

## Planificación de la producción en entornos complejos con listas de materiales invertidas y estructuras alternativas.\*

Manuel Cardós Carboneras<sup>1</sup>, Eduardo Vicens Salort<sup>2</sup>, Cristóbal Miralles Insa<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dr. Ingeniero Industrial, Departamento de Organización de Empresas, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, Valencia, mcardos@omp.upv.es

<sup>2</sup> Catedrático de Universidad, CIGIP, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, Valencia, evicens@omp.upv.es

<sup>3</sup> Ingeniero Industrial, Departamento de Organización de Empresas, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, Valencia, cmiralles@omp.upv.es

### RESUMEN

*Aunque la necesidad de planificar la producción con la presencia de listas de materiales invertidas y estructuras alternativas de producto aparece en numerosos sectores de actividad, ha recibido poca atención de la literatura especializada. En este trabajo se define este problema, se presentan ejemplos de aplicación práctica y se propone un algoritmo heurístico para la planificación y programación.*

*Palabras clave:* planificación, listas invertidas de materiales, estructuras alternativas de producto.

### 1. Introducción.

En este documento se describe y analiza la problemática de planificación de la producción en entornos industriales complejos con la presencia de listas de materiales invertidas y estructuras alternativas de producto y se propone un algoritmo al efecto que ha demostrado su eficacia práctica en un entorno de fabricación e ingeniería con predominio de listas invertidas y estructuras alternativas de producto.

Para ello, primero resulta necesario definir términos y conceptos específicos útiles para abordar la solución de este problema. Este documento sólo considera la presencia de coproductos por estar sujetos a demanda (dependiente o independiente) y ser necesaria su planificación. La inclusión de subproductos es inmediata, pues no requieren planificación.

Finalmente, después de presentar un algoritmo de resolución para el problema descrito, se plantean una serie de conclusiones respecto a la posibilidad de mantener separadas las funciones de planificación, análisis de capacidad y programación de la producción, como suele realizarse en la planificación convencional.

### 2. Listas de materiales invertidas.

Las listas de materiales fueron introducidas inicialmente para la industria de montaje, donde

---

\* Este trabajo tiene su origen en los problemas encontrados durante en el diseño y puesta en marcha de un sistema de planificación y gestión de la producción en una importante empresa industrial con dichas características.

varios productos son procesados obteniendo un solo producto resultante. Esta es la estructura de producto en la que se basa MRP y para la que se ha desarrollado las metodologías y técnicas habituales de planificación, análisis de capacidad y programación de la producción.

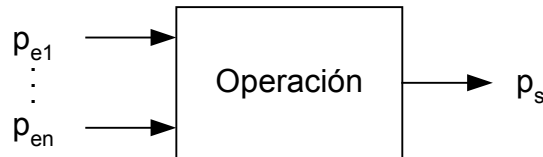


Figura 1: Proceso industrial (operación) con un solo producto resultante

Sin embargo, existen otros muchos procesos industriales que proporcionan varios productos simultáneamente y deben ser planificados puesto que presentan necesidades netas.

Las operaciones tipo más importantes junto con algunos ejemplos ilustrativos son:

- Clasificación.

Durante la operación de clasificado de piezas en la industria cerámica se separa en las calidades primera, comercial y segunda la producción obtenida en los hornos. La distribución de calidades depende básicamente de las características del proceso de fabricación y de los materiales empleados (arcillas, esmaltes). Aunque la distribución de calidades puede variar significativamente a lo largo de los días, a medio plazo se mantiene alrededor de un promedio estable.

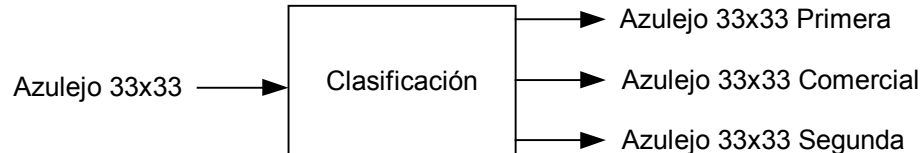


Figura 2: Proceso industrial de clasificación

- Despiece o separación.

Análogamente en los últimos años Krikke [1], Gungor [2], Lambert [3] y Gupta [4] han analizado el desmontaje de aparatos electrónicos y electrodomésticos para minimizar su coste e impacto medioambiental. De forma similar, el corte de una chapa metálica mediante embutición puede proporcionar varias piezas diferentes y el despiece de un pollo sacrificado proporciona dos pechugas, dos alas y dos muslos. En este caso la distribución de los artículos finales suele ajustarse a unos valores conocidos.



Figura 3: Proceso de despiece

- Corte.

En la industria del mármol, las tablas aserradas en los telares se cortan mediante un disco puente en losas de formato grande, por ejemplo 60x40 cm., aunque se obtiene

también otros formatos menores para aprovechar al máximo la tabla de mármol. En este caso la distribución de los artículos finales depende de las dimensiones de la tabla de mármol y de la habilidad de los operarios.

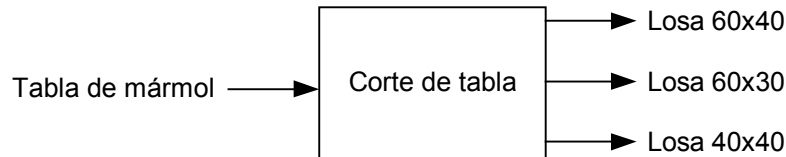


Figura 4: Proceso de corte

### 3. Estructuras de producto alternativas.

La estructura de producto es un conjunto de listas de materiales, operaciones y especificaciones necesarias para fabricar un producto. Habitualmente se utiliza una sola estructura de producto en cada planta de fabricación puesto que sólo se puede fabricar de una forma o porque hay capacidad de producción suficiente para fabricarlo mediante la estructura que produce el menor coste. Sin embargo, en ocasiones aparece la necesidad de utilizar las estructuras alternativas de producto existentes por alguno de los siguientes motivos principales:

1. La viabilidad técnica del proceso depende de las características físicas de los materiales. Por ejemplo, en la industria del mármol se puede obtener bandas de 52x47x3.6 cm. de varias formas:
  - a. Cuando los bloques de mármol están físicamente íntegros, se cortan en tablas de 3.6 cm. en el telar y después con un disco puente se cortan al formato final.
  - b. Si se sospecha que los bloques pueden estar fisurados, en el cortabloques se corta en bandas de longitud libre de 47x3.6 cm. y luego de largo.
2. La viabilidad económica del proceso depende de la elección de los materiales. La industria de alimentación es un buen ejemplo, donde es frecuente disponer de varias recetas para la elaboración de un mismo producto, de forma que en cada momento se elige la más adecuada según la disponibilidad de los componentes y su coste de mercado.
3. Las limitaciones de capacidad pueden forzar la utilización simultánea de varias estructuras de producto para alcanzar el nivel de fabricación deseado. Es aplicable en los límites de una planta de fabricación, pero también cuando se planifica la producción de varias plantas relacionadas. La planificación multiplanta es con frecuencia una gran área de aplicación de las estructuras alternativas de producto pues cada planta suele tener diferentes instalaciones de producción, diferentes procesos de transformación y distintos costes de producción.

### 4. El problema de la planificación de la producción.

Una vez introducidas las listas de materiales invertidas y vistos algunos de los motivos que pueden justificar su aplicación en entornos productivos reales, a continuación se describe la terminología necesaria para poder definir de forma coherente el algoritmo que se presentará

en el siguiente apartado. Estas definiciones se apoyan en algunos de los ejemplos reales ya introducidos.

#### 4.1 Terminología utilizada.

##### 4.1.1 Estructura Alternativa (EA).

La estructura de un producto define los materiales y las operaciones necesarias para su obtención. Un producto tiene estructuras alternativas cuando se puede obtener mediante diferentes materiales y/o operaciones. Un caso particular son las rutas alternativas, en las cuales sólo las operaciones pueden ser diferentes.

##### 4.1.2 Artículo de Planificación (AP).

Es un artículo ficticio que permite representar listas de materiales invertidas. Su estructura de producto es convencional, pero tiene asociados varios productos finales mediante relaciones directas de proporcionalidad que incluyen coeficientes de distribución. Por ejemplo, una orden de fabricación de la línea de clasificado de azulejos de 33x33 cm. de un determinado modelo determina la capacidad utilizada de la línea independientemente de la distribución de calidades que se obtenga. Por otro lado, el tamaño de la orden de fabricación se establece a partir de las necesidades netas de los artículos finales (primera, comercial, segunda) elevadas al íntegro mediante los coeficientes de distribución.



Figura 4: Artículo de planificación

También permite representar estructuras alternativas. Para ello basta con definir un artículo de planificación para cada operación alternativa y permitir que los productos finales estén relacionados con varios artículos de planificación. En consecuencia, el artículo de planificación permite representar simultáneamente listas de materiales invertidas y estructuras alternativas por lo que será la base para la modelización posterior.

##### 4.1.3 Artículo de Planificación Principal (APP).

Es el AP que mejor cumple el criterio de optimización propuesto, por ejemplo el que presenta menor coste unitario de fabricación, de entre todos los AP de un producto. Por este motivo es el artículo que elige MRP para hacer la explosión de materiales de un producto final de entre todos los artículos de planificación disponibles.

##### 4.1.4 Artículo de Planificación Disponible (APD).

Para un período de planificación determinado, es el AP con capacidad disponible en su centro de trabajo que mejor cumple el criterio de optimización propuesto.

#### **4.1.5 Índice de Reemplazo de la Estructura (IRE).**

Es el número de estructuras alternativas disponibles para un determinado producto. Su valor es la unidad cuando el producto sólo se puede obtener mediante una única estructura.

#### **4.1.6 Estados de las Órdenes de Fabricación (OF).**

Cada lanzamiento del MRP regenerativo elimina todas las OF propuestas y genera otras nuevas hasta el horizonte de planificación. Cuando se alcanza el límite de planificación, se aprueban las OF propuestas y pasan a ser OF planificadas, que ya no serán modificadas por el MRP regenerativo (aunque podrá hacer propuestas para su modificación manual). Las OF en firme son las planificadas entregadas a la planta de fabricación para su ejecución.

### **4.2 Formulación del problema.**

El problema de la planificación de la producción con listas de materiales invertidas y estructuras de producto alternativas consiste en determinar las OF necesarias para que el coste total de fabricación sea mínimo cumpliendo las siguientes restricciones:

1. Se desea satisfacer las necesidades netas de cada producto en los períodos de planificación. En este entorno, con frecuencia la cantidad a fabricar de un producto es superior a sus necesidades netas luego aumentan las existencias.
2. Las relaciones entre las operaciones y los productos (incluidos los artículos de planificación), están descritas por las respectivas estructuras de producto.
3. Los centros de trabajo tienen capacidad limitada.
4. Todas las magnitudes son no negativas.

### **5. Algoritmo para la planificación de la producción.**

La solución a este problema podría plantearse de forma directa mediante la programación lineal con la función objetivo y las restricciones descritas en el punto anterior, para cada uno de los períodos temporales de planificación. En una situación real este problema adquiere grandes dimensiones por el número de restricciones que debe incorporar, si bien en la actualidad puede ser abordado con los medios de cálculo disponibles. Sin embargo, proporciona la solución óptima para todo el horizonte de planificación sin tomar en cuenta la incertidumbre creciente conforme se avanza en períodos de planificación cada vez más alejados, así como la necesidad de considerar las continuas incidencias que tienen lugar en la fabricación.

La lógica básica de MRP, CRP y las técnicas de secuenciación resuelven las limitaciones anteriores, pero no consideran las características propias de las listas de materiales invertidas y estructuras de producto alternativas. Por ello modificaremos la lógica de MRP y utilizaremos la terminología definida anteriormente. El algoritmo propuesto se desarrolla en varios pasos sucesivos para cada período de planificación, empezando por el más cercano:

**Paso 1: Construcción inicial del plan de fabricación.**

Analizar la demanda en los períodos de planificación e identificar los productos con  $IRE = 1$  y demanda independiente.

Sólo para ellos, lanzar un MRP regenerativo con lógica ligeramente modificada, de forma que la explosión de materiales se detenga ante cada artículo con  $IRE > 1$ .

Analizar la capacidad y realizar los ajustes convencionales que sean necesarios, aumentando la capacidad de los centros o desplazando las fechas previstas de realizando de algunas OF .

Pasar a planificadas todas las OF propuestas anteriormente que se encuentren dentro del límite de planificación.

Lanzar un nuevo MRP regenerativo con lógica ligeramente modificada, de forma que sólo se considere los APP y se pueda completar el lanzamiento del MRP para todos los productos con estructura alternativa.

**Paso 2: Elegir centro para ajustar la capacidad.**

Si ningún centro presenta sobrecarga, acaba el algoritmo con una solución factible para el período. Ir al paso 4.

Identificar el centro de trabajo con mayor sobrecarga porcentual planificada que contenga productos con  $IRE = 2$ . Si no se encuentra ninguno, aumentar paulatinamente el IRE hasta que aparezca un centro sobrecargado para  $IRE = N$ .

**Paso 3: Elegir AP para ajustar la capacidad.**

Para el centro seleccionado, identificar los productos finales con el menor índice de reemplazo de estructura y sus OF propuestas. Si hay varias órdenes de fabricación relacionadas, elegir la que provoca la menor carga de trabajo. Reducir la cantidad a fabricar por la OF propuesta hasta lograr la saturación del centro o la eliminación de la OF. Si no se ha anulado la OF, pasarla a planificada.

Sustituir el APP del producto por el APD para ese período, si queda capacidad disponible que se pueda utilizar en otro centro. En caso contrario, aplazar al siguiente período la cantidad pendiente de fabricar y reducir la cantidad a fabricar de las OF planificadas perjudicadas por dicho aplazamiento (enfoque “push” de planificación).

Eliminar las OF propuestas y volver al paso 2 anterior.

**Paso 4: Repetir el ciclo para el siguiente período de planificación.**

Hasta que se alcance el límite de planificación, eliminar las OF propuestas, avanzar un período de planificación y volver al paso 2 anterior.

## **6. Conclusiones y líneas futuras de investigación.**

Este documento ha presentado un algoritmo que ha demostrado su capacidad para generar planes de fabricación viables y con niveles aceptables de costes de fabricación en un entorno industrial con fuerte presencia de listas invertidas y estructuras alternativas.

Los resultados obtenidos demuestran que en estos entornos complejos de fabricación no es posible separar la planificación, el análisis de capacidad y la programación de la producción, pues las estructuras de producto utilizadas en cada caso dependen de la disponibilidad de capacidad en los centros y viceversa. En consecuencia, ha sido necesario desarrollar un algoritmo que realice conjuntamente estas funciones.

En futuros trabajos se pretende abordar las siguientes líneas de investigación:

- La mejora del algoritmo de planificación para obtener la convergencia en un menor número de iteraciones y para la obtención de mejores soluciones factibles.
- La caracterización de las redes de estructuras de producto que en general se pueden presentar.
- La planificación de inventarios para mantenerlos por debajo de un límite prefijado, lo que introduciría la optimización multiobjetivo en este contexto.
- La planificación multiplanta en la gestión de la cadena de suministro.

### **Agradecimientos**

Este estudio no habría sido posible sin el apoyo y los recursos dedicados a este proyecto por una importante empresa manufacturera

### **Referencias**

- [1] Krikke, H., (2001) "Design of closed loop supply chains: a production and return network for refrigerators", *ERIM Report Series Research in Management*, ERS-2001-45-LIS
- [2] Clement, J. et al, (1992) *Manufacturing data structures*, Oliver Wight Limited Publications
- [3] Lambert, A.J.D., (2002) "Demand-driven disassembly optimisation for electronic products", *Journal of Electronics Manufacturing*, Vol. 11, No. 2 (2002) 121-135