



Simulador de Gestión de Repuestos Reparables en sistemas multi-escalón

Multiechelon Repairable Spare Parts Inventory Simulator

Orlando Durán, Rodrigo Ugarte

Escuela de Ingeniería Mecánica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile
E-mail: orlando.duran@ucv.cl, rodrigo.ugarte.f@mail.pucv.cl

Recibido: 16 de abril de 2014
Aprobado: 24 de abril de 2017

RESUMEN

El presente trabajo reporta el desarrollo una herramienta de simulación para el análisis y optimización de una cadena logística de repuestos reparables. El modelo relaciona los niveles de stock de un conjunto de repuestos reparables en un sistema multiescalón con la disponibilidad a nivel de sistema. Se estudian diversos casos de estudio con el objetivo de demostrar su viabilidad y aplicación a casos reales.

Palabras clave: Simulación, Repuestos, Disponibilidad, MTBF.

ABSTRACT

The present work reports the development of a simulation tool intended to the simulation and analysis of a repairable spare parts logistic chain. The model correlates the stock levels of a set of repairable spare parts with de system availability. Several study cases are presented as a form of validating the feasibility of the proposed tool.

Key words: Simulation, Spare parts, Availability, MTBF.

I. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de los activos es uno de los factores más importantes en toda empresa industrial, principalmente en aquellas empresas donde se utilizan equipos de altísimo valor y de gran complejidad. La disponibilidad depende en gran medida del esfuerzo por tener estos equipos en funcionamiento la mayor parte del tiempo. Esto puede depender de poseer los medios y recursos adecuados para restablecer el funcionamiento de los equipos lo más rápido posible. Entre esos medios se destaca la existencia de repuestos [1; 2]. Sin embargo la acumulación excesiva de repuestos, como forma de garantizar ciertos niveles de disponibilidad, puede redundar en un aumento en los costos. Por otro lado, la existencia de un presupuesto restringido lleva a un escenario complejo de decisión donde se pretende la maximización de los efectos positivos minimizando la cantidad de estos ítems en los depósitos. Oh y Na estudiaron el efecto en las decisiones relacionadas con el suministro de repuestos reparables bajo restricciones presupuestarias [3]. Existe por lo tanto, la necesidad de analizar y caracterizar el comportamiento de la disponibilidad (de un conjunto de equipos) en función de los niveles de stock que tengan los repuestos críticos (El proceso de toma de decisiones de tener o no cierto repuesto, junto con la definición de la localización del mismo en una cadena de abastecimiento de varios escalones, puede resultar en un proceso complejo y lento. La simulación computacional resulta ser una herramienta eficiente como apoyo a este proceso de decisión. La simulación permite estimar el comportamiento de sistemas estocásticos complejos, cuando su estudio por la

vía analítica resulta insuficiente [4]. Como Díaz declara, la simulación de eventos discretos es una herramienta comúnmente usada para verificar y evaluar diferentes escenarios probables en la vida real y puede ser utilizada para conocer el comportamiento de este tipo de sistemas [5]. Otros autores que destacan la importancia y utilidad que muestran estos sistemas son Bier y Tjelle [6]. Nie y Sheng [7] destacan las ventajas del uso de simulación para comprender mejor la dinámica de estos sistemas. Se puede considerar que el primer trabajo que hizo uso de la simulación en sistemas multiescalonados de repuestos reparables es [8]. Esos trabajos solo calculan la disponibilidad a nivel de sistema, sin considerar otras variables de decisión tales como los costos, los niveles de servicios etc. Este trabajo reporta la creación e implementación de un modelo de simulación para apoyar la toma de decisiones en un sistema multiescalonado de gestión de repuestos reparables. A través de este simulador se puede verificar el impacto que tienen las decisiones referentes a los niveles y localizaciones de un conjunto de repuestos reparables en la disponibilidad a nivel de sistema global. Además, a través del uso de este simulador se puede evaluar el efecto que tienen las decisiones del usuario en los niveles de servicio (fill rate) y la relación que hay entre niveles de inversión (en stock de repuestos) y las disponibilidades a nivel de sistema y en cada una de las locaciones de un sistema multiescalonado.

Sistemas multiescalón para repuestos reparables

Repuestos reparables suelen ser elementos, sistemas o subsistemas, de gran valor monetario y que de manera general poseen una baja rotación. Estos repuestos se consideran reparables cuando, es física y económicamente recomendable, hacerlo pasar por un proceso de reparación a través del cual se le puede devolver a su condición de nuevo o de utilizable. Sherbrooke estudió profundamente los sistemas de abastecimiento y administración de repuestos reparables [9]. A través de estos repuestos se busca la utilización intensiva de activos para mejorar la productividad y la disponibilidad. Es precisamente por esto, que se busca una buena gestión de ellos. La gestión de repuestos reparables es diferente a la gestión de repuestos o inventarios consumibles. Estos últimos utilizan el modelo EOQ (Economic Order Quantity) que supone que los ítems poseen demanda determinística (conocida y constante), además incorpora el costo de mantener un inventario y el costo de ordenar un pedido. La gestión de los repuestos reparables posee características particulares como lo destacan Cavalieri et al. [10]. Los repuestos reparables no son objeto de gestión automática y su control se reduce a estimar las necesidades iniciales y a definir su ubicación física dentro del sistema o cadena uso-reparación-almacenamiento. Cuando ocurre una falla, se remueve la pieza defectuosa, se cambia por una pieza tomada del inventario de la base y la pieza removida se envía a una instalación de reparación y almacenamiento. En el taller se repara y luego se deriva al inventario para ser finalmente, enviada de regreso a una de las bases para sustituir otra pieza usada en una reparación. De esta manera, las piezas están sujetas a ciclos cerrados. Al ser este un sistema o cadena multiescalonado, el problema gana en complejidad [11].

En el modelo multiescalón, el primer escalón está constituido por las bases, que es donde se realizan las reparaciones menores. El segundo escalón es típicamente un taller central, el cual realiza reparaciones más complejas o especializadas (Figura 1). Se debe considerar que en un modelo multiescalón, conviven multiplicidad de ítems, lo que hace aumentar significativamente la complejidad del sistema. Esta complejidad ha llevado a la utilización de diversas estrategias de resolución, entre las que se puede citar la técnica METRIC [9] y el uso de Metaheurísticas [12; 13]

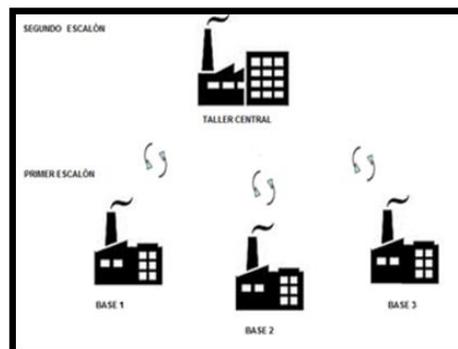


Fig. 1. Sistema de dos escalones

Los fundamentos del modelo tienen las siguientes características:

- La decisión sobre el lugar de reparación de un elemento no depende de los niveles de stock o de la carga de trabajo. Si una base o taller local puede reparar un elemento, se debe a que posee el personal y equipo adecuado.
- No hay traspasos laterales entre las bases.
- Las fallas son independientes y no se aplica la canibalización.

La canibalización es el consumo de elementos de un equipo por otro que esté en reparación.

El fallo de cada ítem es independiente del resto y del número de unidades que fallan. Cuando un repuesto falla entra inmediatamente en ciclo de reparación, con una probabilidad p que se repare en la base, y una probabilidad de $1-p$ de no ser reparado y destinado al taller central. Una adecuada gestión de repuestos reparables constituye un factor clave en la mejoría permanente de la disponibilidad en cualquier empresa, ya que la escasez de materiales para mantenimiento traería como consecuencia inmediata efectos indeseables como:

- Indisponibilidad de los sistemas de producción
- Pérdida de ventas e imagen
- Incremento de los costos de la gestión de materiales
- Incremento de los costos de producción

Por otra parte, un exceso de inventarios evitaría la indisponibilidad de los sistemas de producción y la pérdida de ventas e imagen, pero también incrementaría los costos de la gestión de materiales, disminuyendo también la rentabilidad de la empresa.

Por lo tanto, con un adecuado modelo de planificación y control de inventarios, se espera alcanzar los siguientes objetivos:

- Mejorar el nivel de servicio del almacén de materiales para mantenimiento
- Aumentar la eficacia de los sistemas de mantenimiento industrial
- Incrementar la disponibilidad de los sistemas de producción
- Reducir los costos de gestión de materiales
- Aumentar la rentabilidad de los sistemas de producción.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La disponibilidad de un equipo o sistema es una medida que indica cuánto tiempo está operativo ese equipo o sistema respecto de la duración total durante la que se hubiese deseado que funcionara.

La disponibilidad del sistema (A) se calcula mediante la ecuación 1:

$$A = \frac{\sum_{j=1}^n A_j N_j}{\sum_{j=1}^n N_j} \quad (1)$$

Dónde:

A_j : es la disponibilidad de la base j .

N_j : es la cantidad de equipos que posee cada base j .

La disponibilidad de cada base se calcula de acuerdo a la ecuación 2 [5]:

$$A_j = 100 \prod_{i=1}^l \left(1 - \frac{EBO[s_{ij} | m_{ij}T_{ij}]}{N_j Z_i} \right)^{Z_i} \quad (2)$$

Con ($i = 1, 2, \dots, l$; $j = 1, 2, \dots, n$)

Z_i : es la cantidad de veces que hay un elemento reparable en un equipo.

$EBO [S_{ij} | m_{ij}T_{ij}]$: representa los niveles esperados (esperanza matemática) de los pedidos en espera en el período, dado un cierto nivel de stock s_{ij} y una demanda media en el período $m_{ij}T_{ij}$.

m_{ij} : es la demanda media anual del elemento reparable i en la base j .

T_{ij} : es el tiempo medio de reparación del elemento reparable i en la base j .

Los niveles de stock están restringidos a un presupuesto dado B , como se refleja en la ecuación 3:

$$\sum_{i=1}^l \sum_{j=0}^n c_i s_{ij} \leq B \quad (3)$$

Donde c_i denota el precio unitario del componente o repuesto i . La ecuación 1 corresponde a la función que se desea maximizar, o sea, lograr la mayor disponibilidad a nivel de sistema a partir de las decisiones de inversión y localización de la existencia de repuestos en el sistema multiescalonado. Como fué comentado anteriormente, esta maximización se ve restringida por el nivel máximo de presupuesto para respuestos (B). Las variables de decisión corresponden a los niveles de repuestos i en la base j (valores enteros). Lo fundamental a tener en consideración es que cualquier variación en los niveles de stock de los repuestos reparables tanto en las bases como en el taller central, afectará la disponibilidad global del sistema, debido a que los niveles de stock influyen en la variación del EBO y éste afecta la disponibilidad en cada base.

Modelo de simulación

El modelo de simulación se basa en tres bases y un Taller Central. Cada base posee las siguientes características:

- Niveles de Stock de cada uno de los repuestos reparables existentes en el sistema.
- Cada base posee una probabilidad de reparar los elementos defectuosos, los que al ser reparados ingresan al stock de ella como elementos nuevos,
- Los repuestos que no se han podido reparar en la base, son enviados al taller central, donde se reparan y son devueltos a la base respectiva como nuevos.

El Taller Central, posee también un stock determinado de elementos específicos, los cuales abastecen a alguna base que haya quedado sin stock, para que de esta forma, los tiempos medios de reparación (MTTR- Mean Time to Repair) sean menores y la disponibilidad no decaiga como consecuencia. Con el objetivo de aumentar la disponibilidad en el sistema, es que cada empresa busca reducir la mayor cantidad de tiempos muertos en lo que respecta a la espera del elemento a reparar, y para esto, el modelo de simulación, permite integrar las variables necesarias que forman parte de las bases y el taller central, como por ejemplo, técnicos, tiempos en reparación, llegada de elementos defectuosos, etc.

El programa de simulación cuenta con una serie de módulos específicos que permiten la evaluación de escenarios. En la figura 2 se aprecian los módulos que forman parte del modelo de simulación. Este modelo fue desarrollado bajo la plataforma ARENA [14], [15].

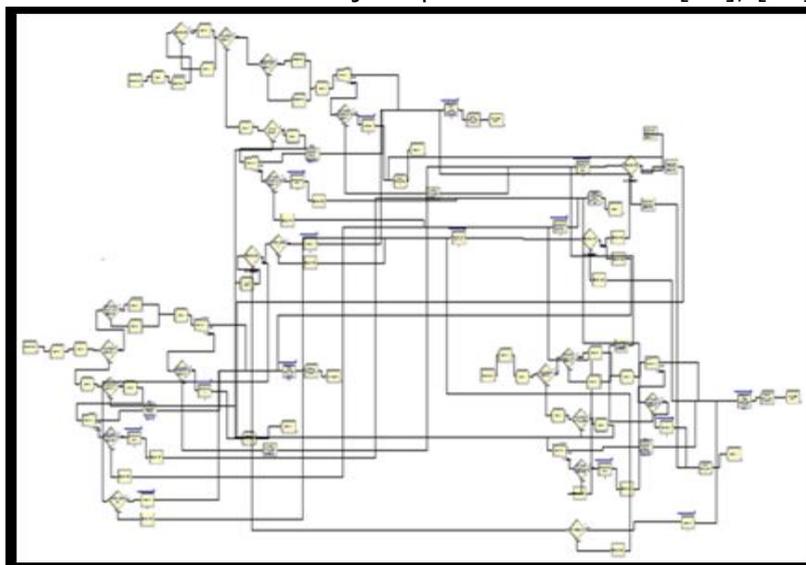


Fig. 2. Aspecto general del modelo de simulación

Estudio de casos

I. En este apartado se presentan 4 estudios de casos que forman parte de diferentes escenarios que pueden ser analizados en el simulador desarrollado. Se debe dejar claro que existe una gran gama de posibilidades para que el usuario pueda evaluar diferentes estrategias y así determinar estrategias que apunten a mejorar la disponibilidad del sistema.

Las diferentes estrategias se logran modificando las siguientes variables en el simulador:

- Niveles de elementos reparables en los inventarios de las bases como en el taller central.
- Diferentes presupuestos para la adquisición de elementos reparables.

SIMULADOR DE GESTIÓN DE REPUESTOS REPARABLES EN SISTEMAS MULTI-ESCALÓN

- Diferentes tiempos de reparaciones en las bases como en el taller central.
- Diferentes tiempos entre requerimientos de repuestos (tasa de fallas).

Caso de estudio I

El primer caso que se muestra permite estudiar la variación de la disponibilidad del sistema en función de los niveles de stock de las bases y del taller central (sin considerar restricción de presupuesto). Aquí puede notarse que, si aumentan los niveles de stock en cada base y taller central, disminuyen los EBOs correspondientes y aumenta la disponibilidad del sistema. En la tabla 1 se aprecian los niveles de stock definidos como alternativas para diferentes escenarios. Los valores obtenidos por la simulación para la disponibilidad del sistema se pueden apreciar en la figura 3. Para fines de gráfica, se optó por reportar la disponibilidad del sistema en función del valor medio de stocks en las bases y taller central. Aquí se aprecia claramente que a mayor cantidad de repuestos, la disponibilidad tiende a aumentar hasta valores cercanos al 100 %.

Tabla 1. Datos Caso I

Stock repuesto 1	Stock repuesto 2	Disponibilidad
Bases y T. Central	Bases y T. Central	Sistema (%)
0	0	6,454
2	2	25,346
4	4	79,302
6	6	97,229
8	8	99,99

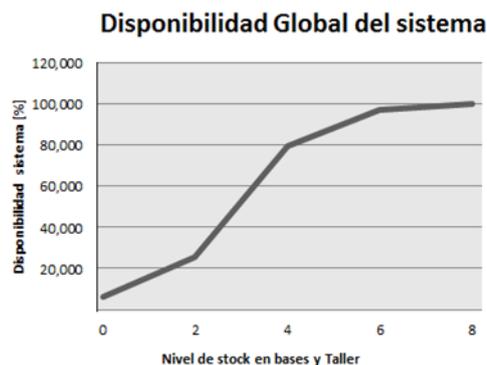


Fig. 3. Disponibilidad del Sistema vs. Niveles de stock

Se puede concluir aquí que al aumentar los niveles de stock en las bases y en el taller central esto conlleva a un aumento en los costos del sistema. La tabla 2, muestra los valores por cada base y taller central a medida que aumenta la adquisición de elementos reparables. Los valores para el repuesto 1 y 2 son \$ 1.000.000 y \$1.500.000 respectivamente. Ver figura 4 y 5

Tabla 2. Datos Caso I. Costos totales del sistema en función de los repuestos 1 y 2

Stock Repuestos 1 y 2	Costos Totales	Disponibilidad
Bases y T. Central	Bases y T. Central (\$)	Sistema (%)
0	0	6,45
2	20.000.000	25,35
4	40.000.000	79,3
6	60.000.000	97,23
8	80.000.000	99,99

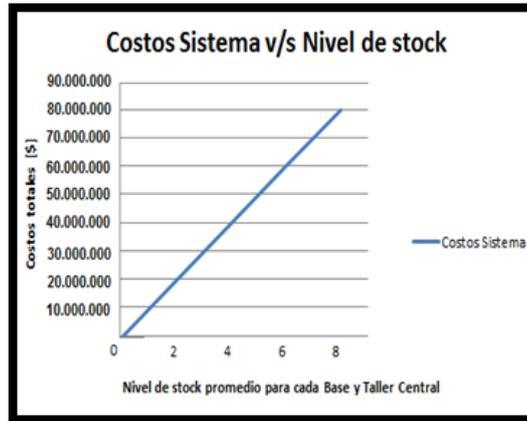


Fig. 4. Costos del sistema en función de los repuestos en promedio para cada Base y Taller Central

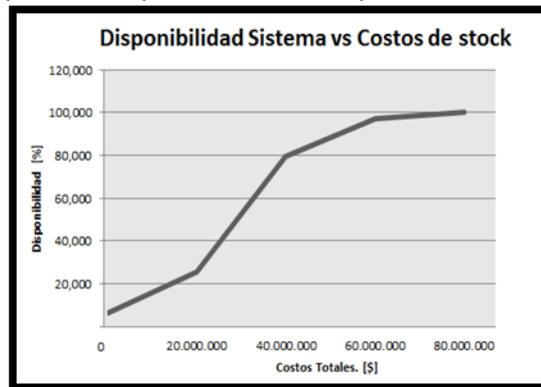


Fig. 5. Disponibilidad del sistema en función de los costos

Caso de estudio II

El segundo caso de estudio, permite mediante la simulación, evaluar diferentes opciones de niveles de inventarios en las bases y en el taller central, ante un presupuesto considerado como restrictivo (\$37.500.000), manteniendo los valores de \$1.000.000 y \$1.500.000 para el repuesto 1 y 2 respectivamente. Con esto se puede demostrar como con un mismo presupuesto se puede tener diferentes valores de disponibilidad del sistema. Se muestran tres alternativas de decisión (llamadas opciones A, B y C) en los que se definieron diferentes niveles de stock para cada base y para el taller central, sujetos al mismo presupuesto, con efectos diferentes en la disponibilidad del sistema. Ver tabla 3. Se ve claramente el impacto que tienen diferentes decisiones de carácter logístico, léase los niveles de stock en cada una de las localizaciones sobre el impacto de la disponibilidad del sistema global. Ver Figura 6.

Tabla 3. Datos caso II. Distribución de repuestos reparables para las diferentes opciones

	Opción A		Opción B		Opción C	
	Rpto.1	Rpto.2	Rpto.1	Rpto.2	Rpto.1	Rpto.2
Base 1	2	3	3	4	4	4
Base 2	3	3	3	3	4	4
Base 3	5	4	4	4	4	4
T. Central	5	5	5	4	3	3

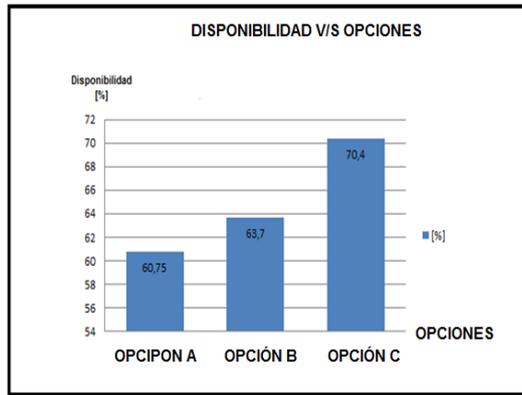


Fig. 6. Disponibilidad del sistema en función de las opciones

Caso de estudio III

El tercer caso de estudio permite mediante la simulación evaluar opciones para los niveles de inventario de las bases y taller central apuntando a obtener una disponibilidad del sistema del 90 %. Con esto se pretende encontrar la mejor opción en relación a los costos de inversión que proporcionen este nivel de disponibilidad del sistema. En la tabla 4 se plantean tres escenarios (opciones A, B y C) con diferentes configuraciones para los niveles de stock. En la tabla 5 se muestran los costos asociados a cada uno de los escenarios y las disponibilidades del sistema obtenidos para cada uno de ellos.

Tabla 4. Datos caso III. Distribución de la cantidad de repuestos reparables para las diferentes opciones en sus respectivos lugares

	Opción A		Opción B		Opción C	
	Rpto.1	Rpto.2	Rpto.1	Rpto.2	Rpto.1	Rpto.2
Base 1	4	6	6	6	5	5
Base 2	5	5	5	5	5	5
Base 3	6	4	6	4	5	4
T. Central	6	6	6	6	5	6

Tabla 5. Datos caso III. Costos y Disponibilidades para las diferentes opciones

Opción	Costo (\$)	Disponibilidad (%)
A	52.500.000	94,1
B	54.500.000	93,6
C	50.000.000	89,9

En la figura 7 se muestran tres opciones de decisión y sus efectos en los costos y disponibilidad del sistema. Los casos que cumplen el requerimiento de tener una disponibilidad del 90 % son el A y el B, sin embargo, el caso A presenta una mejor disponibilidad a un presupuesto mucho menor que en el caso B. Por otro lado, se aprecia que el caso C, cuya disponibilidad está por debajo del requerimiento, su presupuesto de \$ 50.000.000 hace atractiva esta opción si lo que se busca es cumplir o acercarse con el requerimiento y obtener un ahorro importante en términos de inversión en repuestos.

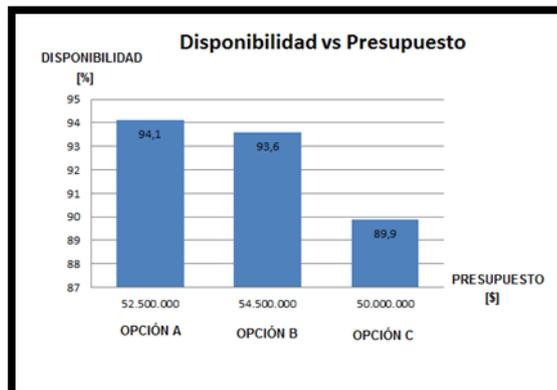


Fig. 7. Disponibilidad sistema y presupuesto para las tres opciones presentadas

Caso de estudio IV

Es posible simular el comportamiento de la disponibilidad del sistema de acuerdo a la variación de los tiempos de reparación tanto en las bases como en el taller central. Además se puede verificar como cambian los niveles de servicio en función de este fenómeno. En este ejemplo, los tiempos de reparación tanto en las bases como en el taller central tienen una distribución triangular con los siguientes valores: 200 (mínimo) - 400 (media) - 420 (máxima) [Hr].

Los tiempos estudiados son los siguientes:

- [190; 350; 400] [Hr]
- [190; 300; 350] [Hr]
- [190; 250; 300] [Hr]

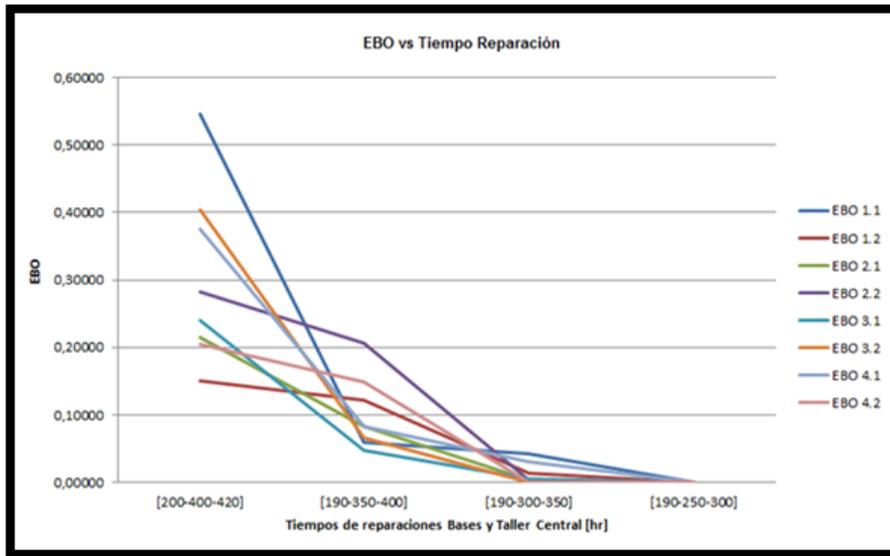


Fig. 8. Variación valores de EBO para cada elemento en su lugar respectivo

Como es de esperarse, al disminuir los tiempos de reparación en el sistema, se aprecia la disminución de los valores de EBO para cada elemento en su lugar respectivo, como se muestra en la figura 8. La disponibilidad a nivel del sistema también se ve afectada por la disminución de los valores de EBOs, pero al contrario de éste, ella aumenta a medida que se reducen los tiempos de las reparaciones. Este comportamiento se puede apreciar en la tabla 6 y en la figura 9.

Tabla 6. Datos caso IV

Tiempos de Reparación (Hr)	Disponibilidad (%)
(200,400,420)	94,20
(190,350,400)	97,98
(190,300,350)	99,70
(190,250,300)	99,99

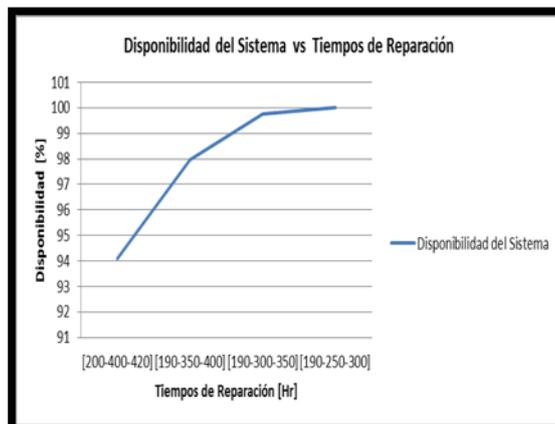


Fig. 9. Disponibilidad del sistema en función de los tiempos de reparación de las bases y taller central

Nivel de servicio

El nivel de servicio es la cantidad de veces que un elemento está disponible cuando es requerido en su lugar respectivo. El modelo de simulación entrega los valores de las variables que permiten calcularlo.

Las variables que entrega el simulador para obtener el nivel de servicio son:

- Cantidad de veces que es solicitado un elemento en su base respectiva.
- Cantidad de veces que el elemento requerido estaba disponible en la base.

Los niveles de servicio en función de los tiempos de reparación para cada base respectiva se muestran a continuación en la tabla 7.

Tabla 7. Niveles de servicio en función de los tiempos de reparaciones

Tiempos de Reparación	Base1	Base 1	Base 2	Base 2	Base 3	Base 3
	Rpto.1	Rpto.2	Rpto.1	Rpto.2	Rpto.1	Rpto.2
(Hr)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
(200,400,420)	69,14	53,93	86,63	87,70	82,88	74,86
(190,350,400)	90,54	54,05	96,25	91,97	95,49	81,08
(190,300,350)	97,59	75,75	99,98	94,68	97,67	99,98
(190,350,400)	98,68	84,05	99,99	95,18	98,24	99,99

A medida que los tiempos de reparaciones disminuyen, el nivel de servicio para cada elemento reparable aumenta, debido a que los elementos reparados ingresan al inventario de cada base como nuevos. Esto muestra la importancia de la alternativa de hacer al sistema de mantenimiento más responsivo y ágil, como una alternativa de inversión a la de aumentar los niveles de stock.

III. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Al observar los resultados de los estudios de caso y de la aplicación del modelo de simulación para la dinámica en un sistema de gestión de stocks de repuestos reparables en sistemas multiescalonados, se puede notar que estos son consistentes. Este modelo ilustra ésta dinámica, y a través de este se pueden analizar los efectos que acarrear factores importantes tales como, nivel de inventario, tiempo y distribución de la demanda, tiempos de reparaciones, etc., con el fin de estudiar los cambios y efectos en la disponibilidad del sistema. En el caso I, se observa como a medida que aumenta la inversión en repuestos, distribuidos en diferentes localizaciones a lo largo del sistema, la disponibilidad a nivel de sistema se ve beneficiada. A partir de esa simulación se puede concluir que este aumento no es lineal y que la mejoría de la disponibilidad es marginal a partir de cierto nivel de gasto adicional en repuestos. Por ejemplo, al observar la tabla 2, se ve claramente que, al aumentar el nivel de inversión de repuestos, de 60 millones a 80 millones, los costos totales aumentarán en 25 %, siendo que la Disponibilidad a nivel de sistema sólo se verá mejorada en 2,5 %. Remitiéndose al caso II, se puede observar que para un mismo nivel de inversión en repuestos, se pueden alcanzar diferentes niveles de Disponibilidad a nivel de sistema. Eso indica que es de vital importancia la decisión de la localización de las diferentes cantidades de repuestos en cada una de las bases y en el taller central. El caso III pone en evidencia la utilidad del simulador como apoyo a la búsqueda de la mejor distribución de las unidades de repuestos a lo largo del sistema o cadena logística para una dada Disponibilidad meta. Por último, el caso IV permite representar la sensibilidad que tiene la disponibilidad del sistema en relación a la variación de los tiempos de reparación. Al disminuir los tiempos de reparaciones tanto en las bases como en el taller central, se logra que el sistema se reabastezca con los elementos, de esta manera, la disponibilidad del sistema aumenta, ósea, siempre habrá elementos requeridos disponibles. Lo mismo ocurre con los niveles de servicio en cada uno de los depósitos, viéndose beneficiados de la reducción de los tiempos de reparación, esto es el resultado de la mantenibilidad en los componentes reparables. El modelo se constituye como una gran herramienta para encontrar el equilibrio entre el costo de los repuestos reparables y la disponibilidad del sistema.

IV. CONCLUSIONES

1. La correcta gestión de los inventarios de repuestos reparables es de vital importancia debido a su alto costo y su relación directa con la disponibilidad de los equipos y a nivel de sistema. Es por esto que la incorporación de elementos sistemáticos para el desarrollo de estrategias y la verificación de sus efectos es de gran importancia.
2. La correcta gestión de repuestos reparables es de suma importancia para la rentabilidad de una empresa debido a los costos elevados que presenta cada repuesto reparable.
3. El desarrollo y uso de modelos de simulación pueden considerarse una poderosa herramienta de apoyo al proceso de toma de decisiones ayudando al usuario a evaluar consecuencias a largo plazo de sus propias decisiones.

V. REFERENCIAS

1. Xie W, Liao HT, Jin TD. Maximizing system availability through joint decision on component redundancy and spares inventory. *European Journal of Operational Research*. 2014;237(1):164-76. DOI 10.1016/j.ejor.2014.02.031.2014.
2. Kilpi J, Toyli J, Vepsalainen A. Cooperative strategies for the availability service of repairable aircraft components. *International Journal of Production Economics*. 2009;117(2):360.
3. Oh G, Na YK. Periodical provisioning quantity determination of repairable parts under the budget constraint. *Journal of the Korean Institute of Plant Engineering*. 2011;16(3):145-54.
4. Rodríguez Ruíz Y, Pérez Mergarejo E. Ergonomía y simulación aplicadas a la industria. *Ingeniería Industrial*. 2011;XXXII(1):2-11. ISSN 1815-5936.
5. A D, Fu M. Multi-Echelon Models for Repairable Items: A Review. Working Paper, University of Maryland; 1995.
6. Bier IJ, Tjelle JP. The Importance of Interoperability in a Simulation Prototype for Spares Inventory Planning. En: *Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference*. p. 913-9.
7. Nie T, Sheng W. Simulation of a Closed Loop Multi-echelon Repairable Inventory System. En: *16th International Conference on Management Science & Engineering*. Moscow, Russia.
8. Clarka. The use of simulation to evaluate a multi-echelon, dynamic inventory model. *Naval Research Logistics*. 1960;7:429-45.
9. Sherbrooke C. Metric: A multi-echelon technique for recoverable item control. *Operations Research*. 1968;12(122-141).
10. Cavalieris, Garettim, Macchi M, et al. A decision-making framework for managing maintenance spare parts. *Production Planning and Control*. 2008;19(4):379-96.
11. Regattieri A, Giazzi A, Gamberi M, et al. An innovative method to optimize the maintenance policies in an aircraft: General framework and case study. *Journal of Air Transport*. 2015;44:8-20.
12. Duran O, L P. Solution of the Spare Parts Joint Replenishment Problem with Quantity Discounts Using a Discrete Particle Swarm Optimization Technique. *Studies in Informatics and Control*. 2013;22(4):319-28.
13. Duran O, Perez L. Optimization of the multiechelon system for repairable spare parts using swarm intelligence combined with a local search strategy. *Lecture Notes in Computer Science*. 2014;85(5):747-61.
14. Keltonw, Sadowski RP, Sturrockd T. *Simulation with Arena*. 5ª ed: MacGraw Hill; 2009.
15. Fabregas Ariza A, Wadnipar Rojas R, Paternina Arboleda C, et al. *Simulación de sistemas productivos con Arena*: Ediciones Uninorte; 2003.