras: a) El Plan de la Cadena de Suministro, que especifica la cuota de producción por producto y periodo del horizonte de planificación. b) El *WIP* (trabajo en proceso) por producto y periodo. c) La cantidad del producto final o ensamblaje sujeto a demanda externa que debe ser enviado en cada periodo. d) El uso de componentes alternados por componente principal, producto y periodo. e) El inventario al final de cualquier periodo de tiempo por producto y componente. f) El uso del modo expeditivo de producción u obtención.

En el modelo podrán incluirse restricciones del tipo: a) El envío de un producto no puede exceder la demanda actual más los pedidos pendientes, para cualquier periodo. b) Los pedidos pendientes de una fuente de demanda no pueden exceder un límite superior por periodo. c) Los niveles de producción deben estar entre unos límites superior e inferior permitidos. d) Un producto debe usar los componentes principales y los alternados que especifica su Lista de Materiales. Deben satisfacerse las restricciones relacionadas con el Segmento de Periodos Efectivos (EPS). e) Un Segmento de Períodos Efectivos puede ser de naturaleza obligatoria. En ese caso, no se permite inventario de un producto con componentes obsoletos después del periodo final de su EPS. f) No pueden violarse los límites superior e inferior en el uso de la capacidad agregada (PGR)** para cada grupo de productos y periodo. g) El uso de cada componente no puede exceder una disponibilidad máxima por periodo. h) No pueden violarse los límites superiores e inferiores en el uso para cada grupo de componentes externos y periodo. i) La obtención de un componente en modo estándar y en modo expeditivo no puede exceder de una disponibilidad máxima por periodo, modo y componente.

Se han considerado las siguientes funciones objetivo: a) Minimizar los costes de obtención/producción estándar y expeditivo así como los costes de posesión y la

penalización por demanda no atendida. b) Minimizar los pedidos pendientes ponderados máximos de cualquier producto en cualquier periodo para obtener una producción equilibrada. c) Minimizar los pedidos pendientes ponderados y la demanda perdida.

La solución debería utilizarse de forma dinámica. Tan pronto como aparezcan nuevos datos sobre disponibilidad de demanda y recursos, nuevas Listas de Materiales, nuevos tiempos de ciclo y pesos de los productos, etc., el modelo debería actualizarse y ejecutarse de nuevo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Cohen, M.A. and H.L. Lee. 'Resource deployment analysis of global manufacturing and distribution networks'. *Journal of Manufacturing and Operations Management* 2 (1989) 81-104.
 - Cohen, M.A. and S. Moon. 'An integrated plant loading model with economics of scale and scope'. *European Journal of Operational Research* 50 (1991) 266-279.
 - Consorcio SCHUMANN. 'SCHUMANN Esprit Programme, Domaine 6 Annex I: Project Programme Corresponding to the Proposal # 26267'. Noviembre 1997.
 - Consorcio SCHUMANN. 'SCHUMANN Esprit Programme, Domaine 6 Full Proposal # 26267'. Agosto 1997.
 - Eppen, G.D., R.K. Martin and L. Schrage. 'A scenario approach to capacity planning'. *Operations Research* 37 (1989) 517-527.
 - Escudero L. F.' Summary report on Schumann progress at the project's midterm'. 15 de Marzo 1999.
 - Escudero, L.F. 'CMIT: A capacitated multi-level implosion tool for production planning'. *European Journal of Operational Research* 76 (1994) 511-528.
 - Escudero, L.F. 'Robust decision making as a decision making aid under uncertainty'. S. Rios (ed.), *Decision Theory and Decision Analysis* (Kluwer Academic Publishers, Boston, 1994) 127-138.
 - Escudero, L.F. and P.V. Kamesan. 'MRP Modelling via Scenarios'. T.A. Ciriani and R.C. Leachman (eds.), *Optimisation in Industry* (J.Wiley, New York, 1993) 101-111.
 - Escudero, L.F. and P.V. Kamesan. 'On solving stochastic production planning problems via scenario modelling'. *TOP* 3 (1995) 69-96.
 - Kekre, S. And S. Kekre, 'Work in progress considerations in job shop capacity planning'. Working paper GSIA, Carnegie Mellou University, 1985.
- Página Web del Proyecto Schumann: ' www.lcp-ashlyns.com/schumann '.

** PGR (Product Going Rate): Factor de ponderación de cada uno de los productos constituyentes de un Grupo de Productos (generalmente líneas de fabricación). Se utiliza para calcular la Restricción Ponderada de la Capacidad Agregada para cada Grupo de Productos y periodo.