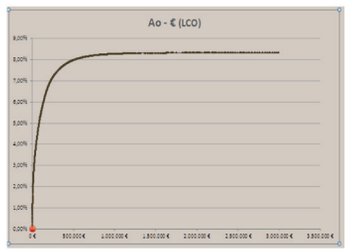
La planificación de repuestos en el Ejército de Tierra. Implantación del método disponibilidad basada en la escasez (RBS)



Spare parts planning in the Spanish Army: readiness based sparing method (RBS) implementation

Juan Carlos García-Benito[1], María Luz Martín-Peña[2]

[1] ISDEFE. Ingeniería de Sistemas para la Defensa de España. C. Beatriz de Bobadilla,3 - 28040. Madrid. Tfno: + 34 914 115011. jcgarcia@isdefe.es
[2] UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS. Ciencias Jurídicas y Sociales. Paseo de los Artilleros - 28032 Madrid. Tfno: 34 914 889247.

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/8083 | Recibido: 09/06/2016 • Aceptado: 29/06/2016

ABSTRACT

One of the goals of the Ejército de Tierra (Spanish Army, SA) Operations Department is to ensure the operational availability of its numerous fleets of weapons' systems. Specially in times of economic crisis, with severe budget cuts, achieving this goal becomes a challenge for the logistic engineering, which has to look for efficiency by implementing innovative projects to improve its supply chain.

Within the maintenance processes, the purchasing and distribution planning of spare-parts are considered the most relevant for the SA due to its influence in the operational availability and the enormous economical resources needed. Among other factors, the pattern of the spare parts demand, extremely irregular, erratic and with a large number of null periods, turns out that finding a good planning method is not a simple task.

This article analyzes the implementation of the adapted RBS method ("Reliability Based Sparing") which provides SA a useful solution to the above purpose, diverting the attention from the demand of each single spare part to the whole system and the available credit. Satisfactory results after the first year of operation are presented.

Keywords: purchasing planning, distribution planning, spare parts, MRO, Defense, RBS, METRIC.

RESUMEN

La Dirección de Operaciones del Ejército de Tierra tiene entre una de sus metas, el asegurar la disponibilidad operativa de sus numerosas flotas de sistemas de armas. En épocas de crisis económicas, con fuertes reducciones presupuestarias, la consecución de dicha meta se convierte en un reto para la ingeniería logística, la cual debe recurrir a la búsqueda de la eficiencia mediante la implantación de proyectos innovadores que mejoren su cadena de suministro.

Dentro de los procesos de mantenimiento, destaca uno por su importancia y por los recursos económicos que necesita: la planificación de aprovisionamientos y distribución de repuestos necesarios en las acciones de mantenimiento. Debido a, entre otros factores, las características de su demanda muy errática e irregular con gran número de periodos con valores nulos, encontrar un buen método de planificación no es tarea sencilla.

Este artículo analiza el proceso de implantación de una adaptación del método RBS el cual resuelve el problema anterior desviando el foco de atención del repuesto al sistema al que pertenece, así como crédito disponible. Los primeros resultados, considerados como satisfactorios, tras un año desde su implantación, son presentados.

Palabras clave: planificación de compras, planificación distribución, repuestos, MRO, Defensa, RBS, METRIC.

1. INTRODUCCIÓN

En el sector servicios, al igual que en el industrial, la *dirección de operaciones* juega un papel fundamental, ya que es la encargada de gestionar y buscar la eficiencia en la ejecución de procesos clave de las organizaciones. El Ejército de Tierra–ET no es ajeno a lo anterior y su dirección de operaciones (DINFULOG–Dirección de Integración de Funciones Logísticas) es un elemento fundamental para la consecución de las metas de la organización. Prueba de ello es la reciente reestructuración que ha sufrido el Mando del Apoyo Logístico de ET, cambiando las tradicionales direcciones verticales (mantenimiento, compras y transporte) por una nueva dirección de operaciones horizontal (DINFULOG) que integra todos los procesos que regulan la cadena de suministro de ET. Esta importancia nace de una necesidad prioritaria: disponer de un gran número de sistemas en estado operativo para garantizar el cumplimiento de sus objetivos. En la actualidad, el número de conjuntos de utilización final usados por ET supera los 12.000, de los cuales, aproximadamente 2.500, se consideran sistemas principales o relevantes para el desarrollo de sus distintas misiones. Ante tan elevado número de sistemas de armas, la necesidad de conseguir una adecuada *disponibilidad operativa* se convierte en un reto exigente para la ingeniería logística. A esto, hay que añadir el habitual tamaño reducido de las flotas, la poca similitud entre los sistemas militares y civiles, su avanzada y muy especializada tecnología, el empleo heterogéneo de los mismos, la escasez de proveedores cualificados, así como la carencia, en muchos casos, de datos históricos fiables. Todo ello, provoca que los estudios de ingeniería necesarios para determinar el apoyo logístico de dichos sistemas adquieran especial relevancia a lo largo de su ciclo de vida.

Dentro de la ingeniería de apoyo logístico, destaca un proceso sobre los demás por su importancia y complejidad: se trata de la *planificación de aprovisionamientos de repuestos*. En síntesis, consiste en decidir qué repuestos comprar, en qué cantidad y en qué fecha, para poder hacer frente a las futuras necesidades de los talleres de ET. Además, la complejidad aumenta debido a varias

razones: en primer lugar la motivada por la legislación existente que regula la contratación en las Administraciones Públicas, la cual, unida a los dilatados plazos de entrega de la mayoría de los proveedores de Defensa, provoca que el horizonte de planificación sea muy largo. Por otra parte, en entornos de servicios en los que predomina el mantenimiento correctivo, la demanda suele ser bastante errática e irregular, causada por averías poco frecuentes, en flotas no muy grandes. En estos entornos, resulta especialmente complicado predecir la demanda de repuestos.

Todos estos hechos han provocado que, desde hace ya tiempo, la DINFULOG haya emprendido numerosos proyectos para mejorar su método de planificación, empleando planteamientos científicos cada vez más sofisticados.

En paralelo, existe otro objetivo largamente perseguido: se trata de *relacionar la disponibilidad operativa de la familia de sistemas y el gasto en compra de repuestos*: *curva DO (Ao – Availability Operational)-€* (Fig.1).

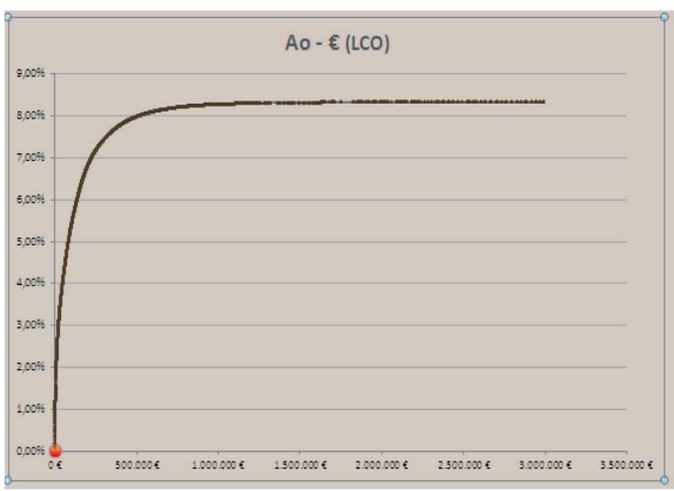


Fig. 1: Relación entre disponibilidad operativa (Ao) e inversión en repuestos

Este conocimiento es clave para realizar, de la manera más eficiente, el proceso de presupuestación y reparto de créditos de mantenimiento entre las distintas familias de sistemas de armas.

Como respuesta a estas dos necesidades, en 2012 se constituyó un Grupo de Trabajo cuya misión era *encontrar un método de planificación de repuestos* idóneo para ET. Al final de sus trabajos, se concluyó que el método más adecuado era el método RBS (*Readiness Based Sparing*/Disponibilidad Basada en la Escasez – ver Sherbrooke[1]).

De esta forma, este artículo revisará la literatura existente al respecto, presentará el modelo empleado en ET incidiendo en las diferencias con modelos RBS estándar y los resultados obtenidos tras un año de implantación.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA I

Aunque en el sector de Defensa el método RBS es conocido como tal, en el mundo académico es conocido por *METRIC* (*Multi Echelon Technique for Recoverable Item Control*/Técnica Multi Escalón Para Control Artículos Recuperables). Fue creado por Sherbrooke[2] para calcular el nivel de stock a mantener en un sistema de dos escalones. Posteriormente, Muckstadt[3] hizo una ampliación del método conocida como MOD-METRIC en la que se consideran los distintos niveles de configuración del sistema, decidiendo cuál de ellos interesa almacenar, con el inconveniente que era muy complejo de calcular. Fue otra vez Sherbrooke[4] quien mejoró el método ganando precisión en el cálculo de faltantes esperados, y en velocidad de cálculo, llamándose al nuevo método VARI-METRIC.

Desde entonces hasta la actualidad, las aportaciones al método han sido numerosas. Así, desde el punto de vista conceptual, una evolución posterior del modelo VARI-METRIC se puede encontrar en Gupta[5], donde se propone un modelo de dos escalones y multi-configuración para artículos reparables usando cadenas de Markov. Recientemente, en Chenyu[6] se propusieron técnicas para estimar el tipo de distribución y sus parámetros usados en el modelo.

También a lo largo de los últimos años, se han ido añadiendo restricciones adicionales al modelo. Así, Díaz[7] considera limitada la capacidad de los talleres y Song[8] incorpora otros factores como la canibalización, envíos laterales y de emergencia, capacidad y política de mantenimiento.

Desde el punto de vista del rendimiento del cálculo, varios han sido los trabajos académicos. En este sentido es interesante destacar el estudio de Nowicki[9] el cual analiza la eficiencia de todos los algoritmos relacionados con METRIC y demuestra como la complejidad del problema necesita de métodos aproximados. De todos los algoritmos, el *análisis marginal* propuesto por Sherbrooke[4], proporciona soluciones cercanas al óptimo y con muy buenas medidas de rendimiento.

Basten[10] realiza el primer trabajo donde integra en el método METRIC el cálculo de número de sistemas finales redundantes, considerando *el tamaño de la flota como una variable de decisión*. En algunos escenarios, conseguir la operatividad marcada sólo se puede conseguir con una flota redundante que entre en servicio cuando se produzca la entrada en taller de un sistema operativo.

Otro área de desarrollo del método METRIC ha sido los trabajos por incorporar al modelo análisis LORA (*Level Of Repair Analysis*), los cuales son usados en el sector MRO para decidir entre aquellos artículos que tienen la capacidad de ser reparados, cuáles interesa ser reparados y en qué escalón. Basten[11] integra en METRIC un análisis LORA mediante un algoritmo interactivo que proporciona soluciones cercanas al óptimo.

Aunque METRIC se aplicó primeramente en el mundo de la defensa, también fue rápidamente aplicado al mundo civil, en especial al mantenimiento de aviones de aerolíneas comerciales. Las referencias Chenyu[6] y Van Jaarsveld[12] exponen casos reales de aplicación de METRIC al sector civil aeronáutico.

El presente artículo aporta a la literatura anterior la descripción de un caso real de implantación del método RBS en un entorno de mantenimiento de flotas del sector de Defensa, ya que no son muchas aquéllas que traten el tema, y máxime aportando resultados reales. De hecho no existe ninguna referencia reciente que aporte resultados reales tras su aplicación en entornos de Defensa.

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

A diferencia de otros métodos tradicionales, el método RBS no se ocupa de estimar la demanda futura de cada repuesto, sino que, al contrario, clasifica todos los repuestos que pertenecen al sistema de armas, priorizándolos según la ganancia de disponibilidad operativa que produciría la adquisición de una unidad de inventario de cada uno de ellos.

De esta forma, dado un *crédito* a invertir en la adquisición de repuestos, se puede conocer, aplicando el método RBS, aquellos repuestos que proporcionan la mayor disponibilidad operativa posible hasta completar dicho crédito. El método RBS, a diferencia

de otros, sobresale por la sencillez de sus fundamentos. De forma resumida, comienza demostrando que, desde el punto de vista de la gestión del repuesto, "*aumentar la disponibilidad operativa del sistema de armas es equivalente a reducir los faltantes esperados en el próximo periodo de planificación*" (ver Smith[13]). Para ello, para un determinado repuesto perteneciente a un sistema de armas, se formula sus faltantes esperados (EBO – *Expected Backorders* – Faltantes Esperados) como la esperanza matemática de que la demanda sea mayor que el stock:

$$EBO(\mathrm{s}) = \sum_{x=s+1}^{\infty}(x-s)Pr\{D=x\} = Pr\{D=s+1\} + 2Pr\{D=s+2\} + 3Pr\{D=s+3\} + \cdots \quad (1)$$

Dónde:

- s : stock actual del repuesto.
- Pr{D=x}: probabilidad de que la demanda del repuesto en todo ET en el horizonte de planificación sea igual a "x".

Seguidamente, RBS plantea que, el método de planificación óptimo buscado, será aquél que *calcule la cantidad a comprar de cada repuesto del sistema de armas "s_i" de forma tal que se minimice los EBO totales del sistema de armas sin sobrepasar el crédito asignado "C"*. Analíticamente (ver Sherbrooke[1]):

$$\begin{aligned} &min_{(s_1,s_2,\ldots)}\ EBO\ \ (s_1) + \ EBO\ \ (s_2) + EBO\ \ (s_3) + \cdots \\ &con\ \ c_1s_1 + c_2s_2 + c_3s_3 + \cdots \leq C \end{aligned} \quad (2)$$

Dónde "c_i" es el precio unitario de adquisición del repuesto "*i*".

Para tal fin, primeramente se debe demostrar la *separabilidad* de la función objetivo (2) lo que permite manejar cada artículo s_i de forma independiente (ver Sherbrooke[1]). Después, la *condición necesaria* para conseguir un valor mínimo se logra aplicando el procedimiento estándar de incorporar un multiplicador de Lagrange - λ que multiplique al factor de la restricción e igualando su derivada parcial a cero. Al ser s_i una variable discreta, es equivalente a que su primera diferencia satisfaga:

$$EBO(s_i) - EBO(s_i - 1) + \lambda c_i \leq 0$$

$$EBO(s_i + 1) - EBO(s_i) + \lambda c_i > 0$$

O equivalentemente:

$$EBO(s_i) - EBO(s_i - 1) \leq -\lambda c_i < EBO(s_i + 1) - EBO(s_i)$$

Y

$$\frac{EBO(s_i) - EBO(s_i - 1)}{c_i} \leq -\lambda < \frac{EBO(s_i + 1) - EBO(s_i)}{c_i}$$

Es decir, de existir un λ, cualquier s_i puede ser un mínimo de (2) si satisface la ecuación (3) (condición necesaria). La *condición suficiente* se logra al ser la ecuación (2) convexa (ver demostración en Sherbrooke[1]).

Por tanto, se llega al siguiente ratio (4) el cual asegura valores mínimos en la optimización (3) y valores decrecientes a aumentar el valor de s_i:

$$Ratio\ RBS = \frac{EBO(s-1) - EBO(s)}{c} \quad (4)$$

Este ratio es aplicado a todos los repuestos asociados al sistema de armas, unidad a unidad, de forma que, aquéllas que tengan un valor más alto, serán las que proporcionen mayor disponibilidad operativa al menor precio, siendo, por tanto, más aconsejada su adquisición. Ahora se entiende como, la predicción de la demanda futura de cada repuesto propuesta por métodos tradicionales de planificación, queda relegada a un segundo plano, siendo *ahora la priorización del repuesto el fundamento de este* método.

El modelo RBS general se describe por las siguientes características:

1. La demanda de cada repuesto en cada taller/almacén se modela con distribuciones de Poisson.
2. Sólo contempla artículos reparables.
3. Se resuelve en un solo cálculo tanto la planificación de compras como de distribución (niveles o puntos de pedido en escalones inferiores). En sistemas multi-escalón, una planificación de distribución correcta es clave para conseguir los objetivos de disponibilidad operativa marcados. De forma simplificada, un *nivel* o *punto de pedido* no es más que una cantidad de inventario con la que se dota al taller para que, cuando lo precise, disponga de él, sin tener que esperar al envío desde el almacén central; al agotarse se repone de forma automática desde el almacén central. Otra vez más, se trata de balancear la disponibilidad operativa frente a la inversión en repuestos: a más y mayores niveles de distribución menor es la espera por repuestos y por tanto, mayor la disponibilidad operativa prevista, pero requiere una mayor inversión en su adquisición.
4. No contempla envíos laterales entre almacenes para resolver faltantes.
5. No contempla baja de artículos reparables.
6. Todos los artículos tienen la misma criticidad.
7. La probabilidad de un fallo en un componente es independientes del fallo en otro.
8. Los tiempos de reparación de cada artículo son independientes entre sí y no presentan tiempos de espera de entrada en taller.

El modelo RBS implantado por ET, aporta al modelo original las siguientes adaptaciones, cuya explicación detallada y justificación se pueden consultar en [14]

1. Contempla todos los repuestos necesarios en el mantenimiento del sistema, reparables o no.
2. Distingue dos cálculos distintos: la planificación de compras y planificación de distribución, con dos curvas *DO*-€distintas. Dos razones han provocado esta necesidad:
   a. Se quiere que el proceso de reparto de créditos entre las distintas familias sean *controlado por el gestor* aportando valor según su experiencia. Así, *cinco* son los conceptos logísticos que hay que tener en cuenta en dicho proceso: compra de repuestos para necesidades de mantenimiento correctivo (RBS compras), compra de repuestos para constitución de puntos de pedido en escalones inferiores (RBS distribución), compra de repuestos para mantenimientos programados (se pueden retrasar o minorar el uso de los sistemas afectados), compra de faltantes activos (con créditos ajustados, para artículos caros, no todos sus faltantes se tienen que resolver ya que pondría en peligro la compra de otros artículos más baratos con la consiguiente aparición de más faltantes en el futuro próximo) y externalización de servicios (reparaciones más rápidas aunque más caras). El gestor tiene que decidir, con las herramientas de apoyo adecuadas, qué crédito asigna a estas cinco vías de ganancia de disponibilidad operativa, y por tanto, se quiere que la compra de

repuestos para necesidades de correctivo (RBS-compras) y para constitución de niveles (RBS-distribución) sean dos opciones independientes controladas por el gestor.

b. Estos dos procesos son gestionados en la actualidad por dos órganos distintos de ET.

3. Se contempla en el cálculo la baja de artículos reparables, incrementándose los faltantes esperados según su histórico de bajas.
4. A diferencia del modelo METRIC, no sólo se usa la distribución de Poisson en el cálculo de probabilidades de demanda. En casos en que la demanda del repuesto es regular y estable en el tiempo, el uso de una distribución Normal da buenos resultados. Pero en patrones de demanda *erratic* o *slow-moving*, los más habituales en ET y en organizaciones MRO en general, (ver clasificación de demanda de piezas de repuesto propuesta en Williams[15]), caracterizados por distribuciones asimétricas con gran número de periodos con demanda nula, el comportamiento de la distribución Normal no era lo suficientemente exacto. Para corregir dicha situación, el modelo de ET analiza la demanda de cada repuesto, aplicando el *contraste de Kolmogorov-Smirnov*, y seleccionado el tipo de distribución más adecuado para el patrón de demanda detectado. Las distribuciones que maneja el contraste son las más utilizadas en el sector MRO: *exponencial, Poisson, Normal y Weibull.* Tras medir el resultado de distintas casos preparados al efecto, se estima que la selección de una función de distribución que se adecué correctamente al patrón de demanda de cada repuesto, puede incrementar la precisión del método en valores cercanos al 8%. Por último, se ha detectado que para tasas de fallo – λ bajas (<1) el contraste de Kolmogorov-Smirnov no funciona correctamente, siendo en estas situaciones la distribución de Poisson la que mejor se adapta a la demanda. Esto hecho fue ya observado por Tersine[16], por lo que, en estos casos, se modifica el resultado del contraste KS.
5. Debido a que los plazos de aprovisionamiento son largos, para aumentar el número de elementos de la muestra, se usan técnicas *bootstrap* para conseguir un mayor número de muestreos. Esta técnica es especialmente útil en sistemas de reciente adquisición.
6. En ET es común la supresión de unidades y creación de otras, tanto en territorio nacional como en misiones internacionales, moviendo habitualmente un porcentaje alto de flotas entre ellas. Esto implica que los consumos históricos usados en la planificación de la distribución de un determinado almacén en el momento actual no sean válidos ya que ha podido variar, en gran medida, la flota actual a la que apoya. Para corregir esta situación el modelo de ET lo resuelve calculando las probabilidades de demanda no basándose en los históricos de cada unidad sino en la actual flota asignada. De esta forma, toda unidad que tenga la misma flota asignada tendrá el mismo resultado en el cálculo RBS-distribución.
7. Se han cambiado las expresiones del modelo original que convierten *la reducción de faltantes esperados* en incremento de *disponibilidad operativa*, incorporando factores propios MRO.

El RBS-distribución es muy similar al RBS-compras; sus principales diferencias son las siguientes:

- En adquisiciones, la *curva DO-€* estaba formada por puntos que identifican a un determinado repuesto. Ahora en distribución, la *curva DO-€* está constituida por puntos que identifican a almacenes y repuestos. Los repuestos en los distintos almacenes donde pueden ser consumidos, compiten entre sí para obtener los niveles o puntos de pedido que originan mayor disponibilidad al menor precio.
- En adquisiciones, el periodo de muestreo de la demanda histórica es igual al horizonte de planificación para el que se quiere calcular la cantidad a comprar. Suelen ser periodos largos. En cambio, en distribución, dicho periodo es igual al tiempo de suministro entre el almacén central y el almacén en cuestión.
- En adquisiciones, el análisis de demanda considera toda la demanda histórica de ET. En distribución, en cambio, sólo se considera la demanda de cada almacén según su flota actual asignada.

Por otra parte y de forma no menos importante, el método RBS ofrece también la relación anteriormente citada entre la disponibilidad operativa prevista y el gasto en repuestos, cumpliéndose otro de los objetivos perseguidos en el proyecto. El método RBS calcula por cada unidad a comprar de cada repuesto, su ganancia de disponibilidad operativa y su precio de adquisición. Además propone el orden en el que se deben adquirir los repuestos, por lo que, aunando ambas ideas, dibujando conjuntamente todos los repuestos del sistema de armas propuestos por el método y en ese orden, se construye la *curva "Do-€"*. Ésta está formada por una serie de valores óptimos: es decir, para un determinado gasto, indica cuál es la máxima disponibilidad operativa alcanzable ya que, teóricamente, alcanzar una disponibilidad mayor con ese crédito no es posible (Fig.1).

4. CASO DE ESTUDIO

Seguidamente y a modo de ejemplo, se va a presentar la aplicación de lo anterior a un caso real, comenzando por el cálculo de faltantes esperados-EBO para a continuación aplicar el ratio RBS en la selección de repuestos. El artículo 61350098578XX es una pila BA-3058 consumida en la familia URO VAMTAC. El análisis de su demanda histórica en todo ET realizado por el contraste KS, ha determinado que la distribución Normal es la más idónea con unos parámetros de μ=3534,94 y σ=620,84, según los consumos en todo ET en plazos igual al horizonte de planificación. El stock del artículo en el momento del cálculo es de 4.124 unidades. Por consiguiente, para poder aplicar el método es necesario, obtener los faltantes esperados: EBO(4124), EBO(4125), EBO(4126),...Cada uno de ellos se resuelve aplicando (1). Así, por ejemplo:

$$EBO(4.124) = 1.Pr\{D = 4.215\} + 2Pr\{D = 4.216\} + 3Pr\{D = 4.217\} + \cdots \quad (5)$$

A su vez, la probabilidad de que la demanda sea igual a un determinado valor, al utilizar una distribución Normal se obtiene con la expresión siguiente (6), que aplicada a (5) proporcionará los valores de EBO:

$$\Pr[\mathrm{D} = \mathrm{x}] = f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(x-\mu)^2\right]}; \quad (6)$$

$$\Pr[\mathrm{D} = 4125] = \frac{1}{620{,}84\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2\times 620{,}84^2}(4125-3534{,}94)^2\right]} = 0{,}00040905$$

Una vez que los faltantes esperados han sido calculados, ya se está en disposición de aplicar el ratio RBS (4) a todos los repuestos de la familia, tal y como se puede ver en la siguiente figura(2).

	Artículo 1		Artículo 2	
s	EBO(s)	[EBO(s-1)-EBO(s)]/5	EBO(s)	[EBO(s-1)-EBO(s)]/1
0	1,000		4,000	
1	0,368	0,126	3,018	0,982
2	0,104	0,053	2,110	0,908
3	0,023	0,016	1,348	0,762
4	0,004	0,004	0,782	0,567
5	0,001		0,410	0,371
6	0,000		0,195	0,215
7	0,000		0,085	0,111
8	0,000		0,034	0,051
9	0,000		0,012	0,021
10	0,000		0,004	0,008

Fig. 2: Ejemplo RBS aplicado a 2 artículos de una familia

En ella se presentan dos artículos, a los que se aplica el ratio RBS según aumenta la cantidad "s" de unidades a comprar. Si el primer artículo fuese el artículo 61350098578XX del ejemplo anterior, s=0, implicaría no comprar nada y mantener su stock de 4.124 unidades; s=1 adquirir una unidad y obtener un stock de 4.125 unidades y así sucesivamente. El primer artículo tiene un precio de 5€ y el segundo de 1€, y el ratio RBS para cada unidad a comprar se presenta en la columna de la derecha, el cual ordenado descendentemente, proporciona el siguiente resultado

6 unidades del artículo 2 (hasta ratio 0,215)
1 unidad de artículo 1 (ratio 0,126)
1 unidad de artículo 2 (ratio 0,111)
1 unidad del artículo 1 (ratio 0,053)
2 unidades del artículo 2 (hasta ratio 0,021)
Y así sucesivamente.

En función del crédito disponible, se suspendería la acumulación de repuestos según su importe acumulado.

5. RESULTADOS

Como primera validación, se probó el comportamiento del modelo RBS en distintas familias de material diverso. Para ello se utilizó una herramienta de simulación de red logística (MAS1) desarrollada por ET. Es un simulador dinámico de evento discreto con variables no estocásticas, que modela la cadena de suministro de ET al tener definido sus artículos, almacenes, talleres, medios productivos, redes de transportes y red de apoyo entre unidades. Se sitúo la fecha de inicio de simulación un año antes de la fecha presente y con los datos históricos disponibles hasta esa fecha, se calculó la cantidad a comprar (RBS-compras) o los puntos de pedido (RBS-distribución) según el método correspondiente que se quería simular. Con dicho resultado del cálculo introducido en MAS1, se procedía a simular su comportamiento enfrentándolo con el último año de demanda real, registrando día a día el comportamiento de la red logística. Al final de la simulación, se medían distintos ratios, siendo prioritario para la toma de decisiones, las esperas registradas en los distintos talleres por la falta de repuestos o lo que es lo mismo la indisponibilidad operativa provocado por los faltantes de repuestos. Al comparar de esta forma los distintos métodos, los resultados fueron bastantes positivos ya que a igualdad de crédito, el método RBS tanto en compras como en distribución, proporcionaba una mayor disponibilidad operativa que el resto de métodos. También se observó que la exactitud de la curva teórica y el posicionamiento de su zona inicial eran bastante correctos y se adecuaban a la realidad advertida en las simulaciones.

Tras esta primera fase, se pasó en 2013 a realizar un piloto de implantación de dicho método en la planificación de adquisi-

Subfamilia (% Faltates)	2013	2014	Evolución 13/14
FAMILIA XXX	23,89	15,82	
FAMILIA XXX	15,41	11,25	
FAMILIA XXX	15,41	11,25	
FAMILIA XXX	15,41	11,25	
FAMILIA XXX	6,95	12,86	
FAMILIA XXX	7,74	7,19	
FAMILIA XXX	20,51	18,11	
FAMILIA XXX	7,74	7,19	
FAMILIA XXX	20,23	16,52	
FAMILIA XXX	15,19	10,55	
FAMILIA XXX	10,95	8,59	
FAMILIA XXX	10,95	8,59	
FAMILIA XXX	10,95	8,59	

Subfamilia (% Faltates)	2013	2014	Evolución 13/14
FAMILIA XXX	20,89	5,09	
FAMILIA XXX	7,31	1,70	
FAMILIA XXX	12,62	5,00	
FAMILIA XXX	13,30	11,38	
FAMILIA XXX	11,80	7,94	
FAMILIA XXX	15,15	6,96	
FAMILIA XXX	9,37	6,46	
FAMILIA XXX	16,38	4,35	
FAMILIA XXX	7,48	6,02	

Subfamilia (% Faltates)	2013	2014	Evolución 13/14
FAMILIA XXX	6,8	0	
FAMILIA XXX	4,57	1,88	
FAMILIA XXX	15,24	4,85	
FAMILIA XXX	21,43	40,31	
FAMILIA XXX	3,76	0,28	
FAMILIA XXX	0,23	0	
FAMILIA XXX	14,08	7,74	
FAMILIA XXX	25,34	4,23	
FAMILIA XXX	15,22	6,67	
FAMILIA XXX	2,45	4,45	
FAMILIA XXX	23,51	16,42	
FAMILIA XXX	6,71	4,7	
FAMILIA XXX	6,45	7,07	
FAMILIA XXX	21,5	11,78	
FAMILIA XXX	29,48	36,27	
FAMILIA XXX	0,36	1,94	
FAMILIA XXX	16,28	7,72	
FAMILIA XXX	52,8	18,67	
FAMILIA XXX	100	14,29	
FAMILIA XXX	8,23	3,46	

Fig. 3: Evolución faltantes en OC1, OC2 y OC3

ciones del Parque y Centro de Mantenimiento Vehículos Ruedas nº1(PCMVR1). Los resultados obtenidos fueron bastantes positivos; aun así, el modelo sufrió modificaciones para ajustarlo a las particularidades de mantenimiento de ET. Una vez que la bondad del modelo quedó suficientemente probada, se decidió iniciar su aplicación al resto de Órganos de Compra dependientes de la DINFULOG.

Los resultados obtenidos tras más de un año de implantación y uso se pueden considerar como positivos. Los efectos del método RBS se deberían traducir en una reducción de los faltantes de inventario, ya que, como se explicó anteriormente, ésta es la esencia del método, *ya que maximizar la disponibilidad operativa era equivalente a reducir el número de faltantes*. Se entiende por *faltante* como *las necesidades de repuestos no satisfechas que han causado esperas en taller a distintas acciones de mantenimiento con la correspondiente pérdida de disponibilidad operativa*. Sin embargo, aunque se observase una reducción de dicha variable en el año en el que el RBS ha estado operativo (2014), no se tendría la certeza absoluta de que esta reducción no se ha debido a otras causas. Cambios de planificadores, exceso de *stock* de otros años, faltantes acumulados, cambios en el crédito asignado, etc., podrían tener un efecto muy determinante en el número de faltantes. Por ello, para que los resultados puedan presentarse como concluyentes se debe esperar un cierto tiempo que permita observar la supuesta tendencia positiva. No obstante, aun no siendo un estudio definitivo, seguidamente se va a exponer la evolución temporal de faltantes de cara a comprobar si en 2014, se ha producido una reducción de los mismos. El ámbito del estudio se circunscribirá, a nivel de subfamilia de material y a tres Órganos de Compra que emplearon en su gestión el método RBS durante todo el año 2014. En dichos Órganos de Compra-OC, el crédito destinado a la compra de repuestos en cada uno de ellos fue similar al disponible en años anteriores. Así, en la próxima figura, se compara el porcentaje de faltantes en Territorio Nacional observado en los años 2013 y 2014, marcándose en color rojo aquél con un valor menor. El *porcentaje de faltantes* se ha calculado, acumulando por Órgano, año y subfamilia, los faltantes medidos frente al total de líneas pedidas. Es decir *del total de repuestos suministrados desde el almacén central a los distintos talleres, cuántos (%) no se han podido enviar en ese momento por déficit de stock*.

A continuación, y como segundo estudio, es interesante analizar la relación entre la inversión en repuestos y la disponibilidad operativa conseguida. Para ello, de los tres Órganos de Compra anteriores uno de ellos, a finales de 2014, decidió presupuestar para el año 2015 la inversión en repuestos de sus familias utilizando las *curvas DO-€* proporcionadas por el RBS. De esta forma, en sus tres familias principales, analizó la "zona inicial" de cada una de sus subfamilias, y solicitó el crédito correspondiente. La reducción del crédito por familia se puede observar en la siguiente figura, siendo como se puede apreciar, bastante considerable. Los efectos sobre la disponibilidad operativa de la flota de cada subfamilia del 2015 frente a 2014 también se presentan en dicha figura (se entiende por disponibilidad operativa - *Ao el porcentaje de días operativos de toda la flota en el año a estudio frente al total de días disponibles*). Se ha marcado en color azul, el periodo con mayor disponibilidad operativa.

A la vista de la evolución de faltantes expuesta en el primer análisis, se puede extraer la conclusión de que existe una clara tendencia a la baja en los faltantes registrados en 2014. De las 32 subfamilias analizadas, sólo en seis aumenta el número de faltantes. De ellas en cuatro, existe una explicación técnica: se ha aumentado fuertemente su uso en 2014 frente a 2013. Tomando este hecho en consideración y eliminando estas cuatro subfamilias del estudio anterior, se obtiene que de las 28 subfamilias posibles, en 26 se ha reducido el número de faltantes.

Familia	Inversión 2014	Inversión 2015	Inc(%)	
FAM 1	464.357,10 €	165.000,00 €	-64,47%	
Familia	**Subfamilia**	**Ao (2014)**	**Ao (2015)**	**Evolución 14/15**
FAM 1	SUBFAM 1A	100%	100%	
	SUBFAM 1B	99%	99%	
	SUBFAM 1C	98%	97%	
	SUBFAM 1D	93%	94%	
	SUBFAM 1E	99%	100%	

Familia	Inversión 2014	Inversión 2015	Inc(%)	
FAM 2	1.114.350,00 €	648.907,36 €	-41,77%	
Familia	**Subfamilia**	**Ao (2014)**	**Ao (2015)**	**Evolución 14/15**
FAM 2	SUBFAM 2A	68%	69%	
	SUBFAM 2B	87%	88%	
	SUBFAM 2C	83%	85%	
	SUBFAM 2D	98%	98%	

Familia	Inversión 2014	Inversión 2015	Inc(%)	
FAM 3	869.366,65 €	511.471,00 €	-41,17%	
Familia	**Subfamilia**	**Ao (2014)**	**Ao (2015)**	**Evolución 14/15**
FAM 3	SUBFAM 3A	97%	95%	
	SUBFAM 3C	52%	58%	
	SUBFAM 3D	71%	74%	

Fig. 4: Evolución disponibilidad operativa y crédito

Por otra parte, el segundo análisis, nos muestra que incluso con una reducción de la inversión en repuestos muy significativa (oscila entre el 41% y 64%), la disponibilidad operativa conseguida en 2015 se mantiene o incluso aumenta frente a 2014. Así de las 12 subfamilias afectadas, en 10 se mantiene o aumenta la disponibilidad operativa, y en las 2 subfamilias en las que decrece, lo hace con cantidades no significativas.

Ambos estudios, presentan cifras bastante positivas que respaldan las dos grandes aportaciones del método RBS: la ganancia de disponibilidad operativa (o equivalentemente la reducción de faltantes) y la posibilidad de planificar con mayor precisión la inversión requerida.

6. CONCLUSIONES

Este artículo presenta una adaptación del modelo RBS aplicada a la planificación de compras y distribución de repuestos en un entorno de mantenimiento de flotas, así como los primeros resultados obtenidos tras su implantación, lo que hace él, según lo expuesto en el epígrafe 2, una referencia bibliográfica de interés.

Conceptualmente, al desplazar la *orientación de abastecimiento* propia de métodos basados en la previsión de demanda usados hasta ahora por ET, a otra *propia* de *mantenimiento*, el repuesto queda relegado a un segundo plano cobrando el *sistema o la familia* un papel principal en el cálculo. Además, éste ya no se regula por parámetros tales como el *nivel de servicio* o la *zona geográfica*; ahora en cambio, la *disponibilidad operativa objetivo* de la familia y el *crédito* disponible son sus controles principales.

Todas estas circunstancias crean el escenario idóneo de planificación en el que la presupuestación del gasto en repuestos y la distribución del crédito entre las distintas familias se llevan a cabo de forma más eficiente, al ser consciente, de esta manera, de los efectos que dichas decisiones tendrán en la disponibilidad operativa de cada familia. Así en épocas de restricciones presupuestarias, con importantes recortes en el crédito asignado que impiden alcanzar la disponibilidad operativa deseada en todos los sistemas, esta herramienta es fundamental para priorizar las distintas familias de sistemas según las necesidades operativas y estratégicas de ET.

También los primeros resultados obtenidos (epígrafe 5) respaldan las previsiones teóricas del modelo, ya que a igualdad de crédito aumenta la disponibilidad de la flota y también ésta se mantiene similar reduciendo significativamente el crédito.

A modo de conclusión general, aunque como se dijo anteriormente, no existe la certeza absoluta de que el método RBS haya sido el único agente causante de esta mejora, no parece erróneo concluir que su papel haya sido determinante. Resultados en definitiva, bastante positivos que asientan el uso del método RBS en la planificación de repuestos de ET y que tomándolo como punto de partida, alientan y promueven futuros proyectos de mejora que permitan su evolución y consolidación en el sostenimiento de ET. En este sentido y como próximas líneas de mejora del proyecto, se pretende incluir la *criticidad* del repuesto en el modelo y el *uso esperado del material* como tercer eje de planeamiento.

BIBLIOGRAFÍA

[1] SHERBROOKE, Craig C. Optimal inventory modeling of systems: multi-echelon techniques".Vol.72. Springer Science & Business Media,2006.
[2] SHERBROOKE, Craig C. "METRIC: A multi-echelon technique for recoverable item control." Operations Research 16.1 p:122-141.1968.
[3] MUCKSTADT, John A. "A model for a multi-item, multi-echelon, multi-indenture inventory system". Management science 20.4-part-i p:472-481.1973.
[4] SHERBROOKE, Craig C. "VARI-METRIC: improved approximations for multi-indenture, multi-echelon availability models." Operations Research 34.2 p.311-319.1986.
[5] GUPTA, Amit; ALBRIGHT, S.Christian. Steady-state approximations for a multi-echelon multi-indentured repairable-item inventory system.European Journal of Operational Research,1992,vol.62, nº3,p.340-353.
[6] CHENYU, Liu, et al. Inventory decision model of single-echelon and two-indenture repairable spares. Proceedings of 2nd international conference on computer application and system modeling. 2012.
[7] DIAZ, A.; FU, M. Multi-echelon inventory systems for repairable items with limited repair facilities.European Journal of Operations Research,1997,vol.97,nº3,p.480-492.
[8] SONG, Yang; YANG, Jian-hua. Simulation of dynamics behaviors for shipping equipment support with system dynamics analysis approach. Journal of Industrial Engineering and Management,2015,vol.8,nº.3,p.636.
[9] NOWICKI, David R.; RANDALL, Wesley S.; RAMIREZ-MARQUEZ, Jose Emmanuel. Improving the computational efficiency of metric-based spares algorithms. European Journal of Operational Research, 2012, vol.219, nº2, p.324-334.
[10] BASTEN, Rob JI; ARTS, Joachim J. Fleet readiness: stocking spare parts and high-tech assets.2014.
[11] BASTEN, Rob JI, et al. An approximate approach for the joint problem of level of repair analysis and spare parts stocking. Annals of operations research, 2015, vol.224, nº1,p.121-145.
[12] VAN JAARSVELD, Willem; DOLLEVOET, Twan. Spare parts inventory control for an aircraft component repair shop. 2011.
[13] SMITH, J., W. Fisher, and J. Heller. "Measurements of Military Essentiality." Logistics Management Institute, Washington, DC.1972.
[14] Cálculo de las adquisiciones de repuestos. El método RBS. Circular Técnica CT 02/13. Dirección de Mantenimiento–Mando de Apoyo Logístico. Ejército de Tierra.2013.
[15] WILLIAMS, T. M. "Stock control with sporadic and slow-moving demand." Journal of the Operational Research Society: p.939-948.1984
[16] TERSINE, Richard J.; TERSINE, R. J. Materials management and inventory systems. North-Holland,1976.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8083-1.pdf