

Modelo para la planificación de operaciones en cadenas de suministro de productos de innovación



Operations planning model for supply chains of innovative products

• José-Luis Calderón-Lama Ingeniero Industrial Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura (Perú)
 • José-P. García-Sabater Doctor Ingeniero Industrial Universidad Politécnica de Valencia
 • Francisco-Cruz Lario Doctor Ingeniero Industrial Universidad Politécnica de Valencia

Recibido: 01/12/08 • Aceptado: 15/06/09

ABSTRACT

- This paper presents a mathematical programming model for production planning of innovative products with known & stable processes, with two or more supply alternatives, and with two or more levels at the BOM. The model includes the possibility of postponement and also several transport means, costs and times, finite capacity on each production, storage and transport resource. The model also includes the possibility of considering different demand scenarios.
- **Key words:** Operations and Production Planning, Supplier Evaluation, Supply Chain, Postponement.

RESUMEN

Se presenta en este trabajo un modelo de programación matemática para la planificación de la producción de artículos de innovación (como son los productos de moda de una sola temporada) con procesos conocidos y estables (es decir sin incertidumbre), con dos o más alternativas de aprovisionamiento y dos o más niveles en la lista de materiales. El modelo incluye la posibilidad de aplazar los procesos de fabricación y de montaje final, considerando varios medios y tiempos de transporte, capacidad finita en cada recurso de producción, almacén y transporte. Asimismo el modelo incluye la capacidad de considerar escenarios de demanda.

Palabras clave: Planificación de Producción y Operaciones, Múltiples Proveedores, Cadena de Suministro, Postponement.

1. INTRODUCCIÓN

El acortamiento en los ciclos de vida y la globalización de los mercados exige continuos cambios en las estrategias de planificación de operaciones (Bozarth et

al., 2009). Un producto con una demanda estable no debiera ser gestionado del mismo modo que uno con una incertidumbre alta en la demanda (Lee, 2002). Pero las herramientas para la toma de decisiones acertadas en planificación de producción, parecen estar centradas en productos cuya demanda puede ser prevista con un alto grado de certidumbre y además la vida del producto es ilimitada.

En la actual situación geo-económica no sólo cambian los productos de año en año, modificando sus procesos de producción y sus costes de almacén y transporte, sino que se alteran los tipos de cambio y se modifican los costes de la mano de obra y operación. De este modo las decisiones que parecían adecuadas en la campaña anterior no lo son en la nueva campaña.

Además, los transportes baratos exigen un tiempo de tránsito que obliga a anticipar demasiado las ventas de los productos. Sin embargo, la incertidumbre de la demanda crece a medida que la decisión de compra se aleja del momento de la venta, por lo que los costes de producción más baratos empiezan a perder valor frente a los costes de sobre o infra almacenar al final de la campaña.

Si además los productos tienen una vida corta (por ejemplo productos que se venden fundamentalmente en campañas de Navidad), la capacidad de previsión es mucho más limitada, el proceso de toma de decisiones se vuelve más arriesgado, y sólo con la campaña iniciada es posible anticipar con menos riesgo la demanda, utilizando por ejemplo modelos de difusión. (Munakata y Tezuka, 2008).

Esta situación se repite en muchos sectores: por ejemplo la industria de la confección tiene el diseño, producción de telas, corte, costura y venta al por menor en diferentes partes del mundo (Fisher et al. 1994). Otras industrias, tales como la industria del juguete, tienen una estructura de cadena de suministro semejante debido a los bajos costes de mano de obra de países del sudeste asiático, China, Centro América, etc. (Christopher et al., 2006).

Así pues se pueden considerar dos momentos en la toma de decisiones, aquel en que no se tiene información suficiente sobre la demanda de un determinado producto. Y el instante en que comienza la venta del producto, momento en el cual se puede determinar con mayor seguridad la demanda esperada.

Ese modo de trabajar se ajusta bastante bien a los modelos de programación estocástica en dos etapas que se pueden encontrar por ejemplo en (Escudero et al., 1999). Estos modelos consideran que el horizonte de planificación se divide en dos tramos, en el primero se toman decisiones que son invariables, y que en el segundo tramo, cuando se concrete la incertidumbre, se tomarán nuevas decisiones de acuerdo a los nuevos datos.

En el presente documento se propone un modelo de programación estocástica de dos etapas, que puede permitir ayudar a la toma de decisiones en un entorno tan volátil como el anteriormente indicado.

El resto del trabajo se organiza como sigue, en el segundo apartado se plantean algunas de las más relevantes estrategias de la cadena de suministro para productos de

innovación. En el tercer apartado se analizan las aportaciones más relevantes de modelado matemático del problema planteado. En el cuarto apartado se presenta el modelo desarrollado. En el quinto apartado se muestra un caso de uso simple. Las conclusiones y líneas futuras de investigación se incluyen en el apartado final de este trabajo.

2. ESTRATEGIAS DE CADENA DE SUMINISTRO FRENTE A PRODUCTOS DE INNOVACIÓN

Se conocen como productos funcionales aquellos con largos ciclos de vida y por tanto con demandas predictibles (Fisher, 1997). Los productos de innovación, por su parte tienen una alta incertidumbre en su demanda, que es difícil de predecir, con ciclos de vida corto, con costes de obsolescencia altos, pero altos márgenes que los compensan (Wong et al., 2006)

La literatura ofrece diferentes estrategias que permiten hacer frente al problema de seleccionar el mejor modo de suministro para aquellos productos con demandas difícilmente predictibles.

Entre otras, la estrategia (Christopher y Towill, 2001) de separar la demanda en dos partes: *base* y *surge*. La demanda base (*base*) es la parte más segura y puede ser pronosticada a partir de datos históricos. Esta parte se puede emplear para comprometer la producción con bastante anticipación. La demanda *surge* es más difícil de prever y requiere esperar hasta estar más cerca (en tiempo) para tener una buena previsión. Esta demanda debe ser satisfecha por procesos más flexibles y probablemente a mayor coste.

Usar diferentes proveedores para hacer frente a cada tipo de demanda (la previsible y la no previsible) parece una buena estrategia que puede ser combinada con el

	Plazo de entrega corto (proveedores locales)	Plazo de entrega largo (proveedores lejanos)
Coste bajo	Producir todo localmente	Prever con anticipación. Producir toda la demanda base, y fabricar los componentes de la demanda surge con anticipación y enviarlos a los ensambladores locales.
Coste alto	Atender demanda surge. Subcontratar a los proveedores lejanos los componentes con anticipación y aplazar ensamble. Ensamblar contra orden (ATO).	No conviene

Tabla 1: Estrategias en función del plazo de entrega y del coste

concepto de *postponement* (Leung y Ng, 2007), por el cual la definición final del producto, se pospone hasta conocer la demanda con un mayor grado de certidumbre. Esta estrategia es adecuada cuando la empresa vende productos que tienen un alto nivel de *commonality*, es decir cuando los productos comparten componentes.

Considerando el plazo de entrega y el coste (de materiales, producción, transporte, inventario) desde diferentes proveedores, para productos innovadores se pueden establecer la siguiente tabla, para los dos tipos de demanda.

Simultáneamente, para algunos productos se pueden utilizar estrategias *Assemble to Order (ATO)* o *Make to Stock (MTS)*. (Wong et al., 2006).

Estas estrategias están siendo utilizadas, separada o combinadamente por las diferentes industrias. El propósito de este trabajo es plantear un modelo matemático simple que permita analizar y tomar decisiones en aquellos entornos donde la previsión de la demanda es compleja, y las alternativas de aprovisionamiento son múltiples.

Para ello en el siguiente apartado se revisan aportaciones relevantes de la literatura que permitan contextualizar el modelo propuesto.

3. MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA PLANIFICACIÓN DE OPERACIONES CON DEMANDA INCIERTA..

Se han tratado de identificar modelos propuestos en la literatura, y las principales aportaciones que serían útiles para el desarrollo de un modelo que ataque el problema previamente expuesto.

La matriz de planificación de la Cadena de Suministro propuesta por (Feischmann et al., 2005) clasifica las tareas de planificación en dos dimensiones “horizonte de planificación” y “proceso de la Cadena de Suministro”. Dicha matriz es ampliada y anotada por (Meyr et al., 2005) y por su relevancia queda plasmada en la figura 1.



Figura 1. Módulos típicos de los APS (Meyr et al., 2005)

El trabajo que se presenta aquí pretende plantear en un único modelo, la Planificación maestra, de Requerimientos de materiales, la planificación de la producción y la del transporte para un horizonte inferior a un año pero superior a 3 meses.

En (Mula et al., 2006) se analizan con detalle muchos trabajos realizados en el ámbito citado y que incluyen incertidumbre en la demanda. A continuación se incluye una breve referencia a otros trabajos que se consideran relevantes, destacando aquellas características susceptibles de ser incorporadas.

Chern y Hsieh (2007) proponen un algoritmo heurístico llamado “*multi-objective master planning algorithm*” (MOMPA) para Planificación Maestra de una red de suministro con múltiples productos terminados considerando retrasos en las entregas, limitaciones de capacidad y costes de materiales y fabricación.

Chen (2006) estudia el problema de planificación de la producción con demanda final estocástica, con distribución de probabilidad conocida. Determina la cantidad a producir de cada producto intermedio y final en cada planta, con capacidad finita

Aliev et al. (2007) proponen un modelo integrado de Planificación agregada de producción y distribución (PAPD) en una red de suministro, multiproducto y multiperiodo, formulado con programación *fuzzy* y resuelto mediante un algoritmo genético.

Leung y Ng (2007a) analizan el proceso de planificación de la producción para productos perecederos (con demanda centrada en una sola época del año, por ejemplo Navidad), y proponen dividirlo en dos fases aplicando el concepto de aplazamiento (*postponement*).

Los mismos autores en otro trabajo (Leung y Ng, 2007b) modelan y analizan el proceso de planificación de la producción para productos perecederos (el mismo problema que exponen en (Leung y Ng, 2007a)) con programación estocástica y análisis de escenarios, y agregan finalmente un análisis de sensibilidad al cambio en los costes de escasez. Su modelo de programación estocástica de dos etapas con cambio de plan (*recourse*) no permite entregas diferidas (*backorders*) y penaliza el plan con coste de escasez (*under-fulfillment*).

En (Peidro et al., 2007) se propone un modelo de programación matemática difusa para la planificación táctica de la cadena de suministro bajo incertidumbre de demanda, proceso y suministro.

Chern y Hsieh (2007) consideran nodos de 5 tipos (proveedores, fabricantes, subcontratistas (SC), distribuidores y detallistas), transportes, límites de capacidad por nodo/ítem/periodo, entregas diferidas y, sobre todo, evalúan distintas alternativas de proveer el mismo producto terminado.

Liang (2008) presenta un modelo de programación lineal multiobjetivo *fuzzy* (PLMOF) para resolver problemas de planificación de producción y transporte

integrados. El modelo propuesto intenta minimizar simultáneamente los costes totales de producción y transporte (de las fábricas a los centros de distribución), el número total de ítems rechazados y el tiempo total de envío.

4.1 NOMENCLATURA

En la Tabla 2 se presentan los índices utilizados en el modelo

i : índice que recorre los productos (incluye su ubicación)	t : índice que recorre los períodos de planificación
k : índice que recorre los strokes	e : índice que recorre los escenarios
r : índice que recorre los recursos	

Tabla 2. Índices

4. FORMULACIÓN DEL MODELO

El modelo que se presenta es un modelo de Programación Lineal Entera, y por tanto puede ser implementado y resuelto en herramientas fácilmente accesibles.

El modelo es un modelo estocástico de dos etapas, donde se asume que en un determinado instante, posterior al actual, la demanda se concretará, pero que en el momento de ejecución sólo se pueden estimar escenarios para la misma. A dichos escenarios se les pueden estimar probabilidades, que serán utilizadas como la mejor aproximación a la incertidumbre de la demanda mediante escenarios con probabilidades.

El objetivo del modelo es la maximización del beneficio ponderado de cada uno de los escenarios. El modelo que definirá cual es el modo óptimo de trabajo considerando un cierto horizonte (parametrizable) congelado.

Esta aproximación es similar a la utilizada por (Leung y Ng, 2007b), aunque en nuestro modelo se permite el retraso en las entregas. Además la introducción de listas de materiales complejas es sustancialmente más intuitiva gracias al concepto de *stroke* que se introduce más abajo y por tanto permite modelar más opciones de trabajo.

Hay que destacar dos características en los índices pues son especialmente relevantes en la definición del modelo. La primera es que el concepto producto no hace referencia únicamente a sus características físicas sino también a su ubicación. Así un producto en China será considerado como un producto diferente si está en España.

En la tabla 3 se presentan los parámetros que son utilizados en el modelo propuesto.

El concepto *stroke* consiste en no pretender planificar los materiales sino las operaciones. Las operaciones pueden ser de transformación o ensamblaje, pero también las de transporte.

Se considera en este modelo que el *stroke* es la unidad básica de operación, cuya ejecución tiene un coste variable de operación $CO_{k,t}$ (que depende del número de *strokes* por periodo) y uno fijo $S_{k,t}$ que se devenga en caso de que la operación se ejecute al menos una vez. De cada *stroke* se obtienen un $N_{i,k}$ unidades de tipo i , y se consume un número de unidades $M_{i,k}$ de tipo i . El *stroke* tiene un tiempo de tránsito de LT_k desde que las unidades de entrada han sido consumidas hasta que las unidades de salida están disponibles. Por ello un producto resultado de un *stroke* no estará disponible hasta LT_k unidades de tiempo después de haber consumido el producto que necesita el *stroke*.

PV_i^e : Precio de Venta en el escenario e del producto i	$PC_{i,t}$: Precio de Compra del producto i en el periodo t .
$CO_{k,t}$: coste del stroke k en el periodo t .	$S_{k,t}$: coste de setup del stroke k en el periodo t .
$D_{i,t}^e$: Demanda de Producto i en el escenario e para el periodo t	P_e : Probabilidad del escenario e
$CH_{i,t}$: coste de almacenar una unidad de producto i en el periodo t .	$CB_{i,t}$: coste de retrasar la entrega de una unidad de producto i un periodo en el periodo t .
VR_i : Valor residual del producto i al final del horizonte de planificación	FH : Numero de periodos de la primera etapa. A partir de $FH+1$, se dispondrá de mejor información sobre la demanda.
$N_{i,k}$: Número de unidades de i que genera un stroke k	$M_{i,k}$: Número de unidades de i que consume un stroke k
LT_k : Lead Time de un stroke k	$KAP_{r,t}$: Capacidad limite de stroke k en el periodo t
$AC_{i,t}$: Vale 1 si el producto i se puede comprar externamente en el periodo t y 0 en caso contrario	$R_{k,r}$: Consumo que de recurso r realiza cada stroke k

Tabla 3. Parámetros

El concepto stroke consiste en no pretender planificar los materiales sino las operaciones. Las operaciones pueden ser de transformación, ensamblaje y transporte.

Con dicho concepto se pueden representar fácilmente estructuras inversas o procesos alternativos.

Por último e igualmente relevante, es el *stroke* (y no el producto realizado) el que consume el recurso. Con el concepto *stroke* para planificar se separa la operación del inventario y de los requerimientos.

En la tabla 3 se presentan las variables utilizadas en el modelo.



$z_{k,t}^e$: Número de strokes k a ejecutar en el periodo t en el escenario e. $\delta_{k,t}^e$: vale 1 si en el periodo t se ejecuta el stroke k. $y_{i,t}$:Inventario de producto i al finalizar el periodo t. $w_{i,t}^e$:Compra de Producto i en el escenario e en el periodo t	$z_{k,t}^F$: Número de strokes k a ejecutar en el periodo t (válido si $t < FH$). $\beta_{i,t}^e$: Backlog en el escenario e del producto i en el periodo t $v_{i,t}^e$: unidades de i vendidas en el periodo t en el escenario e $w_{i,t}^F$: Compra de producto i a ejecutar en el periodo t (válido si $t < FH$).
--	---

Tabla 4. Variables

4.2 OBJETIVO

El objetivo del modelo planteado es la maximización del beneficio esperado promedio según se expresa en la fórmula (1).

costes ligados a las operaciones son los de *setup* y los de operación $S_{k,t} \delta_{k,t} + CO_{i,t} z_{k,t}^e$.

Con la misma estructura de modelo se pueden plantear otras funciones objetivo como maximizar el mínimo

$$\max \left(\sum_e P_e \left(\sum_{i,t} (PV_i^e v_{i,t}^e + VR_i y_{i,t}^e - CB_{i,t} \beta_{i,t}^e - CH_{i,t} y_{i,t} - PC_{i,t}^e w_{i,t}^e) - \sum_{k,t} (S_{k,t} \delta_{k,t}^e + CO_{i,t} z_{k,t}^e) \right) \right)$$

La función objetivo propuesta calcula el beneficio para cada escenario y lo multiplica por la probabilidad P_e del mismo.

El beneficio de cada escenario se calcula sumando los ingresos y restando los costes.

Los ingresos son los obtenidos por las ventas $PV_i^e v_{i,t}^e$ más el valor residual del inventario al final del horizonte de planificación $VR_i y_{i,t}^e$. Para garantizar la generalidad del modelo se ha permitido que los precios de venta sean diferentes para cada escenario, aunque no es necesario que esto sea así.

Los costes ligados a los productos son los relativos a los retrasos en las entregas, los costes de almacenamiento y las compras de material $CB_{i,t} \beta_{i,t} + CH_{i,t} y_{i,t} + PC_{i,t} w_{i,t}^e$. Los

beneficio esperado o maximiza el máximo beneficio esperado.

4.3 RESTRICCIONES

Las restricciones que aplican en este modelo se expresan a continuación.

El conjunto de restricciones (2) son las restricciones de continuidad de inventario, donde el inventario al final de un periodo $Y_{i,t}$ se calcula a partir del inventario en el periodo anterior $Y_{i,t-1}$ menos las salidas (ventas $v_{i,t}^e$ y consumos de los *strokes* $\sum_{k,t} M_{i,k} z_{k,t}^e$) más las entradas (compras $w_{i,t}^e$ y productos resultado de las operaciones (*strokes*) realizados en el periodo LT_k anterior que corresponde a su *lead time* $\sum_{N_{i,k} z_{k,t}^e - LT(k)}$).

$$y_{i,t}^e = y_{i,t-1}^e - v_{i,t}^e - \sum_k M_{i,k} z_{k,t}^e + w_{k,t}^e + \sum_k N_{i,k} z_{i,t-LT(k)}^e \quad \forall e, i, t \quad (2).$$

Se admite que los productos se pueden comprar directamente a proveedores externos para que el modelo sea lo más general posible, pero con las restricciones (6), se limitan tanto los productos como los periodos de compra.

El conjunto de restricciones (3) son las restricciones de continuidad de retrasos. Los retrasos de un periodo $\beta_{i,t}^e$ son los retrasos del periodo anterior $\beta_{i,t-1}^e$ menos las ventas $v_{i,t}^e$ más la demanda de ese periodo $D_{i,t}^e$.

$$\beta_{i,t}^e = \beta_{i,t-1}^e - v_{i,t}^e + D_{i,t}^e \quad \forall e, i, t \quad (3).$$

Cada recurso puede tener capacidad limitada en cada instante de tiempo $KAP_{r,t}^e$. Esto se expresa mediante el conjunto de restricciones (4) que suman los recursos utilizados por los *strokes* planificados $\sum_k R_{r,k} z_{k,t}^e$ para dicho periodos.

$$\sum_k R_{r,k} z_{k,t}^e \leq KAP_{r,t}^e \quad \forall e, r, t \quad (4).$$

Las restricciones que activan las variables $\delta_{k,t}^e$ se expresan en el conjunto de restricciones (5), si $z_{k,t}^e$ es positivo entonces se obliga $\delta_{k,t}^e$ a que sea 1, siendo Q una cota superior de $z_{k,t}^e$

$$z_{k,t}^e - Q\delta_{k,t}^e \leq 0 \quad \forall e, k, t \quad (5).$$

Sólo se autoriza la compra de determinados productos en los periodos en los que se autorice. Es decir poniendo a 0 el parámetro $AC_{i,t}$ se prohíbe la compra de un producto en un determinado periodo. En algunos casos la compra de un producto (ya sea acabado, semiterminado o materia prima) estará siempre prohibida, pero en otros es posible que sea factible en algunos periodos, en esos casos $AC_{i,t}$ debiera valer 1.

$$w_{k,t}^e \leq AC_{i,t} Q \quad \forall e, k, t \quad (6).$$

Como se ha comentado el modelo considera que hay varios escenarios, pero las decisiones que hay que tomar en los primeros periodos no dependen de la ocurrencia de un escenario u otro. Por decirlo llanamente en palabras de un gerente de fabricación: "las decisiones se han de tomar". Para garantizar un único valor de decisión, para aquellos periodos que entrarían dentro del primer tramo del horizonte se incorporan las restricciones (7) y (8), que corresponde a decisiones que quedarán congeladas a la espera de más información que permita conocer la demanda con un grado mayor de certidumbre. Se incorporan las restricciones (7) y (8) para garantizar que en los periodos para los que se toman decisiones no modificables posteriormente el resultado es único.

$$z_{k,t}^e = z_{k,t}^e \quad \forall e, k, t < FH \quad (7).$$

$$w_{i,t}^e = w_{k,t}^e \quad \forall e, k, t < FH \quad (8).$$

Con el modelo propuesto se resuelven de una manera relativamente sencilla los requerimientos para planificar la producción y las operaciones de una cadena de suministro con alternativas de producción deslocalizados de productos con demanda incierta.

El modelo considera una lista de materiales diferente a la de los modelos tradicionales, que la hace depender de la operación con la que se transforman los productos. A esa operación se le llama *stroke* y puede ser tanto una operación de transformación física como un transporte. Los productos son diferentes entre sí dependiendo de las características que se quieran considerar como por ejemplo la ubicación del mismo.

El modelo planifica las operaciones (producción y transporte) a las que les asigna un coste, que tiene que combinar con el coste ligado al mantenimiento de inventarios y al de retrasos en las entregas.

Por último la demanda incierta se analiza en forma de escenarios. Y el modelo ayuda a tomar decisiones que maximicen el beneficio esperado promedio.

4.4 OTROS MODOS DE INTRODUCIR LA INCERTIDUMBRE EN LA DEMANDA.

Otro posible modo de abordar el problema sería a través del análisis de escenarios, en el que se plantean diferentes escenarios que serán resueltos uno a uno, aportando en cada caso el resultado óptimo, tal y como se plantea en (Escudero et al, 1999) Posteriormente dichos resultados óptimos obtenidos para cada escenario podrán ser evaluados para cada uno de los escenarios planteados, obteniendo una matriz de resultados, y dejando que sea el usuario el que defina si prefiere seguir estrategias de maximización de los máximos beneficios, o maximización del mínimo, o cualquier otra estrategia que considere adecuada.

También se podría haber seguido un enfoque posibilista como el planteado por (Peidro et al, 2007), mediante lógica difusa que está dando buenos resultados, fundamentalmente en la comunicación con el usuario. La principal desventaja de esta aproximación es que el valor de la demanda, en el caso de los productos de innovación, no necesariamente se puede representar en un rango continuo.

5. VALIDACIÓN DEL MODELO MEDIANTE UN CASO DE ESTUDIO.

El modelo propuesto analiza la planificación de la producción de artículos de innovación con procesos en los que se puede confiar. La demanda está concentrada en uno o dos meses del año y dos o más alternativas de

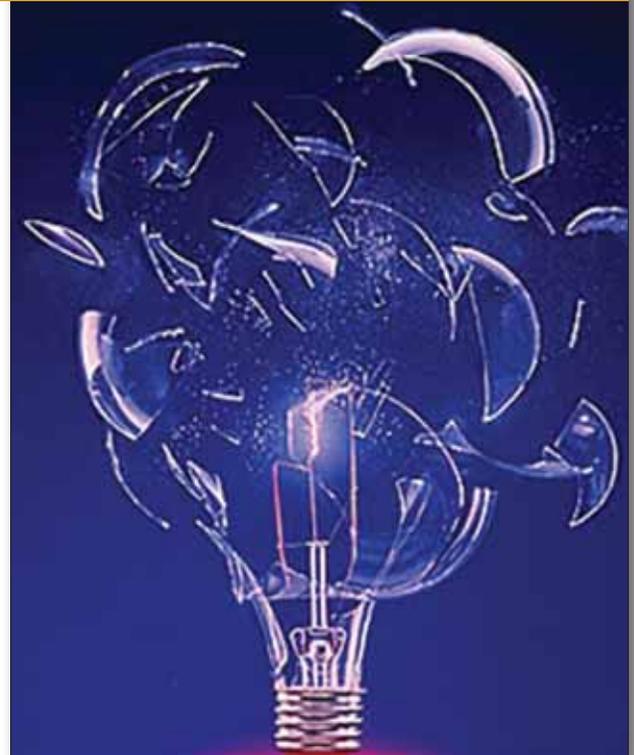
El modelo considera una lista de materiales diferente a la de los modelos tradicionales, que la hace depender de la operación con la que se transforman los productos.

aprovisionamiento, un proveedor local, cercano y caro y un proveedor lejano, más barato. Además considera la posibilidad de aplazamiento (*postponement*) tanto en las etapas de proceso del proveedor lejano como en el propio país.

En este apartado se pretende ilustrar de manera más concreta la situación real que origina el presente estudio y para ello se propone el análisis de un sencillo caso de estudio.

Supóngase una empresa que vende 2 productos A y E que incluyen en su fabricación 2 etapas por ejemplo transformación de materias primas y ensamblaje de las mismas. La compra y transformación de materias primas se realiza en el país de origen, mientras que el ensamblaje se puede realizar en el país de origen o en el propio. Como se ha comentado el producto no sólo es el transformado físico sino también la ubicación en que se encuentra. Así el producto A supone que el producto ya está en el país de destino.

Los productos A y E se pueden obtener desde el mismo componente D a través de procesos que pueden ser realizados en el país de bajo coste o en el proveedor local. De hecho ambos productos requieren la misma materia prima, que por diferentes motivos exige ser transformada en el país de bajo coste.



Existe un único producto intermedio que recibe dos nombres: B y C dependiendo del lugar dónde están ubicados.

Con la estructura de *strokes* propuesta tendríamos 4 modos de transformar la materia prima D a través de 6 operaciones, algunas de las cuales incluyen transporte (*sk 1, sk2, sk6*), otras no (*sk3, sk4*) y algunas son transporte (*sk5*).

El modo más “sencillo” es que la compra de la materia prima y su transformación hasta generar el producto A y su desplazamiento hasta el punto de consumo sea una única operación *sk1*.

Otra alternativa es que la transformación se haga en el punto de origen y se transporte hasta el proveedor local con el *sk2*, donde queda almacenada como producto B, a la espera de ser transformado mediante el *sk3*.

Una tercera opción sería que una vez realizada la transformación de la materia prima

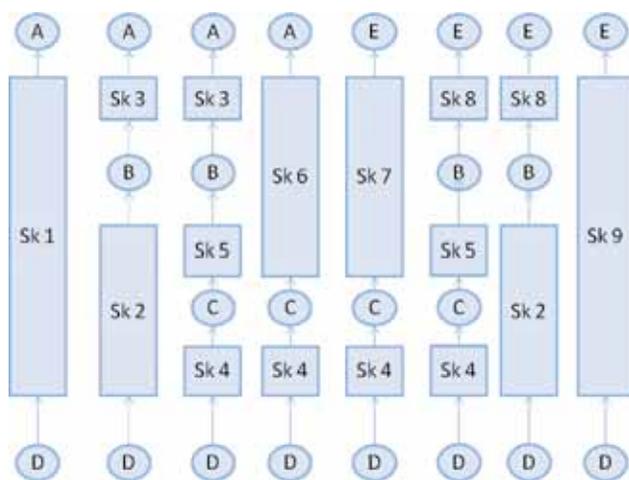


Figura 2: Alternativas en la Definición del Sistema de Aprovisionamiento.

sk4 el producto quedara almacenado en el país de origen como producto C , desde allí se transporta en otra operación sk5 al país de destino, donde mediante la citada operación sk3 quedaría convertido en producto A.

La cuarta alternativa implicaría una transformación sk4 y almacenamiento en país de origen, para posteriormente ser transformada en el mismo país de origen y luego transportado en una operación sk6. Las mismas alternativas rigen para el producto E.

Pero, como se ha comentado no es sólo un problema de costes sino también de tiempos. Cuanto más lejos se esté de la campaña la previsión sobre la misma, es más complicada de hacer y también más incierta. Efectivamente se pueden elegir proveedores lejanos o cercanos, reduciendo no sólo los costes sino también los tiempos de transporte. En incluso se pueden elegir métodos de transporte baratos pero lentos (e incluso de duración incierta) o métodos de transporte caros pero rápidos.

Este, aparentemente complejo sistema, refleja bastante bien el juego de alternativas que tiene que plantear un importador de productos de plástico donde la inyección y el empaquetado serían las dos operaciones básicas.

Todo este complejo sistema queda reducido a planificar la producción de un juego muy reducido de operaciones y almacenaje de productos, como se representa en la figura 3.

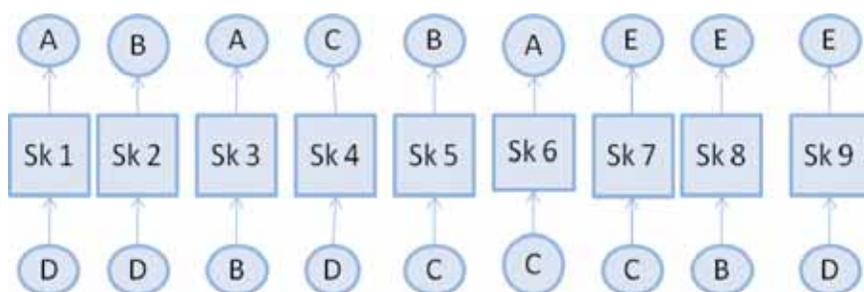


Figura 3: Los strokes del caso de estudio.

En el caso propuesto se comprarían externamente únicamente los productos D, pero la lógica del modelo permitiría comprar B o más apropiadamente C.

No se han considerado medios alternativos de transporte (barco frente a avión por ejemplo), para no complicar el ejemplo, pero sería posible incluirlos con la misma lógica en el modelo sin ninguna dificultad, sin más que introducir más strokes.

También se podrían introducir listas de materiales más complejas, pero no ampliarían las posibilidades del ejemplo y si dificultarían su interpretación.

La incorporación de restricciones ligadas al transporte a contenedor completo, del mismo modo que las limitaciones de capacidad para cada uno de los recursos no se han incorporado pero son relativamente evidentes.

El modelo intentará cubrir con el proveedor lejano para el escenario de menor venta y complementar, si puede, con el proveedor local

Al ejecutar el modelo con los datos del problema propuesto se observa cómo el modelo reacciona cómo se tendría que esperar. Así si el valor residual de los productos no vendidos es mayor que los menores costes posibles, el modelo intentará adquirir al menor precio posible la máxima cantidad de material.

Sin embargo si el valor residual es bajo y el margen de venta es escaso, el modelo intentará cubrir con el proveedor lejano para el escenario de menor venta y complementar, si puede, con el proveedor local. Los costes fijos de lanzamiento de orden animan al sistema a considerar lotes completos. Una reducción de los plazos de aprovisionamiento desde el proveedor lejano incrementa la cantidad comprada a los mismos y/o retrasa la primera compra.

Si los escenarios de demanda son complementarios para ambos productos (menor venta de A implica mayor venta de E) el modelo favorece posponer la decisión de ensamblaje. Sin embargo si los niveles de venta van asociados en los diferentes asociados, no hay una ventaja suplementaria en el hecho de posponer, más allá de la que se puede encontrar si el modelo se ejecuta por separado para cada producto, siempre que no haya limitaciones de capacidad comunes.

6. CONCLUSIONES

Se ha propuesto para el problema de planificar las operaciones de productos de innovación, un problema estocástico de dos etapas, implementado como modelo de Programación Lineal Entera. El modelo pretende “adelantar

El modelo pretende “adelantar trabajo” antes de que comience la temporada de venta, y esperar para tomar las últimas decisiones, cuando la previsión de ventas tenga más posibilidad de ser certera.

trabajo” antes de que comience la temporada de venta, y esperar para tomar las últimas decisiones, cuando la previsión de ventas tenga más posibilidad de ser certera.

El modelo que se propone utiliza el concepto de *stroke* para facilitar la incorporación de estructuras alternativas. Pero puede ser utilizado también para considerar estructuras de materiales inversas, o incluso la incorporación del embalaje como estructura de fabricación.

El concepto *stroke* consiste en proponer planificar las operaciones y no los materiales, que son el resultado de la planificación de las operaciones. Las operaciones pueden ser de transformación o ensamblaje, pero también las de transporte. Se pueden representar fácilmente estructuras inversas o procesos alternativos. Es el *stroke* (y no el producto realizado) el que consume el recurso, lo cual es incorporable de modo más intuitivo en el proceso de modelado.

El modelo propuesto permite obtener soluciones óptimas al problema planteado y proporciona las cantidades de productos terminados a fabricar en forma directa y en forma indirecta o con aplazamiento, asimismo las cantidades de productos intermedios y componentes a producir y transportar, y cuándo hacer el ensamble final (tanto en el proveedor lejano como en el local).

Gracias a su estructura, se puede tener componentes compartidos por los distintos productos finales y se facilita su transporte y control de inventarios.

El modelo se ha implementado de tal modo que los datos entran y las variables salen a través de hojas de cálculo convencionales, siendo por tanto transparente el proceso para el usuario.

Se ha utilizado como software de resolución tanto CPLEX® como LPSolve. Ambos soportan un elevado nivel de productos y profundidad en la lista de materiales. La implementación del modelo está permitiendo realizar análisis de sensibilidad para diferentes niveles de coste ligados a productos, listas de materiales y rutas de fabricación diferentes y diversas.

Este modelo se puede ampliar para considerar economías de escala en los costes de transporte y compra de materiales, tamaño mínimo y máximo del lote de



producción, contratación y despido de la mano de obra directa, etc.

La implementación y adaptación de un modelo de este tipo no requiere de la modificación de los sistemas de información básicos de una empresa, sino simplemente la adaptación de los sistemas de extracción de datos con el objeto de poderlos utilizar.

7. BIBLIOGRAFIA

- Aliev RA, Fazlollahi B, Guirimov BG, et al. (2007) “Fuzzy-genetic approach to aggregate production–distribution planning in supply chain management”. *Information Sciences*. Vol.177 p.4241–4255
- Bozarth CC, Warsing DP, Flynn BB; Flynn EJ. (2009). The impact of supply chain complexity on manufacturing plant performance”. *Journal of Operations Management*, Vol. 27, nº. 1, pp. 78-93.
- Chen H. (2006) “A Lagrangian relaxation approach for production planning with

demand uncertainty". *Proceedings of International Conference on Service Systems and Service Management*. Vol 2 p.1020-1025

- Chern CC, Hsieh JS. (2007) "A heuristic algorithm for master planning that satisfies multiple objectives". *Computers & Operations Research*. Vol.34-11 p. 3491-3513
- Christopher M, Towill DR. (2001), "An integrated model for the design of agile enterprise", *International Journal of Physical Distribution*, Vol. 31 No.4, pp.235-46.
- Christopher M, Peck H, Towill DR. (2006) "A taxonomy for selecting global supply chain strategies". *The International Journal of Logistics Management*. Vol.17-2 p. 277-287
- Escudero LF, Galindo E, García G, Gómez E, Sabau V. (1999). Schumann, a modeling framework for supply chain management under uncertainty". *European Journal of Operational Research*, Vol. 119, nº. 1, pp. 14-34.
- Fisher M, Hammond J, Obermeyer W, Raman A. (1994) "Making supply meet demand in an uncertain world". *Harvard Business Review*. Vol.72-3 p. 83-93
- Fisher M. (1997). What is the right supply chain for your product? *Harvard Business Review*, 75(2), 105-117.
- Feischmann B, Meyr H, Wagner M. (2005). Advanced Planning, en H. Stadtler y K. (dir), *Supply chain management and advanced planning: concepts, models software and case studies.*, pp. 81-106. Springer, Berlin.
- Lee HL. (2002). Aligning Supply Chain Strategies with Product Uncertainties". *California Management Review*, Vol. 44, nº. 3, pp. 105-119.
- Leung SCH, Ng WL. (2007) "A goal programming model for production planning of perishable products with postponement". *Computers & Industrial Engineering*. Vol.53-3 p.531-541
- Leung SCH, Ng WL. (2007) "A stochastic programming model for production planning of perishable products with postponement".

Production Planning & Control. Vol.18-3, p. 190-202

- Liang TF. (2008) "Integrating production-transportation planning decision with fuzzy multiple goals in supply chains". *International Journal of Production Research*, Vol.46-6 p.1477-1494
- Meyr H, Wagner M, Rohde J. (2005). Structure of Advanced Planning Systems, en H. Stadtler y C. Kilger (dir), *Supply Chain Management and Advanced Planning: Concepts, Models, Software and Case Studies*, pp. 109-115. Springer, Berlin.
- Munakata S, Tezuka M. (2008). New diffusion model to forecast new products for realizing early decision on production sales and inventory, in international conference on computer and information technology workshops, *IEEE*, pp. 595-600.
- Mula J, Poler R, Garcia-Sabater JP. (2006) "Models for production planning under uncertainty: A review". *International Journal of Production Economics*. Vol.103-1 p.271-285
- Peidro D, Mula J, Poler R. (2007) "Supply chain planning under uncertainty: a fuzzy linear programming approach". *Fuzzy Systems Conference. IEEE International*. Vol.1 pp. 1-6.
- Wong CY, Stentoft J, Hvolby HH, Johansen J. (2006). Assessing responsiveness of a volatile and seasonal supply chain: A case study". *International Journal of Production Economics*, Vol. 104, nº. 2, pp. 709-721