

## **Revisión de modelos de gestión de inventarios para repuestos reparables<sup>37</sup>**

**Marta Palmer Gato<sup>1</sup>, Manuel Cardós Carboneras<sup>1</sup>, Eugenia Babiloni<sup>1</sup>, Ester Guijarro Tarradellas<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Dpto. de Organización de Empresas. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia. marpalga@doe.upv.es, [mcardos@doe.upv.es](mailto:mcardos@doe.upv.es), [mabagri@doe.upv.es](mailto:mabagri@doe.upv.es), [esguitar@doe.upv.es](mailto:esguitar@doe.upv.es)

### **Resumen**

*Los repuestos reparables juegan un importante papel en diferentes industrias debido al impacto que producen en la disponibilidad de los diferentes productos así como en los costes de inventario. Cuando se trata con repuestos reparables se consideran elementos con un alto coste, de manera que resulta más interesante repararlos que desecharlos y adquirir uno nuevo, en estos casos el poder determinar cual es el nivel de inventario que se ha de mantener se convierte en un elemento clave. En el trabajo se revisa la literatura existente centrándose en las bases a partir de las cuales se han desarrollado los trabajos actuales.*

**Palabras clave:** repuestos reparables, mantenimiento, gestión de inventarios, aviación

### **1. La gestión de inventarios reparables**

Gestionar el inventario implica tomar decisiones sobre dos aspectos fundamentales. Por un lado sobre la importancia del ítem y por otro sobre qué política seguir. El objetivo de ambas decisiones es determinar cuándo lanzar una orden de reaprovisionamiento y qué tamaño debe de tener ésta con el fin de cumplir con una restricción de servicio al cliente, o de coste o de inventario medio. La gestión de los inventarios reparables, aunque tiene elementos en común con la gestión de repuestos, introduce la característica de que estos se mandan a reparar en lugar de ser desechados con la complejidad añadida de que no siempre se pueden reparar, teniendo que ser en ese caso sustituidos por uno nuevo.

Los primeros trabajos relacionados con la gestión de inventarios reparables surgen de las necesidades de la Armada americana. En un estudio llevado a cabo por Schrady (1967) se pone de manifiesto que los inventarios reparables representan sólo un 7% de los productos almacenados, pero por el contrario suponen el 58% del valor de lo almacenado (inicialmente los productos de mayor valor suelen estar diseñados para poder repararse). Según Schrady (1967) la teoría clásica de gestión de inventarios es apropiada para gestionar los consumibles, pero no es válida para controlar los artículos reparables que vuelven a los almacenes de la Armada y ello le lleva a proponer un modelo determinista, basado en el modelo EOQ (Economic Order Quantity), para inventarios reparables. La solución aportada por Schrady, supone conocidos los tiempos de suministro y la demanda (la cual se recibe a un ritmo constante), no permite diferir demanda, y supone capacidad infinita por parte del proveedor y del taller de reparación (con llegadas y salidas instantáneas de material de los almacenes). El objetivo del modelo, al igual que en el EOQ, consiste en determinar cuales son los lotes que hacen mínimos los costes de posesión y pedido para ambos almacenes.

---

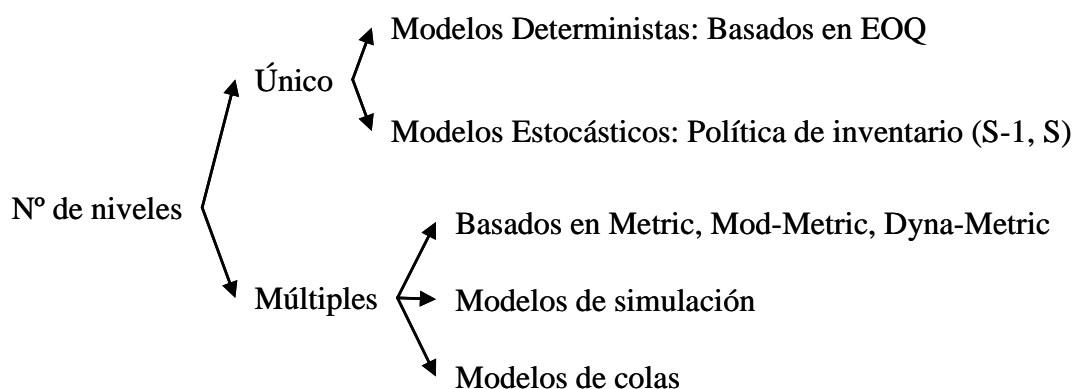
<sup>37</sup> Este trabajo se deriva de la participación de sus autores en un proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación con referencia DPI 2007-65441, titulado “Gestión de existencias bajo demanda Esporádica con aplicación al mantenimiento en aviación (GEMA)”.

Tras Schrady (1967), muchos son los trabajos que desde la década de los 60 se han desarrollado en el campo de los inventarios reparables, debido a su importancia y complejidad, como se puede ver en Guide y Srivastava (1997) y Kennedy et al. (2002). Los objetivos que se han perseguido así como las técnicas desarrolladas son variadas dándose, por ejemplo, objetivos como la minimización de costes, la minimización de la demanda diferida, o la minimización de los costes totales del sistema sujetos a restricciones de servicio. Otro aspecto importante en la gestión de inventarios reparables es cómo se modela la demanda. Aunque no existe un consenso en cuanto a qué función de distribución es más adecuada para tratar con estos inventarios, la forma más extendida es trabajar con procesos de Poisson simples o compuestos.

Con el objetivo de realizar una categorización de las situaciones estudiadas se pueden analizar las siguientes características relativas al modelo de gestión, al sistema o a los propios inventarios:

- Tipo de demanda: Determinista o aleatoria modelada con diferentes tipos de distribuciones
- Periodo de reaprovisionamiento: Un único plazo de reaprovisionamiento o múltiples plazos.
- Tasa de mortalidad de los inventarios: Se considera o no, es determinista o aleatoria ...
- Objetivos perseguidos: Minimización de costes, minimización de roturas de stock, consecución de niveles de servicio al cliente objetivo, etc.
- Número de niveles en el sistema: Múltiples (multi echelon) o único (single echelon).

Se puede hacer una clasificación de los modelos de gestión de inventarios reparables en función del número de niveles que aparecen en el sistema modelado. En el caso de un único nivel los modelos se pueden clasificar como aquellos que tratan una situación determinista y la solución está basada en el modelo EOQ, y los que tratan una situación estocástica cuya solución utiliza la política de inventario (S-1,S) también conocida como política de sustitución de ventas, la cual básicamente consiste en el lanzamiento de una orden de reaprovisionamiento para alcanzar el nivel S cuando la posición de inventario alcanza el valor de S-1. En el caso de múltiples niveles aparecen una gran variedad de posibilidades de clasificación, aunque la mayoría de los modelos utilizan una política de inventario (S-1, S). En particular, para la gestión de los reparables la política de inventario más utilizada en la literatura es la (S-1,S) utilizando una distribución de Poisson simple o compuesta para modelar la demanda.



**Figura 18.** Esquema de clasificación de los modelos de inventarios para reparables

El objetivo de este artículo es realizar una revisión de la literatura centrada, por un lado, en la política más utilizada en la gestión de inventarios reparables, i.e. la política de sustitución de ventas, y por otro revisar los modelos prácticos que aparecen en uno de los campos más extensos de aplicación de la gestión de inventarios reparables como es la gestión de mantenimiento en el sector de la aviación.

## **2. Revisión de la política de sustitución de ventas**

La política de sustitución de ventas ha sido estudiada de forma teórica en diferentes trabajos, el primero en el que se estudia con detalle desarrollando el cómputo de diversas métricas de servicio es debido a Feeney y Sherbrooke (1966) que caracterizaron la política de inventario (S-1, S) sujeta a demandas de Poisson compuesta con un único plazo de suministro. En su trabajo utilizan como distribución de demanda cualquier distribución compuesta de Poisson siendo para su estudio arbitraria la distribución que sigan los tiempos de reparación de los productos. Resuelven tanto la situación en la que se permite diferir demanda como en la que no se permite. Llegan a la conclusión de que el comportamiento del ítem se puede determinar completamente mediante las “steady state probabilities” del número de unidades en reabastecimiento y una vez determinadas estas probabilidades son capaces de desarrollar el cómputo de algunas medidas de rendimiento, entre ellos el fill rate, en función del stock, S. Más tarde, Higa et al. (1975) utilizan una distribución de Poisson compuesta y estudian la distribución de los tiempos de espera.

En un estudio posterior, Smith (1977) utiliza también la distribución de Poisson para modelar la demanda con el objetivo de minimizar el coste esperado por unidad de tiempo. Por último, Moinzadeh (1989) modela la demanda mediante una distribución de Poisson considerando los tiempos de suministro constantes con el objetivo de minimizar el coste total esperado.

Muckstadt y Thomas (1980) comparan dos métodos para resolver un sistema multiechelon en este caso con demanda simple de Poisson. El primero de ellos basado en la aplicación de las soluciones para single-echelon y otro específico de multiechelon. En el caso de lo que ellos llaman “level decomposition” (aplicación de single-echelon) utilizan el fill rate calculado por Feeney y Sherbrooke (1966), en este caso para una distribución de Poisson simple.

Tras el trabajo de Feeney y Sherbrooke (1966), Sherbrooke desarrolló el que pasó a ser la base de la mayoría de los modelos multi-echelon, conocido como METRIC, (Sherbrooke (1968)). Básicamente METRIC consiste en un problema de minimización de costes de stocks sujeto a restricciones de servicio, en este caso la métrica de servicio empleada es la demanda diferida esperada. En este artículo, Sherbrooke indica que para el caso de una única base (single-echelon) el fill rate como otras métricas (ready rate, service rate, operational rate) aportan idénticos resultados en cuanto al stock, no siendo así en el caso de multi-echelon.

Tras este trabajo aparecen toda la familia de variaciones conocidas como Mod-Metric (Muckstad (1973)), Vari-Metric (Sherbrooke (1986)).

A partir de estos trabajos se realizan aplicaciones de la política de sustitución de ventas a la gestión de inventarios reparables persiguiendo objetivos de minimización de costes sujetos a restricciones de servicio (Gross et al. (1977)) y objetivos de minimización de costes de ordenar y mantener, así como los costes de rotura de stock (Fisher y Brennan (1986); Schaefer (1989)). En la actualidad se sigue trabajando con las mismas bases pero se han ido introduciendo elementos nuevos como permitir transbordos entre bases, realizar entregas en ventanas de tiempo. Ejemplos de trabajos actuales en esa línea son Kutanoglu y Mahajan (2009) y Olsson (2010).

Una de las características de los repuestos reparables es que los productos no tienen vida infinita, es decir el producto no siempre se puede recuperar y hay ocasiones en las que se ha de desechar y es necesario comprar uno nuevo.

El primer trabajo en el que se consideró de forma explícita que los productos pueden ser reparables o no en contexto estocástico es debida a Allen y Desopo (1968). En su trabajo consideran que el fallo de cada ítem es independiente del resto y que el número de unidades que fallan en una unidad de tiempo sigue una ley de Poisson de media  $D$ . Cuando un elemento falla entra inmediatamente en el ciclo de reparación, con una probabilidad  $p$ , ciclo del cual sale en condiciones de servicio después de un periodo fijo de reparación  $R$ . Un elemento es no-reparable con probabilidad  $1-p$  y es desechado.

Los siguientes trabajos que continuaron en esa línea de considerar la posibilidad de no-reparación de los productos son debido a Simon y Desopo (1971) y Lee y Moinzadeh (1987), estos últimos consideran la política  $(S-1,S)$  como un caso especial de  $(S-Q,S)$  donde el valor óptimo de  $Q$  es igual a 1, y analizan la distribución de probabilidad de los diferentes niveles de demanda diferida en las bases para diferentes distribuciones de tiempo de reparación considerando la demanda como una distribución de Poisson.

### **3. La gestión de repuestos en la industria de la aviación**

Uno de los mayores campos de aplicación de los reparables es la industria de la aviación, donde la gestión de los repuestos reparables es un elemento crítico debido por una parte al elevado valor de los inventarios y por otra al coste muy elevado y difícilmente cuantificable de tener un avión parado, situación que en dicha industria se conoce como AOG (aircraft on ground). De manera que mediante la gestión de los reparables se debe de intentar asegurar la disponibilidad de los repuestos para no incurrir en dicha situación.

Tedone (1989) presenta un sistema de ayuda a la toma de decisiones que utiliza American Airlines para apoyar las operaciones de sus aproximadamente 400 aviones. El RAPS (Rotables Allocation and Planning System), dispone de las previsiones de demanda de los reparables y hace recomendaciones sobre el número de productos a destinar en cada base. Aunque no explica el modelo que utiliza, sí menciona el hecho de que el sistema incorpora el coste de cancelar un vuelo y que dicho coste es sorprendentemente difícil de estimar. Sherbrooke (1971) desarrolla un modelo analítico que evalúa el número esperado de aviones no operativos. El modelo es para una única base. Las entradas del modelo son los niveles de stock así como las tasas de demanda junto con los tiempos medios de reparación y reaprovisionamiento. El modelo determina los niveles de inventarios que reducen al mínimo el número de aeronaves no operativas sujeto a una restricción de presupuesto. Los autores concluyen que la asignación óptima es prácticamente la misma que la asignación con Metric (ver Sherbrooke (1968)).

Davidson (1980) trata un caso práctico en el que estudian la situación de puesta en marcha de una nueva flota de aviones. Cuando una compañía compra una flota de un nuevo tipo de avión, una de las decisiones más importantes es determinar los niveles de inventarios, reparables o no, que se van a necesitar para el funcionamiento de la flota. En este caso Davidson compara tres modelos diferentes para gestionarlo.

En el trabajo de deHaas y Verrijdt (1997) se ayudan de los modelos Metric y Mod-Metric para determinar los niveles de servicio objetivo, la métrica de servicio que utilizan es el fill rate utilizado por Muckstadt y Thomas (1980) dado que modelan la demanda mediante una distribución de Poisson.

Mabini y Christer (2002) presentan un modelo para determinar los niveles de stock de elementos reparables de una línea aérea comercial de Filipinas. Los elementos se caracterizan por una demanda errática y alto coste. El sistema tiene tres fuentes de suministro de partes. Los inventarios no reparables son desechados y reemplazados por nuevos. El objetivo es minimizar el coste total anual esperado de mantenimiento de inventarios así como los retrasos de los aviones.

Recientemente se han producido algunas aportaciones significativas en el tratamiento de la demanda esporádica, tal y como se suele categorizar la demanda de repuestos, en la industria de aviación. Al-Garni et al. (1999) analizan la fiabilidad de los subconjuntos de freno del Boeing 737 utilizando un modelo de Weibull y proponen su integración con el sistema de planificación de materiales para prever las unidades necesarias en el horizonte de planificación. Ghobbar y Friend (2002) analizan las causas que provocan la demanda esporádica de piezas de repuesto en aviación.

Poco después, Ghobbar y Friend (2003) hacen una comparación de 13 métodos de previsión, incluyendo heurísticas empleadas por algunas compañías de aviación. Para ello aplican la categorización de la demanda propuesta por Syntetos et al. (2005). De ambos trabajos se concluye que la tasa de utilización de los aviones (horas de vuelo, número de aterrizajes) es el factor que más influye en la demanda de repuestos. Además, en Ghobbar et al. (2003) analizan distintos métodos para fijar el tamaño del lote de la orden de reaprovisionamiento de repuestos en aviación y proponen reglas para su utilización.

#### **4. Conclusiones**

La gestión de los inventarios reparables es de vital importancia en la gestión del mantenimiento de diferentes sectores debido al alto coste de dichos inventarios y cobra aún más importancia en sectores como la aviación en el cual no disponer del stock necesario de piezas conlleva dejar un avión en tierra con los costes de aplazamiento o anulación de vuelos que acarrea. En los últimos años se han hecho avances en el tratamiento de la demanda esporádica que tienen aplicación en el campo de los repuestos reparables.

Es por ello que se hace necesaria una revisión de los métodos y modelos que existen en la literatura para determinar cómo estos avances en el tratamiento de la demanda esporádica pueden mejorar la gestión de los repuestos reparables, dado que hasta el momento, de forma general, se suele admitir que la demanda se puede modelar mediante una distribución de Poisson cuando no siempre la demanda sigue esa distribución.

#### **Referencias**

- Al-Garni, A.Z.; Sahin, A.Z.; Al-Ghamdi, A.S.; Al-Kaabi, S.A. (1999). Reliability analysis of aeroplane brakes. *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 15, No 2, pp. 143-150.
- Allen, S.G.; Desopo, D.A. (1968). An Ordering Policy for Repairable Stock Items. *Operations Research*, Vol. 16, No 3, pp. 669-&.
- Davidson, J.D. (1980). Initial Provisioning of Rotable Spares for Airlines - A Case-Study. *Infor*, Vol. 18, No 2, pp. 139-148.

- deHaas, H.F.M.; Verrijdt, J.H.C.M. (1997). Target setting for the departments in an aircraft repairable item system. *European Journal of Operational Research*, Vol. 99, No 3, pp. 596-602.
- Feeney, G.J.; Sherbrooke, C.C. (1966). The (S-1,S) inventory policy under compound Poisson demand. *Management Science*, Vol. 12, No 5, pp. 391-411.
- Fisher, W.W.; Brennan, J.J. (1986). The Performance of Cannibalization Policies in A Maintenance System with Spares, Repair, and Resource Constraints. *Naval Research Logistics*, Vol. 33, No 1, pp. 1-15.
- Ghobbar, A.A.; Friend, C.H. (2002). Sources of intermittent demand for aircraft spare parts within airline operations. *Journal of Air Transport Management*, Vol. 8, No 4, pp. 221-231.
- Ghobbar, A.A.; Friend, C.H. (2003). Evaluation of forecasting methods for intermittent parts demand in the field of aviation: a predictive model. *Computers & Operations Research*, Vol. 30, No 14, pp. 2097-2114.
- Ghobbar, A.A.; Friend, C.H.; Swift, L.A. (2003). Comparison of lot-sizing methods in aircraft repairable component inventory systems. *Journal of Aircraft*, Vol. 40, No 2, pp. 378-383.
- Gross, D.; Kahn, H.D.; Marsh, J.D. (1977). Queuing models for spares provisioning. *Naval Research Logistics*, Vol. 24, No 4, pp. 521-536.
- Guide, V.D.R.; Srivastava, R. (1997). Repairable inventory theory: Models and applications. *European Journal of Operational Research*, Vol. 102, No 1, pp. 1-20.
- Higa, I.; Feyerherm, A.M.; Machado, A.L. (1975). Waiting Time in An (S-1,S) Inventory System. *Operations Research*, Vol. 23, No 4, pp. 674-680.
- Kennedy, W.J.; Patterson, J.W.; Fredendall, L.D. (2002). An overview of recent literature on spare parts inventories. *International Journal of Production Economics*, Vol. 76, No 2, pp. 201-215.
- Kutanoglu, E.; Mahajan, M. (2009). An inventory sharing and allocation method for a multi-location service parts logistics network with time-based service levels. *European Journal of Operational Research*, Vol. 194, No 3, pp. 728-742.
- Lee, H.L.; Moinzadeh, K. (1987). Operating Characteristics of A 2-Echelon Inventory System for Repairable and Consumable Items Under Batch Ordering and Shipment Policy. *Naval Research Logistics*, Vol. 34, No 3, pp. 365-380.
- Mabini, M.C.; Christer, A.H. (2002). Controlling multi-indenture repairable inventories of multiple aircraft parts. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 53, No 12, pp. 1297-1307.
- Moinzadeh, K. (1989). Operating Characteristics of the (S-1,S) Inventory System with Partial Back-Orders and Constant Resupply Times. *Management Science*, Vol. 35, No 4, pp. 472-477.
- Muckstad, J.A. (1973). Model for A Multi-Item, Multi-Echelon, Multi-Indenture Inventory System. *Management Science Series B-Application*, Vol. 20, No 4, pp. 472-481.

- Muckstadt, J.A.; Thomas, L.J. (1980). Are Multi-Echelon Inventory Methods Worth Implementing in Systems with Low-Demand-Rate Items. *Management Science*, Vol. 26, No 5, pp. 483-494.
- Olsson, F. (2010). An inventory model with unidirectional lateral transshipments. *European Journal of Operational Research*, Vol. 200, No 3, pp. 725-732.
- Schaefer, M.K. (1989). Replenishment policies for inventories of recoverable items with attrition. *Omega*, Vol. 17, No 3, pp. 281-287.
- Schrady, D.A. (1967). A Deterministic Inventory Model for Repairable Items. *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 14, No 3, pp. 391-&.
- Sherbrooke, C.C. (1968). Metric - A Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control. *Operations Research*, Vol. 16, No 1, pp. 122-&.
- Sherbrooke, C.C. (1971). Evaluator for Number of Operationally Ready Aircraft in A Multilevel Supply System. *Operations Research*, Vol. 19, No 3, pp. 618-&.
- Sherbrooke, C.C. (1986). Vari-Metric - Improved Approximations for Multi-Indenture, Multiechelon Availability Models. *Operations Research*, Vol. 34, No 2, pp. 311-319.
- Simon, R.M.; Desopo, D.A. (1971). Ordering Policy for Repairable Stock Items. *Operations Research*, Vol. 19, No 4, pp. 986-&.
- Smith, S.A. (1977). Optimal Inventories for An (S-1, S) System with No Backorders. *Management Science*, Vol. 23, No 5, pp. 522-528.
- Syntetos, A.A.; Boylan, J.E.; Croston, J.D. (2005). On the categorization of demand patterns. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 56, No 5, pp. 495-503.
- Tedone, M.J. (1989). Repairable Part Management. *Interfaces*, Vol. 19, No 4, pp. 61-68.