

## ANÁLISIS ENTRE DISTINTAS ALTERNATIVAS DE RECUPERACIÓN DE VALOR A TRAVÉS DE LA SIMULACIÓN

Isabel Fernández<sup>1</sup>, Paolo Priore<sup>1</sup>, Alberto Gómez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Campus de Viesques, 33204 Gijón (Asturias).  
ifq@epsig.uniovi.es; priore@uniovi.es; agomezg@uniovi.es

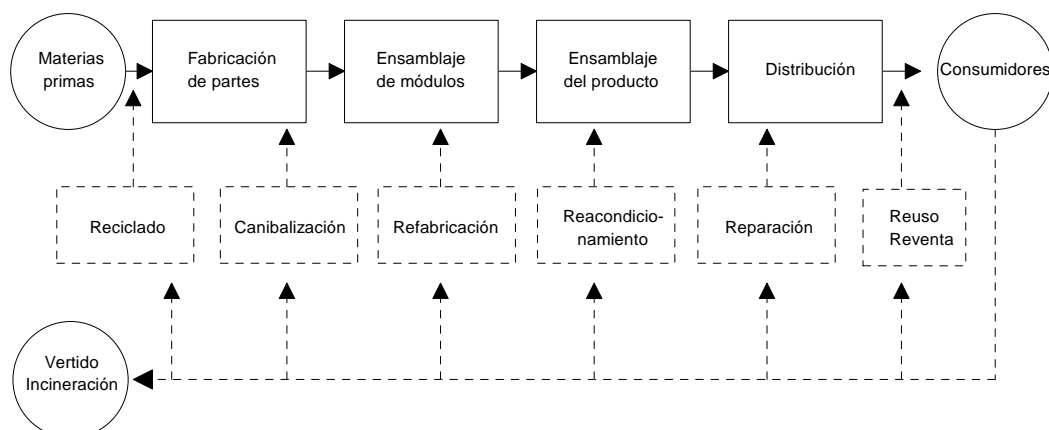
### Resumen

*La Logística Inversa y la recuperación son temas que han recibido en los últimos años un creciente interés tanto por la comunidad científica como por los profesionales de empresa. El presente trabajo aborda un problema dentro de este contexto, consistente en facilitar la toma de decisiones entre posibles alternativas de recuperación y entre éstas y la fabricación tradicional mediante el uso de la simulación.*

**Palabras clave:** Simulación, Recuperación de valor, retornos, toma de decisión

### 1. Introducción

Si bien los métodos de gestión de inventarios se encuentran ampliamente afianzados en el contexto de los flujos tradicionales de los productos, es decir, los que se producen desde el fabricante hasta su punto de consumo en el mercado, en los escenarios donde tiene lugar la recuperación de productos procedentes del mercado (denominados como de “bucle cerrado”), no lo están tanto, pudiéndose encontrar políticas muy distintas entre sí y con ámbitos de aplicación muy diversos.



**Figura1.** Actividades de recuperación de valor (adaptado de Rudi *et al.* (2000)).

La Logística Inversa y la recuperación son temas que han recibido en los últimos años un creciente interés tanto por la comunidad científica como por los profesionales de empresa. El presente trabajo aborda un problema dentro de este contexto, consistente en facilitar la toma

de decisiones entre posibles alternativas de recuperación y entre éstas y la fabricación tradicional mediante el uso de la simulación.

De entre las distintas posibles opciones de recuperación (reutilización, reparación, reacondicionamiento, refabricación, canibalización, reciclado; Thierry *et al.*, 1995; ver Figura 1), en este trabajo se han considerado las opciones de refabricación y canibalización por pertenecer ambas a la categoría de opciones que mayor valor de recuperación comportan y por ser las menos estudiadas. El propósito de la refabricación estriba en conseguir que el producto recuperado alcance unos estándares de calidad, funcionalidad y garantía enteramente equiparables a los de los productos nuevos. Con la canibalización se persigue únicamente la recuperación de aquellos módulos o partes que tengan algún interés para la empresa; la identidad del producto original se pierde. Los módulos o partes obtenidos mediante esta opción podrán utilizarse para efectuar otras tareas de recuperación –reparación, refabricación, etc.- o para su venta como repuestos.

Decantarse por una opción u otra no siempre resulta sencillo ya que los costes involucrados –costes de desensamblaje, de gestión de inventarios, de procesamiento, entre otros- difieren al igual que los potenciales ingresos o los tiempos de ciclo.

## **2. Revisión de la literatura**

Uno de los primeros modelos de gestión de inventarios en bucle cerrado fue desarrollado por Shady (1967). En él se consideraban infinitas tanto la tasa diaria de producción como la tasa diaria de recuperación. Este modelo se enfoca a la reparación como opción de recuperación. Con el tiempo, Nahmias & Rivera (1979) desarrollaron un modelo que consideraba la tasa diaria de recuperación finita, pero sin embargo seguía considerando infinita la tasa diaria de producción. Fue Teunter (2004) quien desarrolló un modelo de gestión de inventarios en bucle cerrado, que consideraba finitas tanto la tasa diaria de producción como la tasa diaria de recuperación, consiguiendo de esta forma asemejarse en mayor medida a la realidad.

Al margen de los modelos mencionados anteriormente, cuyas diferencias estriban en las distintas consideraciones sobre las tasas diarias de producción y de recuperación, en la literatura pueden encontrarse otros muchos modelos en función de cuales sean las hipótesis de trabajo adoptadas con respecto a otro tipo de consideraciones. A continuación se destacan algunos de ellos.

- Resolución de modelos en contextos deterministas (Teunter, 2004) o en entornos estocásticos (Inderfurth *et al.*, 2001).
- Consideración o no de la opción de eliminación (Inderfurth *et al.*, 2001), (Teunter, 2004).
- Igualdad de los tiempos de ejecución para la fabricación y la refabricación (Teunter & Vlachos, 2002) o considerarlos distintos entre sí (Kiesmüller, 2003)
- Consideración de una única opción de recuperación (Kiesmüller, 2003) o considerar múltiples opciones de recuperación (Inderfurth *et al.*, 2001) (Kleber *et al.*, 2002)
- Consideración de rupturas de stocks (Teunter & Vlachos, 2002) y modelos en los que no se permiten (Kleber *et al.*, 2002)
- Distintos modelos dependiendo de que la demanda sea mayor que las devoluciones (Teunter & Vlachos, 2002) o que por el contrario pueda darse la posibilidad de mayores devoluciones que demanda (Kiesmüller, 2003) (Kleber *et al.*, 2002)
- Planteamiento del proceso de recuperación como un problema de colas, de forma que la recuperación se realice a medida que lo requiere la demanda (Bayindir *et al.*, 2002)

A pesar de los diferentes modelos de los que se dispone en la literatura, las políticas de gestión de inventarios, más comúnmente referidas, son las políticas (1, R) y (P, 1), ya que mediante la combinación de ambas se puede obtener el resto de políticas. La política (P, 1) consiste en obtener, en un ciclo, P lotes de productos nuevos ( $Q_p$ ) por cada vez que se procesa un lote de productos recuperados ( $Q_r$ ). La política (1, R) se describe más adelante ya que es la utilizada en este trabajo.

### 3. Descripción del problema

El escenario que se pretende simular se muestra en la Figura 2.

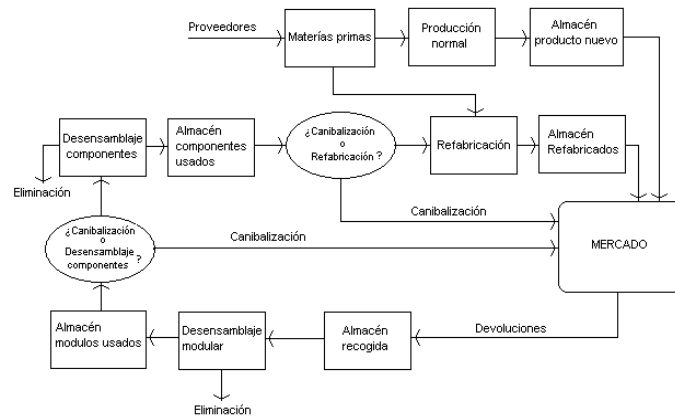


Figura 2. Representación gráfica del bucle cerrado adoptado

Dentro de este bucle cerrado a su vez, se simularán separadamente distintas situaciones:

a) En una de ellas se pretende decidir cuál es la cantidad de ítems que se destinan a cada una de las dos opciones de recuperación consideradas. La elección se sustenta básicamente sobre parámetros de naturaleza de económica, de forma que se minimicen los costes totales de inventario (ver su evolución en Figura 3) más los de reprocesamiento respectivos. La modelización de esta situación no se ha encontrado en la literatura.

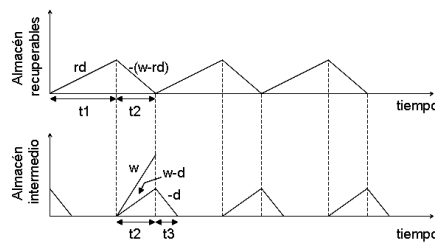
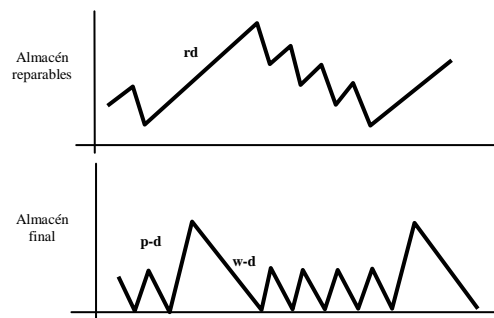


Figura 3. Evolución de los inventarios en los almacenes afectados

b) Paralelamente al proceso de recuperación de los productos devueltos, se realiza el proceso de *fabricación normal*, entendiéndose por éste el que se nutre de materia prima virgen obtenida de los proveedores. De ahí que la segunda simulación pretenda determinar en qué situación resulta más adecuado recurrir a la recuperación en contraste con la adquisición de nuevos productos desde el exterior. Para ello se tendrán en cuenta los niveles de inventarios generados bajo el supuesto de aplicación de una política tipo (1, R) y representados en la Figura 4. La política (1, R) consiste en obtener, en un ciclo, un lote de productos nuevos ( $Q_p$ )

por cada R lotes de productos reprocesados ( $Q_r$ ). Las hipótesis de partida de dicho modelo son las siguientes:

- Las tasas diarias de demanda ( $d$ ) y de devolución del mercado ( $rd$ ) son deterministas y conocidas.
- La tasa diaria de demanda es siempre mayor que cero,
- La tasa de devolución es siempre menor que la tasa de demanda y mayor que cero ( $0 < rd/d < 1$ ).
- Las tasas diarias de producción ( $p$ ) y de reprocesamiento ( $w$ ) son finitas.
- Las tasas diarias de producción y de recuperación son siempre mayores que la tasa de demanda (en la literatura se pueden encontrar artículos que desarrollan esta política y que consideran la posibilidad de que la tasa de recuperación pueda ser menor que la tasa de demanda (Koh *et al.*, 2002) si bien consideran infinita la tasa diaria de producción)
- Los productos recuperados son equiparables en calidad a los productos nuevos y satisfacen la misma demanda que estos últimos



**Figura 4.** Evolución de los inventarios en los almacenes afectados

Se considerarán tasas de reprocesado,  $w$ , y producción finitas,  $p$ , menores a la tasa de demanda del mercado,  $d$ ;  $r$  representa el % de artículos en el mercado que se devuelven.

Al igual que en el contexto tradicional de la gestión de inventarios, las decisiones de optimización se basan en la minimización de costes entre los que se tienen en cuenta los costes de posesión de los distintos inventarios en ambos almacenes y los costes de emisión de los lotes. A efectos de este trabajo, dichos costes se denotan como sigue:

$K_p$ : Coste de emisión de los productos nuevos (por lote).

$K_r$ : Coste de emisión de los productos recuperados o reprocesados (por lote).

$h_s$ : Coste de posesión en el almacén final (por producto y por unidad de tiempo).

$h_r$ : Coste de posesión en el almacén de recuperables (por producto y por unidad de tiempo).

El objetivo es encontrar el tamaño de lotes óptimos ( $Q_r$ ,  $Q_p$ ) que minimicen los costes totales ((1) y (2)). Se denomina  $Q_p$  al lote óptimo de productos nuevos y  $Q_r$  al lote óptimo de productos recuperados.

$$Q_p^{(1,R)*} = \sqrt{\frac{2 * K_p * d * (1 - f)}{h_s * (1 - f) * \left(1 - \frac{d}{p}\right) + h_r * f}} \quad (1)$$

$$Q_r^{(1,R)*} = \sqrt{\frac{2 * K r * d}{(h_s + h_r) * \left(1 - \frac{d}{r}\right)}} \quad (2)$$

Con estos tamaños de lotes, el correspondiente número R de lanzamientos (3) es el mismo que en el modelo de Schrady,

$$R = [f/(1-f)*(Q_p/ Q_r)] \quad (3)$$

donde  $f = rd/d$ .

A continuación, se va a realizar un análisis de sensibilidad del modelo de simulación, con objeto de conocer el ámbito correcto de aplicación del citado modelo.

### 3. Análisis de sensibilidad

Previo a la realización del análisis de sensibilidad, se debe indicar que una de las limitaciones del modelo de simulación viene dada por la propia política (1, R) que se modela en el mismo. Esta política obliga a que el valor de R sea mayor o igual que 2, ya que de no ser así, no se distinguiría de una política (P, 1) en la que  $P = 1$ . De esto se deduce que, si la elección de los valores de los datos de partida origina un valor de R que no cumpla con la condición anteriormente expuesta, entonces el modelo de simulación no será válido.

El análisis de sensibilidad se realizará en dos partes. En una primera parte, se variarán los valores de las tasas empleadas en la fase refabricación-fabricación (tasa diaria de demanda, de refabricación, de producción y de llegada de productos de la etapa anterior). En una segunda parte, se van a variar los valores de las tasas empleadas en cada una de dos etapas de desensamblaje.

#### 3.1. Primera parte

A continuación se presentan diversos casos, en los que se varían los valores de las tasas empleadas en la fase refabricación-fabricación:

- Caso 1: La tasa diaria de refabricación (w) es mayor que la tasa diaria de demanda por parte del mercado (d), pero sin embargo sus valores son muy próximos.
- Caso 2: Las tasas diarias de producción (p) y de refabricación (w) son mucho mayores que la tasa diaria de demanda (d).
- Caso 3: La tasa diaria de producción (p) es menor que la tasa diaria de refabricación (w)
- Caso 4: La tasa diaria de llegadas de productos 'teóricos' procedentes de la etapa de desensamblaje en componentes ((rd)') es mucho menor que la tasa diaria de demanda de productos por el mercado (d).

Del análisis de sensibilidad realizado en la fase de refabricación-fabricación, se han obtenido las siguientes conclusiones sobre la utilidad del modelo de simulación adoptado dependiendo de los valores de los datos de partida:

- La tasa diaria de refabricación puede tener un valor próximo al de la tasa diaria de demanda de productos por parte del mercado, siempre y cuando, en la fase de refabricación-

fabricación, los valores obtenidos para los tiempos  $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$  cumplan la siguiente condición:  $t_1 > t_2 + t_3$ .

- Cuanto mayor sean las tasas diarias de refabricación y de producción, menores serán los errores de redondeo en los que se incurre, y mejor será el resultado obtenido mediante la simulación.
- La tasa diaria de llegada de productos 'teóricos' procedentes de la etapa de desensamblaje en componentes, junto con la tasa diaria de demanda de productos por parte del mercado, debe permitir obtener, en la fase de refabricación-fabricación, un valor de  $R$  mayor o igual a 2.

### **3.2. Segunda parte**

La segunda parte del análisis de sensibilidad consiste en variar los valores de las tasas empleados en cada una de las etapas de desensamblaje (tasa diaria de llegada de productos (( $rd$ )'), tasa diaria de desensamblaje ( $w$ ) y tasa diaria de demanda de productos ( $d$ )). Las variaciones que se han considerado para la realización de la segunda parte del análisis de sensibilidad han sido las siguientes:

- Se ha modificado el valor de la tasa diaria de demanda ( $d$ ) con respecto al valor de la tasa diaria de llegada de productos (( $rd$ )'), de forma que, en ciertas ocasiones, dicho valor fuese mayor, y en otras ocasiones fuese menor.
- Se ha modificado, en cada etapa de desensamblaje, la relación existente entre la tasa  $d_1$  y la tasa  $d_2$ , de forma que el porcentaje de productos destinados a cada una de las opciones de recuperación consideradas fuese variando.
- Se ha modificado el valor de la tasa diaria de desensamblaje ( $w$ ), en un intento por comprobar si la proximidad del valor de esta tasa con el valor de ( $rd$ )' o con el valor de  $d$ , pudiese acarrear algún problema de funcionamiento al modelo de simulación.

Las conclusiones que se han obtenido del análisis de sensibilidad realizado en cada una de las etapas de desensamblaje son las siguientes:

- En la etapa de desensamblaje en componentes, el valor de la tasa diaria de demanda de productos destinados a refabricación ( $d_2$ ), debe ser tal que fije un valor de la tasa diaria de llegada de productos 'teóricos' procedentes de la etapa de desensamblaje en componentes, que permita obtener, junto con la tasa diaria de demanda de productos por parte del mercado, un valor de  $R$  mayor o igual a 2, en la fase de refabricación-fabricación.
- No existe ninguna restricción, para el correcto funcionamiento del modelo de simulación desarrollado, sobre el valor del resto de las tasas empleadas en cada una de las etapas de desensamblaje, salvo las limitaciones impuestas por la política aplicada en dichas etapas de desensamblaje.

## **4. Conclusiones**

En este trabajo se propone un sistema de gestión en bucle cerrado el cual constituye un marco teórico ideal para la consideración de políticas enfrentadas en la realidad empresarial, tanto más cuanto más se extiendan los efectos de las normativas legales medioambientales a los distintos sectores de actividad y las posturas preactivas por parte de las organizaciones

En dicho bucle cerrado se han modelado dos diferentes situaciones, coincidiendo con dos diferentes etapas de desensamblaje. Para una de ellas se ha desarrollado una política, que supone una novedad con respecto a las políticas de gestión de inventarios en bucle cerrado ya existentes en la literatura, las cuales, si bien consideran las múltiples opciones de recuperación de productos procedentes del mercado, únicamente contemplan el desempeño de una única opción entre las distintas posibles. La consideración conjunta de varias posibilidades de recuperación ayuda a las empresas y facilita la decisión sobre qué cantidad de los productos procedentes del mercado derivar a cada una de las opciones de recuperación, que hayan sido elegidas previamente. Dicha decisión se realiza de forma que los costes económicos totales en los que se incurre sean los mínimos posibles. En otro punto del bucle se considera una política tomada de la literatura, la política (1, R) de Teunter (2004).

Gracias a lo anterior se ha comprobado que la política desarrollada en este trabajo puede combinarse consigo misma, así como con la política (1, R), obteniéndose como resultado una situación más próxima a la realidad que la que supone la aplicación de la política (1, R) de Teunter (2004) de forma individual.

Mediante la herramienta de simulación, se ha modelado la situación descrita del bucle cerrado. El programa de simulación empleado para dicho fin ha sido Arena 10.0. Para determinar el ámbito correcto de aplicación del modelo de simulación desarrollado, se ha realizado un análisis de sensibilidad donde quedan claramente especificadas las condiciones que deben cumplir los valores de los datos de partida, si se quiere alcanzar la situación óptima en la que los costes totales en que se incurre, en el escenario de trabajo descrito en el bucle cerrado, sean los mínimos.

## Referencias

- Bayindir, Z. P., Erkip, N., & Güllü, R. (2003). A model to evaluate inventory costs in a remanufacturing environment. *International Journal of Production Economics*, Vol. 81-82, pp. 597-607.
- Inderfurth, K., de Kok, A.G., & Flapper, S.D.P. (2001). Product recovery in stochastic remanufacturing systems with multiple reuse options. *European Journal of Operational Research*, Vol. 133, pp. 130-152.
- Kiesmüller, G.P. (2003). Optimal control of a one product recovery system with leadtimes. *International Journal of Production Economics*, pp. 81-82, pp. 333-340.
- Kleber, R., Minner, S., & Kiesmüller, G. P. (2002). A continuous time inventory model for a product recovery system with multiple options. *International Journal of Production Economics*, Vol. 79, pp. 121-141.
- Koh, S.-G., Hwang, H., Sohn, K.-I., & Ko, C.-S. (2002). An optimal ordering and recovery policy for reusable items. *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 43, pp. 59-73.
- Nahmias, N., & Rivera, H. (1979). A deterministic model for repairable item inventory system with a finite repair rate. *International Journal of Production Research*, Vol. 17, No.3, pp. 215-221.
- Schrady, D. A. (1967). A deterministic inventory model for repairable items. *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 14, pp. 391-398.
- Teunter, R. H. (2004). Lot-sizing for inventory system with product recovery. *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 46, pp. 431-441.
- Teunter, R. H., & Vlachos, D. (2002). On the necessity of a disposal option for returned products that can be remanufactured. *International Journal of Production Economics*, Vol. 75, pp. 257-266.

Thierry, M., Salomon, M., Van Nunen, J., & Van Wassenhove, L. (1995). Strategic issues in product recovery management. *California Management Review*, Vol. 37, No.2, pp. 114-135.

Rudi, N.; Pyke, D. y Sporsheim, P. (2000). Product Recovery at the Norwegian National Insurance Administration. *Interfaces*, Vol. 30, No. 3, pp. 166-179.