

Planificación de la capacidad y gestión de la tesorería en sistemas de logística inversa con refabricación

Ernest Benedito^{1,2}, Albert Corominas^{1,2}

¹ Departament d'Organització d'Empreses (OE). Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Avda. Diagonal, 647. Edifici A, planta 7. 08028 Barcelona

² Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials (IOC). Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Avda. Diagonal, 647. Edifici H, planta 11. 08028 Barcelona

Resumen

La logística inversa influye de forma muy significativa tanto en la planificación y gestión de la producción como en la determinación de las capacidades óptimas de fabricación refabricación y almacenaje. Pocos estudios han desarrollado modelos que tengan en cuenta la logística inversa al calcular las capacidades y políticas de fabricación óptimas. En este artículo se describe un modelo de planificación estratégica que tiene en cuenta la logística inversa y se muestra su utilidad en la toma de decisiones estratégicas en el campo de la gestión de la producción.

Palabras clave: Planificación estratégica, gestión de la capacidad, logística inversa, refabricación.

1. Introducción

En los últimos años el concepto de logística inversa ha recibido especial atención tanto desde el ámbito empresarial y profesional como por parte del mundo académico, convirtiéndose en una cuestión estratégica, un elemento a tener en cuenta por las empresas en su proceso de toma de decisiones a la hora de diseñar y desarrollar su cadena de suministro. El interés por parte del mundo empresarial queda reflejado en el incremento de las actividades relacionadas con la logística inversa en sectores tan relevantes como el del transporte, la electrónica de consumo, la prensa y los medios de comunicación, o el sector textil por mencionar sólo unos pocos (Verstrepen *et al.*, 2007). Desde el punto de vista académico, la investigación sobre logística inversa muestra un predominio de los estudios relativos a los aspectos tácticos y operativos sobre los de índole estratégica, principalmente en cuanto a la planificación de la producción y la gestión de inventarios (Rubio *et al.*, 2008), siendo escasos los trabajos que analizan los aspectos relativos a la planificación de la capacidad en los sistemas de refabricación (Georgiadis *et al.*, 2006).

Es en este entorno en el que desarrollamos nuestro trabajo, proponiendo un modelo de programación lineal entera mixta (PLEM) para la planificación óptima de la capacidad tanto de los procesos de fabricación y de refabricación, como de almacenamiento de los inventarios existentes en el sistema de logística inversa. Tradicionalmente, los modelos utilizados para analizar la implantación de sistemas de logística inversa han considerado predeterminada la capacidad de ambos sistemas de producción (fabricación y refabricación) y sus modalidades de gestión (modelos EOQ o similares), dando como resultado la optimalidad de estrategias puras (fabricación o refabricación) frente a estrategias mixtas de fabricación y refabricación (Rubio y Corominas, 2008). El enfoque utilizado en este trabajo permite optimizar las

decisiones relativas a las capacidades y analizar los efectos de la introducción de una línea de refabricación sobre la estructura productiva de la empresa, y en particular sobre la planificación estratégica de la capacidad de producción y de almacenamiento de los inventarios, con el objetivo de determinar la viabilidad de los sistemas de logística inversa. El modelo incorpora, de manera simplificada, la gestión de la tesorería del sistema propuesto lo cual permite identificar los flujos económicos y financieros que se generan en estas estructuras productivas de cadena de suministro de lazo cerrado.

2. Problema y modelo

Adoptamos los supuestos siguientes: consideramos un horizonte finito dividido en ejercicios fiscales (años), que a su vez se dividen en períodos (por ejemplo, un horizonte de 10 años, divididos en trimestres, con 40 períodos en total); no se admite perder ni diferir demanda, hay un sistema productivo de fabricación y otro de refabricación y, asimismo, un almacén de productos acabados y otro de productos fuera de uso (PFU); el producto refabricado no se distingue del nuevo; las capacidades sólo pueden tomar un número finito de valores; la tendencia de la demanda es creciente, por lo que no se considera la posibilidad de reducir capacidad; respecto de las capacidades de fabricación y refabricación, hay un pago en cada período por disponer de ellas, las ampliaciones son por sustitución de equipos y los equipos sustituidos se venden por su valor residual que se supone igual a su valoración en el balance, parte de la inversión no es amortizable y se considera como gasto en el período de adquisición del equipo; respecto de las capacidades de almacenaje de productos acabados y PFUs hay un pago por pasar de una capacidad a otra superior (incluye el pasar de una capacidad 0 a una capacidad dada) y las ampliaciones son por incorporación de nuevas instalaciones a las previamente existentes; hay un pago por período, que depende de la capacidad instalada y de la edad de los equipos, que incluye los correspondientes a actuaciones de renovación y mantenimiento y son crecientes con la capacidad y la antigüedad; gracias a estos pagos los equipos conservan sus propiedades iniciales; esto último nos permite suponer que los costes variables de producción dependen de la capacidad instalada, pero no de su edad; la amortización es lineal y se realiza en un número entero de años; se dispone de una cuenta de crédito remunerada, con un saldo negativo acotado; prescindimos de las repercusiones del IVA en la tesorería. Parte del producto vendido se recupera al finalizar su vida útil; se supone que en el sistema se aplica el “*waste stream approach*” (Jayaraman, 2006), es decir, que se refabrican todos los PFUs recuperados; también se supone que el valor contable de los inventarios de PFUs es nulo. No hacemos ningún supuesto sobre la forma de crecer el coste con la capacidad (supuestos restrictivos podrían simplificar el modelo).

Obviamente, muchos de estos supuestos podrían substituirse por otros sin alterar las características esenciales del modelo propuesto, que se ha enfocado en torno a los aspectos más relevantes desde el punto de vista adoptado.

Se quiere maximizar, mediante un modelo PLEM el saldo de caja al finalizar la actividad, habiendo cobrado y pagado las cantidades pendientes, suponiendo que los activos se venden por su valor residual.

Todos los valores monetarios se expresan en unidades monetarias corrientes.

Los parámetros del modelo son:

Y	Número de años.
T	Numero de períodos por año.
N	Número de productos.

d_{nt}	Demanda por período para el producto n en el período t ($n = 1, \dots, N$; $t = 1, \dots, Y \cdot T$).
p_{nt}	Precio (sin IVA) del producto n en el período t ($n = 1, \dots, N$; $t = 1, \dots, Y \cdot T$).
τ^s	Número de períodos entre la venta y el cobro de un producto.
I_n, L_n	Respectivamente, duración mínima y máxima de la vida útil del producto n ($n = 1, \dots, N$) expresada como número de períodos. Los retornos del producto n vendido en el período t se reciben entre los períodos $I_n + t$ and $L_n + t$, inclusive.
r_{nkt}	Proporción de unidades de producto n ($n = 1, \dots, N$) de calidad k ($k = 1, \dots, k_n$) recuperadas en el período t ($t = I_n, \dots, L_n$) después de su venta, con $\sum_{t=I_n}^{L_n} \sum_{k=1}^{k_n} r_{nkt} \leq 1 \quad \forall n$
k_n	Número de calidades del producto n al finalizar su vida útil ($n = 1, \dots, N$).
c_n^r, c_n^d	Respectivamente, costes unitarios de recuperación y desecho correspondientes al producto n ($n = 1, \dots, N$). Se asume que los pagos se realizan en el mismo período en el que se recupera o desecha.
$\alpha_n^M, \alpha_{nk}^R$	Respectivamente, capacidad de fabricación necesaria para fabricar una unidad de producto n ($n = 1, \dots, N$) y capacidad de refabricación necesaria para refabricar una unidad de producto n ($n = 1, \dots, N$) y calidad k ($k = 1, \dots, k_n$) al finalizar su vida útil.
β_n	Capacidad de almacén necesaria para contener una unidad de producto n ($n = 1, \dots, N$), manufacturado, remanufacturado o fuera de uso.
i_t^b, i_t^d	Tipos de interés aplicables a los saldos negativos y positivos, respectivamente, de la cuenta de crédito remunerada ($t = 1, \dots, Y \cdot T$). Suponemos que los intereses se pagan y se cobran, respectivamente, en el mismo período en que se devengan.
τ^p	Número de períodos que transcurren entre la adquisición de los recursos correspondientes a los costes variables y el pago de los mismos.
τ^b	Período, dentro de cada año, en que se paga el impuesto sobre sociedades (es decir, en el supuesto que el inicio del horizonte de planificación coincide con el de un año, dichos pagos tienen lugar en los períodos $T + \tau^b, T + 2 \cdot \tau^b, \dots$ y, en su caso, en $Y \cdot T$).
M_i	Capacidades de manufactura ($i = 0, \dots, \nu_M$; $M_0 = 0$; $M_i < M_{i+1}$, $i = 0, \dots, \nu_M - 1$).
R_i	Capacidades de remanufactura ($i = 0, \dots, \nu_R$; $R_0 = 0$; $R_i < R_{i+1}$, $i = 0, \dots, \nu_R - 1$).
W_i	Capacidades de almacenamiento de producto acabado ($i = 0, \dots, \nu_W$; $W_0 = 0$; $W_i < W_{i+1}$, $i = 0, \dots, \nu_W - 1$).
D_i	Capacidades de almacenamiento de productos fuera de uso ($i = 0, \dots, \nu_D$; $D_0 = 0$; $D_i < D_{i+1}$, $i = 0, \dots, \nu_D - 1$).
CM_{it}, CR_{it}	Inversión necesaria para adquirir la capacidad de manufactura o remanufactura, respectivamente, X_i ($X = M, R$; $i = 1, \dots, \nu_X$; $t = 1, \dots, Y \cdot T$). Se pagan en el período en que tiene lugar la inversión.

CW_{ijt}, CD_{ijt}	Inversión para pasar de la capacidad de almacenamiento de producto acabado o de productos fuera de uso, respectivamente, X_i a la X_j ($X = W, D; i = 0, \dots, j-1; j = 1, \dots, v_X; t = 1, \dots, Y \cdot T$). Se pagan en el período en que tiene lugar el cambio.
$PM_{j\tau t}, PR_{j\tau t}$	Costes para el período t , que se pagan en el propio período t , correspondientes a la capacidad de manufactura o remanufactura, respectivamente, X_i ($X = M, R$) cuando esta tiene edad τ ($i = 1, \dots, v_X; \tau = 0, \dots, t-1; t = 1, \dots, Y \cdot T$).
$PW_{j\tau t}, PD_{j\tau t}$	Costes para el período t , que se pagan en el propio período t , correspondientes a la capacidad de almacenamiento de producto acabado y productos fuera de uso X_i ($X = W, D$) cuando ésta tiene edad τ ($i = 1, \dots, v_X; \tau = 0, \dots, t-1; t = 1, \dots, Y \cdot T$).
v_{nit}^M	Costes variables unitarios de manufactura (excluidos los de personal de producción, que se consideran vinculados a la capacidad) ($n = 1, \dots, N; i = 1, \dots, v_M; t = 1, \dots, Y \cdot T$).
v_{nikt}^R	Costes variables unitarios de remanufactura (excluidos los de personal de producción, que se consideran vinculados a la capacidad) ($n = 1, \dots, N; i = 1, \dots, v_R; k = 1, \dots, k_n; t = 1, \dots, Y \cdot T$).
v_{nit}^W, v_{nit}^D	Costes variables de almacenamiento de producto acabado y de productos fuera de uso, respectivamente (excluidos los de personal de almacén, que se consideran vinculados a la capacidad). ($n = 1, \dots, N; i = 1, \dots, v_X, X = W, D; t = 1, \dots, Y \cdot T$).
PF_t	Diferencia entre pagos fijos (es decir, independientes de las capacidades y del nivel de actividad) y cobros fijos, correspondiente al período t ($t = 1, \dots, Y \cdot T$).
CF_t	Costes fijos (es decir, independientes de las capacidades y del nivel de actividad) correspondiente al período t ($t = 1, \dots, Y \cdot T$).
b	Tanto por uno que se paga como impuesto sobre beneficios.
h_0	Tesorería inicial.
$h_{\max}^-$	Máximo saldo negativo de la cuenta de crédito remunerada (en valor absoluto).
τ^d	Plazo de amortización, expresado en años (valor entero positivo).
$a_{\max}$	Plazo para compensar bases impositivas negativas de ejercicios anteriores, expresado en años (valor entero positivo).
Rmx_a^+, Rmx_a^-	Cotas superiores de los resultados positivos y negativos, respectivamente ($a = 1, \dots, Y$).
Vmx_t^M, Vmx_t^R	Cotas superiores de los coste variables de manufactura y remanufactura, respectivamente ($t = 1, \dots, Y \cdot T$).
Vmx_t^W, Vmx_t^D	Cotas superiores de los coste variables de almacenamiento de producto acabado y de productos fuera de uso, respectivamente ($t = 1, \dots, Y \cdot T$).
γ	Factor que se utiliza para valorar los inventarios ($0 < \gamma < 1$). El valor del inventario del producto n en t es $\gamma \cdot p_{nt}$.
ε	Porción de la inversión en equipos de manufactura y remanufactura que es amortizable ($0 < \varepsilon \leq 1$).

Variables reales del modelo (todas no negativas):

x_t^{IM}, x_t^{IR}	Inversión en capacidad de manufactura y de remanufactura, respectivamente ($t = 1, \dots, Y \cdot T$).
x_t^{IW}, x_t^{ID}	Inversión en capacidad de almacenamiento de producto acabado y de productos fuera de uso, respectivamente ($t = 1, \dots, Y \cdot T$).
x_t^{CM}, x_t^{CR}	Costes de capacidad de manufactura y de remanufactura, respectivamente ($t = 1, \dots, Y \cdot T$).
x_{it}^{CW}, x_{it}^{CD}	Costes de capacidad de almacenamiento de producto acabado y de productos fuera de uso, respectivamente X_i ($X = W, D; i = 1, \dots, v_X; t = 1, \dots, Y \cdot T$).
x_t^{VM}, x_t^{VR}	Costes variables de manufactura y de remanufactura, respectivamente ($t = 1, \dots, Y \cdot T$).
x_t^{DM}, x_t^{DR}	Amortización de los equipos de manufactura y remanufactura, respectivamente ($t = 2, \dots, Y \cdot T$).
x_t^{RM}, x_t^{RR}	Cobros por la venta de los equipos de manufactura y remanufactura, respectivamente ($t = 2, \dots, Y \cdot T + 1$). $x_{Y \cdot T + 1}^{RM}$ y $x_{Y \cdot T + 1}^{RR}$ se refieren a la venta de activos al finalizar la actividad.
x_t^{VW}, x_t^{VD}	Costes variables de almacenamiento de producto acabado y de productos fuera de uso, respectivamente ($t = 1, \dots, Y \cdot T$).
q_{nt}	Número de unidades del producto n manufacturadas en el período t ($n = 1, \dots, N; t = 1, \dots, Y \cdot T$).
ρ_{nkt}	Número de unidades del producto fuera de uso de calidad k de tipo n remanufacturadas (supuesto: salen del almacén y se remanufacturan en el mismo período) en el período t ($n = 1, \dots, N; k = 1, \dots, k_n; t = I_n + 1, \dots, Y \cdot T$).
s_{nt}	Inventario de producto acabado del producto n en el período t ($n = 1, \dots, N; t = 1, \dots, Y \cdot T$).
σ_{nkt}	Inventario de productos fuera de uso de calidad k de tipo n en el período t ($n = 1, \dots, N; k = 1, \dots, k_n; t = I_n + 1, \dots, Y \cdot T - 1$).
δ_{nkt}	Número de unidades del producto fuera de uso de calidad k de tipo n desechadas en el período t ($n = 1, \dots, N; k = 1, \dots, k_n; t = I_n + 1, \dots, Y \cdot T$).
h_t^+, h_t^-	Saldos positivo y negativo (en valor absoluto) de la cuenta de crédito remunerada al final del período t .
θ_{al}	Base imponible negativa del ejercicio a compensada en el ejercicio $a + l$ ($a = 1, \dots, Y; l = 1, \dots, a_{max}$).
BI_a	Base imponible del ejercicio a ($a = 1, \dots, Y$).
RE_a^+, RE_a^-	Resultado positivo y negativo (en valor absoluto) del ejercicio a ($a = 1, \dots, Y$).

Variables binarias del modelo:

- y_{it}^M, y_{it}^R Valor 1 si y sólo si en el período t la capacidad de manufactura o de remanufactura, respectivamente, es X_i ($X = M, R; i = 1, \dots, v_X; t = 1, \dots, Y \cdot T$).
- y_{it}^{CM}, y_{it}^{CR} Valor 1 si y solo si en el período t se substituyen los equipos usados en $t-1$ por otros nuevos, de manufactura o de remanufactura, respectivamente, de capacidad X_i ($X = M, R; i = 1, \dots, v_X; t = 2, \dots, Y \cdot T$).
- y_{it}^W, y_{it}^D Valor 1 si y sólo si en el período t la capacidad de almacenamiento de producto acabado y de productos fuera de uso, respectivamente, es X_i ($X = W, D; i = 1, \dots, v_X; t = 1, \dots, Y \cdot T$).
- y_a^{RE} Valor 1 si y sólo si el resultado del ejercicio a es positivo ($a = 1, \dots, Y$).

Se quiere maximizar el saldo de caja al final del horizonte, que tendrá en cuenta el cobro correspondiente a la venta de activos y el pago del impuesto sobre beneficios del último ejercicio. La función objetivo es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 [\text{MAX}] \quad & h_{Y \cdot T}^+ - h_{Y \cdot T}^- + \sum_{t=Y \cdot T - \tau^s + 1}^{Y \cdot T} \sum_{n=1}^N p_{nt} \cdot d_{nt} - \sum_{t=Y \cdot T - \tau^p + 1}^{Y \cdot T} (x_t^{VM} + x_t^{VR} + x_t^{VW} + x_t^{VD}) - b \cdot BI_Y + x_{Y \cdot T + 1}^{RM} + x_{Y \cdot T + 1}^{RR} \\
 & + \sum_{\tau=0}^{\min\{T, Y\} \cdot \tau^d - 1} \left(1 - \frac{\tau + 1}{T \cdot \tau^d} \right) (x_{Y \cdot T - \tau}^{IW} + x_{Y \cdot T - \tau}^{ID})
 \end{aligned}$$

En cuanto a las restricciones del modelo, a continuación se da una descripción de los aspectos más relevantes que contemplan ya que, por razones de espacio no se puede mostrar el detalle completo.

Las restricciones tienen en cuenta, en cada período, los siguientes aspectos:

- El balance de los inventarios de productos acabados y de los de PFUs.
- La fabricación y la refabricación no deben sobrepasar las capacidades de fabricación y refabricación, respectivamente; los productos almacenados no deben superar las capacidades de almacenamiento de productos acabados y PFUs.
- El saldo de la cuenta de crédito en cada período. Debe tener en cuenta los siguientes conceptos: saldo en período anterior, intereses pagados/cobrados, cobros por ventas de períodos anteriores, cobros por ventas de equipos sustituidos, pagos fijos, pagos por adquisición/modificación de capacidad, pagos por disponer de capacidad, pagos por costes variables, pagos por costes de recuperación de productos fuera de uso, pagos por costes de desechar productos recuperados, pagos del impuesto de sociedades.
- El saldo negativo de la cuenta de crédito no debe exceder el máximo permitido.
- El beneficio/pérdida antes de impuestos en cada ejercicio. Debe tener en cuenta las siguientes partidas: costes fijos, parte no amortizable de la inversión en equipos de fabricación y refabricación, amortizaciones de los equipos de fabricación y refabricación imputables al período, amortizaciones correspondientes a las inversiones en capacidades de almacenamiento de productos acabados y PFUs, valoración de la variación del inventario de productos acabados.

- La base imponible del impuesto de sociedades en cada ejercicio. Debe tener en cuenta el resultado (beneficio o pérdida) del ejercicio y la compensación de las bases imponibles negativas de los últimos ejercicios.
- Los cambios en las capacidades por sustitución en el caso de fabricación y refabricación y por ampliación en el caso de almacenamiento de productos acabados y PFUs.
- La inversión en capacidad de fabricación, refabricación y en almacén de productos acabados y PFUs.
- Los pagos por período que dependen de cada capacidad.
- Los costes variables de los productos fabricados y refabricados, (que dependen de las capacidades de fabricación y refabricación instaladas, respectivamente) y los costes variables de las unidades en almacén de productos acabados y PFUs (que dependen de la capacidad de almacenamiento de productos acabados y PFUs instaladas, respectivamente).
- Los cobros por la venta de los equipos de fabricación y refabricación que hayan sido sustituidos.
- Las amortizaciones de los equipos de fabricación y refabricación instalados en períodos anteriores.

3. Ejemplo numérico

En esta sección se muestra el caso particular de una empresa con un horizonte temporal de 10 años, dividido en trimestres, que fabrica un solo producto y el producto recuperado puede tener tres calidades distintas. Consideramos tres posibles tipos de capacidades de fabricación, una de refabricación y una de almacenaje.

Se ha implementado el modelo en Gurobi 3.0.0 y se ha resuelto para diferentes valores de ε (porción de la inversión que se amortiza). En todos los casos se ha considerado un plazo de amortización de 5 años. En la siguiente tabla (Tabla 1) se muestran los resultados obtenidos y los tiempos de ejecución

Tabla 1. Resultados de ejecución para diferentes valores del parámetro ε

ε	Valor óptimo	Tiempo ejecucion (seg)
0,6	375.900	255
0,7	378.530	295
0,8	381.371	560
0,9	385.284	3670

Observamos que el tiempo de resolución es sensible al parámetro ε , aumentando considerablemente a partir de $\varepsilon = 0,9$. Debido a ello, se ha plantado resolver el problema lineal de forma alternativa, en dos fases: en la primera fase se resuelve tomando el valor $\varepsilon = 0$ y se toma el plan de adquisición de capacidades de fabricación y refabricación representado

por las variables y_{it}^{CM}, y_{it}^{CR} ; en la segunda fase se considera fijado el plan de adquisición de capacidades de fabricación y refabricación e igual al obtenido en la solución óptima de la fase 1 y se resuelve el programa tomando el valor de $\varepsilon = 0,6, \dots, 0,9$. Los valores óptimos obtenidos son los mismos que los mostrados en la tabla, sin embargo el tiempo de ejecución es de 20 s. y no depende del valor de ε .

4. Conclusiones

Este trabajo se refiere a la planificación estratégica en un entorno de logística inversa. Se propone un modelo PLEM para determinar la planificación de producción y las capacidades de fabricación, refabricación y de almacenes óptimas en una empresa multiproducto con logística inversa. El modelo tiene en cuenta los costes de producción y almacenaje, los costes asociados a las capacidades correspondientes así como otros costes relevantes para el funcionamiento operativo de la empresa como por ejemplo los costes financieros o el pago de impuestos sobre beneficios. El modelo permite analizar la sensibilidad del resultado en relación con los diversos parámetros que caracterizan el entorno, incluso cuando los costes asociados a las capacidades no son lineales. Se presenta un ejemplo de aplicación del modelo para ilustrar su uso como herramienta de planificación.

Como ampliación de este trabajo se realizará una experiencia computacional para verificar el alcance del modelo y analizar los tiempos de resolución.

Referencias

- Georgiadis, P., Vlachos, D., Tagaras G. (2006). The impact of product lifecycle on capacity of closed-loop supply chains with remanufacturing. *Production and Operations Management*, Vol. 15, No. 4, pp. 514-527.
- Jayaraman, V. (2006). Production planning for closed-loop supply chains with product recovery and reuse: an analytical approach. *International Journal of Production Research*, Vol. 44, No. 5, pp. 981-998.
- Rubio, S. and Corominas, A. (2008). Optimal manufacturing-remanufacturing policies in a lean production environment. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 55, No. 1, pp. 234-242.
- Rubio, S., Chamorro, A., Miranda, F. J. (2008). Characteristics of research on reverse logistics (1995-2005). *International Journal of Production Research*, Vol. 46, No. 4, pp. 1099-1120.
- Verstrepen, S., Cruijssen, F., De Brito, M. P. and Dullaert, W. (2007). An exploratory analysis of reverse logistics in Flanders. *European Journal of Transportation & Infrastructure Research*, Vol. 4, pp. 301-316.