

Modelo de Planificación Dinámica de Operaciones en la Cadena de Suministro

Esther Álvarez¹

¹ Dpto. de Tecnologías Industriales. Facultad de Ingeniería. Universidad de Deusto. Avda. de las Universidades, 24, 48007 Bilbao. esther.alvarez@deusto.es

Resumen

Este artículo presenta un modelo para la planificación dinámica que está basado en el intercambio de información y en la coordinación de planes de producción que integran la cadena de suministro con el fin de obtener una buena solución global. El modelo comprende tres sistemas de comunicación basados en agentes: (i) un sistema de comunicación intraplanta, que maneja los sucesos imprevistos que se producen en el interior de una planta, (ii) un sistema de comunicación inter- plantas, que gestiona los sucesos que pueden afectar a los planes de producción de otras plantas de la misma empresa y (iii) un subsistema de comunicación de la cadena de suministro, que tiene en cuenta los eventos que pueden afectar a proveedores o clientes. Este artículo muestra algunos de los resultados de un proyecto financiado por el Gobierno Vasco (PI2008-08).

Keywords: sincronización en la cadena de suministro, planificación colaborativa

1. Introducción

En la mayoría de las cadenas de suministro, a menos que apuesten por la integración vertical, es necesario que distintas empresas compartan información y coordinen la ejecución de las operaciones con el fin de lograr un flujo continuo de productos y servicios, información y dinero.

En particular, se constata la existencia de un acuerdo amplio en la comunidad científica en cuanto a la necesidad de intercambiar información para evitar consecuencias indeseadas como el denominado efecto látigo (Donovan, 2002), que se traduce en un exceso de inventario, rupturas de stock y problemas de calidad. Aquellas compañías que establecen cadenas de suministro colaborativas son las que pueden conseguir una ventaja competitiva más significativa. Para ello, es preciso que compartan información relativa al inventario como base para tomar sus propias decisiones, lo cual redundará en una reducción de las ineficiencias y en beneficios tanto para ellas como para la cadena de suministro como conjunto (Hugos, 2006).

Las principales contribuciones en este sentido se concretan en modelos cuya función es representar la manera en que hay que gestionar una cadena de suministro. Los más importantes son los siguientes:

- El modelo SCOR (Supply Chain Operations Reference Model), que es una herramienta de diagnóstico para la gestión de la cadena de suministro que cubre todas las operaciones de interacción con el cliente, desde la introducción de pedidos hasta el pago (www.supply-chain.org).
- El modelo CPFR (Collaborative Planning and Forecasting Replenishment), que ofrece un marco general en el que proveedores y clientes pueden colaborar en la planificación, previsión de la demanda y procesos de reposición con el fin de atender mejor a la

demanda (<http://www.vics.org>). Este modelo apuesta por el uso de software basado en tecnología web y permite el intercambio de información en tiempo real (Seifert, 2003).

- El proyecto CO-OPERATE (Azevedo et al., 2005), el cual plantea un escenario de planificación colaborativa mediante la creación de una infraestructura de comunicación entre distintas empresas.

Aunque se han realizado algunos avances para reducir el efecto látigo, faltan estudios que se centren en optimizar las soluciones globales en términos de planes de producción dinámicos, es decir, aquellos que se obtienen como respuesta a anomalías que se producen en la planta durante la ejecución de las operaciones.

Este artículo describe un modelo para la planificación dinámica colaborativa que trata de coordinar diferentes niveles de la cadena de suministro con el fin de reducir los niveles de inventario, los retrasos en la entrega de pedidos y que asegure la visibilidad de los pedidos al cliente.

2. Definición del problema

El modelo de planta industrial que se ha elegido para este trabajo de investigación se corresponde con un entorno de fabricación discreta que está sujeto a perturbaciones frecuentes.

2.1. Modelo entidad-relación

Se ha empleado un modelo semántico entidad-relación para representar los elementos de la planta. El modelo entidad-relación correspondiente a la entidad Empresa y sus componentes directamente relaciones se representa en la figura 1.

Los principales componentes de la entidad Empresa son los siguientes:

1. **Planta.** Una empresa puede disponer de varias plantas. La carga de producción de cada planta se planificará de forma independiente.
2. **Referencia.** Una referencia de producto está relacionada con un producto que se puede fabricar en una planta determinada. Algunos de los atributos de una referencia de producto son el código, el tamaño de lote, el coste y el tiempo de fabricación unitario. Una orden de fabricación sólo se relacionará con una referencia para la cual existen uno o varios planes de proceso.
3. **Material.** Cada referencia precisa un conjunto de materiales que deben transformarse en productos (referencias).
4. **Operación.** Cada máquina puede ejecutar diferentes operaciones a distintas velocidades. El tiempo de carga se compone de un componente de preparación y otro de ejecución.
5. **Característica.** Las características de un producto definen los tiempos de preparación variable de cada operación
6. **Cliente.** Son las entidades que reciben el producto terminado de la empresa.
7. **Proveedor.** Son las entidades que proporcionan materiales para fabricar los productos finales de la compañía.

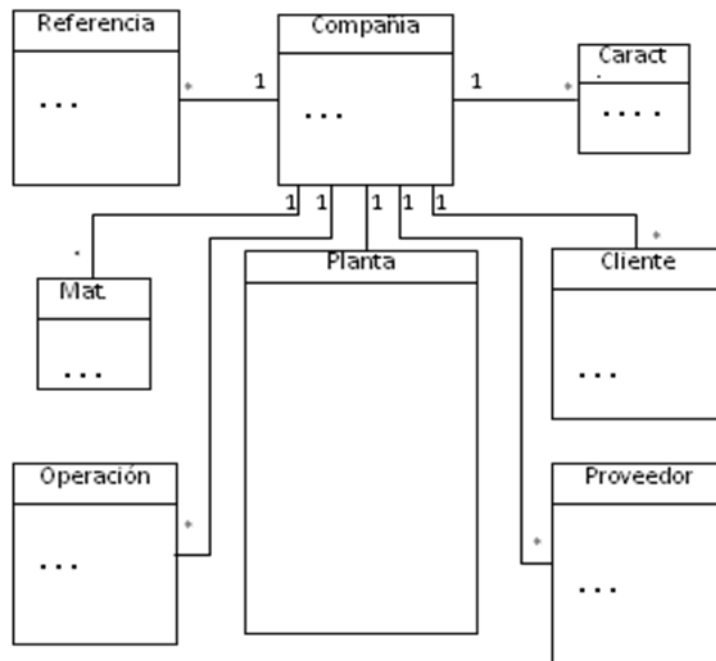


Figura 1. Empresa y componentes directamente relacionados.

2.2. Objetivos

La resolución del problema de la programación de producción conlleva la asignación de máquinas y tiempos a las operaciones que constituyen los pedidos, de tal forma que se cumplan todas las restricciones impuestas. Sin embargo, una solución que simplemente satisfaga las restricciones no es suficiente, sino que se debe conseguir la solución que además optimice los objetivos del problema.

En nuestro sistema de programación de producción los principales objetivos a lograr son los siguientes:

- *Reducción de los costes básicos de producción.* La producción de una orden o pedido genera unos costes que dependen fundamentalmente de los costes de fabricación relativos a las máquinas asignadas a las operaciones de la orden, es decir, dependen de la ruta de fabricación empleada.
- *Cumplimiento de fechas de entrega.* Un retraso en la fecha de entrega de un pedido afecta a la satisfacción del cliente, e incluso puede provocar la pérdida de futuros pedidos de éste, por lo que su satisfacción constituye un objetivo muy importante para la empresa. El cumplimiento de la fecha de entrega de cada orden es un componente de la función objetivo que se integra como un coste nulo cuando las operaciones de la orden se fabrican dentro del límite establecido, y crece al aumentar el retraso.
- *Cumplimiento de fecha de horizonte de programación.* Un retraso respecto a la fecha de horizonte de programación reduce la capacidad de las máquinas en el siguiente periodo de programación y puede desembocar en posteriores retrasos e incumplimientos de fechas de entrega. El cumplimiento de la fecha de horizonte de programación es un componente adicional de la función objetivo que se integra como un coste nulo cuando las órdenes se fabrican dentro del límite establecido, y crece al aumentar el retraso.
- *Cumplimiento de entrega justo a tiempo (JIT).* Este objetivo se plantea de forma opcional, pues se aplica sólo en caso de que el usuario desee una programación JIT. El cumplimiento de la fecha de entrega justo a tiempo es un componente (opcional) de la función objetivo que se

integra como un coste nulo cuando la orden se termina no antes de la fecha de entrega establecida, y crece al aumentar el adelanto en la terminación con respecto a esa fecha.

- *Reducción de tiempos ociosos de las máquinas.* Una mejor utilización de las máquinas es un objetivo interesante que puede conseguirse minimizando los tiempos relativos en que las máquinas permanecen paradas. Para ello, la función objetivo incorpora un componente adicional, integrado como un coste, que crece al aumentar el tiempo ocioso de cada máquina en función del trabajo medio que podría haberse realizado en ese tiempo.

De acuerdo con lo anterior, la función de coste global utilizada para evaluar la calidad de las soluciones en la resolución del problema viene dada por la siguiente expresión,

$$\sum_{i=1}^n Cp(OP_i) + \sum_{i=1}^m [Ce(OR_i) + Ch(OR_i) + Ca(OR_i)] + \sum_{i=1}^q Co(M_i) + \left[\frac{k \cdot w}{n} \sum_{i=1}^n Cp(OP_i) \right] \quad (1)$$

donde:

- n es el número de operaciones de fabricación programadas.
- m es el número de órdenes o pedidos programados.
- q es el número de máquinas disponibles de la planta.
- $Cp(i)$ es el coste de producción de la operación i , e igual al coste básico de producción (coste unitario de fabricación de la pieza en la máquina asignada por la cantidad de piezas a fabricar en la operación), multiplicado por el nivel de preferencia de la máquina asignada (factor subjetivo, ecológico, ...).
- $Ce(i)$ es el coste por retraso en el cumplimiento de la fecha de entrega de la orden i , e igual al producto del coste básico de producción de las operaciones de la orden, por el valor de prioridad de la orden, por el correspondiente porcentaje de penalización diario, y por el número de días de retraso.
- $Ch(i)$ es el coste por retraso respecto al horizonte de programación de la orden i , e igual al producto del coste básico de producción de las operaciones de la orden, por el correspondiente porcentaje de penalización diario, y por el número de días de retraso.
- $Ca(i)$ es el coste por adelanto en la terminación de la orden i respecto a la fecha de entrega (opcional programación JIT), e igual al producto del coste básico de producción de las operaciones de la orden, por el correspondiente porcentaje de penalización diario, y por el número de días de adelanto.
- $Co(i)$ es el coste por tiempo ocioso de la máquina i , e igual al producto del coste unitario medio de la máquina por el número medio de unidades que la máquina hubiera fabricado en los tiempos ociosos dentro del horizonte de planificación.

3. Restricciones

El sistema trabaja con las siguientes restricciones:

1. La empresa posee varias plantas que llevan a cabo diferentes procesos de producción que no están conectados por operaciones de ensamblado. Sin embargo, estas plantas pueden incluir máquinas que se pueden utilizar como recursos alternativos en caso de falta de capacidad en una planta determinada.
2. La comunicación y el intercambio de información tendrá lugar dentro del ámbito de los proveedores y clientes inmediatos, con el fin de sincronizar la producción dentro

de la cadena de suministro básica. Pero esta restricción no impide que un evento se propague más allá de los límites de sus proveedores y clientes inmediatos de manera que tenga un efecto más amplio (cadena de suministro extendida). De hecho, los proveedores y clientes afectados por un evento pueden, a su vez, informar al siguiente nivel de la cadena con el fin de reducir el stock de seguridad y el tiempo de suministro total.

3. Se trabaja en un contexto en el que los patrones de demanda de los productos se consideran relativamente estables.
4. Cada planta es autónoma en la toma de decisiones en relación con la programación de la producción pero, al mismo tiempo, hace uso de información proveniente de otros nodos con el fin de lograr una planificación dinámica efectiva que busque una mejor solución global.

4. Medidas de rendimiento

Para evaluar el comportamiento del sistema en la generación de planes se han considerado las siguientes medidas de rendimiento:

1. Medidas de rendimiento asociadas a la minimización de costes:
 - Coste total de fabricación asociado a un programa de producción.
2. Medidas de rendimiento asociadas a criterios de cumplimiento de plazos relativos a las órdenes:
 - Tiempo de estancia en el sistema de cada orden.
 - Retraso de cada orden y coste asociado.
 - Tiempo medio de estancia en el sistema de las órdenes.
 - Retraso máximo.
 - Retraso medio de las órdenes y coste total del retraso.
3. Medidas de rendimiento asociadas a las máquinas:
 - Número de operaciones asignadas a cada máquina.
 - Porcentaje de utilización de cada máquina en el intervalo de programación.
 - Media de operaciones asignadas por máquina.
 - Porcentaje medio de utilización de las máquinas en el intervalo de programación.

5. Infraestructura de comunicación

Como se ha explicado en los apartados anteriores, la compañía que vamos a estudiar se compone de varias plantas. Cada planta tendrá su propio programa de producción para el periodo en curso que se lanzará a las máquinas y a los operarios para su ejecución. Además, cada planta dispondrá de su propio modelo de capacidad, por lo que será posible comprobar la viabilidad de introducir nuevas órdenes de producción o demanda de capacidad adicional procedente de excepciones internas dentro de la fábrica.

Las infraestructura de comunicaciones del sistema comprende tres sistemas de comunicación basados en agentes (Álvarez et al., 2009): (i) un sistema de comunicación intraplanta, que maneja los sucesos imprevistos que se producen en el interior de una planta, (ii) un sistema

de comunicación inter- plantas, que gestiona los sucesos que pueden afectar a los planes de producción de otras plantas de la misma empresa y (iii) un subsistema de comunicación de la cadena de suministro, que tiene en cuenta los eventos que pueden afectar a proveedores o clientes. Esta infraestructura permite asegurar la visibilidad de la información entre diferentes eslabones de la cadena de suministro y, de este modo, facilitar la sincronización de diferentes programas de producción y, por ende, obtener una ventaja competitiva como conjunto.

Se ha elegido una arquitectura multi-agente, donde cada agente representa a un nodo de la cadena de suministro tal y como se representa en la figura 2. Cada planta dispone de un planificador dinámico que atiende a sus eventos internos (problemas de disponibilidad de recursos, nuevos pedidos, problemas de calidad, etc.) que se recogen a través de un módulo de captura de datos. Para ello, tiene en cuenta la capacidad disponible en su plan de producción activo. Pero además, si no hubiera capacidad suficiente en esa planta, podrá solicitar capacidad disponible en otros recursos alternativos en otra planta de la empresa a través del módulo Coordinador de plantas.

Por otra parte, si un evento afecta a los proveedores o clientes inmediatos, éstos serán informados a través del módulo Gestor y Monitorizador de eventos, o incluso jugarán un papel en la toma de decisiones. Así, cuando la llegada de nuevos pedidos exige la comprobación de la disponibilidad de materiales fuera de la empresa, se enviarán solicitudes de pedido a uno o varios proveedores adecuados y luego se elige el mejor. Los proveedores, si no dispusieran del material, podrán tener que comunicarse a su vez con sus propios proveedores. Paralelamente, cuando un evento puede afectar a los clientes en términos de retrasos en la entrega, se enviarán mensajes a los clientes informándoles acerca de la nueva fecha prevista de entrega. Estos a su vez, si ocasionaran nuevos retrasos en sus propias entregas, también se comunicarán con sus clientes, de manera que toda la cadena de suministro funcionará de una manera coordinada.

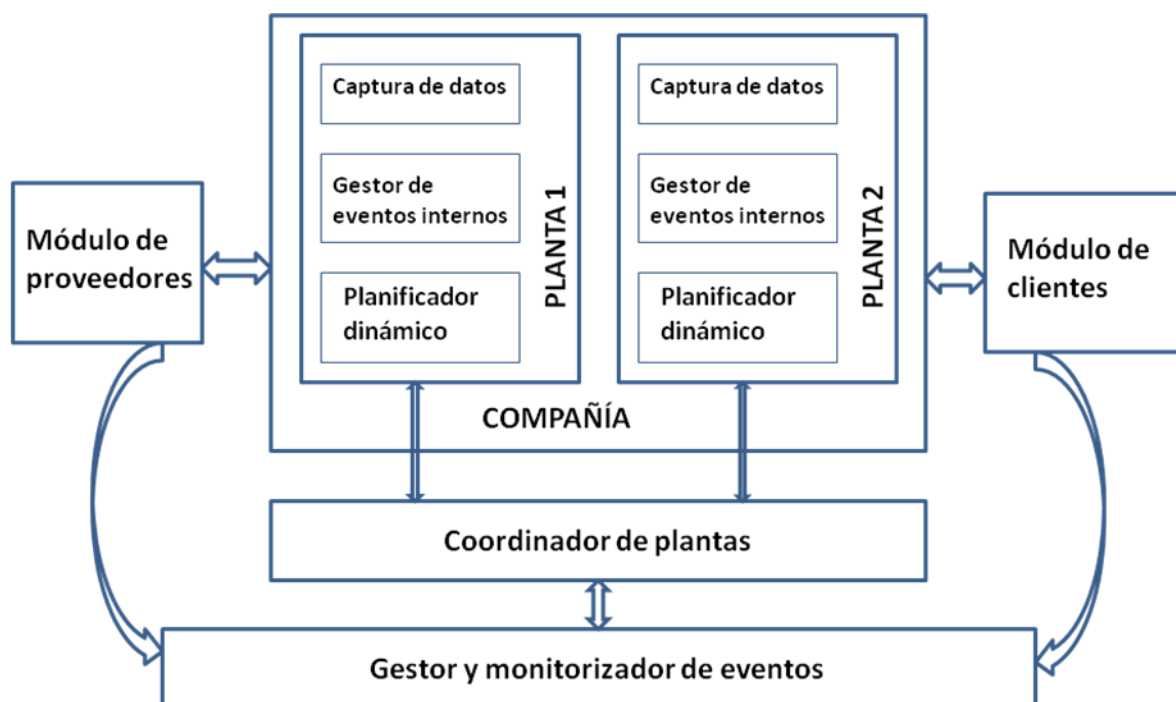


Figura 1. Infraestructura de comunicaciones.

6. Características generales del algoritmo propuesto

El algoritmo diseñado para realizar la programación de producción se basa en el procedimiento general de un algoritmo evolutivo, AE, combinado con una heurística específica adaptada al problema. Esta heurística se aplica en el proceso de generación de los organismos de la población inicial, así como en la recombinación de genes para formar nuevos organismos en las generaciones sucesivas. Tiene como objetivo producir organismos-solución viables, es decir, que cumplen todas las restricciones del problema. De esta forma, los programas de producción obtenidos pueden aplicarse siempre a la situación real de la planta, ya que satisfacen todas las restricciones impuestas.

La información de entrada que utiliza el AE está formada por todas las entidades que componen la estructura de la planta industrial. En concreto, del conjunto de operaciones abiertas presentes en el sistema, el AE se encarga de programar todas aquellas que estén sin asignar, respetando al mismo tiempo las asignaciones de máquinas y fechas de las operaciones ya programadas que pudiera haber. Esto significa que, en la búsqueda de máquina e intervalo de tiempo para las operaciones a programar, el AE considera la ocupación real de las máquinas.

El AE no se ve afectado en su funcionamiento por el motivo que ha producido la necesidad de programar las operaciones no asignadas, es decir, éstas pueden ser todas las operaciones existentes en el sistema, o bien una parte del total, que deben reprogramarse por un evento imprevisto. Los diferentes eventos imprevistos que el sistema soporta (avería de máquina, falta de materia prima, orden urgente, etc.) se tratan de forma previa a la ejecución del AE, tratamiento que conlleva la selección de operaciones a reprogramar y la modificación de la información relativa a la planta que pudiera haberse visto afectada por el evento. Esta independencia y generalidad del AE, hace que puede usarse tanto para generar programas de producción estáticos como para la reprogramación dinámica.

En concreto, para las pruebas de la programación de producción se han elegido las siguientes características y parámetros de configuración de funcionamiento del AE:

- El número p de organismos de la población se define como parámetro de configuración del algoritmo. Actualmente se adopta un número medio de organismos, dado que el objetivo más importante de las pruebas es medir la calidad de las soluciones en nivel de optimización para los diferentes criterios de selección evolutiva planteados.
- La función f de adaptación al entorno de cada organismo x_k ($k = 1, \dots, p$) usada por el AE es la inversa de la función de coste a minimizar descrita previamente:

$$f(x_k) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n C_p(i) + \sum_{i=1}^m [C_e(i) + C_h(i) + C_a(i)] + \sum_{i=1}^q C_o(i)}$$

- La selección de los organismos reproductores en cada generación se realiza mediante un criterio determinista que permite la reproducción de todos los organismos de la población actual.
- La generación de nuevos organismos-solución se realiza sólo mediante mutación de los organismos existentes (no hay cruce), es decir, el algoritmo propuesto es específicamente evolutivo.
- La selección de los organismos supervivientes (sustitución de organismos) se realiza mediante doce criterios de selección evolutiva: un esquema determinista elitista, tres esquemas de selección proporcional, tres esquemas de selección por jerarquía, dos

esquemas de selección por torneo, y tres esquemas de selección disruptiva. Precisamente es este aspecto del algoritmo, la selección de supervivientes, el eje central de nuestro estudio empírico, en el que se comparan estos doce criterios aplicados al problema de la programación de producción discreta.

7. Conclusiones

En este artículo, se describe un modelo de programación de operaciones dinámico en entornos colaborativos, en el que se identifican las principales variables, objetivos a lograr y restricciones que se han incluido. Por otra parte, también se describen algunos indicadores de rendimiento agrupados en tres grandes categorías: servicio al cliente, eficiencia productiva y calidad de la replanificación. El modelo analiza las implicaciones que la aparición de eventos imprevistos que afecten a la viabilidad de los planes de producción en una planta puede ocasionar en otros puntos de la cadena de suministro. Además, se describe el algoritmo genético que se ha utilizado para la programación de las operaciones. En las próximas etapas de la investigación se prevé el desarrollo de un software y pruebas sistemáticas que sirvan para validar la metodología elegida.

Agradecimientos

El presente artículo se basa en el trabajo realizado en el proyecto PI-2008-08, financiado por el Gobierno Vasco.

Referencias

Alvarez, E. Díaz, F. & Larrinaga, M.A. (2009) Exceptions Management in the Supply Chain; Proceedings of the 19th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM 2009; pp: 1467-1475; ISBN: 978-0-9562303-3-1; Gemini International Limited, Teeside University, UK.

Azevedo, A.L., Toscano, C. and Sousa, J. P. (2005) Cooperative planning in dynamic supply chains, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 18, No. 5, pp. 350-356.

Donovan, R. M. (2002) Supply chain management: Cracking the bullwhip effect.

Hugos, M. (2006) Essentials of Supply Chain Management. John Wiley and Sons.

SCOR 9.0 Overview, Supply chain council,

http://www.supply-chain.org/cs/root/scor_tools_resources/scor_model/scor_model

CPFR_Whitepaper_Spring_2008,

http://www.vics.org/committees/cpfr/cpfr_white_papers/

VICS,

Seifert, Dirk (2003) Collaborative Planning, Forecasting, and Replenishment: How to Create a Supply Chain Advantage, Amacon.