

Trabajo Fin de Máster

Organización Industrial y Gestión de Empresas

Diseño de un sistema de gestión de inventario de piezas de repuesto en un servicio postventa de ascensores

Autor: Luis Cabello Gómez

Tutor: Pedro Luis González Rodríguez

Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Máster
Organización Industrial y Gestión de Empresas

**Diseño de un sistema de gestión de inventario
de piezas de repuesto en un servicio postventa
de ascensores**

Autor:

Luis Cabello Gómez

Tutor:

Pedro Luis González Rodríguez

Profesor titular

Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Trabajo Fin de Máster: Diseño de un sistema de gestión de inventario de piezas de repuesto en un servicio postventa de ascensores

Autor: Luis Cabello Gómez

Tutor: Pedro Luis González Rodríguez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

A mi familia y amigos

A mis maestros

Agradecimientos

En primer lugar, quiero dar las gracias a mi familia. Especialmente a mis padres, por la formación y educación que con mucho esfuerzo lograron darme en Alemania, que sin su apoyo y confianza esto no habría sido posible.

A mis hermanas que, por supuesto son las mejores del mundo. Que con sus bromas y demás siempre consigue sacarme una sonrisa cuando más falta me hace.

A Rocío, por su apoyo incondicional que me da en los momentos que más lo necesitaba.

Por último, quería agradecer a mi tutor Pedro Luis, por haber escuchado y aceptado mi propuesta de trabajo Fin de Máster y por guiarme mediante aportaciones y consejos.

Luis Cabello Gómez

Sevilla, 2017

Resumen

Las empresas dedicadas a la fabricación ascensores, tienen que satisfacer al cliente con un servicio de postventa rápido y eficaz. El tema de las piezas de repuesto está ganando cada vez más protagonismo en el ámbito del ascensor.

Un almacén de piezas de repuesto mal gestionado puede tener roturas de stock de piezas críticas que, por tanto, pueden dejar un equipo fuera de servicio durante un gran plazo tiempo, ya que se tienen que fabricar las piezas o esperar hasta que el proveedor las suministre. Por ello, es importante tener un inventario de repuestos bien dimensionado para evitar roturas de stock y dar una buena atención al cliente.

Por tanto, el objetivo del presente Trabajo Fin de Máster es el análisis del stock de un almacén de piezas de repuesto de postventa de una empresa del sector del ascensor y la optimización de dicho stock teniendo en cuenta la criticidad de las piezas y el nivel de servicio.

Abstract

Companies dedicated to the manufacture elevators, have to satisfy the customer with a fast and efficient after-sales service. The issue of spare parts is gaining more and more importance in the field of the elevator.

A poorly managed spare parts warehouse can have stockout of critical parts that can, therefore, leave a lift out of service for a long period of time, since the parts have to be manufactured or wait until the supplier provide it. For this reason, it is important to have a spare parts inventory well dimensioned to avoid stockout and give good customer service.

Therefore, the objective of this Master's Thesis is to analyze the stock of a spare parts inventory from after-sales of a lift company and optimize the stock taking into consideration the criticality of the pieces and the service level.

Índice

Agradecimientos	i
Resumen	iii
Abstract	v
Índice	vi
Índice de Figuras y Tablas	viii
1 Objeto y Justificación	1
1.1. Objetivo del Proyecto	1
1.2. Justificación	1
1.3. Descripción de la Empresa	2
1.4. Sumario	4
2 Estado del Arte	5
2.1. Gestión de Inventario de Piezas de Repuesto	5
2.2. Conclusiones extraídas de la Revisión Bibliográfica	7
3 Sistemas Clásicos de Gestión de Stock	12
3.1. Modelos de Inventario	12
3.1.1 Modelo Inventario (R, S)	12
3.1.2 Modelo Inventario (s, S)	12
3.1.3 Modelo Inventario (s, Q)	13
3.1.4 Modelo Inventario (R, s, S) y (R, s, Q)	14
3.2. Demanda de Stock	15
3.3. Stock de Seguridad	15
3.3.1 Variabilidad conjunta de la demanda durante el tiempo de aprovisionamiento	16
3.3.2 Stock de Seguridad de Piezas de Repuesto para mantenimiento con Nivel de Servicio	17
3.4. Punto de Pedido	18
4 Sistema de Gestión de Inventario en Servicio Postventa	19
4.1. Introducción	19
4.2. Datos Piezas de Repuesto	20
4.2.1 Demanda Piezas de Repuesto	20
4.2.2 Contraste de Hipótesis	21

4.2.3	Plazo de Entrega	24
4.2.4	Nivel de Criticidad y Nivel de Servicio	24
4.3.	Determinación del Stock de Seguridad y Punto de Pedido	28
4.3.1	Impacto Económico del Stock de Seguridad	30
4.4.	Tamaño del Lote	32
5	Conclusión	34
6	Bibliografía	35

Índice de Figuras y Tablas

Figura 1: Modelo SH	3
Figura 2: Modelo QH	3
Figura 3: Modelo EH.....	3
Figura 4: Gama de productos Hidral	3
Figura 5: Modelo (R, S).....	12
Figura 6: Modelo (s, S).....	13
Figura 7: Modelo (s, Q).....	13
Figura 8: Modelo (R, s, Q)	14
Figura 9: Modelo (R, s, S).....	14
Figura 10: Hoja de cálculo para la Gestión de Piezas de Repuesto (Crespo, 2014).....	17
Figura 11: Demanda piezas repuesto.....	21
Figura 12: Bondad de ajuste 6521200	22
Figura 13: Bondad de ajuste 6559100	22
Figura 14: Bondad de ajuste 6515010	23
Figura 15: Stock de Seguridad de Almacén.....	31
Figura 16: Modelo inventario revisión continua (s, Q)	33
Tabla 1: Hito ventas productos Hidral.....	2
Tabla 2: Tabla resumen artículos más destacables	10
Tabla 3: Demanda placa MP/11	20
Tabla 4: Demanda placa MAP07.....	20
Tabla 5: Demanda placa MEH3	20
Tabla 6: Pieza repuesto desviación típica.....	21
Tabla 7: Criterios Ocurrencia, Severidad y no Detección.....	25
Tabla 8: FMECA MH-H.....	26
Tabla 9: Matriz Criticidad	27
Tabla 10: Rango Criticidad	27
Tabla 11: Criticidad piezas repuesto.....	27

Tabla 12: Nivel de Servicio Clientes	28
Tabla 13: Stock de Seguridad y Punto de Pedido.....	29
Tabla 14: Impacto económico stock de seguridad almacén Postventa	31
Tabla 15: Lote óptimo de pedido	32

1 OBJETO Y JUSTIFICACIÓN

En este capítulo se expone el objetivo del proyecto, la forma en la que se aborda y las razones que justifican su elección. Posteriormente se presenta un breve resumen de los capítulos en los que está estructurado este trabajo.

1.1. Objetivo del Proyecto

El propósito del presente Trabajo Fin de Máster es desarrollar un sistema de gestión de piezas de repuesto de un servicio postventa de una empresa del sector del ascensor que se adapte al negocio, determinando los parámetros y estableciendo un análisis económico. Hay que tener en cuenta la gran importancia que tienen las piezas de repuesto en el mundo del ascensor. Un almacén mal gestionado puede tener roturas de stock de piezas críticas inesperadas que, por tanto, pueden dejar un equipo fuera de servicio durante un gran plazo tiempo, ya que se tienen que fabricar las piezas o se tiene que esperar hasta que el proveedor las suministre. Es importante tener un inventario de repuestos bien dimensionado para evitar roturas de stock y dar una buena atención al cliente. La gestión de piezas de repuesto es habitual en las propias empresas y hay referencias bibliográficas que abordan el tema. Sin embargo, que sepamos, no hay referencias sobre cómo gestionar el almacén de piezas de repuesto en una empresa servicio postventa.

El objetivo del proyecto se ha abordado dividiendo el trabajo en los siguientes objetivos específicos:

1. Revisión y análisis de la literatura en busca de problemas de inventario de piezas de repuesto en entornos similares al problema objeto de estudio.
2. Revisión de los sistemas clásicos de gestión de stock, con el objeto de estudiar los procedimientos existentes para la correcta selección del método más adecuado de gestión y para la determinación de los parámetros necesarios.
3. Desarrollar un procedimiento del cálculo de stock de seguridad para el entorno en cuestión, evaluando su impacto económico. Determinar y estimar los parámetros de los sistemas de gestión más adecuados para la empresa objeto de estudio.

1.2. Justificación

En la Industria del Ascensor, muchos fabricantes se ven afectados por la competencia y globalización de mercado. Esto conlleva que cada vez un mayor número de empresas entren en una dinámica de guerra de precios y para mantenerla reduzcan la calidad de la atención al cliente. Es por ello, que empresas que no compiten por precio, se quieran diferenciar de las demás con una buena calidad de producto y un servicio postventa rápido y eficaz.

Aparte de tener un servicio técnico que se pueda desplazar a cualquier sitio, cada vez es más importante, tener un stock de piezas de repuesto disponible para el cliente. Según (Dombrowski y Malorny, 2017), muchas empresas productoras aumentan su enfoque en el servicio postventa. En este sector empresarial, las empresas pueden generar altos márgenes en comparación con el negocio de productos primarios. Esto se basa en el hecho de que el servicio de postventa es responsable de sólo el 20% de la facturación de las empresas productoras, pero es capaz de generar alrededor del 80% de los beneficios de la empresa. Para asegurar que el servicio postventa continúe siendo un área de

negocios rentable para las empresas, es necesario que los procesos del servicio postventa estén orientados al cliente.

En muchos casos, un ascensor fuera de servicio puede tener una gran repercusión, por ejemplo, en un centro comercial, dónde es de vital importancia tener funcionando un ascensor montacargas para elevar mercancía pesada. De hecho, si las empresas mantenedoras de los equipos no son capaces de dar tiempos de respuesta y reparación relativamente cortos, están obligadas a pagar penalizaciones dependiendo del contrato que se haya acordado.

Hoy en día es imprescindible tener un almacén de piezas de repuesto disponible para el cliente y poder enviar el mismo día el repuesto, si se quiere dar una excelente calidad de servicio postventa. Una de las consecuencias de rotura de stock puede ser la disminución de las ventas, daño en la imagen de la empresa y pérdida de confianza de los clientes. Para ser competitivo, se tiene que dimensionar un inventario con el número de repuestos necesario y disponible para el cliente. Según (López, 2014), los métodos de stocks modernos tratan de hacer que el stock sea el mínimo posible, sin dejar de servir los pedidos al cliente.

Al no haber unas reglas claras para ver como se establece un sistema de gestión de repuestos para un almacén de postventa de cara al cliente, nace la idea de gestionar el stock de seguridad que se relaciona con la criticidad de la pieza y distintos niveles de servicio que se le quiera dar al cliente.

De la revisión bibliográfica se ha podido extraer una falta de problemas que combinen la gestión de inventario con piezas de repuesto de cara a un cliente final teniendo en cuenta la criticidad de la pieza de repuesto y el nivel de servicio que se le quiera dar a cada cliente, por lo que este Trabajo Fin de Máster cubre un vacío en la literatura actual.

1.3. Descripción de la Empresa

Hidral es una empresa con más 40 años de experiencia en la industria de la elevación y la accesibilidad. Dentro de este sector se ha especializado desde sus inicios en el campo de la hidráulica, aunque hoy en día ofrece igualmente soluciones de tracción y cuenta con más de 3500 clientes. La empresa cuenta con dos fábricas de 11.000m² + 10.000m². Sevilla, España. Internacionalmente está en fase de proyección y tiene ya oficinas en Brasil, Rusia y EEUU.

Desde 1975, Hidral ha emprendido un camino de ascenso guiado por objetivos muy claros: investigación, desarrollo y un amplio concepto de servicio al cliente, que se extiende desde el asesoramiento inicial hasta la atención postventa (HIDRAL S.A., 2017). La filosofía de la empresa es vender siempre al profesional de la industria del ascensor, nunca a promotoras, constructoras o usuario final. Hoy, el 60% de la producción es exportada a más de 50 países.

Cabe resaltar los hitos de venta que ha conseguido con algunos modelos en los últimos años:

Tipo	Modelo	Unidades fabricadas	Fecha
Plataforma Salvaescaleras	SH	10000	junio-2014
Ascensor Montacargas	QH	4500	febrero-2015
Plataforma Montacargas	EH	28000	diciembre-2016

Tabla 1: Hito ventas productos Hidral



Figura 1: Modelo SH



Figura 2: Modelo QH



Figura 3: Modelo EH

Esto es solo una breve descripción de los hitos que ha logrado la empresa, ya que tiene más variedad de productos que vende a ascensoristas. A continuación, se muestra una imagen describiendo todos los productos que comercializa la empresa:

Gama de productos

- Elevadores Montacargas EH
- Elevadores de Carga Acompañada EHMix-ECH
- Plataformas de Tijeras TH
- Minicargas MH-MTH
- Ascensores Montacargas QH
 - Personas QHP
 - Montacargas QHG
 - Montacoches QHV
 - Grandes Cargas QH Jumbo
- Plataformas Salvaescaleras SH
- Plataformas Verticales PH
- Elevador de Personas DH
- Ascensores Resid. y otros UH-AH
- Elevadores y Ascensores Especiales



Figura 4: Gama de productos Hidral

Esto significa que hay muchas unidades en funcionamiento, dentro y fuera de España. Por tanto, es esencial tener un cierto stock de seguridad de piezas para las unidades.

En el ejercicio pasado, se enviaron en total 22832 piezas de repuesto. En total se estima que existen aproximadamente 1000 tipos de repuestos.

1.4. Sumario

El proyecto está estructurado en 5 capítulos y un apartado en el que se incluyen las referencias empleadas del trabajo. En el capítulo 1, describe el objetivo del Trabajo Fin de Máster, se justifica el mismo, se realiza una breve descripción de la empresa objeto de estudio y finalmente se muestra un breve sumario con el contenido de los siguientes capítulos.

En el capítulo 2 se realiza un estado del arte que se centra en la revisión bibliográfica de los diferentes tipos de inventarios de stock que existen y su relación con piezas de repuesto.

En el capítulo 3 se detallan conceptos clásicos de gestión de stock, haciendo hincapié en la determinación de los parámetros.

El capítulo 4 se propone un método de gestión de inventario para la gestión de piezas de repuesto en un servicio postventa.

Finalmente, en el capítulo 5 se extraen las conclusiones obtenidas tras la realización del trabajo.

2 ESTADO DEL ARTE

A continuación, se va a realizar una revisión bibliográfica de los problemas de inventarios de piezas repuestos que afectan a la empresa objeto de estudio de este Fin de Máster. Dicha revisión permitirá al lector obtener una idea general sobre las piezas de repuesto y los tipos de gestión de inventarios que están relacionado con dichas piezas.

Dentro de la revisión bibliográfica no existen prácticamente referencias a problemas de gestión de stocks de un almacén de postventa de ascensores, dimensionando el stock teniendo en cuenta la criticidad de la pieza de repuesto y el nivel de servicio que se le quiera dar al cliente. Nos centramos en trabajos sobre modelos de inventario que se aplican a almacenes de piezas de repuesto, ya que la mayoría de la bibliografía se centra en el problema de gestión de piezas de repuesto de mantenimiento.

2.1. Gestión de Inventario de Piezas de Repuesto

La gestión de los inventarios de las piezas de repuesto en la actualidad lleva motivando una gran cantidad de trabajos. Se observa que el problema de un inventario de piezas de repuesto se está estudiando desde diferentes puntos de vista. Hay trabajos que se centran por ejemplo en la optimización conjunta de un almacén de repuesto con el mantenimiento. También existen trabajos que se centran solo en comparar las distribuciones que mejor se adaptan para cierto tipo de piezas de repuesto y además la mejora de un inventario de piezas de repuesto de un taller de reparaciones.

A continuación, se van a resumir los trabajos actuales que hablan sobre la problemática de los inventarios de piezas de repuesto para mejor comprensión del lector.

Un trabajo novedoso publicado por (Turrini y Meissner, 2017), trata sobre la distribución de demanda en la gestión de inventarios de repuestos. En esta publicación, se contribuye a la literatura empírica mediante el análisis de las distribuciones que mejor se adaptan a las piezas de repuesto. Se utiliza la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov Smirnov (K-S) para encontrar las distribuciones que mejor se ajustan a sus datos y comparan los resultados con los de la literatura actual.

(Wang, 2012) publicó un trabajo sobre un modelo estocástico para inventario conjunto de piezas de repuesto y optimización de mantenimiento planificado. Este trabajo presenta la optimización conjunta tanto para el control de inventario de las piezas de repuesto y el intervalo de inspección de Mantenimiento Preventivo (PM). Las variables de decisión son el intervalo de pedido, el intervalo de PM y la cantidad de orden. Debido a la naturaleza aleatoria de los fallos de las plantas, se derivan modelos de costes estocásticos para el inventario y mantenimiento de piezas de repuesto y se emplea un algoritmo de enumeración con programación dinámica estocástica para encontrar las soluciones óptimas conjuntas en un horizonte de tiempo finito. El modelo de inventario sigue una política de revisión periódica, pero con la demanda regida por la necesidad de piezas de repuesto debido al mantenimiento. Se demuestra el modelo desarrollado usando un ejemplo numérico.

La publicación de (Nguyen, Yeung y Castanier, 2013) trata sobre el mantenimiento óptimo y decisiones de reemplazo bajo cambio tecnológico con la consideración de inventarios de piezas de repuesto. Remarca que los modelos clásicos de inventario de piezas de repuesto suponen que se utilizará el mismo tipo de tecnología en todo el horizonte de planificación. Sin embargo, el reemplazo de activos a menudo ocurre en la forma de una nueva tecnología que hace obsoletos los inventarios existentes de piezas de repuesto. Este trabajo tiene como objetivo estudiar el impacto del inventario

de piezas de repuesto en el mantenimiento del equipo y las decisiones de reemplazo bajo el cambio tecnológico mediante una formulación de proceso de decisión de Markov. Bajo el cambio tecnológico, se muestra que las opciones de reparación y no hacer nada tienen mucho más valor ya que permiten esperar la aparición de tecnologías aún mejores en el futuro.

En el trabajo de (Panagiotidou, 2014) fue motivado por el problema de control de inventario de piezas de repuesto y mantenimiento observado purgadores de vapor en una refinería de petróleo. Se estudia el problema de mantenimiento y pedidos de repuestos para más de un elemento de operación idéntico. Los elementos de operación pueden sufrir dos tipos de fallos silenciosos: un fallo menor, que resulta en un mal funcionamiento del elemento, y un fallo importante o crítico, que hace que el elemento esté completamente fuera de servicio. Las revisiones de mantenimiento se llevan a cabo periódicamente para detectar cualquier fallo y los elementos inspeccionados se mantienen, reparan o reemplazan preventivamente de acuerdo con su condición. Se investigan dos políticas de gestión de inventarios para suministrar los repuestos necesarios: una revisión periódica y una política de revisión continua. Además, la sensibilidad de los modelos propuestos se estudia a través de ejemplos numéricos y se discute el efecto de algunas características clave del problema en las decisiones óptimas.

La publicación de (Mjirda *et al.*, 2016) investiga la optimización conjunta del mantenimiento preventivo periódico y el problema de inventario de repuestos. En este trabajo, se propone un nuevo modelo para la optimización conjunta del mantenimiento preventivo periódico y el problema del inventario de piezas de repuesto. Consiste en encontrar un programa de mantenimiento óptimo de la máquina M en un horizonte cíclico compuesto por t periodos, teniendo en cuenta la gestión del inventario de las piezas de repuesto. Se realiza un experimento computacional sobre un conjunto de instancias generadas para mostrar la eficiencia y el límite del modelo.

(Zahedi-Hosseini, Scarf y Syntetos, 2016) describe en su trabajo la demanda de piezas de repuesto de las plantas industriales de fábrica de papel, al menos en parte, por las necesidades de mantenimiento. Por lo tanto, es importante optimizar conjuntamente el mantenimiento planificado y el inventario de piezas de repuesto asociado utilizando las políticas de mantenimiento y reposición más adecuadas. En este estudio basado en la simulación, se aborda este desafío en el contexto del fallo aleatorio de piezas en servicio y la sustitución de piezas defectuosas en las inspecciones del período T . Las inspecciones se modelan utilizando el concepto de tiempo de retardo (*delay-time concept*). Se comparan modelos de inventario de revisión periódica y revisión continua. Una planta de fabricación de papel proporciona un contexto real para la presentación de sus ideas. Examinan a los profesionales que trabajan con dicha planta para recopilar datos reales que informen de los valores y parámetros en los modelos. Los resultados de simulación indican que una política de revisión periódica con pedidos que son dos veces más frecuente que la inspección es óptima en el contexto del problema que se estudia.

(Durán, Macchi y Roda, 2016) publicó su trabajo sobre la relación de las políticas de inventario de repuestos con el coste total de propiedad de los activos industriales. En este trabajo se presentan los resultados de un estudio de simulación dirigido a caracterizar la relación de las políticas de inventario de repuestos con el coste total de propiedad de las plantas industriales. El estudio está motivado por la expectativa de que varias decisiones de gestión de repuestos causen efectos importantes en la rentabilidad a largo plazo de los activos industriales. En dichas decisiones se pueden considerar, entre otras, el aprovisionamiento inicial, la política de inventario y la adquisición al fin de ciclo de vida útil. Este trabajo adopta la simulación para probar una política específica de inventario de piezas de repuesto, es decir, un sistema de revisión continua, con el objetivo final de evaluar sus efectos sobre el rendimiento operativo de una planta de trituración industrial y, en consecuencia, sobre su coste total de propiedad.

Según el trabajo publicado de (Basten y van Houtum, 2014), habla sobre modelos de inventario orientados al sistema para piezas de repuesto. En esta publicación, se estudian los modelos de control de inventario de piezas de repuesto bajo restricciones de servicio orientadas a sistema. Esos modelos se vinculan a dos tipos arquetípicos de redes de piezas de recambios: redes de usuarios que mantienen sus propios sistemas, por ejemplo, en el mundo militar, y redes de fabricantes de equipos originales

(OEM) que dan servicio a la base instalada de productos que han vendido. Se discute tanto la ubicación única como los modelos de varios escalones (*multi-echelon*). Se enfoca más en el uso de envíos laterales y de emergencia, y se refiere a otras extensiones y al acoplamiento de modelos de control de inventario de piezas de repuesto a problemas relacionados, como la planificación de la capacidad de un taller de reparación.

El trabajo publicado por (van Jaarsveld, Dollevoet y Dekker, 2015), estudia el control de inventario de repuestos para un taller de reparación de componentes de aeronaves. La inspección de un componente defectuoso revela qué piezas de repuesto se necesitan para repararlo y en qué cantidad. La escasez de piezas de repuesto demora las reparaciones, mientras que los operadores de aeronaves exigen tiempos de reparación de componentes cortos. Los métodos actuales de optimización del inventario de piezas de repuesto no pueden garantizar el rendimiento en el nivel de componente, que es deseado por los operadores. Para hacer frente a este déficit, su modelo incorpora los requisitos del operador. En consonancia con las políticas de taller de reparación típicas, las piezas de repuesto se asignan por orden de llegada a las reparaciones, y su inventario se controla utilizando una gestión de política (s, S). El enfoque de solución aplica la generación de columnas en una formulación de programación. Se desarrolla un nuevo método para resolver el problema de fijación de precios relacionado.

2.2. Conclusiones extraídas de la Revisión Bibliográfica

La demanda de piezas de repuesto normalmente exhibe un comportamiento altamente estocástico. Como la mayor parte de la demanda de piezas de repuesto se debe a los fallos de los equipos mecánicos o electrónicos, es altamente impredecible. La intermitencia de este tipo de demanda sugiere que debe modelarse con distribuciones compuestas, ya que permiten modelar los tamaños de demanda y los intervalos entre demanda como variables separadas.

La llegada de demanda generalmente se modela como un proceso de *Bernoulli*. Es decir, en cada unidad de período de tiempo, la probabilidad de observar una demanda está modelada por una variable aleatoria de *Bernoulli*. Como consecuencia, los tiempos entre llegadas se describen mediante una variable aleatoria geométrica. El tamaño de demanda corresponde a la suma de todos los tamaños de órdenes de demanda que llegan durante una unidad de tiempo. (Croston, 1972) fue el primero en introducir la estructura de demanda compuesta para modelar la demanda intermitente en un contexto de pronóstico en 1972. Su modelo usa el proceso de *Bernoulli* para describir la llegada de la demanda, y los tamaños de la demanda se modelan a través de independientes e idénticamente distribuidas variables aleatorias normales. Los trabajos que emplean modelos similares incluyen (Boylan y Syntetos, 2007) y (Altay, Rudisill y Litteral, 2008). Sin embargo, si se supone que la demanda es discreta, la distribución *gamma* solo puede aproximarse a la distribución de la demanda. La *distribución gamma* se utiliza principalmente en la literatura para modelar la demanda de tiempo de entrega por ejemplo, (Snyder, 2002) o (Rego y Mesquita, 2015). Otra distribución no compuesta que tiene una larga historia de aplicación en el contexto de repuestos es la *distribución de Poisson*, especialmente cuando la pieza de repuesto se mueve muy lentamente, con la demanda llegando a realizaciones únicas como describe por ejemplo (Muckstadt, 2005).

Aparte de las distribuciones típicas que se suelen usar para la demanda de las piezas de repuesto, ha habido una intensa investigación para estudiar los diferentes aspectos de problemas de inventario de piezas de repuesto, como problemas de gestión, problemas de inventario de varios escalones (*multi-echelon*), reemplazo basado en la edad de la pieza, piezas de repuesto reparables, problemas relacionados con la obsolescencia, etc. Una revisión del problema de inventarios de piezas de repuesto se puede ver en (Kennedy, Wayne Patterson y Fredendall, 2002). Como explican los autores, los inventarios de repuestos son totalmente diferentes de otros inventarios de producción. Su función es

ayudar al personal de mantenimiento a mantener los equipos en condiciones de funcionamiento. La relación estrecha entre los inventarios de repuestos y el mantenimiento se discute en varios artículos de la revisión. (Kabir y Al-Olayan, 1996) estudia la optimización conjunta de la sustitución basada en la edad y la política de inventario de revisión continua tipo (s, S) de piezas de repuesto. (van Jaarsveld, Dollevoet y Dekker, 2015) utiliza una política de inventario de revisión continua para mejorar el almacén de un taller de reparación. (Basten y van Houtum, 2014) también usa una política de inventario de revisión continua $(S-1, S)$ en su trabajo. (Rego y Mesquita, 2015; Durán, Macchi y Roda, 2016) utilizan una política inventario de revisión continua tipo (s, Q) . No existe mucha documentación relacionada que solo trate una política de inventario de revisión periódica. Por ejemplo (Wang, 2012) usa en su modelo estocástico para inventario conjunto de piezas de repuesto una política de inventario de revisión periódica. La mayoría de trabajos prueban políticas de inventario de revisión continua y periódica. (Zahedi-Hosseini, Scarf y Syntetos, 2016) hace en su trabajo una comparación de la mayoría de modelos de inventario de revisión periódica y revisión continua tipo (R, S) , (R, s, S) , (R, s, Q) , (s, S) y (s, Q) . Para obtener una visión más amplia de los modelos de control de inventario de piezas de repuesto, nos referimos al libro de (Muckstadt, 2005). (Chelbi y At-Kadi, 2001) presentan políticas de gestión para un sistema de fabricación, con el objetivo de optimizar conjuntamente la estrategia de mantenimiento con un inventario de piezas de repuesto de revisión continua. (Paterson *et al.*, 2011) revisaron la investigación sobre modelos de inventario con transbordos laterales. (Bacchetti y Saccani, 2012) llevó a cabo una revisión bibliográfica de la clasificación de piezas de repuesto y la previsión de demanda, e investigó la brecha entre la investigación y la práctica en el manejo de repuestos.

Un tema bastante importante es el stock de seguridad y la criticidad de las piezas de repuesto. En este caso, en la mayoría de las publicaciones relacionadas con inventarios de repuestos, hacen poca referencia al stock de seguridad. (Huiskonen, 2001) describe en su trabajo que, en caso de necesidad inmediata, el stock de seguridad local suele ser la única forma de aprovisionamiento, pero con más tiempo para operar una estructura centralizada con entregas directas también se convierte en una opción. También menciona que la criticidad de una pieza de repuesto es probablemente la primera característica que señalan los profesionales de la logística de piezas de recambio cuando se les pregunta sobre las características específicas. Para (Kennedy, Wayne Patterson y Fredendall, 2002), las reparaciones no planificadas, las consecuencias de los desabastecimientos a menudo incluyen la pérdida de producción con costes significativos, y es necesario algún tipo de política de stock de seguridad. (Eaves y Kingsman, 2004) integraron la clasificación del patrón de demanda, la previsión de la demanda y la evaluación del rendimiento del pronóstico, y mostraron que la metodología presentada podría ampliarse para ayudar a establecer niveles stock de seguridad operacional. (van Jaarsveld, Dollevoet y Dekker, 2015) describe que los métodos de control de inventario estocástico para la optimización de stock de seguridad generalmente establecen objetivos de disponibilidad en función del precio, el tiempo de entrega y el volumen de demanda. En su trabajo el rendimiento del taller de reparación se mide con el nivel de los componentes, y la tasa de llenado de los objetivos de disponibilidad (*Target Fill Rate*) que depende de la criticidad de los componentes. (Vaughan, 2005) describe la importancia que tienen las piezas de repuesto críticas, ya que deben estar disponibles cuando sea necesario, para evitar un cierre de la planta o la falta de disponibilidad del equipo. (Panagiotidou, 2014) considera en su trabajo un sistema que consiste en elementos críticos idénticos que están sujetos a deterioro. (Durán, Macchi y Roda, 2016) se limita a la generación de datos de una pieza de repuesto específica requerida por un activo crítico en una planta, para proporcionar un análisis enfocado de su estudio. (Zahedi-Hosseini, Scarf y Syntetos, 2016) considera en su trabajo una situación específica de una fábrica de papel y desarrolla varios modelos de simulación para optimizar conjuntamente el mantenimiento de inspección y la política de inventario de rodamientos que son piezas críticas.

En el presente Trabajo Fin de Máster se considera usar con la muestra de datos disponible una distribución normal para la demanda de piezas de repuesto. También se usará un modelo de gestión de inventarios teniendo tipo (s, Q) teniendo en cuenta el stock de seguridad. Descartamos usar un modelo (s, S) ya que según (van Jaarsveld, Dollevoet y Dekker, 2015) se suele usar para talleres de reparación y a la empresa le conviene usar un modelo (s, Q) porque las piezas analizadas en este trabajo son de fabricación interna. No obstante, no hemos encontrado ningún trabajo que enlace la criticidad de las piezas de repuesto que, relacionado con el nivel de servicio que se le quiera dar a los clientes, se calcule el stock de seguridad de un almacén de postventa.

Este campo de estudio es muy importante, ya que hay muchos trabajos relacionado con los inventarios de piezas de repuesto. El Trabajo Fin de Máster tiene cierto parecido al trabajo de (van Jaarsveld, Dollevoet y Dekker, 2015) pero tiene estas diferencias:

- Relacionado con la aeronáutica
- Almacén de un taller de reparaciones
- Utilizan varias piezas de repuesto para reparar componentes de avión
- No dimensionan el stock de seguridad teniendo en cuenta la criticidad de la pieza y el nivel de servicio que se le quiere dar al cliente

A continuación, se mostrará una tabla de resumiendo los trabajos más destacables de la revisión bibliográfica, donde comparamos los siguientes criterios: Modelo de Inventario, Determinista o Estocástico, Teórico o Aplicado, Activos Internos, Postventa, Criticidad Activos y por último el stock de seguridad.

Referencia	Contenido	Modelo Inventario	Determinista / Estocástico	Teórico / Aplicado	Activos Internos	Postventa	Criticidad Activos	Stock de Seguridad
Kabir 1996	Optimización conjunta del reemplazo por edad y el aprovisionamiento de repuesto. Combina la política de reemplazo por antigüedad con la política de inventario de revisión continua.	(s, S)	E	T	SI	NO	NO	NO
Vaughan 2005	Política de inventario para piezas de repuesto, cuando la demanda de piezas de repuesto surge debido al mantenimiento preventivo programado así como a la tasa de fallo aleatorio de las equipos en servicio.	(s, S)	E	T	SI	NO	SI	NO
Panagiotidou 2014	Optimización conjunta de las políticas de pedido y mantenimiento de piezas de repuesto para elementos idénticos sujetos a fallos silenciosos de purgadores de vapor en una refinería de petróleo.	(R, S) y (s, S)	D	T	SI	NO	SI	NO
Rego 2015	Estudio de simulación a gran escala sobre previsión de demanda de piezas de repuesto y control de inventario para seleccionar las mejores políticas de un fabricante de automóviles en Brasil.	(s, Q)	D	T	SI	NO	NO	NO
van Jaarsveld 2015	Mejora control de inventario de repuestos para un taller de reparación de componentes de aeronaves.	(s, S)	E	A	NO	SI	SI	SI
Duran 2016	Simulación dirigida a caracterizar la relación de las políticas de inventario de repuestos con el coste total de propiedad de las plantas industriales.	(s, Q)	E	T	SI	NO	SI	NO
F. Zahedi-Hosseini 2017	Simulación sobre optimización conjunta de mantenimiento de inspecciones y aprovisionamiento de piezas de repuesto comparando modelos de inventario de revisión periódica y revisión continua en una planta de fabricación de papel.	(R, S), (R, s, S), (R, s, Q), (s, S) y (s, Q)	D	T	SI	NO	SI	NO

Tabla 2: Tabla resumen artículos más destacables

Se van a explicar las columnas más interesantes usadas en esta tabla y a posteriori se hará un breve resumen de los datos.

Se añadió la columna de “Modelo Inventario” para comparar el tipo de inventario que se usa en los trabajos revisados. Llama la atención que (Zahedi-Hosseini, Scarf y Syntetos, 2016) sean los únicos que usan prácticamente todos los modelos de inventario para su simulación.

La columna “Determinista / Estocástico” resalta si en el trabajo se usaron valores no aleatorios o si algo no se conoce con exactitud y solo se explica en términos de probabilidades.

Otra columna que se ha tenido en cuenta es la “Teórico / Aplicado”. Se distingue si el resultado del trabajo se realizó en un marco teórico y permanece en él o si el trabajo también aplica los resultados en la práctica.

La columna “Activos Internos” destaca si en los trabajos relacionados hacen al menos mención de los activos internos. Un ejemplo sería un almacén de mantenimiento que mantiene un stock de piezas de repuesto importante para máquinas en una fábrica.

También se tiene en cuenta la columna “Postventa” si las piezas están relacionadas con un servicio postventa de cara al cliente. Este caso es bastante interesante ya que está bastante relacionado con el Trabajo Fin de Máster.

Otra columna que también está relacionada con el Trabajo Fin de Máster es la columna “Críticidad Activo”. Se revisa en los trabajos si tienen en cuenta la criticidad de la pieza de repuesto o bien la criticidad de una máquina.

Finalmente se usa la última columna “Stock de Seguridad” resaltando los trabajos que al menos mencionan o tienen en cuenta el stock de seguridad. Este criterio resulta ser también interesante ya que está relacionado con el objeto de estudio.

Se observa en tabla 2 que no existe un modelo de gestión de inventario que sea el más adecuado en caso de piezas de repuesto. Se utilizan modelos de gestión de revisión continua y periódica. La mayoría de los trabajos aplican modelos estocásticos. La gran mayoría de los trabajos revisados se realizó en un marco teórico. Se aprecia también que prácticamente todos los trabajos se centran en activos internos. Es decir, que la gestión de las piezas de repuesto suele ser para almacenes de mantenimientos de empresas que necesitan tener piezas de recambio para consumo interno. Otro aspecto interesante es que la mayoría de los trabajos no se centran en servicio postventa, es decir, gestionar un almacén de cara al cliente. La criticidad de activos, ya sea de una máquina o pieza de repuesto, se suele tener en cuenta o por lo menos lo mencionan en los trabajos. Por último, el stock de seguridad, que para este Fin de Trabajo de Máster también es de importancia, se suele mencionar poco como se puede ver. Hay otros trabajos que mencionan el stock de seguridad en una gestión de piezas de repuesto de mantenimiento, que no salen en esta tabla.

Se puede decir que el trabajo de (van Jaarsveld, Dollevoet y Dekker, 2015) se parece más al objeto de estudio, ya que se centra en una gestión de inventario de servicio postventa. Hay que tener en cuenta que se trata de un taller de reparación para componentes de aviones y utilizan las piezas de repuesto para la reparación.

3 SISTEMAS CLÁSICOS DE GESTIÓN DE STOCK

Se van a resumir los modelos de inventarios más importantes, conceptos clásicos de demanda, stock de seguridad y punto de pedido.

3.1. Modelos de Inventario

3.1.1 Modelo Inventario (R, S)

Según describe (Larrañeta, Onieva y Lozano, 1988), es un modelo de revisión periódica con periodo de revisión constante R . Cada vez que se realiza la revisión se lanza un pedido desde el nivel que se observa hasta un nivel máximo constante (Panagiotidou, 2014) aplica varios modelos de inventario, entre ellos el (R,S) para una optimización conjunta de las políticas de pedidos y mantenimiento de piezas de repuesto de purgadores de vapor en una refinería de petróleo.

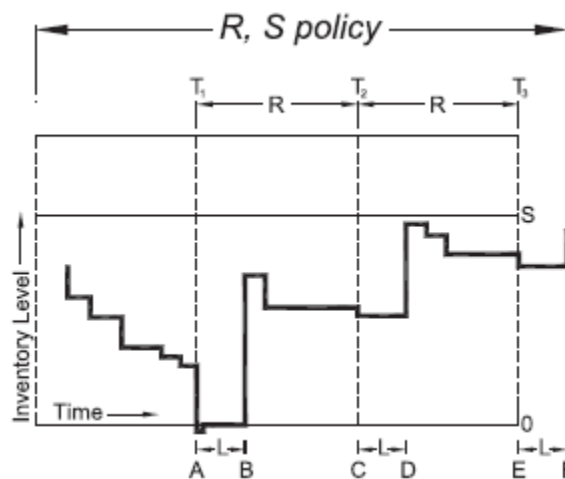


Figura 5: Modelo (R, S)

Estos modelos se denominan sistemas (R, S), por ser éstas las variables

- S = Nivel máximo stock
- R = Revisión periódica
- L = Plazo de entrega

3.1.2 Modelo Inventario (s, S)

Según (Zahedi-Hosseini, Scarf y Syntetos, 2016), es una política de inventario de revisión continua (s, S), en la que se hace la orden de pedido a elevar la posición de inventario al nivel máximo S cuando el número de piezas de inventario cae o es inferior al nivel s . (García *et al.*, 2004) menciona que, el valor de S permite cualquier medio de definición, conduciendo únicamente a variación en los niveles de stock y el número de lanzamiento.

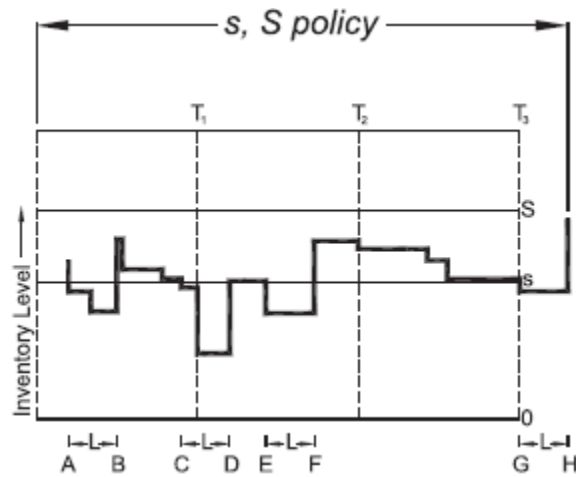


Figura 6: Modelo (s, S)

- S = Nivel máximo stock
- s = Punto pedido
- L = Plazo de entrega

3.1.3 Modelo Inventario (s, Q)

Según describe (Larrañeta, Onieva y Lozano, 1988), es uno de los modelos más sencillos, y más genéricamente empleado en el análisis de la gestión es el modelo de revisión continua con tamaño de lote de abastecimiento Q cuyo pedido se realiza cuando el nivel de stock es una cantidad s que cubre exactamente la demanda media que se espera durante el plazo de aprovisionamiento. A. Alrabghi et al. (Alrabghi y Tiwari, 2016) aplica un modelo de inventario tipo (s, Q) en un nuevo enfoque para el modelado de sistemas complejos de mantenimiento mediante simulación por eventos discretos.

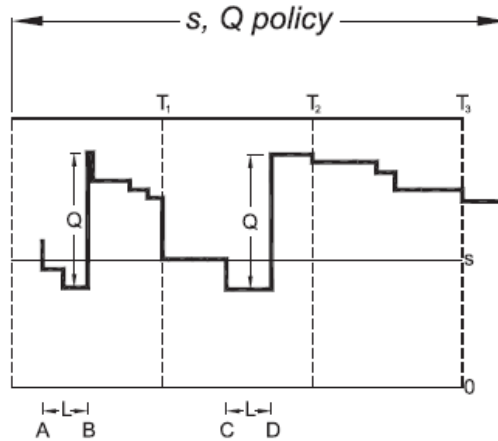


Figura 7: Modelo (s, Q)

A estos modelos, que dan lugar a una forma de gestión, se les denomina sistemas (s, Q) , por ser éstas las dos variables que la determinan.

- Q = Lote
- s = Punto pedido
- L = Plazo de entrega

3.1.4 Modelo Inventario (R, s, S) y (R, s, Q)

Estos modelos descritos en el trabajo de (Zahedi-Hosseini, Scarf y Syntetos, 2016) sobre la optimización conjunta de mantenimiento de inspección y aprovisionamiento de repuestos, hace un estudio comparativo de las políticas de inventario utilizando datos de simulación y encuestas.

A continuación, se detalla el modelo de inventario (R, s, Q). La política de inventario periódica (R, s, Q), en la que cada R unidades de tiempo se hace un orden de Q unidades siempre que la posición de inventario es menor o igual a s.

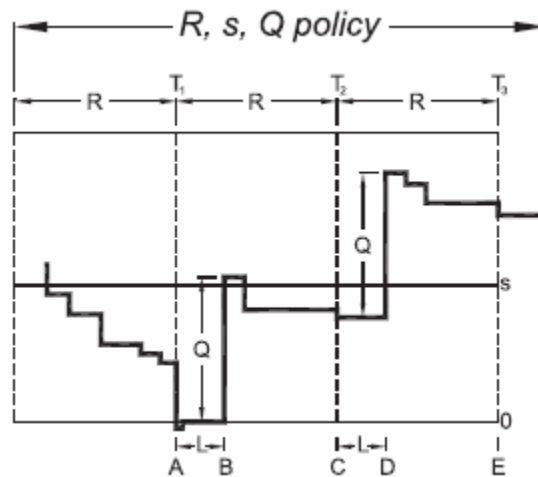


Figura 8: Modelo (R, s, Q)

- Q = Lote
- s = Punto de pedido
- R = Revisión periódica
- L = Plazo de entrega

Seguidamente, se detalla el modelo de inventario (R, s, S). Según (Larrañeta, Onieva y Lozano, 1988), es una política de inventario con revisión periódica (R, s, S). Cuando se revisa el stock, si éste es superior al nivel inferior s no se pide un lote, sino que se espera a la siguiente revisión.

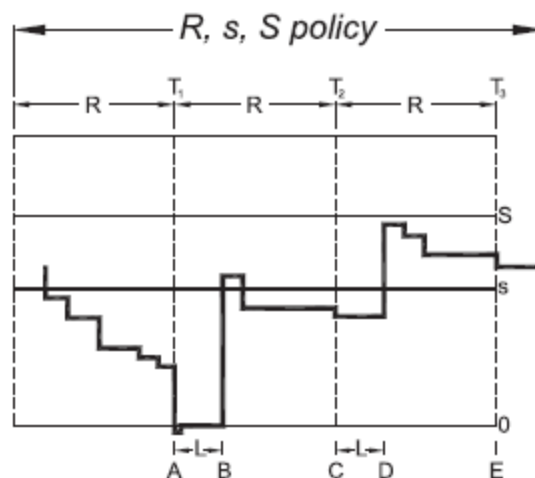


Figura 9: Modelo (R, s, S)

- S = Nivel máximo de stock

- s = Punto de pedido
- R = Revisión periódica
- L = Plazo de entrega

Por tanto, en este trabajo Fin de Máster, se decide usar el modelo de inventario con revisión continua (s, Q), porque se monitorizan las piezas gracias al personal encargado del almacén de postventa.

3.2. Demanda de Stock

Como muestra (Larrañeta, Onieva y Lozano, 1988) se denominan los métodos de análisis de los stocks de productos sujetos a demanda independiente. Esta demanda, o bien es determinista y perfectamente conocida, o se prevé mediante métodos estadísticos que estiman el tipo de distribución probabilística que mejor la representa, y los parámetros que la definen. Dada la dificultad y el coste de realizar, se suele emplear de forma general la *distribución normal* para productos con demanda continua o cuya magnitud sea elevada. Y para demanda discreta y reducida, la *distribución Poisson*. En el caso de productos especialmente importantes, se realicen estimaciones más precisas empleando la *distribución de Laplace*, la *binomial* o alguna de la familia de la *distribución gamma*.

La demanda se prevé, según (Cortés *et al.*, 2008), extrapolando los datos históricos sobre su comportamiento anterior. De la demanda se estima su forma (distribución), y los parámetros que la definen, que, en la mayoría de los casos suele ser el valor medio (la media) y el error de previsión (la desviación típica o varianza).

Debido a los datos históricos que se poseen, se decide usar una distribución normal en el proyecto para la demanda media y desviación típica. Como describe (López, 2014), la distribución normal es el modelo de distribución de probabilidad más usado en la práctica, ya que multitud de fenómenos se comportan según una distribución normal.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2}{n} - (\bar{X})^2}$$

X= media demanda

σ = desviación típica demanda

3.3. Stock de Seguridad

Como describe (García *et al.*, 2004), el stock de seguridad es un inventario creado con el doble propósito de satisfacer la demanda que excede de las previsiones para un determinado periodo y de proteger al Sistema de las irregularidades no previstas del entorno. El hecho de que exista incertidumbre en las previsiones de la demanda implica que la demanda real pueda ser mayor que la demanda prevista. En estos casos, el inventario de seguridad evita que se agote el producto y, por lo tanto, que se pierdan ventas por falta de éste.

Sabiendo el stock de seguridad SS, se introduce en los modelos de inventario de revisión continua o periódica para calcular los puntos de pedidos s o nivel máximo constante S.

Según (Larrañeta, Onieva y Lozano, 1988), el modelo de revisión continua se realiza un pedido cuando

alcanza el punto de pedido s , que cubre exactamente la demanda media μ que se espera durante el plazo de aprovisionamiento más una cierta cantidad, denominada stock de seguridad, destinada a cubrir las probables desviaciones de la demanda con respecto al valor medio μ . Esto es $s = \mu + ss$.

El modelo de revisión periódica R se realiza un pedido cada periodo de revisión R y lanza un pedido desde el nivel que se observa hasta un nivel máximo S . Este nivel superior es la magnitud que corresponde a una demanda que se presentara de acuerdo con la demanda prevista durante el plazo de revisión R y el de aprovisionamiento, más una cantidad destinada a stock de seguridad, SS , con el fin de cubrir los probables incrementos de la demanda sobre el valor medio esperado μ . En este caso también $S = \mu + SS$, pero correspondiendo μ y SS al periodo de tiempo suma del de revisión más el plazo de aprovisionamiento.

En la literatura de (Larrañeta, Onieva y Lozano, 1988; Cortés *et al.*, 2008; López, 2014) la fórmula utilizada para calcular el stock de seguridad es:

$$SS = Z \cdot \sigma$$

siendo:

- Z = Factor de seguridad, calculado en función al nivel de servicio
- σ = Desviación típica de la demanda durante el plazo de entrega

La fórmula obtenida anteriormente, según (López, 2014), se puede interpretar que, el stock de seguridad será el resultado de multiplicar la desviación típica por el valor de la distribución normal estándar para el nivel de servicio fijado. Se deduce que cuanto más variable es la demanda, mayor será el stock de seguridad, teniendo en cuenta que la variabilidad se mide por la desviación típica.

En cuanto al valor Z , cuanto mayor sea el nivel de servicio (y menor la probabilidad de rotura de stock), el valor Z , será más alto y el stock de seguridad será mayor. Este valor se puede coger de la tabla de la distribución normal estándar. Por ejemplo, obtendríamos para un nivel de servicio de 95,54% el factor de seguridad $Z = 1,7$.

3.3.1 Variabilidad conjunta de la demanda durante el tiempo de aprovisionamiento

Según describe (Crespo, 2007), el nivel de existencias de seguridad puede calcularse asumiendo que la disponibilidad de inventario se mide en términos de la probabilidad de indisponibilidad por ciclo de pedido. En este caso, el stock de seguridad puede ser modelado como una función del nivel de servicio al cliente especificado por la dirección y la desviación estándar de la demanda de piezas de repuesto durante el plazo de aprovisionamiento. Al mismo tiempo, esta desviación estándar de la demanda de plazo de aprovisionamiento se basa en la media y la varianza de la demanda y del plazo de aprovisionamiento, asumiendo que las distribuciones de la demanda y del plazo de aprovisionamiento son independientes entre sí:

$$\sigma_{Dl} = \sqrt{\bar{L} \cdot \sigma_D^2 + \bar{D}^2 \cdot \sigma_L^2}$$

Siendo:

- σ_{Dl} Variabilidad conjunta de la demanda de piezas durante el tiempo de aprovisionamiento
- \bar{L} Tiempo medio de aprovisionamiento
- σ_D Variabilidad de la demanda de piezas por unidad de tiempo
- σ_L Variabilidad del tiempo de aprovisionamiento
- \bar{D} Demanda media de piezas

Podemos observar que se tiene en cuenta la varianza del tiempo de aprovisionamiento.

Para este proyecto Fin de Máster se decide usar el cálculo del stock de seguridad usando la variabilidad σ_{DL} , ya que se tiene en cuenta la variabilidad de la demanda y tiempo de aprovisionamiento.

$$SS = Z \cdot \sigma_{DL}$$

3.3.2 Stock de Seguridad de Piezas de Repuesto para mantenimiento con Nivel de Servicio

El autor (Crespo, 2014), usa para el cálculo del stock de seguridad y el punto de pedido un concepto ligeramente distintos a los otros autores: Un nivel de servicio medio ponderado como se puede ver a continuación.

PROGRAMA PARA LA GESTIÓN DE PIEZAS DE REPUESTO															
ORIGEN DATO	MANTTO	MANTTO	MANTTO	MANTTO			ALMACÉN	ALMAC	ALMACÉN	ALMACÉN				ALMACÉN	
Spare parts	ASSETS	Criticality	% Consumo	Nivel servicio	N. Serv Promedio	z	Demanda(w)	$\sigma(D)$	T Apro (week)	$\sigma(LT)$	$\sigma(DTA)$	SS	P. PEDIDO	PRECIO	Inventory(€)
ELECTRODOS PH ITEM #: 11451	35510-TK001	A	30%	0,99	0,828	0,95	1,50	0,20	4,00	1,00	1,55	1,47	7,47	€ 301,00	€ 442,18
	35510-TK002	A	40%	0,99											
	35510-TK005	B	10%	0,95											
	32010-ML001	C	20%	0,2											
SELLOS MECÁNICOS ITEM #: 10928	33010-PP001	A	25%	0,99	0,982	2,10	0,15	0,15	20,29	4,00	0,93	1,94	5,06	€ 3.688,00	€ 7.166,86
	33010-PP002	A	25%	0,99											
	33040-PP003	B	10%	0,95											
	33040-PP004	B	10%	0,95											
	33050-PP008	A	15%	0,99											
	33050-PP009	A	15%	0,99											
ARANDELA M16INOX ITEM #: 12346	General	B	1%	0,99	0,95	1,64	11236,00	19,23	10,29	1,00	11236,17	18481,85	134052,14	€ 0,10	€ 1.848,19
	Criticality Level	Service Level													
	A	0,99													
	B	0,95													
	C	0,2													

Figura 10: Hoja de cálculo para la Gestión de Piezas de Repuesto (Crespo, 2014)

Se contempla que esta hoja de cálculo se usa para almacenes de mantenimiento, es decir, para uso interno. A cada pieza de repuesto, se asignan varios activos (máquinas) con su correspondiente criticidad que define el nivel de servicio y porcentaje de demanda de cada activo.

Por ejemplo, la pieza de repuesto Electrodo PH (Item #: 11451) puede ser empleada en varios activos diferentes que son 35510-TK001, 35510-TK002, 35510-TK005 y 32010-ML001. Cada activo tiene su criticidad, que a la vez define el nivel de servicio y el porcentaje de demanda.

Teniendo estos datos en cuenta se hace una media de nivel de servicio ponderada para la pieza de repuesto en cuestión.

Para el cálculo del stock de seguridad se va aplicar una versión modificada de (Crespo, 2014). Nosotros vamos a tener piezas de repuesto y no vamos a tener activos sino clientes externos, ya que es una demanda externa y no interna. Se van asignar clientes a cada pieza de repuesto y le vamos a dar más o menos nivel de servicio teniendo en cuenta la criticidad de la pieza de repuesto. Es decir, se va a calcular el nivel de servicio medio ponderado de las piezas de repuesto teniendo en cuenta el nivel de servicio objetivo de los clientes y la criticidad de la pieza de repuesto.

3.4. Punto de Pedido

Según (Larrañeta, Onieva y Lozano, 1988) el punto de pedido s cubre exactamente la demanda media μ que se espera durante el plazo de aprovisionamiento más una cierta cantidad, denominada stock de seguridad, destinada a cubrir las probables desviaciones de la demanda con respecto al valor medio μ . Esto es $s = \mu + ss$. Por tanto, el valor medio se puede expresar:

$$\mu = \bar{D} \cdot \bar{L}$$
$$s = \bar{D} \cdot \bar{L} + Z \cdot \sigma_{Dt}$$

Una vez alcanzado el punto de pedido s , se debe realizar un pedido para evitar problemas en el suministro de piezas debido a una rotura de stock.

4 SISTEMA DE GESTIÓN DE INVENTARIO EN SERVICIO POSTVENTA

En este capítulo se describe el segundo objetivo específico del Trabajo Fin de Máster, que es desarrollar un sistema de gestión de inventario en servicio postventa. Para ello vamos a crear un procedimiento que se pueda aplicar a cualquier pieza de repuesto que se detalla a continuación.

4.1. Introducción

En los apartados anteriores, se han descrito los principales modelos de inventario, demanda de stock y el stock de seguridad. Con esta información adquirida, se podría calcular el stock de seguridad con un nivel de servicio como describe (López, 2014).

No obstante, el principal problema de este trabajo es ver cómo se determina el stock de seguridad y cómo gestionar el inventario. El problema específico de este Fin de Máster es, que se tienen varios clientes y, además, las piezas de repuesto pueden tener diferente criticidad. Esto significa que dicho valor provocará fluctuaciones en el nivel del stock de seguridad. Por tanto, hace falta combinar los valores añadidos de las piezas y clientes, para poder calcular el stock de seguridad.

A continuación, se hará una breve descripción la metodología que se quiere aplicar para gestionar un inventario de piezas de repuesto de postventa.

En primer lugar, se necesitan los datos históricos la demanda de las piezas de repuesto. Este dato es necesario para poder calcular el stock de seguridad. Se parte de la hipótesis de normalidad obteniendo los parámetros que definen la desviación y la media.

Para comprobar si se puede usar la distribución, se procede a un contraste de hipótesis. En esa comprobación se verá si se rechaza o no la hipótesis de la normalidad.

Una vez contrastados los resultados del contraste de hipótesis. Definimos el plazo de entrega de las piezas de repuesto. El plazo de entrega puede cambiar dependiendo de la pieza de repuesto.

Se procede a obtener la criticidad de la pieza. Este dato lo puede proporcionar la empresa en el caso de que disponga de un histórico de productos basado en experiencias de fabricación. Si no está disponible se puede obtener haciendo por ejemplo un análisis de modo de fallo de criticidad (FMECA, *Failure Mode Effect and Criticality Analysis*). Dicha metodología se menciona por ejemplo en (Crespo, 2007). Nos parece interesante usar este método porque no tenemos constancia de que se haya usado en la literatura revisada relacionado con el stock de seguridad. Este método es práctico para una empresa que cuente con un servicio de postventa, ya que conocerían el producto y sus debilidades. De esta manera pueden realizar el análisis de una manera sencilla.

El nivel de servicio es necesario para poder calcular el stock de seguridad. Este valor se obtiene multiplicando el valor de la criticidad con el valor de nivel de servicio que le asignamos al cliente.

Finalmente, para calcular el stock de seguridad y el punto de pedido, se aplican los datos anteriormente obtenidos.

4.2. Datos Piezas de Repuesto

4.2.1 Demanda Piezas de Repuesto

Para poder calcular el stock de seguridad, se necesita saber la demanda. En este caso se dispone de datos históricos y se calcula la demanda aleatoria. A modo de ejemplo nos vamos a centrar en 3 piezas de repuesto que se suelen enviar con cierta frecuencia y son vitales para el funcionamiento del equipo. Vamos a revisar los datos de las siguientes piezas repuestos:

- PLACA DE CONTROL MP/11 (6521200)
- PLACA PRINCIPAL MAP07 (6559100)
- PLACA MEH3 BASE (6515010)

Se trata de placas de maniobra que van instalada en el cuadro el cuadro eléctrico de los equipos. Estas piezas son muy importantes / críticas para el equipo instalado. La placa de control MP/11 se usa en equipos montaplatos modelo MH, la placa principal MAP07 se usa en ascensores montacoche modelo QH y la MEH3 en plataformas solo carga modelo EH.

A continuación, se va a detallar la demanda mensual de los últimos dos años de cada pieza:

Nº Artículo		Descripción										Precio		
6521200		Placa control MP/11										181,78 €		
ene-15	feb-15	mar-15	abr-15	may-15	jun-15	jul-15	ago-15	sep-15	oct-15	nov-15	dic-15	ene-16	feb-16	mar-16
12	11	5	7	12	5	7	14	14	12	20	8	14	4	5
abr-16	may-16	jun-16	jul-16	ago-16	sep-16	oct-16	nov-16	dic-16	ene-17	feb-17	mar-17	abr-17	may-17	jun-17
9	4	14	5	11	16	12	9	15	15	12	25	16	8	7

Tabla 3: Demanda placa MP/11

Nº Artículo		Descripción										Precio		
6559100		Placa principal MAP07										182,85 €		
ene-15	feb-15	mar-15	abr-15	may-15	jun-15	jul-15	ago-15	sep-15	oct-15	nov-15	dic-15	ene-16	feb-16	mar-16
13	17	9	14	12	6	19	16	15	15	19	5	9	12	9
abr-16	may-16	jun-16	jul-16	ago-16	sep-16	oct-16	nov-16	dic-16	ene-17	feb-17	mar-17	abr-17	may-17	jun-17
10	18	25	11	5	23	19	8	6	12	18	10	12	12	8

Tabla 4: Demanda placa MAP07

Nº Artículo		Descripción										Precio		
6515010		Placa MEH3 base										206,70 €		
ene-15	feb-15	mar-15	abr-15	may-15	jun-15	jul-15	ago-15	sep-15	oct-15	nov-15	dic-15	ene-16	feb-16	mar-16
18	8	20	13	7	31	14	27	19	20	11	7	8	14	19
abr-16	may-16	jun-16	jul-16	ago-16	sep-16	oct-16	nov-16	dic-16	ene-17	feb-17	mar-17	abr-17	may-17	jun-17
13	19	14	12	6	32	24	17	22	25	9	14	14	12	10

Tabla 5: Demanda placa MEH3

Para una mejor visualización, se muestran los datos en un gráfico de líneas:

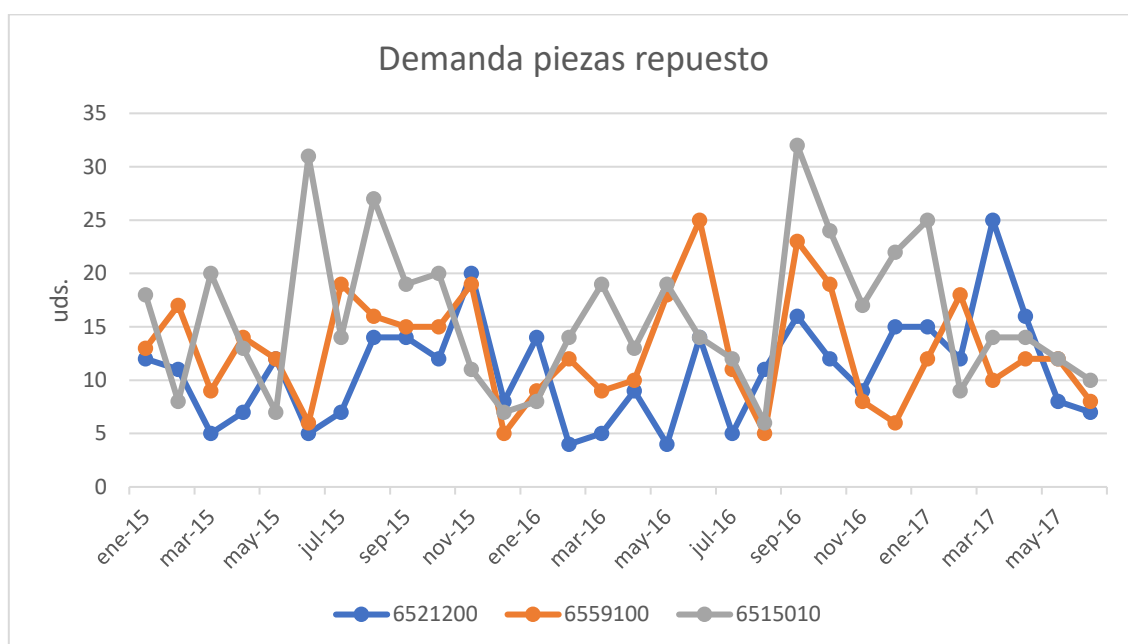


Figura 11: Demanda piezas repuesto

Una vez obtenido los datos, calculamos la media y la desviación típica descrita en el apartado 3.2 para poder calcular el stock de seguridad. A continuación, se puede ver en tabla 6 los datos descritos.

N.º Artículo	Media	Desviación típica (σ)
6521200	10,93	4,97
6559100	12,90	5,21
6515010	15,97	6,99

Tabla 6: Pieza repuesto desviación típica

4.2.2 Contraste de Hipótesis

Para saber si nuestra demanda aleatoria es realmente compatible con una distribución normal, vamos a hacer un contraste de hipótesis. Para ello vamos a usar el programa Stat::Fit®(StatFit, 2017). Introducimos los datos de la demanda de cada repuesto y ejecutamos “Auto::Fit”. Una vez ejecutado, nos saldrá un listado de ranking, de las distribuciones que mejor encajan con nuestros datos. Esto nos da un primer indicio si la distribución normal ha sido aceptada.

Procedemos a hacer la bondad de ajuste, para comprobar si nuestra propuesta de distribución cumple o no. Para ello, nos metemos en el menú “Fit” y ejecutamos “Goodness of Fit”.

Las pruebas de bondad de ajuste son simplemente comparaciones de los datos de entrada a las distribuciones ajustadas de una manera estadísticamente significativa. Cada prueba hace la hipótesis de que el ajuste es bueno y calcula una estadística de prueba para compararla con un estándar. En ese caso se usarán las pruebas de Kolmogorov Smirnov (KS) y Anderson Darling (AD).

A continuación, se detallan los resultados de las tres piezas de repuesto con número 6521200, 6559100 y 6515010:

```

Normal
  mean      =      10.9333
  sigma     =      4.8849
Kolmogorov-Smirnov
  data points      30
  ks stat          9.26e-002
  alpha            5.e-002
  ks stat(30,5.e-002) 0.242
  p-value          0.938
  result           DO NOT REJECT
Anderson-Darling
  data points      30
  ad stat          0.498
  alpha            5.e-002
  ad stat(5.e-002) 2.49
  p-value          0.749
  result           DO NOT REJECT

```

Figura 12: Bondad de ajuste 6521200

```

Normal
  mean      =      12.9
  sigma     =      5.12087
Kolmogorov-Smirnov
  data points      30
  ks stat          0.136
  alpha            5.e-002
  ks stat(30,5.e-002) 0.242
  p-value          0.585
  result           DO NOT REJECT
Anderson-Darling
  data points      30
  ad stat          0.363
  alpha            5.e-002
  ad stat(5.e-002) 2.49
  p-value          0.885
  result           DO NOT REJECT

```

Figura 13: Bondad de ajuste 6559100

Normal		
mean	=	15.9667
sigma	=	6.87257
Kolmogorov-Smirnov		
data points		30
ks stat		0.179
alpha		5.e-002
ks stat(30,5.e-002)		0.242
p-value		0.257
result		DO NOT REJECT
Anderson-Darling		
data points		30
ad stat		0.525
alpha		5.e-002
ad stat(5.e-002)		2.49
p-value		0.721
result		DO NOT REJECT

Figura 14: Bondad de ajuste 6515010

La interpretación de los resultados se basa en el *p-value*, el cual corresponde con la máxima probabilidad del error tipo I al ajustar los datos a la distribución evaluada. Un pequeño valor de *p-value* indica que la muestra es altamente improbable y, por lo tanto, el ajuste debe rechazarse. Por el contrario, un valor alto de *p-value* indica que la muestra es probable y, por lo tanto, el ajuste de los datos de la distribución no debería rechazarse. Por lo tanto, cuanto más alto sea el valor de *p-value*, más probable es que el ajuste sea apropiado. El nivel de significación utilizado para todas las pruebas de bondad de ajuste se establece, por defecto, a $\alpha=0,05$. El valor de α indica del riesgo de equivocarse cuando se evalúa H_0 . Por ejemplo, para un α de 0,05 y dado que la hipótesis nula (H_0) sea verdadera se espera que la misma sea rechazada un 5% de las veces que se ejecute la prueba.

Para el contraste de hipótesis de la distribución normal se ha hecho un análisis de KS y AD. Para que no se rechace la hipótesis nula (H_0), se tiene que cumplir la condición $p\text{-value} > \alpha$. Esto significa que la hipótesis nula sigue la distribución especificada (en este caso la normal)

Como se puede apreciar en los resultados de bondad de ajuste, se cumple la condición en todos los casos. Por ejemplo, el repuesto 6515010. Se ha calculado un *p-value* de KS de 0,257 y un *p-value* de AD de 0,721. En ambos casos el valor es mayor que $\alpha=0,05$.

Por tanto, no se rechaza la hipótesis nula, ya que el *p-value* es mayor $\alpha=0,05$.

Según estas dos pruebas, no se rechaza la hipótesis nula H_0 de los tres repuestos, ya que cumple la condición de error de tipo I $p\text{-value} > \alpha$. Esto significa que la hipótesis nula (H_0) sigue los datos de la distribución especificada que es la distribución normal.

En resumen, no se rechaza la hipótesis, pero tenemos la salvedad que no coincide la desviación estándar muestral con la “sigma” que aparece en el contraste de hipótesis. Esto es debido a que el software considera una desviación poblacional, aunque la diferencia es mínima.

4.2.3 Plazo de Entrega

Para el plazo de entrega se considera un plazo de aprovisionamiento fijo de 3 semanas. El plazo de aprovisionamiento es común para todos los productos, ya que la empresa fábrica internamente las placas de maniobra.

Al tener un plazo de aprovisionamiento fijo sin desviación consideramos que $\sigma_L = 0$. Por tanto, la fórmula mencionada en apartado 2.4.2. cambiaría de la siguiente manera:

$$\sigma_{Dl} = \sqrt{\bar{L} \cdot \sigma_D^2 + \bar{D}^2 \cdot \sigma_L^2}$$
$$\sigma_{Dl} = \sigma_D \sqrt{\bar{L}}$$

Como se puede observar, la variabilidad ya solo depende de la desviación de la demanda y el plazo de aprovisionamiento.

4.2.4 Nivel de Criticidad y Nivel de Servicio

Según (García *et al.*, 2004), el stock de seguridad dependerá de la incertidumbre de la distribución estadística durante el plazo de entrega y el nivel de servicio al cliente que se quiera incorporar al sistema. Debido a la cantidad de clientes que tiene la empresa, se decide calcular el nivel de stock seguridad combinando el nivel de servicio objetivo y criticidad de la pieza, teniendo en cuenta la facturación del cliente y prioridad estratégica que le quiera dar la empresa.

Para poder obtener la criticidad de las piezas, se decide hacer un análisis de modo de fallo y criticidad (FMECA, *Failure Mode Effect and Criticality Analysis*). Este método sirve para identificar las piezas más críticas.

El FMECA es una extensión del FMEA (Análisis Modal de Fallos y Efectos) y CA (*Criticality Analysis*). Es un método para identificar los modos de fallos potenciales de un producto o proceso el cual, aunque usado en este ejemplo no es objeto del presente trabajo, para una mayor comprensión de dichos métodos se puede consultar (Crespo, 2007). De esta manera se va obtener la criticidad de cada pieza, para calcular el stock de seguridad.

A modo de ejemplo se va a detallar del producto MH-H (Montaplatos con accionamiento Hidráulico) un análisis de modo de fallo. Este elevador constituye una gama de montacargas diseñados para el transporte vertical de cargas pequeñas, pensado para facilitar múltiples aplicaciones dentro del sector de servicio e industria. Para mejor entendimiento de la tabla, vamos a describir los grandes subsistemas del elevador, criterios usados para la probabilidad de la ocurrencia, la severidad y la probabilidad de la no detección de los fallos.

Central Hidráulica

Su función es generar la presión adecuada en el aceite hidráulico para impulsar el cilindro. Central hidráulica compacta formada por tanque de aceite, grupo moto-bomba y bloque distribuidor con elementos de seguridad y control.

Cuadro de maniobra

Elemento que controla el funcionamiento del elevador montaplatos. Maniobra de tipo automática simple mediante placa de relés, en corriente continua rectificada a 24 V.

Sistema suspensión

Cilindro de embolo a tracción mediante un sistema de poleas de desvío situado en la parte superior del hueco y en el propio cabezal de cilindro. La suspensión (2:1) es mediante cables de 5 mm. de diámetro, composición 6x37+1, carga de rotura 14.0 KN (1770 N/mm).

Instalación eléctrica

Botoneras incorporadas en las puertas de planta. Instalación eléctrica premontada y lista para ser enchufada, interconexionando las distintas plantas mediante mangueras eléctricas provistas de conectores.

Instalación hidráulica

Canalización necesaria para realizar la instalación hidráulica entre cilindro y central hidráulica. Tubería flexible de doble malla metálica y sometidas individualmente a un ensayo de presión con los racores montados, cuyo resultado aparece marcado.

Se establecen los valores de la probabilidad de ocurrencia, severidad y probabilidad de la no ocurrencia de los fallos según la experiencia de los operarios y en algunos datos históricos que había de ciertas piezas. A continuación, se detallan las tablas con sus respectivos rangos y criterios establecidos.

Probabilidad Ocurrencia		Determinación de Severidad		Probabilidad de no Detección	
Criterio	Probabilidad	Criterio	Índice	Criterio	Probabilidad
Improbable	1 - 2	Muy leve	1 - 2	Escasa	1 - 2
Baja	3 - 4	leve	3 - 4	Poca	3 - 4
Probable	5 - 6	Moderada	5 - 6	Media	5 - 6
Alta	7 - 8	Alta	7 - 8	Alta	7 - 8
Muy probable	9 - 10	Muy alta	9 - 10	Muy alta	9 - 10

Tabla 7: Criterios Ocurrencia, Severidad y no Detección

A continuación, se muestra la tabla de FMECA de los problemas más comunes que suelen ocurrir al montaplatos modelo MH-H:

#	Subsistema	Componente y función		Fallo funcional	Modo de fallo	Efecto fallo	O	S	D	NPR
		Grupo de Válvulas	Motor							
1	Central hidráulica	Regular presión de aceite al cilindro	Tira aceite al tanque	Grupo no esta bien regulado	No llega aceite al cilindro.	6	3	2	36	
		Accionar bomba	Motor no funciona	Válvulas en mal estado	No llega aceite al cilindro.	3	6	2	36	
		Impulsar aceite	Bomba no funciona	Acoplamiento	No actúa la bomba.	2	8	3	48	
2	Cuadro maniobra	Alimentar botoneras y placa maniobra	No hay corriente	Sin alimentación externa	Maniobra sin alimentación	1	2	1	2	
		Recibir señal de botonera y controlar movimiento de cabina	Fallo eléctrico	Transformador defecto	Maniobra sin alimentación	2	5	1	10	
		Transmitir fuerza del cilindro	Cabina no sube	Placa defectuosa	Maniobra sin alimentación	1	6	1	6	
3	Sistema suspensión	Transformar presión de aceite en energía mecánica	Fallo del cilindro	Mal conectada	Equipo no funciona	2	9	4	72	
		Conexión eléctrica entre botonera y maniobra	Fallo eléctrico	Polea deteriorada	Equipo no funciona	3	6	5	90	
		Mandos que modifican el comportamiento de la maniobra	No llega aceite	No llega aceite	No hay tracción al cable de acero	2	5	1	10	
4	Instalación eléctrica	Fluido para poder impulsar cilindro	Fuga de aceite	Escabe deteriorado	Cilindro no se mueve	3	7	3	63	
		Conexión eléctrica entre botonera y maniobra	Fallo eléctrico	Fugas de aceite	Cabina pierde nivel de planta	4	5	2	40	
		Mandos que modifican el comportamiento de la maniobra	Fallo eléctrico	Cilindro gripado	Cilindro ni sube ni baja	1	8	3	24	
5	Circuito hidráulico	Fluido para poder impulsar cilindro	Fuga de aceite	Mal cableado	Maniobra no recibe llamadas correctas	5	7	6	210	
		Conexión eléctrica entre botonera y maniobra	Fallo eléctrico	Cable deteriorado	Maniobra no recibe llamadas	3	8	2	48	
		Mandos que modifican el comportamiento de la maniobra	Fallo eléctrico	Botonera defectuosa	Maniobra no recibe llamadas	2	6	4	48	
6	Circuito hidráulico	Fluido para poder impulsar cilindro	Fuga de aceite	Botonera mal cableada	Maniobra no recibe llamadas correctas	3	5	5	75	
		Conexión eléctrica entre botonera y maniobra	Fallo eléctrico	Válvula bloqueada	Cilindro no se mueve	2	5	3	30	
		Mandos que modifican el comportamiento de la maniobra	Fallo eléctrico	Tubería obstruida	Cilindro no se mueve	1	4	3	12	
7	Circuito hidráulico	Fluido para poder impulsar cilindro	Fuga de aceite	Escape por rotura de tubería	No hay suficiente aceite para mover el cilindro	1	4	2	8	

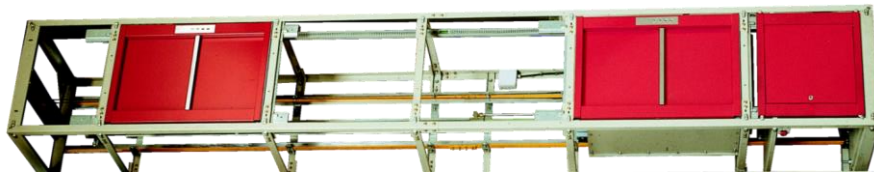


Tabla 8: FMECA MH-H

Para determinar la criticidad del conjunto de los componentes de una unidad o equipo, se utiliza una matriz de ocurrencia por severidad del fallo mejor conocida como matriz de criticidad. La matriz tiene un código de colores que permite identificar el riesgo relacionado con los valores que se han elegido en la tabla de FMECA anteriormente presentada. A continuación, se muestra una matriz con los rangos de criticidad establecidos según ocurrencia y severidad:

Ocurrencia	9 - 10					
	7 - 8					
	5 - 6		2		1	
	3 - 4			4	2	
	1 - 2	1	2	6	5	1
		1 - 2	3 - 4	5 - 6	7 - 8	9 - 10
		Severidad				

Tabla 9: Matriz Criticidad

Se observan los distintos tonos de color que se han establecido según la ocurrencia y severidad del componente. El color verde sería una criticidad “baja”, el color amarillo “mediana” y rojo “alta”.

Para la valoración que se le va a dar a cada pieza, se acuerda con la empresa tres rangos de nivel de criticidad:

Rango	Nivel de Criticidad
A	0,99
B	0,95
C	0,8

Tabla 10: Rango Criticidad

En la tabla 8 se pueden ver los rangos de nivel de criticidad siendo “A” un nivel de criticidad 99%, “B” 95% y “C” 80%. Una vez establecido la criticidad mediante la matriz de criticidad y los niveles de criticidad, asignamos la criticidad a cada pieza de repuesto en este trabajo fin de máster. En la siguiente se detalla la criticidad de las piezas.

Pieza de repuesto	Criticidad
6521200	A
6559100	A
6515010	A

Tabla 11: Criticidad piezas repuesto

Se contempla que la pieza de repuesto 6521200 (PLACA DE CONTROL MP/11) se ha asignado la criticidad “A”. La placa ha obtenido una criticidad alta debido a la ocurrencia de 2 y severidad de 9 que se estableció en el análisis de modo de fallo y criticidad del montaplatos hidráulico MH-H. Esta combinación de ocurrencia y severidad, deja el caso del modo de fallo “placa defectuosa” en el campo

rojo con criticidad alta. El valor crítico “A” resulta lógico, puesto que una placa defectuosa deja en fuera de servicio el equipo completo y no hay posibilidad de ponerlo en marcha sin cambiar la placa. Los datos de las demás placas se han obtenido de otros análisis de modo de fallo y criticidad que nos ha proporcionado la empresa.

Nivel de Servicio

Una vez establecidos los rangos y niveles de criticidad, se valora el nivel de servicio objetivo (NS Objetivo) que se quiere asignar según facturación/demanda de cada pieza de repuesto. De esta manera se obtendrá el nivel de servicio combinado (NS Combinado). El nivel de servicio combinado se obtiene multiplicando el valor de nivel de criticidad y el nivel objetivo asignado. teniendo en cuenta

A continuación, se enlistan los niveles de servicio, de servicio, de objetivo y la demanda porcentual del año pasado de las piezas de cada cliente:

Pieza repuesto	Cliente	NS Objetivo	Criticidad	Nivel Criticidad	% Demanda	NS Combinado	NS Ponderado
6521200	ThyssenKrupp	0,99	A	0,99	30%	0,9801	0,940005
	Schindler	0,99	A	0,99	25%	0,9801	
	OTIS	0,95	A	0,99	20%	0,9405	
	Kone	0,95	A	0,99	10%	0,9405	
	Resto clientes	0,8	A	0,99	15%	0,792	
6559100	ThyssenKrupp	0,99	A	0,99	20%	0,9801	0,936045
	Schindler	0,99	A	0,99	25%	0,9801	
	OTIS	0,95	A	0,99	25%	0,9405	
	Kone	0,95	A	0,99	15%	0,9405	
	Resto clientes	0,8	A	0,99	15%	0,792	
6515010	ThyssenKrupp	0,99	A	0,99	30%	0,9801	0,9306
	Schindler	0,99	A	0,99	20%	0,9801	
	OTIS	0,95	A	0,99	20%	0,9405	
	Kone	0,95	A	0,99	10%	0,9405	
	Resto clientes	0,8	A	0,99	20%	0,792	

Tabla 12: Nivel de Servicio Clientes

En la tabla 10 se puede ver el nivel objetivo asignado a los clientes para cada pieza de repuesto. Se decide asignar a los clientes con un volumen de compra relativamente grande, asignar niveles objetivo de 80% a 99%. El nivel de criticidad de todas las piezas es de 99% debido a la criticidad “A” que fueron asignados a estas piezas. El nivel de servicio ponderado se calcula mediante el porcentaje de la demanda y el nivel de servicio combinado.

Se puede ver la pieza de repuesto 6521200, que se va a emplear para varios clientes. De esta manera se puede asignar a cada cliente un nivel de servicio objetivo y dependiendo de la demanda de los repuestos, calcular el nivel de servicio medio ponderado. En este caso obtenemos para la pieza de repuesto mencionada un nivel de servicio ponderado de 0,940005. Esto quiere decir, que se pretende alcanzar que la pieza de repuesto que aproximadamente el 94% de las veces no haya rotura del stock de seguridad.

4.3. Determinación del Stock de Seguridad y Punto de Pedido

Con los datos que se han obtenido sobre las 3 piezas de repuesto, procedemos a calcular el stock de seguridad SS y el punto de pedido s usando las formulas anteriormente mencionadas. Para ello se aplica una hoja de cálculo de Excel que ha sido modificada de (Crespo, 2014), que asocia la criticidad de cada pieza teniendo en cuenta el nivel de criticidad, nivel de servicio objetivo, nivel de servicio combinado, la demanda de cada cliente y se calcula el nivel de seguridad ponderado. A continuación, se muestra el resultado de los cálculos:

Pieza repuesto	Cliente	NS Objetivo	Criticidad	Nivel Criticidad	% Demanda	NS Combinado	NS Ponderado	Z	D (m)	$\sigma(D)$	L (m)	$\sigma(L)$	$\sigma(D\&L)$	SS	$\approx SS$	s	$\approx s$	Precio	Coste SS	
6521200	ThyssenKrupp	0,99	A	0,99	30%	0,9801	0,9400005	1,55	10,93	4,96	0,75	0,00	4,30	6,68	7,00	14,88	15,00	181,78 €	1.272,46 €	
	Schindler	0,99	A	0,99	25%	0,9801														
	OTIS	0,95	A	0,99	20%	0,9405														
	Kone	0,95	A	0,99	10%	0,9405														
	Resto clientes	0,8	A	0,99	15%	0,792														
6559100	ThyssenKrupp	0,99	A	0,99	20%	0,9801	0,936045	1,52	12,90	5,20	0,75	0,00	4,50	6,86	7,00	16,53	17,00	182,85 €	1.279,95 €	
	Schindler	0,99	A	0,99	25%	0,9801														
	OTIS	0,95	A	0,99	25%	0,9405														
	Kone	0,95	A	0,99	15%	0,9405														
	Resto clientes	0,8	A	0,99	15%	0,792														
6515010	ThyssenKrupp	0,99	A	0,99	30%	0,9801	0,9306	1,48	15,97	6,99	0,75	0,00	6,05	8,96	9,00	20,94	21,00	206,70 €	1.860,30 €	
	Schindler	0,99	A	0,99	20%	0,9801														
	OTIS	0,95	A	0,99	20%	0,9405														
	Kone	0,95	A	0,99	10%	0,9405														
	Resto clientes	0,8	A	0,99	20%	0,792														

Tabla 13: Stock de Seguridad y Punto de Pedido

En la hoja de Excel (Tabla 12) se pueden ver los valores de Nivel de Servicio Objetivo (NS Objetivo) previamente establecido y el valor porcentual de facturación según cada cliente. Con estos valores se calcula primero el Nivel de Servicio Combinado (NS Combinado) teniendo en cuenta el Nivel de Criticidad y el Nivel Servicio Objetivo. El Nivel de Servicio Ponderado se calcula con el Nivel de Servicio Combinado y teniendo en cuenta el porcentaje de la demanda de cada cliente.

Una vez obtenido el nivel de servicio ponderado (NS Ponderado) de la pieza de repuesto, se calcula el factor de seguridad Z . Mediante los valores calculados de la demanda media mensual \bar{D} , la desviación típica de demanda $\sigma(\bar{D})$ y el plazo de aprovisionamiento L fijado en 3 semanas que equivale a 0,75 meses, se calcula la variabilidad conjunta de la demanda de piezas durante el tiempo de aprovisionamiento $\sigma(\bar{D}\&L)$. Calculado la variabilidad conjunta se multiplica con el factor de seguridad Z y obtenemos el stock de seguridad SS . El punto de pedido s se obtiene multiplicando la demanda media por el plazo de entrega sumando el stock de seguridad.

Los resultados se redondean los valores hacia arriba del stock de seguridad SS y el punto de pedido s , ya que tenemos unidades enteras y no es posible tener por ejemplo 1,78 repuestos.

Se contempla que se calcula un factor de seguridad de 1,55 para la pieza de repuesto 6521200 debido al factor de seguridad ponderado de 0,940005. En combinación con la variabilidad conjunta se calcula un stock de seguridad de 6,68 piezas, que redondeamos hacia 7. En este caso vamos a tener un valor de 1272,46 € en stock de seguridad para evitar una ruptura del stock. El punto de pedido se debería hacer cuando lleguemos a 14,88 piezas de stock, que sería en realidad 15 piezas.

Un factor de seguridad parecido se calcula para la pieza de repuesto 6559100. Se obtiene un factor Z de 1,52 y un stock de seguridad de 6,86 que redondeamos a 7. El punto de pedido se sitúa a 16,53 piezas, por tanto, hay que fijar el punto de pedido a 17 piezas. El capital que se tiene que invertir para el stock de seguridad es de 1279,95 €.

Comparando la pieza de repuesto 6515010 con el resto de piezas, resulta que es la que tiene el stock de seguridad más alto, teniendo el factor de seguridad más bajo con 1,48. Esto viene debido a la demanda media y desviación típica que son más altas que el resto de piezas. Se contempla que el stock de seguridad llega a 8,96 piezas que redondeamos a 9. Se calcula unos costes de almacenamiento de 1860,30 €, que son los más altos.

Los resultados evaluados se dan por bueno y se aplicarán para estas piezas.

4.3.1 Impacto Económico del Stock de Seguridad

El 18/09/2017 se hace un control en el almacén de postventa para comparar la cantidad del stock de seguridad de las piezas de repuesto que se tiene actualmente y stock de seguridad propuesto según nuestros cálculos. Para ver el impacto económico del stock de seguridad, seleccionamos los diez subsistemas más importantes de todos los productos que tiene la empresa. El trabajo se ha centrado en estudiar los diez subsistemas con sus respectivos componentes más importantes y a valorar la criticidad, stock de seguridad y el punto de pedido. Estos subsistemas están compuestos por las siguientes piezas de repuesto que se detallan en la siguiente tabla. Hemos aplicado el mismo procedimiento para el resto de componentes.

Pieza repuesto	Precio	≈ SS	SS real	Valor SS	Diferencia
6521200	181,78 €	7,00	17,00	3.090,26 €	1.817,80 €
6559100	182,85 €	7,00	15,00	2.742,75 €	1.462,80 €
6515010	206,70 €	9,00	15,00	3.100,50 €	1.240,20 €
2034151	284,60 €	4,00	10,00	2.846,00 €	1.707,60 €
2195102	86,00 €	9,00	20,00	1.720,00 €	946,00 €
6518700	246,45 €	8,00	5,00	1.232,25 €	-739,35 €
2015301	228,96 €	5,00	9,00	2.060,64 €	915,84 €
6545100	204,98 €	6,00	8,00	1.639,84 €	409,96 €
6521100	75,86 €	4,00	30,00	2.275,80 €	1.972,36 €
6518840	205,22 €	8,00	11,00	2.257,42 €	615,66 €
				Total	10.348,87 €

Tabla 14: Impacto económico Stock de Seguridad almacén Postventa

Se contempla que hay más piezas de repuesto en stock de seguridad que se calcularon anteriormente. Las piezas 6521200 y 6559100 tienen prácticamente el doble de cantidad y, por tanto, están muy por encima ya los costes de almacenamientos serán muy elevados. La pieza 6515010 tiene 5 piezas más que el stock de seguridad calculado. La pieza 6518700 es la única de las diez alistadas, que está por debajo del stock de seguridad recomendado. En almacén se dispone de 5 piezas, 3 piezas menos de lo recomendado. En un aumento temporario de la demanda de esta pieza, puede haber rotura de stock y se tendría que esperar hasta que se reponga la pieza. Este daño obviamente sería por una venta no realizada o también por el desgaste comercial frente al cliente. Finalmente se puede ver que la estimación de ahorro es de 10348,87 €.

Para mejor visualización de la cantidad de piezas de repuesto que hay de stock de seguridad, se añade un gráfico de columnas agrupadas.

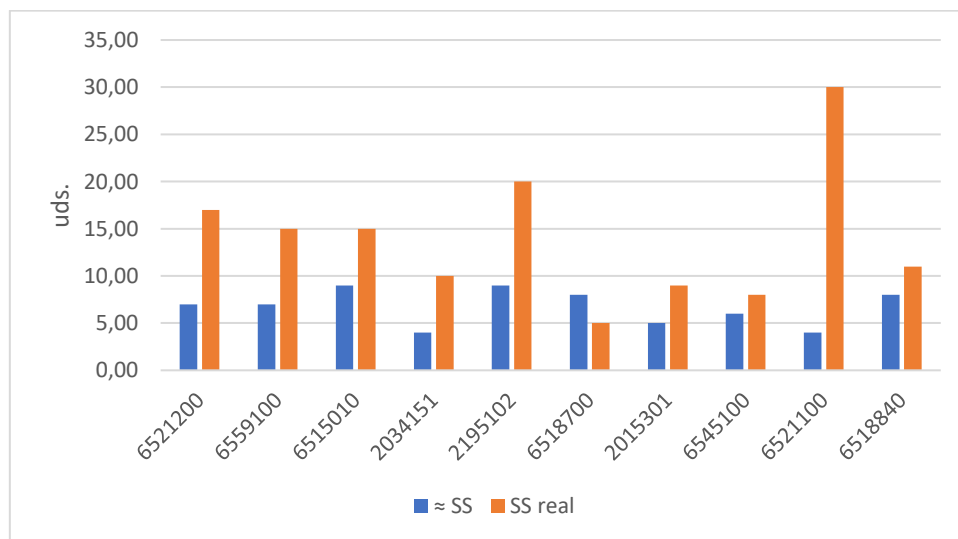


Figura 15: Stock de Seguridad de Almacén

Se puede decir, que prácticamente todas las piezas de repuesto que estén por encima del stock de seguridad recomendado, por tanto, se está desperdiciando capital al tener un stock de seguridad sobredimensionado.

Se estima que existe alrededor de 200 piezas de repuesto importantes, teniendo en cuenta que se estudiaron 10 piezas y el impacto económico fue de 10348,87 €, se puede hacer una idea del impacto que supondría las 200 piezas. No nos atrevemos hacer un análisis, pero entendemos que tendrá un impacto positivo y merece ser estudiado con más detalle.

4.4. Tamaño del Lote

Puesto que se había mencionado que se iba a seguir un modelo de inventario de revisión continua tipo (s, Q), se procede van a determinar los parámetros necesarios para calcular el tamaño de lote de pedido.

Se decide usar un modelo de revisión continua porque las piezas anteriormente mencionadas en este Trabajo Fin de Máster son de fabricación propia (placas de maniobra) y se pretende evitar la saturación de la fábrica con múltiples pedidos, ya que las placas se fabrican bajo demanda en el taller eléctrico. Otro motivo por qué utilizaremos este modelo de revisión es la monitorización de las piezas por el personal encargado del almacén de repuestos.

Hasta ahora se ha calculado principalmente el Stock de Seguridad (SS) y el punto de pedido (s). Es decir, sabemos que se tiene hacer pedido cuando baje el stock hasta el punto de pedido s.

No obstante, también es necesario saber el lote de pedido de piezas que se tiene que hacer. Para ello, suele ser muy frecuente usar el cálculo de lotes óptimos de pedido del modelo Wilson. De esta manera se puede hacer una aproximación del lote a pedir.

Según (López, 2014), el lote económico de pedido Q^* es el lote que minimiza los costes totales de gestión de stocks. Para calcular matemáticamente el lote económico de pedido se emplea la denominada fórmula de Wilson. Dicha fórmula se deduce de derivar e igualar a 0 la función de los costes totales de stocks, con la finalidad de hallar su mínimo. Según esta fórmula:

$$Q^* = \sqrt{\frac{C_p \cdot D \cdot 2}{C_a}}$$

Q^* = Lote Óptimo

C_p = Coste emisión de un pedido (u.m./pedido)

C_a = Coste almacenaje unitario (u.m./unidad)

D = Demanda anual

Según (Larrañeta, Onieva y Lozano, 1988), la demanda del periodo D es usualmente un año. Por tanto, vamos a coger la demanda anual de las tres piezas de repuesto. Es decir, de junio 2016 hasta junio 2017.

Para el cálculo de Q^* se estima un coste de almacenaje C_a de 15 €/unidad y coste de emisión de pedido C_p de 20 €/pedido porque es de fabricación interna.

Pieza Repuesto	D	C_p	C_a	Q^*	$\approx Q^*$
6521200	165	20 €	15 €	20,98	21,00
6559100	169	20 €	15 €	21,23	22,00
6515010	211	20 €	15 €	23,72	24,00

Tabla 15: Lote óptimo de pedido

Se contempla que el lote óptimo de pedido, dependiendo de la pieza de almacén, se encuentra algo por encima de 20 unidades. Para la pieza 6521200 se ha calculado un lote de 21, para 6559100 un lote de 22 y para 6515010 un lote de 24 piezas. A continuación, se demuestra un gráfico del modelo de inventario (s, Q).

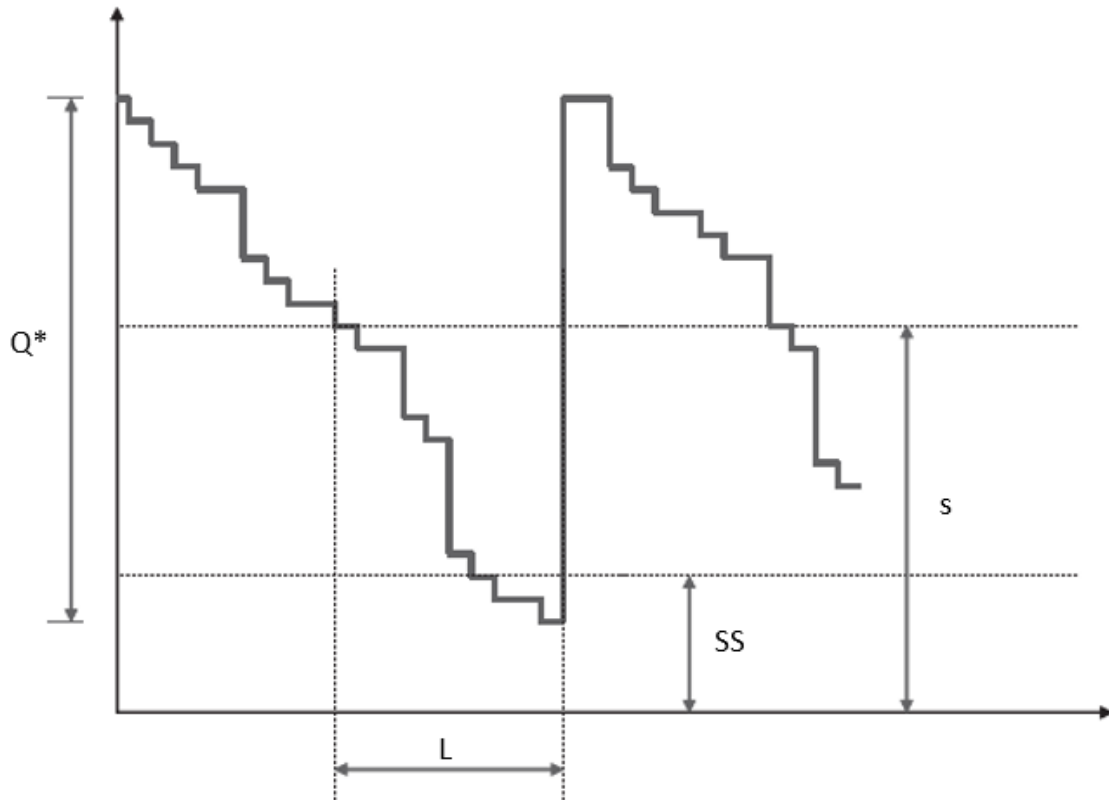


Figura 16: Modelo inventario revisión continua (s, Q)

Con todos los datos calculados, se puede interpretar mejor el gráfico. Se observa que, por ejemplo, se calculó anteriormente para la pieza de repuesto 6521200 el valor del stock de seguridad (SS) de 7 piezas. El plazo de entrega (L) se estableció en tres semanas. El punto de pedido (s) se hace a partir de 15 piezas, esto significa que si el valor del stock baja hasta el punto de pedido (s), se hará un pedido de una cantidad Q , que serían 21 piezas.

5 CONCLUSIÓN

Este Trabajo Fin de Máster surge de la idea de desarrollar un sistema de gestión de repuestos para un almacén de postventa que proporciona un servicio a clientes, por tanto, es el objetivo general del trabajo. Este objetivo se verá cumplido si se han logrado todos los objetivos específicos descritos en el capítulo 1.1. A continuación se analizará si se han cumplidos estos objetivos.

En la revisión bibliográfica del segundo Capítulo se hace un resumen de los trabajos sobre la gestión de piezas de repuesto en entornos similares al problema objeto de estudio que son relativamente actuales y que, directa o indirectamente tengan algo que ver con el objetivo general. Se describe que el problema de un inventario de piezas de repuesto se está estudiando desde diferentes puntos de vista y que es de gran importancia. Además, se sacan las conclusiones de los trabajos revisados y se expone la información más importante al lector del estado de arte. Por tanto, se puede dar por resuelto el primer objetivo específico planteado.

En el Capítulo 3 se hace una recapitulación de los sistemas clásicos de gestión de stock. Se describen los modelos típicos de inventario, la demanda de stock y el stock de seguridad. A lo largo de los diferentes apartados que componen el proyecto, se ha facilitado una visión general de los procedimientos existentes para la correcta selección de método que existen acerca de la gestión de inventarios de piezas de repuesto y también de los sistemas clásicos de gestión de stock que han servido de base para la metodología utilizada en el trabajo. Con esto queda cubierto el segundo objetivo específico en el Capítulo 1.1.

En tercer lugar, en el Capítulo 4, se detalla el procedimiento de un sistema de gestión de inventario en servicio postventa. Se describe como calcular la demanda y posteriormente comprobar si la distribución elegida es la correcta. Se define el plazo de entrega y se describe el punto de pedido. A continuación, se muestra el método de obtener el nivel de criticidad y nivel de servicio y se hace una evaluación del impacto económico. Con esto se cumple el tercer objetivo específico, en el que se plantea un desarrollo de un procedimiento para calcular el stock de seguridad relacionado con la criticidad de la pieza y el nivel de servicio de cliente. Con esta propuesta se cubre un vacío existente en la bibliografía revisada.

Alcanzados los tres objetivos específicos propuestos al inicio del proyecto en el Capítulo 1.1, se puede llegar a la conclusión que se ha cumplido el objetivo general del Trabajo Fin de Máster.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Alrabghi, A. y Tiwari, A. (2016) «A novel approach for modelling complex maintenance systems using discrete event simulation», *Reliability Engineering and System Safety*. Elsevier, 154, pp. 160-170. doi: 10.1016/j.ress.2016.06.003.
- Altay, N., Rudisill, F. y Litteral, L. A. (2008) «Adapting Wright's modification of Holt's method to forecasting intermittent demand», *International Journal of Production Economics*, 111(2), pp. 389-408. doi: 10.1016/j.ijpe.2007.01.009.
- Bacchetti, A. y Saccani, N. (2012) «Spare parts classification and demand forecasting for stock control: Investigating the gap between research and practice», *Omega*. Elsevier, 40(6), pp. 722-737. doi: 10.1016/j.omega.2011.06.008.
- Basten, R. J. I. y van Houtum, G. J. (2014) «System-oriented inventory models for spare parts», *Surveys in Operations Research and Management Science*. Elsevier Ltd, 19(1), pp. 34-55. doi: 10.1016/j.sorms.2014.05.002.
- Boylan, J. E. y Syntetos, A. A. (2007) «The accuracy of a Modified Croston procedure», *International Journal of Production Economics*, 107(2), pp. 511-517. doi: 10.1016/j.ijpe.2006.10.005.
- Chelbi, A. y At-Kadi, D. (2001) «Spare provisioning strategy for preventively replaced systems subjected to random failure», *International Journal of Production Economics*, 74(1-3), pp. 183-189. doi: 10.1016/S0925-5273(01)00125-6.
- Cortés, P. et al. (2008) *Métodos cuantitativos y organización de la producción : problemas resueltos*. Madrid : Universidad de Sevilla.
- Crespo, A. (2007) *The maintenance management framework : models and methods for complex systems maintenance*. London : Springer.
- Crespo, A. (2014) «Asignatura de Mantenimiento. Master en Organización Industrial y Gestión de Empresas ETSI (Universidad de Sevilla)». Sevilla, pp. 79-87.
- Croston, J. D. (1972) «Forecasting and Stock Control for Intermittent Demands», *Journal of the Operational Research Society*, 23(3), pp. 289-303. doi: 10.1057/jors.1972.50.
- Dombrowski, U. y Malorny, C. (2017) «Service Planning as Support Process for a Lean After Sales Service», *Procedia CIRP*. The Author(s), 64, pp. 324-329. doi: 10.1016/j.procir.2017.03.080.
- Durán, O., Macchi, M. y Roda, I. (2016) «On the relationship of spare parts inventory policies with Total Cost of Ownership of industrial assets», *IFAC-PapersOnLine*. Elsevier B.V., 49(28), pp. 19-24. doi: 10.1016/j.ifacol.2016.11.004.
- Eaves, A. H. C. y Kingsman, B. G. (2004) «Forecasting for the ordering and stock-holding of spare parts», *Journal of the Operational Research Society*, 55(4), pp. 431-437. doi: 10.1057/palgrave.jors.2601697.
- García, J. P. et al. (2004) *Gestión de stocks de demanda independiente*. Valencia : Universidad Politécnica de Valencia.
- HIDRAL S.A. (2017) *Company Hidral*. Disponible en: <http://www.hidral.com/contenidos/company/company.html> (Accedido: 17 de septiembre de 2017).
- Huiskonen, J. (2001) «Maintenance spare parts logistics: Special characteristics and strategic choices», *International Journal of Production Economics*, 71(1-3), pp. 125-133. doi: 10.1016/S0925-5273(00)00112-2.
- van Jaarsveld, W., Dollevoet, T. y Dekker, R. (2015) «Improving spare parts inventory control at a repair shop», *Omega (United Kingdom)*. Elsevier, 57, pp. 217-229. doi: 10.1016/j.omega.2015.05.002.

- Kabir, A. B. M. Z. y Al-Olayan, A. S. (1996) «A stocking policy for spare part provisioning under age based preventive replacement», *European Journal of Operational Research*, 90(1), pp. 171-181. doi: 10.1016/0377-2217(94)00246-0.
- Kennedy, W. J., Wayne Patterson, J. y Fredendall, L. D. (2002) «An overview of recent literature on spare parts inventories», *International Journal of Production Economics*, 76(2), pp. 201-215. doi: 10.1016/S0925-5273(01)00174-8.
- Larrañeta, J. C., Onieva, L. y Lozano, S. (1988) *Métodos modernos de gestión de la producción*. [1a ed., 1a reimp.]. Madrid : Alianza.
- López, R. (2014) *Logística de aprovisionamiento : Comercio y marketing*. Madrid : Paraninfo.
- Mjirda, A. *et al.* (2016) «On the joint optimization of the periodic preventive maintenance and the spare parts inventory problem», *IFAC-PapersOnLine*. Elsevier B.V., 49(12), pp. 881-885. doi: 10.1016/j.ifacol.2016.07.886.
- Muckstadt, J. A. (2005) *Analysis and Algorithms for Service Parts Supply Chains*. doi: 10.1007/b138879.
- Nguyen, T. P. K., Yeung, T. G. y Castanier, B. (2013) «Optimal maintenance and replacement decisions under technological change with consideration of spare parts inventories», *International Journal of Production Economics*. Elsevier, 143(2), pp. 472-477. doi: 10.1016/j.ijpe.2012.12.003.
- Panagiotidou, S. (2014) «Joint optimization of spare parts ordering and maintenance policies for multiple identical items subject to silent failures», *European Journal of Operational Research*. Elsevier B.V., 235(1), pp. 300-314. doi: 10.1016/j.ejor.2013.10.065.
- Paterson, C. *et al.* (2011) «Inventory models with lateral transshipments: A review», *European Journal of Operational Research*. Elsevier B.V., 210(2), pp. 125-136. doi: 10.1016/j.ejor.2010.05.048.
- Rego, J. R. Do y Mesquita, M. A. De (2015) «Demand forecasting and inventory control: A simulation study on automotive spare parts», *International Journal of Production Economics*. Elsevier, 161, pp. 1-16. doi: 10.1016/j.ijpe.2014.11.009.
- Snyder, R. (2002) «Forecasting sales of slow and fast moving inventories», *European Journal of Operational Research*, 140(3), pp. 684-699. doi: 10.1016/S0377-2217(01)00231-4.
- StatFit (2017) *Statistical Software*. Disponible en: <http://www.geerms.com/> (Accedido: 17 de septiembre de 2017).
- Turrini, L. y Meissner, J. (2017) «Spare parts inventory management: new evidence from distribution fitting», *European Journal of Operational Research*. Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.ejor.2017.09.039.
- Vaughan, T. S. (2005) «Failure replacement and preventive maintenance spare parts ordering policy», *European Journal of Operational Research*, 161(1), pp. 183-190. doi: 10.1016/j.ejor.2003.06.026.
- Wang, W. (2012) «A stochastic model for joint spare parts inventory and planned maintenance optimisation», *European Journal of Operational Research*. Elsevier B.V., 216(1), pp. 127-139. doi: 10.1016/j.ejor.2011.07.031.
- Zahedi-Hosseini, F., Scarf, P. y Syntetos, A. (2016) «Joint optimisation of inspection maintenance and spare parts provisioning: A comparative study of inventory policies using simulation and survey data», *Reliability Engineering and System Safety*. Elsevier Ltd, (February), pp. 1-11. doi: 10.1016/j.ress.2017.03.007.