3rd International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management
XIII Congreso de Ingeniería de Organización
Barcelona-Terrassa, September 2nd-4th 2009

Modelo de planificación agregada conjunta de fabricación y remanufactura con oferta de productos usados dependiente del precio

Albert Corominas Subias[1], Amaia Lusa García[1], Jordi Olivella Nadal[1]

[1] Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales y Dpto. de Organización de Empresas. Universitat Politècnica de Catalunya. Av. Diagonal, 647, p 11, 08028, Barcelona. albert.corominas@upc.edu / amaia.lusa@upc.edu / jorge.olivella@upc.edu

Palabras clave: logística inversa, planificación agregada, recuperación de productos, remanufactura, función de oferta de productos usados.

1. Introducción

La logística inversa ha sido, en los últimos años, objeto de un interés creciente por parte de la comunidad científica (Sergio Rubio et al., 2008). El presente trabajo se inscribe en el área de la recuperación de productos y, dentro de ella, en la de remanufactura, siguiendo la clasificación de Sasikumar y Kannan (2008). En este trabajo se modeliza la planificación agregada conjunta de un sistema que tiene la posibilidad, por una parte, de producir unidades nuevas, y por otro, de remanufacturar unidades usadas, obteniendo en ambos casos el mismo producto, con calidad de nuevo (ver figura 1).

El hecho de disponer tanto de de capacidad de fabricación como de remanufactura permite enfrentar las dificultades asociadas a la variabilidad y la incertidumbre de la recuperación de productos usados. De hecho, la incertidumbre sobre la recuperación de productos usados es uno de los temas en que se centra buena parte de la literatura sobre la remanufactura (Guide, 2000, Inderfurth, 1997). Cuando la fabricación de productos totalmente nuevos también es posible, los puntos esenciales de la planificación pasan a ser la capacidad y la minimización del coste.

El modelo que se desarrolla corresponde a casos como las cámaras fotográficas de uso único (Toktay et al., 2003) y los envases. Se trata en todo caso de producción discreta, el más habitual en la literatura sobre logística inversa, aunque también se ha estudiado el caso de la producción continua (French y LaForge, 2006), del que son ejemplos el papel y el aluminio (Srivastava, 2008).

Los sistemas de producción discreta con fabricación y remanufactura han sido objeto de análisis desde distintos puntos de vista. La viabilidad económica, en el supuesto que no se utilizan inventarios, ha sido analizada por S. Rubio y Corominas (2007). La determinación de los centros de recolección también ha sido objeto de análisis (Beamon y Fernandes, 2004, Min et al., 2006). Un caso particular es aquél en que se pueden mezclar elementos obtenidos de productos usados con material nuevo, que ha sido desarrollado por Hammond y Beullens (2007). Las programación de la producción, considerando la producción sobre pedido o para la creación de stock, ha sido analizada por Guide et al. (2003). También se han analizado políticas de reaprovisionamiento y las decisiones de fabricación o de remanufactura, según el caso, a las que dan lugar (Zanoni et al., 2006).

Para poder planificar la remanufactura es necesario tener una estimación del volumen de producto usado que va a recuperarse en cada período. Algunos modelos consideran constante la proporción de productos recuperados (Teunter et al., 2007) El número de unidades recuperadas, sin embargo, depende de múltiples factores como, por ejemplo, las ventas en períodos anteriores (Savaskan et al., 2004), la ley de supervivencia del producto, las facilidades que se ofrecen a los usuarios para devolver los productos una vez han sido utilizados, el valor de uso residual cuando los usuarios deciden sustituirlos (Morana y Seuring, 2007) y el precio ofrecido por la devolución de los productos. La planificación agregada conjunta de la fabricación y la remanufactura también tiene precedentes (Inderfurth, 1997, Jayaraman, 2006), aunque estos trabajos no incluyen el precio como variable que determina la oferta de producto usado.

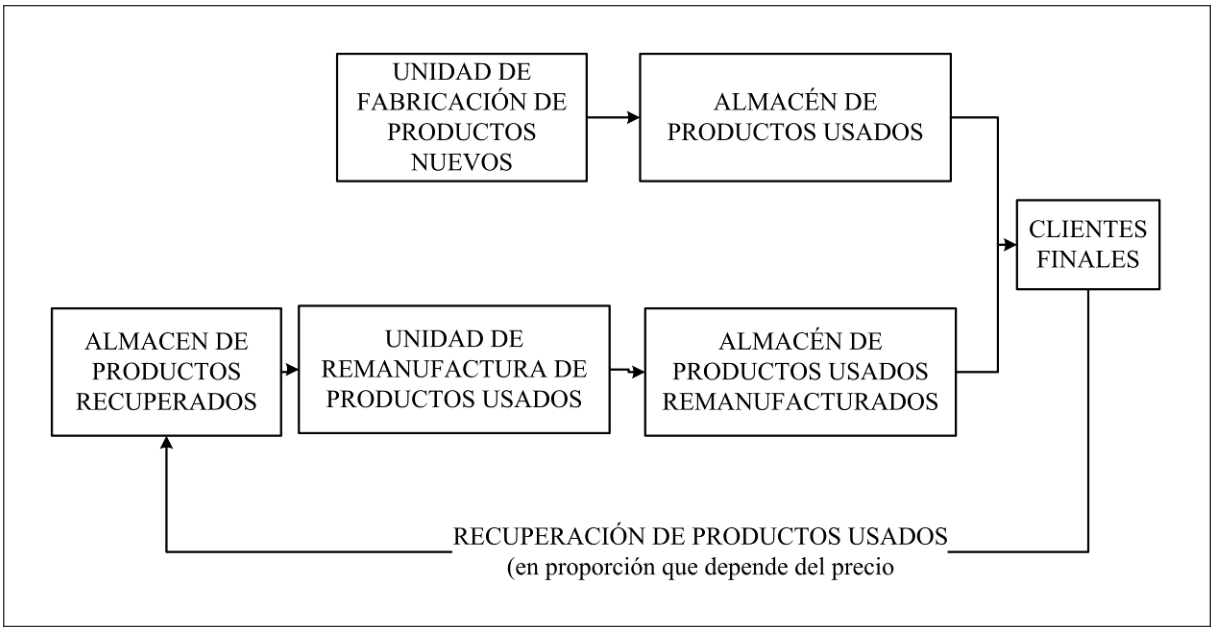

Figura 1. Flujos de productos nuevos, remanufacturados y usados

El problema que abordamos en este trabajo es la planificación agregada de un sistema de producción discreta con capacidad de fabricación y de remanufactura, partiendo de una estimación de la demanda El número de unidades recuperadas, con distintos estados de conservación, es una proporción del número de unidades desechadas por los usuarios. La proporción depende del precio ofrecido. Se dispone también de una estimación del número de unidades desechadas, para cada estado de conservación. Se incluye en el modelo, además de las limitaciones de capacidad y las limitaciones de las horas de trabajo, la disponibilidad de tesorería y los intereses activos y pasivos.

En la sección 2 se detalla el problema, mientras que en la sección 3 se expone el modelo, en la sección 4 se referencia la experiencia computacional realizada y en la sección 5 se incluyen las referencias.

2. Características del problema

El problema que se modeliza y resuelve es el siguiente:

- El producto es único. Hay dos sistemas independientes, para la fabricación y la remanufactura (ver Figura 1), con costes de transporte equivalentes. El producto manufacturado y el remanufacturado son indistinguibles.

- Los productos recuperados pueden tener distintos estados de conservación, que se detectan en el momento de de la recuperación. Se dispone de una previsión de la proporción de producto recuperable de cada estado de conservación. El rendimiento del proceso de remanufactura depende del estado de conservación del producto recuperado. Los almacenes tienen capacidad limitada.

- Se dispone de una plantilla de dimensión fija con la posibilidad de realizar horas extras.

- Se consideran costes de producción, costes laborales y costes de stock.

- La tesorería se considera mediante una cuenta de crédito remunerada, en la que los saldos positivos generan intereses y se pagan intereses por el dinero disponible y por el dinero utilizado. El dinero utilizado puede alcanzar, como máximo, la cifra del dinero disponible, que es fija.

- La demanda, de la que se tiene una previsión, se atiende de manera completa e inmediata.

- La proporción de productos usados que son recuperados se obtiene como una función convexa del precio ofrecido. No se conocen trabajos empíricos acerca de la forma de este tipo de funciones. Sin embargo, deducimos que son continuas y crecientes. La convexidad permite asegurar la existencia de soluciones óptimas.

3. Modelo

El modelo de optimización diseñado para la resolución del problema es no lineal. Esto se debe a que se supone que la relación entre la proporción de productos usados que son recuperados y el precio es una función no lineal. Asimismo, el producto de dicha función por el precio, que interviene en la función de costes, es también no lineal.

Datos

T	Número de periodos del horizonte de planificación (t=1..T).
K	Número de diferentes estado de conservación en que se pueden encontrar los productos cuando son desechados para el uso por los usuarios.
d_t	Demanda del producto en el periodo t (t=1..T).
r_{kt}	Número de unidades de producto desechadas para el uso por los usuarios en el periodo t (t=1..T) en un estado de conservación k (k=1..K) y que son potencialmente recuperables, en una proporción que depende del precio.
s_0^M	Inventario inicial de productos acabados en el almacén del sistema de fabricación de productos nuevos.
s_T^M	Inventario deseado al final del horizonte de planificación en el almacén del sistema de fabricación de productos nuevos.

s_0^R Inventario inicial de productos acabados en el almacén del sistema de fabricación de productos remanufacturados.

s_T^R Inventario deseado al final del horizonte de planificación en el almacén del sistema de fabricación de productos remanufacturados.

s_{k0} Inventario inicial en el almacén de productos usados en un estado de conservación k (k=1..K).

s_{kT} Inventario deseado, al final del horizonte de planificación, en el almacén de productos usados en un estado de conservación k (k=1..K).

p_t Precio de venta en el periodo t (t=1..T).

α^M Horas de fabricación requeridas para obtener una unidad de producto.

α_k^R Horas de remanufactura requeridas para obtener una unidad de producto a partir de una unidad de producto usado en un estado de conservación k (k=1..K).

mc_t Coste variable de fabricación de una unidad en el periodo t (t=1..T), excluyendo el coste de personal.

rc_{kt} Coste variable de remanufactura de una unidad en el periodo t (t=1..T), a partir de una unidad de producto usado en un estado de conservación k (k=1..K), excluyendo el coste de personal.

τ^+ Número de periodos transcurridos entre el uso de los recursos correspondientes a los costes variables y su pago (los recursos usados en t se pagan en $t+\tau^+$).

W^{DM}, W^{DR}, W^U Capacidades (en número de unidades de producto) de los almacenes productos acabados (manufacturados y remanufacturados) y productos usados (para ser remanufacturado), respectivamente.

wc_t^{DM}, wc_t^{DR} Coste variable de almacenaje de una unidad de producto acabado en el periodo t (t=1..T), excluyendo el coste de personal, en los sistemas de fabricación y remanufactura, respectivamente.

wc_{kt}^U Coste variable de almacenaje de una unidad de producto usado, en un estado de conservación k (k=1..K), en el periodo t (t=1..T), excluyendo el coste de personal.

B Importe máximo del saldo negativo de la cuenta de crédito remunerada.

i_t^b, i_t^d, i_t^a Tipos de de interés que se aplican, respectivamente, al importe tomado a crédito (valor absoluto del saldo de la cuenta, cuando es negativo), al importe depositado (saldo de la cuenta, cuando es positivo) y al crédito disponible y no usado (B menos valor absoluto del saldo de la cuenta, cuando es negativo). Suponemos que el interés se carga o se abona en la cuenta en el mismo periodo en que se devenga (t=1..T).

b_0 Importe inicial del saldo de cuenta de crédito remunerada (que puede ser negativo, nulo o positiva, siendo siempre ≥B).

BF_t Importe de los cobros (incluyendo los provenientes de las ventas, cuyo importe es conocido de antemano) menos los pagos correspondientes a los costes que son conocidos desde el principio del horizonte de planificación (es decir, no dependen de las decisiones incluidas en el modelo), correspondientes al periodo t (t=1..T). Puede tener un valor positivo (cuando los cobros superan los pagos), nulo ó negativo.

P Número de periodos en los que la compañía pagará los salarios a los trabajadores.

τ_j^p Periodos en los que la compañía pagará los salarios a los trabajadores (j=1..P), donde $\tau_j^p < \tau_{j+1}^p; j=1,...,P-1$. Por razones formales, definimos $\tau_0^p = 0$.

h^0, h^+ Número ordinario y máximo de horas de trabajo por periodo (tanto en el sistema de fabricación como en el de remanufactura). Las horas por encima de h^0 se pagan como horas extra.

V Número máximo de horas extra para el conjunto del horizonte de planificación (tanto en el sistema de fabricación como en el de remanufactura).

cv_t^M, cv_t^R Coste de una hora extra correspondiente al sistema de fabricación y remanufactura, respectivamente, en el periodo t (t=1..T).

cd_{kt} Coste para la compañía de desechar una unidad de producto usado en el estado de conservación k en el periodo t $(k=1,...,K; t=1,...,T)$.

Función

$\varphi_{kt}(\pi_{kt})$ Proporción de las unidades de producto desechadas para el uso por los usuarios en el periodo t (t=1..T), en el estado de conservación k (k=1..K), que se devuelven. Depende de los precios, π_{kt}, que la compañía ofrece a los usuarios (que forman parte de las variables de decisión definidas más abajo). La función $\varphi_{kt}(\pi_{kt}) \cdot r_{kt}$ es, por tanto, la curva de suministro de las unidades de producto usado en un estado de conservación k en el periodo t. Hasta donde sabemos, no existen trabajos empíricos sobre la forma de estas funciones. Cara a la optimización, la propiedad más significativa es la convexidad del coste que tiene para la compañía adquirir unidades usadas, o sea, $\pi_{kt} \cdot \varphi_{kt}(\pi_{kt}) \cdot r_{kt}$; si estos costes son convexos, el modelo puede ser resuelto como un programa no lineal ó, de manera aproximada, a través de la programación lineal (programación separable convexa). En este trabajo adoptamos el supuesto de que las funciones $\pi_{kt} \cdot \varphi_{kt}(\pi_{kt}) \cdot r_{kt}$

son convexas; en particular utilizamos, en la experiencia computacional, funciones definidas para $0 \le \pi_{kt} \le p_t$, de la forma $\varphi_{kt}(\pi_{kt}) = \gamma_{kt} + \eta_{kt} \cdot \pi_{kt}^{\vartheta}$, donde $\gamma_{kt} \ge 0, \eta_{kt} > 0$, $\vartheta > 0$ y tales que $\gamma_{kt} + \eta_{kt} \cdot p_t^{\vartheta} = 1$. Verificar la convexidad de la función $\pi_{kt} \cdot \varphi_{kt}(\pi_{kt}) \cdot r_{kt}$ (para $\pi_{kt} > 0$) es inmediato. Si no se cumpliera el supuesto de convexidad, el modelo tendría que ser resuelto mediante un algoritmo MILP, utilizando SOS-2 para aproximar las funciones.

Variables

$q_t^M \in \mathrm{R}^+$ Número de unidades de producto que han sido manufacturadas en el periodo t (t=1..T).

$q_{kt}^R \in \mathrm{R}^+$ Número de unidades de producto que han sido remanufacturadas en el periodo t (t=1..T) partir de unidades usadas en el estado de conservación k (k=1..K).

$s_t^M \in \mathrm{R}^+$ Inventario de productos acabados en el almacén del sistema de fabricación, al final del periodo t (t=1..T).

$s_t^R \in \mathrm{R}^+$ Inventario de productos acabados en el almacén del sistema de remanufactura, al final del periodo t (t=1..T).

$s_{kt} \in \mathrm{R}^+$ Inventario de unidades usadas en el estado de conservación k al final del periodo t (t=1..T, k=1..K).

δ_t^M, δ_t^R Unidades vendidas provenientes del almacén de fabricación y remanufactura, respectivamente, en el periodo t (t=1..T).

$b_t^-, b_t^+ \in \mathrm{R}^+$ Saldos negativo o positivo, según el caso, de la cuenta de crédito al final del periodo t (t=1..T).

π_{kt} Precio a pagar por la compañía al usuario, en el periodo t (t=1..T), por una unidad usada en el estado de conservación k (k=1..K). Suponemos que $0 \le \pi_{kt} \le p_t$ t (t=1..T, k=1..K) (es decir, el precio que la compañía ofrece por una unidad de producto usada nunca será mayor que el precio de una unida nueva, ya que suponemos que, con ese precio, la compañía recuperaría todas las unidades usadas en los diversos estados de conservación; suponemos, también, que el usuario, al desechar para el uso una unidad de producto, la vende a la compañía o la elimina como residuo –es decir, suponemos que el usuario no guarda la unidad usada para venderla a la compañía en un periodo posterior; nótese que aceptamos la posibilidad de que π_{kt} sea mayor que $p_t - rc_{k\tau}^R \left(\tau = t, ..., T\right)$, puesto que debido a la condición de no rechazar ni posponer la demanda –que es equivalente a considerar que los costes de rechazar y de posponer la demanda son infinitos– y de la capacidad limitada de fabricación, puede ser necesario recuperar unidades usadas a pesar de que los costes de adquisición y remanufactura sean mayores que los precios de venta de la nueva unidad).

$ud_{kt} \in \mathrm{R}^+$ Número de unidades de producto usado en el estado de conservación k (k=1..K) desechadas por la compañía en el periodo t (t=1..T).

$v_t^M, v_t^R \in \mathrm{R}^+$ Número de horas extras en el periodo t (t=1..T), realizadas en el sistema de fabricación y remanufactura, respectivamente.

Modelo

$$
\begin{aligned}
min\, z = & \sum_{t=1}^{T}\left(mc_t \cdot q_t^M + \sum_{k=1}^{K} rc_{kt} \cdot q_{kt}^R \right) + \sum_{t=1}^{T-1}\left(wc_t^{DM} \cdot s_t^M + wc_t^{DR} \cdot s_t^R + \sum_{k=1}^{K} wc_{kt}^U \cdot s_{k,t} \right) + \\
& + \sum_{t=1}^{T}\left(cv_t^M \cdot v_t^M + cv_t^R \cdot v_t^R \right) + \sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} cd_{kt} \cdot ud_{kt} + \sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} r_{kt} \cdot \varphi_{kt}\left(\pi_{kt}\right) \cdot \pi_{kt} + \\
& + \sum_{t=1}^{T}\left(i_t^b - i_t^a \right) \cdot b_t^- - \sum_{t=1}^{T} i_t^d \cdot b_t^+
\end{aligned}
\tag{1}
$$

$$\alpha^M \cdot q_t \leq h^0 + v_t^M \quad t = 1,...,T \tag{2}$$

$$\sum_{k=1}^{K} \alpha_k^R \cdot q_{kt}^R \leq h^0 + v_t^R \quad t = 1,...,T \tag{3}$$

$$
\left.
\begin{aligned}
& s_t^M = s_{t-1}^M + q_t^M - \delta_t^M \\
& s_{kt} = s_{k,t-1} + r_{kt} \cdot \varphi_{kt}\left(\pi_{kt}\right) - q_{kt}^R - ud_{kt} \quad k = 1,...,K \\
& s_t^R = s_{t-1}^R + \sum_{k=1}^{K} q_{kt}^R - \delta_t^R \\
& \delta_t^M + \delta_t^R = d_t
\end{aligned}
\right\} t = 1,...,T
\tag{4}
$$

$$\sum_{k=1}^{K} s_{kt} \leq W^U \quad t = 1,...,T-1 \tag{5}$$

$$\sum_{t=1}^{T} v_t^M \leq V \tag{6}$$

$$\sum_{t=1}^{T} v_t^R \leq V \tag{7}$$

$$b_t^+ - b_t^- = \left[b_{t-1}^+ \cdot \left(1 + i_t^d\right) - b_{t-1}^- \cdot \left(1 + i_t^b - i_t^a\right) - B \cdot i_t^a + BF_t \right] -$$

$$- \left[\sum_{k=1}^{K} cd_{kt} \cdot ud_{kt} + \sum_{k=1}^{K} r_{kt} \cdot \varphi_{kt}\left(\pi_{kt}\right) \cdot \pi_{kt} \right] -$$

$$- \left[mc_{t-\tau^+} \cdot q_{t-\tau^+}^M + \sum_{k=1}^{K} rc_{k,t-\tau^+} \cdot q_{k,t-\tau^+}^r + wc_{t-\tau^+}^{DM} \cdot s_{t-\tau^+}^M + \sum_{k=1}^{K} wc_{k,t-\tau^+}^U \cdot s_{k,t-\tau^+} + wc_{t-\tau^+}^{DR} \cdot s_{t-\tau^+}^R \right] - \quad (8)$$

$$- \left[\sum_{i \in \left[\tau_{j-1}^p + 1, \ldots, \tau_j^p\right] \mid \exists \tau_j^p = t, j = 1, \ldots, P} \left(cv_i^M \cdot v_i^M + cv_i^R \cdot v_i^R \right) \right] \qquad t = 1, \ldots, T$$

$$\left.\begin{array}{ll} s_t^M \leq W^{DM} & t = 1, \ldots, T-1 \\ s_t^R \leq W^{DR} & t = 1, \ldots, T-1 \\ 0 \leq v_t^M \leq h^+ - h^0 & t = 1, \ldots, T \\ 0 \leq v_t^R \leq h^+ - h^0 & t = 1, \ldots, T \\ 0 \leq \pi_{kt} \leq p_t & k = 1, \ldots, K; t = 1, \ldots, T \\ b_t^- \leq B & t = 1, \ldots, T \end{array}\right\} \quad (9)$$

La función objetivo (1) incluye los costes que dependen de las decisiones de planificación (los costes de mantenimiento del stock correspondientes al final del horizonte no se incluyen porque el nivel de stock de los diversos productos, al final del horizonte, está predeterminado). Puesto que los ingresos vienen dados, minimizar los costes es equivalente a maximizar los beneficios. Las restricciones (2) y (3) corresponden a las restricciones de capacidad de la fabricación y la remanufactura, respectivamente. El grupo de ecuaciones (4) establece la relación entre inventario, producción y venta, tanto en fabricación como en remanufactura (para t=T las variables de stock se sustituyen por las cantidades predeterminadas, s_T^M, s_T^R y s_{kT}). La ecuación (5) limita la capacidad de almacenaje de unidades usadas (las otras limitaciones de capacidad de los almacenes se imponen como límites de las correspondientes variables). Las ecuaciones (6) y (7) establecen el límite superior de las horas extra totales para fabricación y remanufactura, respectivamente.

La ecuación (8) relaciona los cobros, los pagos y los saldos de la cuenta de crédito remunerada. Los cobros y los pagos no son los mismos en todos los periodos, lo que supone que haya distintas formulaciones de la restricción. Para abreviar la presentación, la parte derecha de la igualdad se divide en cuatro bloques, encerrados entre llaves. Los dos primeros bloques son comunes a todos los periodos del horizonte de planificación: el primero incluye la variación en el saldo de la cuenta, el interés y el saldo entre los cobros y los pagos que no dependen de las decisiones de planificación; el segundo incluye el coste de las unidades usadas desechadas por la compañía y el de la adquisición de unidades usadas a los clientes. El tercer bloque (coste variable de producción y almacenaje) sólo debe ser incluido para los periodos tales que $t > \tau^+$ (antes no se producen pagos porque el plazo de pago todavía no ha transcurrido). Finalmente, el cuarto bloque corresponde a los pagos de las horas extra, y por tanto solo debe ser incluido para los periodos en que se efectúan pagos a los trabajadores, es decir, cuando $\exists j \mid t = \tau_j^p$. Además, para $t = 1$, el lado izquierdo de la restricción es igual a b_0.

Por último, el grupo de ecuaciones (9) establece los límites superiores e inferiores de diversas variables.

4. Experiencia computacional

Aunque es posible resolver el modelo anterior mediante un software de optimización no lineal (como por ejemplo MINOS), se ha creído conveniente linealizar el modelo y resolverlo mediante un software de optimización lineal (CPLEX) ya que éste resulta más potente y, además, ha sido objeto de mayores avances en los últimos tiempos.

Las ecuaciones que deben ser linealizadas son la (1) y la (4). En ambas se tiene una expresión no lineal convexa que depende únicamente de la variable π_{kt}, por lo que su linealización mediante programación separable convexa resulta trivial.

Se han resuelto varios ejemplares con CPLEX 10.0 y se han obtenido resultados muy satisfactorios.

Referencias

Beamon, B. M.; Fernandes, C. (2004) Supply-chain network configuration for product recovery. Production Planning & Control,Vol 15, No.3, pp.270-281.

French, M. L.; LaForge, R. L. (2006) Closed-loop supply chains in process industries: An empirical study of producer re-use issues. Journal of Operations Management,Vol 24, No.3, pp.271-286.

Guide, V. D. R. (2000) Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs. Journal of Operations Management,Vol 18, No.4, pp.467-483.

Guide, V. D. R.; Jayaraman, V.; Linton, J. D. (2003) Building contingency planning for closed-loop supply chains with product recovery. Journal of Operations Management,Vol 21, No.3, pp.259-279.

Hammond, D.; Beullens, P. (2007) Closed-loop supply chain network equilibrium under legislation. European Journal of Operational Research,Vol 183, No.2, pp.895-908.

Inderfurth, K. (1997) Simple optimal replenishment and disposal policies for a product recovery system with leadtimes. Or Spectrum,Vol 19, No.2, pp.111-122.

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.

Min, H.; Ko, C. S.; Ko, H. J. (2006) The spatial and temporal consolidation of returned products in a closed-loop supply chain network. Computers & Industrial Engineering,Vol 51, No.2, pp.309-320.

Morana, R.; Seuring, S. (2007) End-of-life returns of long-lived products from end customer - insights from an ideally set up closed-loop supply chain. International Journal of Production Research,Vol 45, No.18-19, pp.4423-4437.

Rubio, S.; Chamorro, A.; Miranda, F. J. (2008) Characteristics of the research on reverse logistics (1995â€“2005). International Journal of Production Research,Vol 46, No.4, pp.1099 - 1120.

Rubio, S.; Corominas, A. (2007) Optimal manufacturing–remanufacturing policies in a lean production environment. Computers & Industrial Engineering.

Sasikumar, P.; Kannan, G. (2008) Issues in reverse supply chains, part I: end-of-life product recovery and inventory management â€“ an overview. International Journal of Sustainable Engineering,Vol 1, No.3, pp.154 - 172.

Savaskan, R. C.; Bhattacharya, S.; Van Wassenhove, L. N. (2004) Closed-loop supply chain models with product remanufacturing. Management Science,Vol 50, No.2, pp.239-252.

Srivastava, S. K. (2008) Value recovery network design for product returns. International Journal of Physical Distribution and Logistics Management,Vol 38, No.4, pp.311.

Teunter, R.; Kaparis, K.; Tang, O. (2007) Multi-product economic lot scheduling problem with separate production lines for manufacturing and remanufacturing. European Journal of Operational Research,Vol In Press, Corrected Proof.

Toktay, B.; Laan, E. A.; Brito, M. P. (2003) Managing Product Returns: The Role of Forecasting.

Zanoni, S.; Ferretti, I.; Tang, O. (2006) Cost performance and bullwhip effect in a hybrid manufacturing and remanufacturing system with different control policies. International Journal of Production Research,Vol 44, No.18-19, pp.3847-3862.