

## Un algoritmo para la Planificación de Producción en un Sistema en Red de Fabricación basada en Sistemas Multiagente<sup>1</sup>

Julio J. García-Sabater<sup>1</sup>, Manuel Cardós Carboneras<sup>2</sup>,  
José Pedro Garcia-Sabater<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ingeniero Industrial. DOE Universidad Politécnica de Valencia. jugarsa@omp.upv.es

<sup>2</sup> Dr. Ingeniero Industrial. DOE Universidad Politécnica de Valencia. jamarin@omp.upv.es

<sup>3</sup> Dr. Ingeniero Industrial. DOE Universidad Politécnica de Valencia. jpgarcia@omp.upv.es

### Resumen

*En la presente comunicación se hace una breve descripción de un procedimiento para la Planificación de la Producción en un sistema productivo descentralizado. La base del procedimiento consiste en ir “explotando” nivel a nivel, los requerimientos en cada una de las etapas. Sabiendo que cada etapa tiene sus propias limitaciones (calendarios, capacidades de máquinas) y que a través de ella es posible fabricar unos determinados componentes a partir de otros. Los agentes productores diseñados tienen como inteligencia un modelo matemático que elige entre las mejores alternativas disponibles. El algoritmo diseñado ha sido implementado en un sistema real de producción de piezas metálicas.*

**Palabras clave:** Sistemas Multiagente, Planificación de Producción.

### 1. Introducción

La Planificación de Producción es un problema ampliamente conocido y tratado en múltiples trabajos. Un modo de abordarlo es a través de modelos de Programación Matemática. La mayor parte de estos modelos exigen estructuras de fabricación (listas de materiales) en A.

Los sistemas de fabricación descentralizados, donde los recursos productivos no están en un único emplazamiento y se rigen cada uno por sus propias limitaciones, son una estructura de fabricación cada vez más frecuente.

En este trabajo se propone un algoritmo para la Planificación de Producción en un Sistema de Fabricación Descentralizado, donde se permiten estructuras de materiales de cualquier tipo (I,A,V,X). Dicho algoritmo ha sido desarrollado teniendo en cuenta el soporte metodológico que aportan los sistemas MultiAgente, ha sido implementado sobre una plataforma JAVA y está siendo aplicado en un grupo de empresas pertenecientes al sector del automóvil.

---

<sup>1</sup> Este trabajo deriva de la participación de sus autores en un proyecto de investigación cofinanciado por el Ministerio de Educación y Ciencia y Fondos Europeos de Desarrollo Regional (FEDER) con referencia DPI 2004-2598, cuyo acrónimo es “GescoFlow”.

## 2. Descripción de la Red de Empresas considerada

La empresa sobre cuyos requerimientos se ha desarrollado el algoritmo que se presenta a continuación se dedica a la transformación, tratamiento y montaje de piezas metálicas en el sector del automóvil, trabajando para diferentes fabricantes en diferentes lugares del mundo.

La planificación de producción es un proceso que ha devenido en crítico a medida que el grupo empresarial ha comenzado a hacer crecer la cantidad de valor que añade en la totalidad de la cadena de valor. De modo continuo nuevos productos, nuevas etapas productivas y nuevas empresas se incorporan a una red que ha encontrado en su sistema de planificación de producción un limitador de su crecimiento.

Entre los diferentes procesos que se pueden encontrar se pueden destacar los de estampación y corte, tratamiento químico, pintado, montaje y ensamblado. Además los transportes y los procesos de embalaje forman parte relevante de los procesos productivos. Algunos de estos procesos transforman a partir de un producto (bobina de acero) uno o varios productos en diferentes cantidades. Otros por el contrario componen a partir de dos o más elementos un único componente. Además los clientes no sólo demandan productos en tiempo y calidad, sino que la forma requerida exige un determinado embalaje.

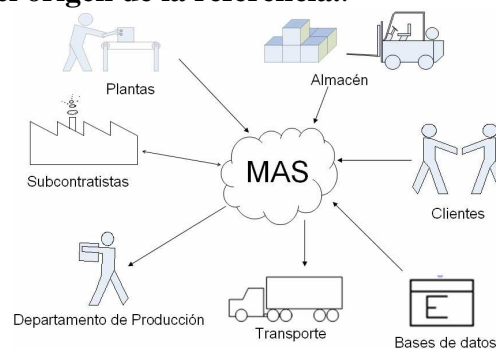
Por otro lado cada empresa puede tener su propio calendario laboral, y éste puede ser conocido o no. Además en cada empresa puede haber cantidades más o menos conocidas de inventario, que deberán ser tenidos en cuenta.

Teniendo en cuenta todos los condicionantes anteriormente expuestos los SMA aparecen como una tecnología apropiada no sólo para hacer frente al problema sino incluso para lograr un mejor entendimiento del mismo a través de su modelado.

## 3. La arquitectura del sistema.

### 3.1. Estructura general del sistema

El modelado del sistema esquemáticamente se puede representar del siguiente modo. Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



**Figura 1: Modelo general del Sistema Multi-Agente**

Los clientes envían su previsión de demanda con la que se empieza la planificación. El Sistema pregunta al almacén la disponibilidad del producto solicitado por el cliente. En caso de que no sea suficiente para cubrir la demanda, el almacén actuará de agente coordinador para conseguir tener todo el material a su tiempo. A a partir de las bases de datos se va obteniendo paso a paso la lista de materiales y se van generando tantos agentes como sean

necesarios para poder ir produciendo todos los productos. Los agentes, antes de solicitar un producto para poder fabricar el que se le ha solicitado, demandará al almacén el producto y en caso de que no existiera suficiente el agente coordinador solicitará al agente productor correspondiente el producto y su posible fecha de fabricación en función de la capacidad ya asignadas.

El resultado será transferido tanto a los subcontratistas y proveedores para que puedan planificar sus plantas así como al departamento de logística para que puedan planificar los sistemas de transporte. Actualmente el modelo no incluye un agente de transporte, sino que considera que éste se da automáticamente, pero está previsto que en futuras ampliaciones del sistema se pueda tener en cuenta, incluyendo sus restricciones.

El plan será utilizado por el departamento de producción para poder elaborar los programas de producción a partir de las fechas de recepción, entrega y tamaño de los lotes, que serán el punto de partida para secuenciar y temporalizar.

Debido a la complejidad del modelo completo se ha optado por mostrar en este caso un caso sencillo de interacción de los agentes, con limitaciones en la disponibilidad de los productos así como en algunos de los proveedores y algunas restricciones de capacidad simplificadas.

### **3.2. Modelo del agente producto**

El modelo descrito en el presente apartado describe el modelo implementado en cada agente encargado de producción. Cada vez que el almacén le solicita algún producto el agente debe ejecutar el modelo para comprobar si posee capacidad suficiente para fabricar el producto. En caso de que si tenga capacidad, calculará el momento y la cantidad en que deba ser fabricado.

El modelo matemático que el agente lleva encapsulado y que se ejecuta cada vez que se le solicita es el siguiente:

#### **Parámetros:**

$DISP_{t,k}$  = Disponibilidad del stroke k en t

$M_{jk}$  = Productos de tipo j en k.

$N_{ik}$  = Productos de tipo i en k.

$CFA_{kt}$  = Costes de fabricar k en t.

$CSU_{kt}$  = Costes de set up k en t.

$INP_i$  = Inventario inicial de i.

$SS_i$  = Stock de seguridad de i.

$DEM_{i,t}$  = Demanda de i en t.

$BEN_{i,t}$  = Beneficios de i en t.

$CAL_{i,t}$  = Costes de almacenar i en t.

$MPL_{i,t}$  = Producción planificada de i en t.

$CDI_{i,t}$  = Coste de demanda insatisfecha de i en t.

$INC_j$  = Inventario inicial de i.

$RPL_{j,t}$  = Requerimientos planificados de j en t.

$CAJ_{j,t}$  = Costes de almacenar j en t.

$CA_{i,t}$  = Compromisos adquiridos de servir i en t

### Variables:

$z_{k,t}$  = Numero de Strokes de tipo k en t.

$\delta_{k,t}$  = Si se produce k en t.

$o_{i,t}$  = Venta de i en t.

$q_{i,t}$  = Demanda insatisfecha de i en t.

$x_{i,t}$  = Existencias de i en t.

$y_{i,t}$  = Producción de i en t.

$v_{j,t}$  = Existencias de j en t.

$w_{j,t}$  = Consumo de j en t.

$r_{j,t}$  = Requerimientos de j en t.

### MAX:

$$\text{Beneficios de vender} \quad \sum_{i,t} BEN_{i,t} \cdot (o_{i,t} + CA_{i,t}) \quad \forall i,t \quad (0.1)$$

$$\text{Costes de almacenar:} \quad \sum_{i,t} CAL_{i,t} \cdot x_{i,t} + \sum_{j,t} CAJ_{j,t} \cdot v_{j,t} \quad \forall i,t,j \quad (0.2)$$

$$\text{Costes de producir} \quad \sum_{k,t} CSU_{k,t} \cdot \delta_{k,t} + \sum_{k,t} CFA_{k,t} \cdot z_{k,t} \quad \forall k,t \quad (0.3)$$

$$\text{Costes de demanda insatisfecha (backlog):} \quad \sum_{i,t} CDI_{i,t} \cdot q_{i,t} \quad \forall i,t \quad (0.4)$$

$$\text{Costes de comprar:} \quad \sum_{j,t} CAD_{j,t} \cdot (r_{j,t} + RPL_{j,t}) \quad \forall j,t \quad (0.5)$$

### SUJETO A:

$$o_{i,t} + q_{i,t} = DEM_{i,t} \quad \forall i,t \quad (0.6)$$

$$x_{i,t} = x_{i,t-1} + y_{i,t} - o_{i,t} + MPL_{i,t} - CA_{i,t} \quad \forall i, \forall t > 0 \quad (0.7)$$

$$x_{i,t} = INO_i + y_{i,t} - o_{i,t} + MPL_{i,t} - CA_{i,t} \quad \forall i, t = 0 \quad (0.8)$$

$$y_{i,t} = \sum_k N_{i,k} \cdot z_{k,t-LT(K)+1} \quad \forall i,t,k \quad (0.9)$$

$$\sum_k z_{t,k} \leq KAP \cdot DISP_{t,k} \quad \forall k,t \quad (0.10)$$

$$v_{j,t} = v_{j,t-1} - w_{j,t} + r_{j,t} + RPL_{j,t} \quad \forall j, \forall t > 0 \quad (0.11)$$

$$v_{j,t} = INJ_j - w_{j,t} + r_{j,t} + RPL_{j,t} \quad \forall j,t = 0 \quad (0.12)$$

$$w_{j,t} = \sum_k M_{j,k} \cdot z_{k,t} \quad \forall j,t,k \quad (0.13)$$

$$\text{si } (z_{k,t} > 0) \Rightarrow \delta_{t,k} = 1 \quad \forall k,t \quad (0.14)$$

$$x_{i,t} \geq SS_i \quad \forall i,t \quad (0.15)$$

El modelo matemático representa un modelo en el que se fabrican las piezas necesarias para entregar en caso de no disponerse en stock y si necesita piezas para fabricar que no posee las compra al exterior (en este caso a otros agentes)

El primer parámetro  $DISP_{t,k}$  es la disponibilidad del stroke k en t. El concepto de stroke se ha definido para afrontar la complejidad del problema. Es posible que existan distintas combinaciones de productos tanto de entrada como de salida para un mismo proceso. Las distintas combinaciones de salida se dan sobretodo en los procesos de soldadura, concretamente en determinados robots. Por todo esto se considera necesario definir el concepto de grupo. Se entiende como grupo el conjunto de piezas que intervienen en un proceso ya sea como elementos de entrada o como elementos de salida. Estos grupos pueden estar formados por una sólo pieza. De esta forma cualquier proceso se entiende como una transformación de un grupo X en un grupo X'.

Esto exige la definición un concepto que ligue de una forma más clara la transformación de un grupo X en otro grupo X'. Así aparece el concepto de stroke. Podemos entender stroke como el golpe que supone la transformación de un grupo X en un grupo X'. El ritmo de producción se va a definir como strokes/hora.

Por  $CA_{i,t}$  se entiende los compromisos adquiridos de servir el producto i en el tiempo t. Debido al funcionamiento del modelo este parámetro/variable se hace necesario debido a la realimentación del modelo. Al ejecutar el modelo por primera vez el agente debe ejecutarlo con todas las demandas que existan en ese momento, una de las salidas de esa primera ejecución será el tiempo y la cantidad a entregar a un determinado cliente. Existe la posibilidad de que más adelante se le solicite más producto y deba volver a ejecutarse el modelo, pero en este caso las salidas anteriores se convierten en entradas ya que el producto comprometido previamente no puede ser ignorado a efectos de capacidad y las condiciones de entrega no se deben alterar, en este caso la salida previa entraría en el modelo como  $CA_{i,t}$ .

Al mismo tiempo, y en dirección contraria existe la posibilidad de que de ejecuciones anteriores del modelo algún agente se hubiera comprometido a servir determinado producto j en un instante de tiempo t que deberá ser tenido en cuenta en posteriores ejecuciones del modelo. Estas recepciones planificadas se representan como  $RPL_{j,t}$

El resto de parámetros no se comentan debido a su uso extensivo en los modelos matemáticos tradicionales y a que su propio nombre indica que representan.

La función objetivo que debe tratar de perseguir el modelo es maximizar los beneficios del agente, teniendo en cuenta que los beneficios son el resultado de vender productos, menos los costes de almacenar, de producir, de comprar y en caso de que existieran los costes de no servicio (Ecuaciones de (0.1) a (0.5)).

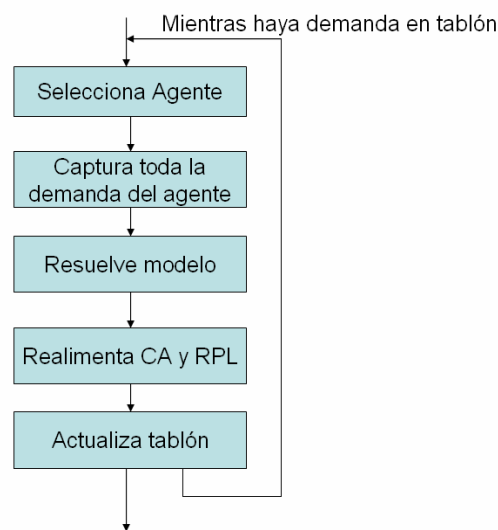
La ecuación (0.16) muestra que se debe responder a toda la demanda solicitada o bien comprometiéndose a servirla o bien haciendo saber al agente comprador que la pieza no podrá ser servida.

Las ecuaciones (0.7), (0.8), (0.11) y (0.12) representan las restricciones de mantenimiento de inventario, es decir, el inventario de un periodo es igual al inventario del anterior más la producción y lo que se esperaba recibir menos la cantidad servida.

La ecuación (0.9) muestra la continuidad en la producción de cualquier componente  $i$ , donde en cada stroke se pueden fabricar diferentes piezas.

El objetivo es que cada vez que el agente reciba órdenes de producción decida si puede fabricar, en caso de que la respuesta sea positiva comprometerse a fabricar y tener en cuenta estos compromisos antes de comprometerse a más productos.

El procedimiento, representado gráficamente en la



**Figura 2: Esquema del algoritmo**

Este proceso se repite mientras haya demanda en el tablón. La selección del agente se hace teniendo en cuenta, de entre los agentes productores con demanda aquel más arriba de una lista precalculada que indica qué agentes son prioritarios. Una vez seleccionado el agente se captura del tablón toda la demanda acumulada (tanto la externa de clientes, como la interna de subcontratistas), así como los compromisos adquiridos y las recepciones planificadas. Los datos se introducen al agente que le aplica la inteligencia (resuelve el modelo) indicando qué demanda puede servir en forma de compromisos adquiridos, y que requerimientos harán falta. Estos últimos se incorporan en forma de demanda al tablón.

Para elaborar el modelo del caso de estudio se desarrollaron cada uno de los meta-modelos de la metodología INGENIAS. Se elaboraron los Meta-modelos de Organización, Agentes,

Interacción y Entorno así como los casos de uso. El programa ha sido desarrollado en JAVA con la plataforma JADE y apoyándose en una base de datos MySQL.

El sistema propuesto es del tipo heterarquico con coordinador con los siguientes agentes.

- Agente Cliente: que transforma la demanda de los clientes en requerimientos que los agentes pueden entender y responder.
- Agente Almacén: que recibe los requerimientos de los agentes y transmite las demandas de los agentes. Este es el agente coordinador.
- Los agentes productores: que reciben las demandas, planifican la producción de aquellos productos que forman parte de su catálogo, y establecen un plan de requerimientos de materiales para poder hacer frente a la producción.

La inteligencia del Agente cliente permite transformar la demanda que presentan los clientes reales de la red, en una demanda que responda a las posibilidades de la red, y la producción de los mismos a tanto los requerimientos reales de los clientes (fundamentalmente que los productos se sirvan en embalajes específicos llenos).

La inteligencia del Almacén sirve como una bolsa que ofrece demandas y analiza propuestas de ejecución seleccionando aquellas alternativas más adecuadas. Asimismo el Agente Almacén considera las demandas que la red no puede satisfacer haciendo frente a las mismas, para que el sistema pueda seguir adelante.

El corazón del sistema se encuentra en los agentes productores cuya inteligencia es un modelo matemático, parametrizable para cada agente productor, implementado con LPSolve, que permite tener en cuenta estructuras de producto variables y alternativas de producción dentro de un mismo agente.

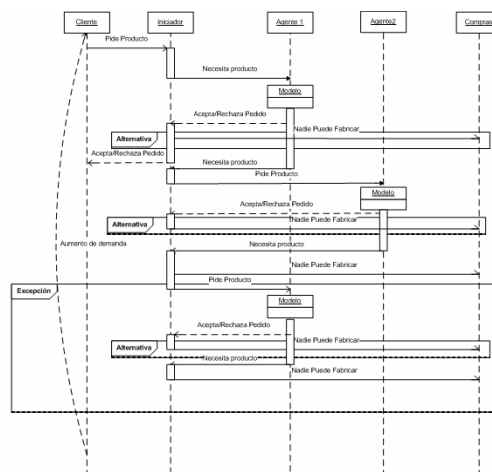


Figura 3: Modelo de comunicación en AUMML

El modelo se representa en AUMML tal y como muestra el diagrama representado en la anterior figura.

En un primer lugar el agente cliente lanza una demanda al agente iniciador (agente almacén) que pregunta al Agente 1 si puede satisfacerla. El agente 1 antes de responder a la pregunta ejecuta el modelo expuesto en el apartado anterior, y responde al agente iniciador comprometiéndose a fabricar total o parcialmente la cantidad solicitada (o rechazándola). En caso de que el agente 1 no pueda realizar toda la producción solicitada el agente iniciador se verá obligado a comprar al agente compras para poder servir el pedido.

Al mismo tiempo es posible que el agente 1 necesite producto para poder fabricar y por tanto le solicita al agente iniciador producto en una determinada fecha. El agente iniciador, en este caso, localiza el agente que fabrica el producto solicitado y repite el ciclo anteriormente descrito.

#### 4. Resultados, Conclusiones y Líneas Futuras de Investigación.

El SMA propuesto ha sido implementado con éxito en una red de fabricación concreta. Se han realizado experimentos que pretendían evaluar diferentes alternativas, teniendo en cuenta no sólo la validez de los resultados en cuanto a calidad sino también en cuanto a tiempo de computación. Los resultados obtenidos no sólo son prácticos en la implantación propuesta sino que además son claramente esperanzadores en cuanto que la flexibilidad del sistema se ha puesto de manifiesto cuando han salido a la luz particularidades del sistema que inicialmente no fueron previstas.

El problema planteado tiene más de 600 referencias finales (considerando diferentes tipos de embalajes) y más de 15 subcontratistas. Más aún algunos de ellos deben ser desglosados en varios agentes productores, para evitar que el sistema entre en bucles cerrados.

Se adjuntan dos de las múltiples pantallas que el sistema genera. La figura 4 es una pantalla que permite al usuario seguir el proceso de cada uno de los agentes, mientras que la figura 5 es una pantalla que permite al usuario analizar las demandas acumuladas para cada uno de los agentes.

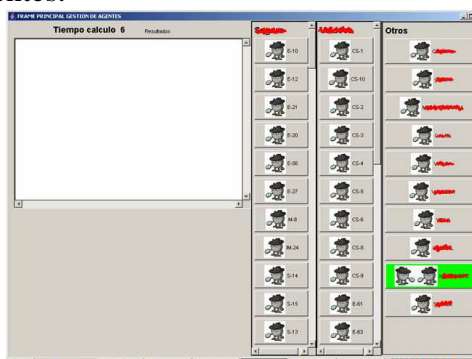


Figura 4: Pantalla de creación de agentes

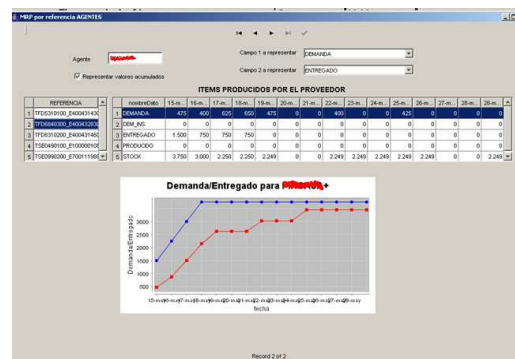


Figura 5: Pantalla de resultados

La aplicación práctica ha permitido concluir algunos aspectos interesantes que debieran ser tenidos en cuenta en el desarrollo de herramientas de este tipo. En primer lugar la consideración de que un producto es una pieza (o conjunto de ellas) en un embalaje y en una ubicación. Así algunos productos tienen varias presentaciones pero además pueden estar en diferentes lugares físicos, o servirse a diferentes clientes, lo que implica más productos.

Los tiempos de computación no son especialmente elevados (en la mayor parte de los casos se ha resuelto el problema en menos de 30 minutos de computación) y sin embargo los resultados están siendo valorados muy positivamente por la empresa usuaria.

Alguna de las líneas de trabajo en las que se puede desarrollar actividad son: consideración de backlogs positivos y negativos simultáneamente con la demanda (debido a diferentes ubicaciones), consideración de actividades de valor añadido diferentes de las de producción: concretamente almacenaje y distribución, y consideración de modelos matemáticos particularizados para cada uno de los subcontratistas.