

PROPUESTA DE UN MODELO DE CONTROL DE INVENTARIO DE
REPUESTOS PARA UNA EMPRESA MANUFACTURERA DE ALIMENTOS DEL
NORTE DEL VALLE DEL CAUCA.

ÁNGELA MARÍA MONSALVE SALAZAR
KATLEEN ALEXANDRA OSPINA OSORIO



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA ACADÉMICO INGENIERÍA INDUSTRIAL
ZARZAL
2018

PROPUESTA DE UN MODELO DE CONTROL DE INVENTARIO DE
REPUESTOS PARA UNA EMPRESA MANUFACTURERA DE ALIMENTOS DEL
NORTE DEL VALLE DEL CAUCA.

ÁNGELA MARÍA MONSALVE SALAZAR
KATLEEN ALEXANDRA OSPINA OSORIO

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR A TÍTULO DE
INGENIERO INDUSTRIAL

DIRECTOR. Msc. CARLOS ALBERTO ROJAS TREJOS



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA ACADÉMICO INGENIERÍA INDUSTRIAL
ZARZAL
2018

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

AGRADECIMIENTOS

A Dios en primer lugar, por sus abundantes bendiciones a lo largo de este camino, por permitirme mantenerme firme en mi sueño, por los días llenos de obstáculos, porque me dio la sabiduría, el entendimiento y la fuerza para continuar con este proceso de formación.

En segundo lugar a toda mi familia, en especial a mi mamá Martha L. Osorio, quien con su gran esfuerzo y trabajo decidió seguir conmigo este rumbo llamado Ingeniería Industrial, gracias infinitas porque nunca me dejó sola, siempre estuvo para mí pese a las dificultades que se nos presentaban, pues unas veces sentía no poder más pero estaba ella que me impulsaba a seguir con mi gran sueño, llenándome de energía y valentía así como ella ha asumido la vida con mucha entrega y dedicación.

A mis hermanos Jorge Antonio, Jorge Luis y Antony que con su cariño me dieron a entender que siempre estarán ahí presente para cuando los necesite.

A mi pareja por haber sido partícipe de esta etapa de mi existencia, estar conmigo en las buenas y en las malas, por su amor incondicional, su paciencia y por ser mi complemento perfecto, la compañía y la entrega absoluta en mi camino.

A la Universidad del Valle sede Zarzal y todos sus docentes por haber interferido en mi formación como profesional, dándome las mejores herramientas, consejos y experiencias para emprender mi camino en la vida laboral. En especial a mi asesor de tesis, MSC en Ingeniería industrial Carlos Alberto Rojas Trejos quien nos acompañó en este proyecto de inicio a fin compartiendo su conocimiento, brindándonos su apoyo y sabios consejos. También al Ing. Carlos Humberto Millán quien hizo un acompañamiento muy importante en la realización de nuestro trabajo de grado, mil gracias por el tiempo y la paciencia.

También a todas las personas que compartieron conmigo este largo proceso, mis compañeros, del paso por la universidad quedan recuerdos gratos en mi memoria. Especialmente quiero darle las gracias a Mayra Arenas, Yuliana Castillo y Tatiana

Salazar quienes me acompañaron en este camino y fueron parte esencial en este proceso, contribuyendo a que éste finalizara exitosamente e hicieron de esta etapa universitaria un trayecto de vivencias que nunca olvidare, más que compañeras somos amigas, mil gracias.

A mi compañera de trabajo de grado Ángela María Monsalve Salazar, que sin su dedicación, compromiso y esfuerzo no hubiera sido lo mismo, gracias a su apoyo y conocimiento hicieron de esta experiencia una de las más especiales.

Katleen Alexandra Ospina Osorio

Agradezco a Dios y al Universo por conspirar y darme la oportunidad de cumplir un logro más en mi vida, por darme la salud, paciencia y todo lo que se requiere en este camino.

A mi madre por todo su apoyo durante este proceso, por su incondicionalidad y sobre todo por su amor.

A nuestro director Carlos Alberto Rojas, por dedicarnos parte de su tiempo y compartirnos sus conocimientos.

A la Universidad del Valle y a los docentes que hicieron parte de mi proceso académico y de los cuales aprendí mucho.

A mi compañera Katleen Alexandra Ospina, por ser un excelente persona, comprometida, por todo el esfuerzo y dedicación en la realización de este trabajo.

A mis amigos y compañeros de estudio, por todo lo compartido, de cada uno de ellos me llevo grandes aprendizajes.

Ángela María Monsalve Salazar

DEDICATORIA

Dedico este logro a mi mamá, quien gracias a su gran esfuerzo, sus sabios consejos, sus palabras de aliento y amor me impulsaban siempre a salir adelante por más obstáculos que se presentaban, gracias infinitas por su dedicación y entrega para sacarme adelante, gracias porque con su ayuda he logrado llegar hasta este punto y sé que es un orgullo para ella, porque este triunfo no es solo mío sino de las dos.

A Dios elevo mis oraciones porque sin él nada sería posible, por guiar mis pasos, sostenerme y bendecirme con su infinito amor.

A mis hermanos Jorge Luis, Jorge Antonio y Antony con el ánimo de inculcar en ellos la responsabilidad y esfuerzo que se debe de tener a la hora de cumplir los objetivos que nos tracemos en la vida. A mi familia en general por su apoyo, comprensión y amor a lo largo de este camino.

Katleen Alexandra Ospina Osorio

A Dios por prestarme la vida y darme la fortaleza para llevar a cabo este proyecto.

A mi madre por todo su esfuerzo para que yo pudiera realizar esta carrera, por su comprensión, por enseñarme a ser una mujer responsable, comprometida. Dedico este logro a ella porque además de ser mi madre ha sido una gran compañera en este camino que se llama vida.

Ángela María Monsalve Salazar

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	10
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
2. OBJETIVOS	18
2.1 OBJETIVO GENERAL	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3. JUSTIFICACIÓN	19
4. MARCO REFERENCIAL	21
4.1 MARCO TEÓRICO	21
4.1.1 Técnicas de clasificación de inventario	21
4.1.2 Sistemas de pronóstico de demanda	25
4.1.3 Sistema de control de inventario	33
4.2 ESTADO DEL ARTE	35
4.3 MARCO CONCEPTUAL	42
5. DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA ACTUAL DE INVENTARIO DE REPUESTOS DE LA EMPRESA CASO DE ESTUDIO.	47
6. CLASIFICACIÓN ABC MULTICRITERIO	55
6.1 GENERALIDADES	55
6.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO ANALYTIC HIERARCHY PROCESS	56
6.2.1 Selección de Criterios Relevantes	56
6.2.2 Establecimiento de las preferencias relativas – Vector Prioridad	56

6.2.3	Análisis de consistencia	60
6.2.4	Clasificación de repuestos por peso de cada criterio	61
6.2.4.1	Clasificación de repuesto por costo unitario	61
6.2.4.2	Clasificación de repuesto por consumo	62
6.2.4.3	Clasificación de repuesto por Rotación	63
6.2.5	Peso final del repuesto	64
6.3	APLICACIÓN DEL MÉTODO MATRIZ DE DOS CRITERIOS DE FLORES	66
7.	SISTEMAS DE PRONÓSTICOS	68
7.1	PATRÓN DE DEMANDA DE LOS REPUESTOS.	68
7.2	IMPLEMENTACIÓN DE PRONÓSTICOS	69
7.2.1	Pronósticos para repuestos con demanda errática	69
7.2.2	Pronósticos para repuestos con demanda no errática	80
7.3	SEÑAL DE RASTREO	80
8.	DETERMINACIÓN DE LA POLITICA DE CONTROL	82
8.1	PARÁMETROS	82
8.2	PROPUESTA DE CONTROL DE INVENTARIOS Y CTR ASOCIADO	84
8.2.1	Metodología de la selección del sistema	85
8.2.1.1	Sistema de Revisión Continuo (s, S)	85
8.2.1.2	Sistema de Revisión Periódico (R, S)	88
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
10.	BLIBLIOGRAFÍA	96

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Cantidad de solicitudes urgentes elaboradas	15
Tabla 2. Suma del valor del inventario	16
Tabla 3. Suma del valor de consumo de los rodamientos	17
Tabla 4. Matriz de clasificación de dos criterios	23
Tabla 5. Clasificación resultante de la combinación	24
Tabla 6. Sistemas de pronósticos y el patrón de demanda observado	26
Tabla 7. Condiciones especiales para almacén de repuestos	47
Tabla 8. Estrategia de liberación	52
Tabla 9. Resultado de encuesta	57
Tabla 10. Media geométrica	58
Tabla 11. Matriz de comparación de criterios	58
Tabla 12. Matriz normalizada	59
Tabla 13. Matriz Normalizada y Vector prioridad	59
Tabla 14. Análisis de consistencia	61
Tabla 15. Resumen del peso de los repuestos (costo unitario)	62
Tabla 16. Resumen del peso de los repuestos (Consumo)	63
Tabla 17. Resumen del peso de los repuestos (Rotación)	64
Tabla 18. Resumen del peso final de los repuestos	65
Tabla 19. Matriz de resultado de clasificación de dos criterios de Flores.	66
Tabla 20. Matriz de resultado de 2 criterios de Flores et al. (1992)	67
Tabla 21. Repuestos clase A	67
Tabla 22. Coeficiente de variación de los repuestos	69
Tabla 23. Pronósticos de promedio móvil – Repuesto 500015	70

Tabla 24. Resultados Iteraciones de n	71
Tabla 25. Pronósticos de suavización exponencial simple-Repuesto 500015	72
Tabla 26. Pronósticos de suavización exponencial doble	74
Tabla 27. Método de Croston – Repuesto 500015	76
Tabla 28. Combinación lineal 3 - Repuesto 500015	78
Tabla 29. Comparación de ECM para los repuestos erráticos	79
Tabla 30. ECM de cada sistema de pronósticos	80
Tabla 31. Señal de rastreo – Repuesto 500015	81
Tabla 32. Costo anual de llevar o mantener inventario.	83
Tabla 33. <i>Calculo de valores con sistema (s, S) para repuestos clase A</i>	87
Tabla 34. Calculo de valores con sistema (R, S) para repuestos clase A	90
Tabla 35. Comparación de CTR y nivel de servicio	90
Tabla 36. Comparación CTR	92

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Demanda perpetua, estable o uniforme.	27
Figura 2. Demanda con tendencia creciente.	27
Figura 3. Demanda con tendencia decreciente.	28
Figura 4. Combinación de demanda uniforme con estacional o periódica	28
Figura 5. Demanda con tendencia intermitente.	29
Figura 6. Estructura básica de la gestión de almacén de repuestos.	48
Figura 7. Gestión almacén de repuestos.	50
Figura 8. Proceso de solicitud de repuestos.	52
Figura 9. Clasificación ABC con técnica AHP	65
Figura 10. Patrón de demanda- ítems A	69
Figura 11. Demanda y pronóstico promedio móvil	71
Figura 12. Demanda y pronóstico suavización exponencial simple	73
Figura 13. Demanda y pronóstico suavización exponencial doble	75
Figura 14. Demanda y pronóstico Método de Croston	77
Figura 15. Demanda y pronóstico combinación de pronósticos	79

INTRODUCCIÓN

La gestión de los inventarios es uno de los temas más complejos en Logística. Uno de sus principales problemas es su administración, dado que siempre hay demasiado de lo que no se vende o consume, y muchos productos agotados de lo que sí se vende; lo cual se debe a la falta de información precisa y oportuna sobre la demanda en el punto de consumo (Pérez et al., 2013). De igual forma Benavides y Yangana (2015) afirman que la gestión de inventarios es el segundo proceso logístico más importante dentro de una organización, después del transporte, ya que comprende una gran porción de activos involucrando grandes cantidades de dinero en su mantenimiento, pedidos pendientes o ventas perdidas que deterioran los niveles de servicio que se pueden generar a raíz de una pobre gestión de los mismos.

En el entorno empresarial se conoce la gestión de inventario como el proceso encargado de asegurar la cantidad de productos adecuados en la organización, de tal manera que se pueda asegurar la operación continua de los procesos de comercialización de productos a los clientes; es decir, asegurar que las operaciones de manufactura y distribución no se detengan, cumpliendo con las promesas de entrega de productos a los clientes (Zapata, 2014).

La administración de inventarios es una de las actividades logísticas en donde se encuentran más posibilidades de reducir costos para las empresas, mediante una mejor gestión de los materiales almacenados y su transporte (Sallenave, 2002). Una buena administración en este campo permite reducir la cantidad de elementos requeridos en los almacenes, así como aumentar los niveles de cumplimiento de los pedidos de clientes internos y externos (Chopra y Meindl, 2008).

De acuerdo con Ballou (2004) “los inventarios son acumulaciones de materias primas, provisiones, componentes, trabajo en proceso y productos terminados que aparecen en numerosos puntos a lo largo del canal de producción y de logística de una empresa.”(p.326). Lo anterior permite determinar que existen diferentes productos que son mantenidos en las empresas de manera que se asegure el funcionamiento de la misma, un ejemplo claro de esto son los repuestos.

Según Porras y Dekker (2008) el control de inventario de piezas de repuesto es esencial para muchas organizaciones, ya que el exceso de inventario conduce a altos costos de inversión y la falta de existencias puede tener un gran impacto en el rendimiento de las operaciones. Además, Cortes y Morales (2012) mencionan que para mantener en funcionamiento las máquinas de forma continua se debe prestar atención a los repuestos que la componen ya que si existen faltantes de repuestos, estos pueden generar un paro en la producción hasta que el ítem llegue a la planta y sea reemplazado. Esto puede tener como consecuencias la pérdida de la venta o el retraso en la entrega del producto, generando un impacto negativo en el “good will” de la empresa o desconfianza por parte del cliente.

En la industria colombiana se evidencia falencias en áreas como almacenes de repuestos o insumos. Así lo demuestran Briceño y Oñate (2007) que al analizar los estados financieros de algunas empresas representativas, se encontraron con grandes inversiones en los almacenes de repuestos respecto a la inversión total en los equipos con una tendencia al crecimiento, lo que lo convierte en un punto crítico dentro de una adecuada administración.

De acuerdo a la importancia que tiene la gestión de inventario de repuestos en las organizaciones y el impacto que se presenta en los costos de mantenimiento de inventario y los costos por faltantes. Este trabajo tiene como finalidad proponer un modelo de control de inventario de repuestos para una familia de repuestos representativa de una empresa de alimentos del norte del Valle del Cauca. Para ello

la metodología utilizada se fundamenta en primer lugar en la realización de un diagnóstico del sistema actual de gestión y control de inventario de la empresa caso de estudio; en segundo lugar se hará una clasificación ABC multicriterio para saber cuáles son los ítems más importantes o críticos para la empresa. Posteriormente se construirá un modelo de pronóstico para simular la demanda y así finalmente seleccionar la política de control de inventarios más adecuada.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El control de inventarios es uno de los temas más complejos y apasionantes de la logística y de la planeación y administración de la cadena de abastecimiento. Uno de los problemas típicos, por ejemplo, es la existencia de excesos y de faltantes de inventarios: *“Siempre tenemos demasiado de lo que no se vende o consume, y muchos agotados de los productos que más rotan.”* (Vidal, 2010)

El mismo autor menciona que

El mantenimiento y manejo de los inventarios es costoso para las organizaciones; puede representar, junto con el sistema de almacenamiento, entre un 15 y un 30 por ciento de los costos totales de logística. Sin embargo, el mantenimiento de los inventarios puede representar ahorros por economías de escala en otros costos, como son transporte, compra y producción, incentivando la reducción de los precios de los productos (Vidal, 2010, p.4).

Un problema existente en la gestión de inventarios es el control de los repuestos, ya que estos ítems presentan una demanda errática, es decir una demanda difícil de predecir debido a que tienen grandes variaciones a lo largo del tiempo (Vidal, 2010).

Según Kennedy, Patterson & Fredendall (2002) el inventario de repuestos se diferencia de otros inventarios de fabricación de varias maneras. En primer lugar, las funciones son diferentes. Por ejemplo, el trabajo en proceso (WIP, por sus siglas en inglés) existe con el fin de suavizar las irregularidades en el flujo de producción. Por otra parte, los inventarios de productos terminados proporcionan una fuente de productos para la entrega oportuna a los clientes. La función de los inventarios de piezas de repuesto, sin embargo, existen para ayudar a un personal de

mantenimiento a conservar el equipo en buenas condiciones de funcionamiento. Las piezas de repuesto no son productos intermedios o finales para ser vendidos a un cliente.

De igual forma, Insuasty (2015), reitera que a diferencia de los productos terminados o las materias primas, los cuales son impulsados por los procesos de producción y la demanda de los clientes, los repuestos se mantienen en stock para apoyar las operaciones de mantenimiento o las fallas repentinas de los equipos.

Los inventarios de repuestos e insumos son un recurso estrictamente necesario para la productividad y eficiencia de la empresa, donde su verdadera razón de ser dentro de la misma es mantener o aumentar la disponibilidad de equipos productivos y no llegar a incurrir en largas paradas que directamente son grandes pérdidas, que contrastadas con el valor del inventario son mucho mayores (Briceño y Oñate, 2007).

Navas (2010), afirma que el control de inventarios de partes y repuestos en Colombia para empresas de manufactura se caracteriza por la inapropiada inversión en materiales, poca rotación de inventarios, alto valor de los inventarios debido al almacenamiento de ítems que son obsoletos o cantidades de compra excesivas, bajo nivel de servicio, entre otros. Por otra parte, Vidal (2010) menciona que los repuestos presentan demandas bajas, incluso con observaciones de demanda cero por cinco años, lo que causa mucha dificultad de control.

En la empresa caso estudio, se pudo evidenciar que existen algunos de los problemas comunes del control de inventarios de repuestos.

En primer lugar, la empresa tiene actualmente un inventario de repuestos valorado en \$9, 981, 125,651 pesos m/cte.

También existen faltantes de repuestos. Esta no disponibilidad de repuestos incurre en algunos paros de maquinaria que pueden afectar la producción. La siguiente tabla muestra la cantidad de solicitudes urgentes elaboradas por el planeador de repuestos desde Mayo de 2016 hasta Mayo de 2017 (ver Tabla 1).

Tabla 1. Cantidad de solicitudes urgentes elaboradas

Cuenta de Material		
Años	Fe. Entrega	Total
2016	may	24
	jun	13
	jul	25
	ago	30
	sep	30
	oct	61
	nov	24
	dic	27
Total 2016		234
2017	ene	15
	feb	25
	mar	17
	abr	2
	may	2
Total 2017		61
Total general		295

Fuente: Sistema de información SAP, empresa caso estudio, 2017.

Otros inconvenientes que hacen necesario o justifican la realización de un proyecto en torno al inventario de repuestos en la empresa caso de estudio son:

Artículos de gran valor de inventario; compras de artículos basados en criterios de lotes no económicos, ni cálculos adecuados de los parámetros de reposición y almacenamiento de repuestos; fijación de stocks mínimos y máximos sin criterios

técnicos apropiados, es decir, se realiza de forma empírica, sin tomar en cuenta la dinámica operativa de los equipos.

Según lo anterior, en la organización caso de estudio no existe una metodología que determine la cantidad económica de pedido, ni un cálculo del punto de pedido, además, no existe un stock de seguridad para repuestos de alta rotación, tampoco existe un criterio que determine el momento en el cual se debe realizar la solicitud del pedido.

Los rodamientos es una categoría que se creó dado que existe un elevado inventario de los mismos con un valor de \$292, 616,563 en el valor total de repuestos (Tabla 2), además, de ser el repuesto más consumido de los últimos 18 meses, con un valor total de consumo de \$951, 205,417 (Tabla 3), ítems que son objeto de estudio en el desarrollo de este proyecto y posteriormente replicarlo a otros tipo de repuestos. Cabe mencionar también que los faltantes de dichos repuestos ocasionan paros en las máquinas, por ende pueden ocasionar paradas en la producción.

Tabla 2. Suma del valor del inventario

Etiquetas de fila	Suma del valor del inventario	Porcentaje del valor del inventario
Repuestos	9,669,235,929	96.88%
Rodamientos	292,616,563	2.93%
Suministros	19,273,159	0.19%
Total general	9,981,125,651	100.00%

Fuente: Sistema de información SAP, empresa caso estudio, 2017.

Tabla 3. Suma del valor de consumo de los rodamientos

Rp.Rodamientos/Acces		
2016		
1		69,314,342
2		66,387,270
3		43,052,295
4		58,313,805
5		44,624,402
6		25,874,809
7		26,604,433
8		28,044,933
9		21,686,049
10		68,448,397
11		69,899,381
12		102,947,269
Total 2016		625,197,385
2017		
1		56,665,026
2		70,308,806
3		81,569,432
4		52,867,147
5		48,109,488
6		16,488,133
Total 2017		326,008,032
Total	Rp.Rodamientos/Acces	951,205,417

Fuente: Sistema de información SAP, empresa caso estudio, 2017.

Con base en lo anterior, se deriva la siguiente pregunta de investigación, ¿Cómo proponer una política de control de inventarios de repuestos en una empresa manufacturera de alimentos del Norte del Valle del Cauca que contribuya a minimizar el costo total relevante?

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer un modelo de control de inventario de repuestos para una empresa manufacturera de alimentos del norte del Valle del Cauca que contribuya a la disminución del costo total relevante asociado.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un diagnóstico del sistema de gestión y control de inventario actual de repuestos en la empresa caso estudio.
- Realizar una clasificación ABC multicriterio para el inventario de repuestos de la empresa caso de estudio.
- Desarrollar un modelo de simulación de pronóstico para los repuestos clasificados como A, a partir de un análisis histórico de la demanda de los mismos.
- Definir una política de control de inventario de repuestos que permita determinar la frecuencia de revisión, los instantes de pedido y el tamaño de las órdenes.

3. JUSTIFICACIÓN

Vidal (2010) afirma que las causas relacionadas con la necesidad de mantener inventarios no pueden ser eliminadas totalmente, la mejor alternativa entonces es la aplicación de sistemas óptimos de gestión y control de inventarios para responder a dichas causas.

Por lo tanto, para hacer frente al problema de desbalanceo de inventarios se sugiere diseñar e implementar estrategias adecuadas de control con la utilización de sistemas de pronósticos, que permitan estimar con precisión el patrón, el promedio y la variabilidad de la demanda de cada ítem que se mantenga en inventario y la clasificación ABC para establecer prioridades de administración y diferenciación de sistemas de control de ítems para cada categoría (Vidal, 2010). Además, se debe analizar la información básica para determinar las políticas de control de inventario, teniendo en cuenta la complejidad que se presenta debido a las variaciones en el comportamiento de la demanda como en el caso de algunos ítems que tienen demanda cero durante los meses evaluados (Cortes y Morales, 2012)

La generación de un nuevo modelo de gestión y control de inventarios que contemple aspectos y criterios aplicados por la compañía como lo son la rotación y el costo de mantenimiento, junto a técnicas de análisis estadístico propios de la academia, permite a la empresa hacer una administración adecuada de sus existencias.

El control de inventario de piezas de repuesto es esencial para muchas organizaciones, ya que el exceso de inventario conduce a altos costos de inversión y la falta de existencias puede tener un gran impacto en el rendimiento de las operaciones, (Porrás & Dekker, 2008). La función de los inventarios de piezas de repuesto, ayuda al personal de mantenimiento para mantener el equipo en

condiciones de funcionamiento (Kennedy et al., 2002). Además, la aplicación de modelos de inventarios adecuados para estos ambientes puede generar ahorros significativos en costos y mejorar los niveles de servicio.

Igualmente; el control de inventario de piezas de repuesto juega un papel cada vez más importante en la gestión de operaciones moderna. La disyuntiva es clara: por un lado, un gran número de piezas de repuesto genera una gran cantidad de capital, mientras que poco inventario puede dar lugar a un mal servicio al cliente o acciones de emergencia extremadamente costosas (Aronis, 2004).

Con base en lo anterior, se puede decir que el diseño de un sistema de control de inventario de repuesto es importante ya que evita paros y pérdidas en la producción por falta de los mismos, además, conduce a reducir los altos costos de inversión y pérdidas, mejorando así el rendimiento de las operaciones y el nivel de servicio.

Por lo tanto este trabajo de grado pretende proponer un modelo de control de inventarios de repuestos que incluya las principales teorías académicas con relación al desarrollo del mismo y contribuya a determinar la frecuencia de revisión de inventario de cada uno de los ítems, el momento en que se debe realizar una orden y los tamaños de pedido correspondiente, generando un costo total del inventario mínimo.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 MARCO TEÓRICO

El propósito de este capítulo es presentar aquellos conceptos teóricos relevantes para la ejecución del presente proyecto. Se iniciará exponiendo las técnicas de clasificación de inventarios, posteriormente se continuará presentando los sistemas de pronósticos y por último se culminará con los sistemas de control.

4.1.1 Técnicas de clasificación de inventario. El Análisis ABC es una de las técnicas de clasificación de inventario comúnmente empleada (Yu, 2011). Aunque el análisis de ABC se caracteriza por su facilidad de uso, ha sido criticado por su enfoque exclusivo. Otros criterios como el tiempo de entrega, la uniformidad, la obsolescencia, la durabilidad, el costo de inventario y los requerimientos de tamaño de pedido también han sido reconocidos como críticos para la clasificación del inventario (Wan Lung, 2007). Debido a esto han surgido otras técnicas de clasificación que permiten la incorporación de más criterios, estas técnicas son llamadas multi-criterio.

Clasificación ABC.

Esta clasificación se basa en el principio de Pareto o la regla 80/20, que emplea la siguiente regla de oro: “pocos vitales y muchos triviales” y este se vale de un único criterio para realizar dicha clasificación. Normalmente, los artículos se clasifican en función del valor de las ventas anuales, que es el producto de la demanda anual del ítem (D_i) y el precio unitario promedio (v_i). Los artículos de clase A son relativamente pocos en número pero constituyen una cantidad relativamente grande de valor de uso anual, mientras que los artículos de clase C son relativamente grandes en número, pero constituyen una cantidad relativamente pequeña de valor de uso anual. Los elementos

entre las dos clases anteriores constituyen la clase B, aunque algunos estudios afirman que no hay necesidad de incluir esta clase en el análisis (Ramanathan, 2006, p.695).

Según Vidal (2010) para definir cuáles ítems deben formar parte de cada clase (A, B ó C), se escoge un porcentaje de mayor a menor, de acuerdo al orden secuencial dado por la mayor utilización de los ítems. Usualmente, los ítems clase A constituyen del 10 al 20% de los primeros ítems dentro de la clasificación, contando por el 60% al 80% del valor total de las ventas anuales; los ítems clase B constituyen entre un 20 y un 40% del total de ítems, contando por entre el 20% al 30% restante del valor anual; y los ítems clase C, usualmente los más numerosos, constituyen el resto, contando por una pequeña parte del total de la inversión en inventario, la cual usualmente no pasa del 10% del total de ventas de la empresa. Algunos autores difieren en la proporción de ítems clase B y C, como por ejemplo Wild (como se citó en Vidal, 2010) recomienda una distribución alrededor de los siguientes valores:

Ítems Clase A = 10% del total de ítems, con alrededor del 65% del total de ventas;
Ítems Clase B = 20% del total de ítems, con alrededor del 25% del total de ventas;
Ítems Clase C = 70% del total de ítems, con alrededor del 10% del total de ventas.

En ocasiones es altamente recomendable y necesario hacer uso de criterios adicionales que permitan realizar una diferenciación más efectiva de las existencias (Castro, Vélez y Catro, 2011). Por ello a continuación se mencionan algunas de las técnicas ABC multicriterio existentes.

Clasificación ABC multicriterio. El análisis multicriterio se apoya en diferentes métodos tales como la matriz de dos criterios de Flores, Olson & Dorai (1992), la aplicación del Proceso de Análisis Jerárquico (Analytic Hierarchy Process - AHP) a problemas de inventarios planteada por Partovi y Burton (1993), el modelo de optimización lineal alternativo de Wan Lung (2007), entre otros.

Matriz de dos criterios de Flores: El ABC multicriterio aplicado a los inventarios (*Multi Criteria Inventory Classification*, MCIC) tiene sus inicios con el trabajo de Flores & Whybark (1986) quienes años después clasifican a 47 SKU con base en cuatro criterios: costo promedio unitario, volumen de ventas, factor crítico y *lead time*.

Flores et al. (1992) Desarrolla una herramienta llamada “Matriz de dos criterios de Flores” en la que se toma los ítems, dos criterios y se evalúan por separado, mediante ABC tradicional, para posteriormente ubicarlos dentro de una matriz, reclasificándolos nuevamente y obtener la clasificación ABC bajo dos criterios

La Tabla 4 presenta la matriz base de clasificación, en la que se refleja la combinación de la importancia entre los dos criterios elegidos.

Tabla 4. Matriz de clasificación de dos criterios

		SEGUNDO CRITERIO		
		A	B	C
PRIMER CRITERIO	A	AA	AB	AC
	B	BA	BB	BC
	C	CA	CB	CC

Fuente: (Flores et al., 1992)

Esta matriz significa que una vez clasificado cada uno de los ítems por dos criterios se debe reclasificar cuál de ellos clasifico como A por el primer y segundo criterio, cual es A en el primero y B en el segundo, así sucesivamente hasta agruparlos en cada una de las casillas de la matriz anterior. Posterior a ello, todos los ítems que ingresaron en la matriz como AA, AB y BA se reubican como los nuevos ítems tipo A, los AC, BB y CA se ubican como los nuevos ítems tipo B y por ultimo aquellos que quedaron dentro del BC, CB y CC conforman los ítems tipo C según la metodología de la comparación de dos criterios de Flores, como se ilustra en la siguiente tabla:

Tabla 5. Clasificación resultante de la combinación

CLASIFICACIÓN	COMBINACIÓN
A	AA
	BA
	AB
B	BB
	AC
	CA
C	CC
	CB
	BC

Fuente: (Flores et al., 1992)

Proceso analítico jerárquico (AHP) de Partovi & Burton (1993): El AHP consiste en asignar una medida escalar reflejando la importancia de los artículos; esta aplicación tiene un componente de subjetividad basado en la experiencia de los intervinientes en la administración y control del inventario, pero a través de las diversas aplicaciones ha demostrado su consistencia y solidez matemática.

La técnica del AHP consta de los siguientes pasos sucesivos:

- Se construye la matriz de preferencias entre todas las alternativas con respecto de cada uno de los criterios.
- Cada matriz de preferencias se normaliza dividiendo cada término de la misma entre la suma de los elementos de su columna respectiva.
- A partir de cada matriz de preferencias, se obtiene el vector de prioridad de cada criterio promediando los términos de cada fila de la matriz normalizada.
- Se construye la matriz de preferencias para los criterios propiamente dichos, se normaliza de la misma forma y se obtiene el vector de prioridad de los criterios en forma semejante a como se obtuvo para cada criterio.
- Se verifica que tanto cada matriz de preferencias correspondiente a cada criterio como la matriz de preferencias de los criterios propiamente dichos no dañe la condición de consistencia establecida por el coeficiente del mismo

nombre. El coeficiente de consistencia para cada criterio debe ser menor o igual que 0.1 Si no cumple con esa condición, hay que determinar el origen de cada inconsistencia, corregirla y realizar de nuevo los pasos hasta que cumpla la condición.

- Por último se calcula el producto entre una matriz formada por todos los vectores de prioridad de cada criterio y el vector de prioridad de los criterios propiamente dichos. El resultado es el vector de prioridad de las alternativas y es el que puede servir de guía para tomar la decisión final respecto de las mismas (Vidal, 2010).

Modelo de optimización lineal alternativo de Wan Lung (2007): Buscando un equilibrio entre las técnicas existentes y su aplicabilidad en el entorno empresarial, Ramanathan (2003) plantea un modelo de optimización lineal ponderado basado en una técnica similar al DEA, donde el mismo modelo genera los pesos ponderados para evitar la subjetividad en su asignación. Sin embargo, debido a que para cada ítem se requiere una función objetivo, la aplicación de este modelo en un ambiente donde existan miles de referencias por evaluar se considera poco práctico.

4.1.2 Sistemas de pronóstico de demanda. El sistema de pronósticos es un elemento clave para el cumplimiento de los objetivos de la organización y para el mejoramiento de su competitividad, ya que de no tomar las decisiones correctas, se puede caer en extremos como el deficiente servicio al cliente, el exceso de inventarios o, peor aún, ambos factores en forma simultánea cuando se presenta el desbalanceo de los inventarios. (Vidal, 2010)

El mismo autor afirma que “los pronósticos de demanda siempre estarán errados. Esto no es sorprendente ya que cuando se pronostica, se está anticipando lo que ocurrirá en el futuro. La clave del éxito de un sistema de gestión de inventarios es, por lo tanto, conocer a fondo los errores del pronóstico y responder a ellos en forma adecuada mediante la utilización de inventarios de seguridad.”

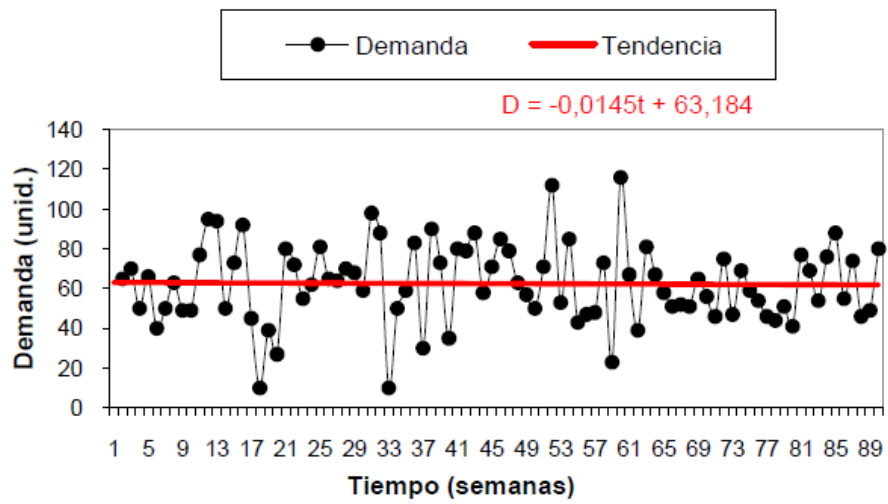
Existen diferentes tipos de pronósticos tales como: promedio móvil, suavización exponencial simple, suavización exponencial doble, método de Winters, pronósticos combinados, método de Croston, entre otros. El sistema de pronósticos a escoger depende en gran parte del patrón de demanda observado a través de datos históricos, aunque se trata de una primera aproximación a la decisión definitiva, ya que ésta siempre depende de la naturaleza del sistema bajo estudio. (Ver Tabla 6)

Tabla 6. Sistemas de pronósticos y el patrón de demanda observado

PATRÓN DE DEMANDA OBSERVADO	SISTEMA DE PRONÓSTICO RECOMENDADO
Perpetua, estable o uniforme	Promedio móvil o suavización exponencial simple
Con tendencia creciente o decreciente	Regresión lineal simple o suavización exponencial doble
Estacional o periódica	Modelos periódicos de Winters
Demanda altamente correlacionadas	Métodos integrados de promedios móviles auto-regresivos (ARIMA)
Errática (Por ejemplo, en ítems clase A de bajo movimiento)	Pronóstico combinado de tiempo entre la ocurrencia de demandas consecutivas y la magnitud de las transacciones individuales (Método de Croston y relacionados)

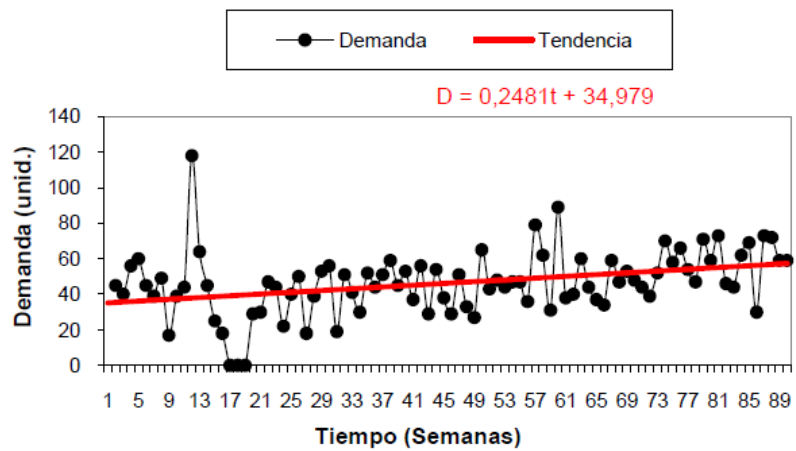
Fuente: (Vidal, 2010)

Es muy importante para el diseño de cualquier sistema de pronósticos construir los gráficos que representan los datos históricos de demanda, ya que su sola observación permite hacerse a una idea de cuál método puede ser el más adecuado. Ver figura 1, 2, 3, 4 y 5.



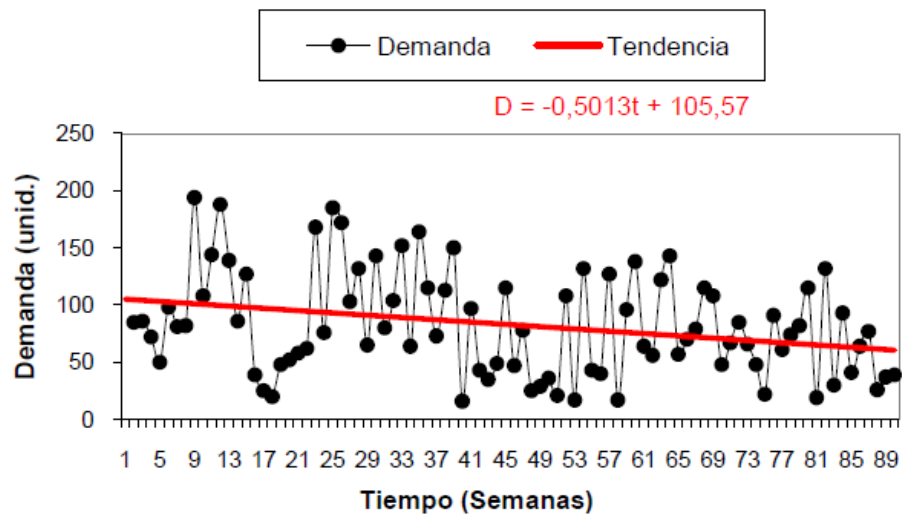
Fuente: (Vidal, 2010)

Figura 1. Demanda perpetua, estable o uniforme.



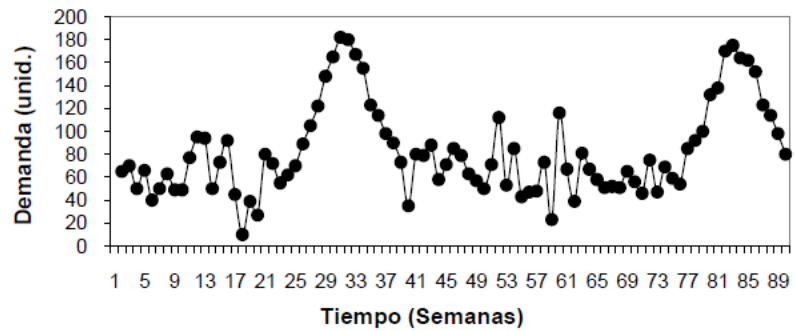
Fuente: (Vidal, 2010)

Figura 2. Demanda con tendencia creciente.



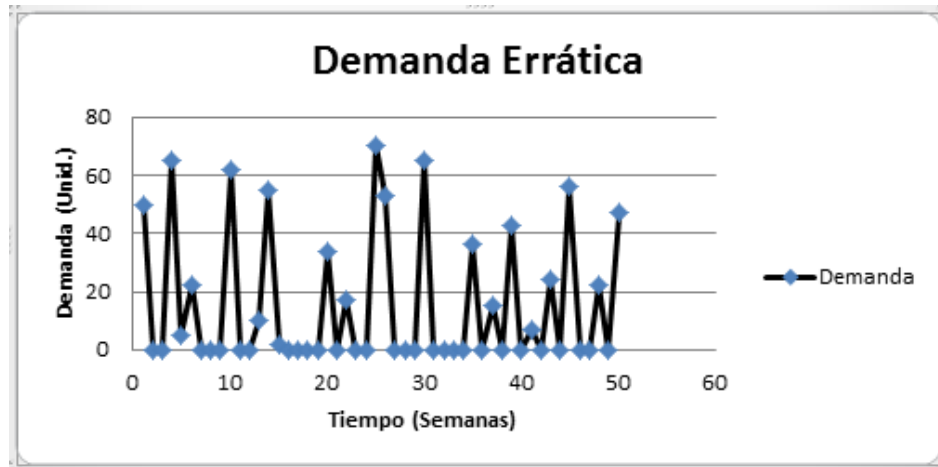
Fuente: (Vidal, 2010)

Figura 3. Demanda con tendencia decreciente.



Fuente: (Vidal, 2010)

Figura 4. Combinación de demanda uniforme con estacional o periódica



Fuente: (Vidal, 2010)

Figura 5. Demanda con tendencia intermitente.

Indicadores de eficiencia de un sistema de pronósticos. Se necesita disponer de errores absolutos, cuadráticos o porcentuales para n períodos, para así obtener el promedio de esos errores sobre dichos períodos. Estos índices se denominan la desviación absoluta media (*Mean Absolute Deviation, MAD*), el error cuadrático medio (*ECM*) (en inglés *Mean Square Error, MSE*) y la desviación absoluta porcentual media (*Mean Absolute Percentage Error, MAPE*). (Vidal, 2010)

Donde:

x_t = Error del pronóstico de la demanda para el periodo t .

$\hat{x}_t$ = Pronóstico de demanda para el periodo t , calculado en algún periodo anterior.

La *MAD* se define como el promedio de los errores absolutos sobre un número determinado de períodos, de la siguiente forma, donde n es el número de períodos:

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n |x_t - \hat{x}_t|}{n} \quad (1)$$

El *ECM* se define como el promedio de los errores cuadráticos sobre un número determinado de períodos, así:

$$ECM = \frac{\sum_{t=1}^n (x_t - \hat{x}_t)^2}{n} \quad (2)$$

Finalmente, la desviación absoluta porcentual media *MAPE* (*Mean Absolute Percentage Error*):

$$MAPE = \frac{100 \times \sum_{t=1}^n \left| \frac{x_t - \hat{x}_t}{x_t} \right|}{n} \quad (3)$$

Promedio Móvil. Heizer y Render, (2004) Mencionan que el promedio móvil consiste en calcular el promedio de los datos del pasado, y este valor será considerado como el valor pronosticado para el próximo. Los promedios móviles son útiles si se puede suponer que la demanda del mercado permanecerá relativamente estable en el tiempo. La fórmula matemática para expresar el promedio móvil puede escribirse como:

$$Promedio\ Movil = \frac{\sum_{t=1}^n S_{t-1}}{n} \quad (4)$$

Dónde:

S_{t-1} = Demanda de los periodos anteriores.

n =Número total de periodos.

Suavización Exponencial Simple. El método de suavización exponencial simple es un sofisticado método de pronóstico de promedios móviles ponderados cuya aplicación sigue siendo muy sencilla e Implica mantener pocos registros de datos históricos (Heizer y Render, 2004). Su fórmula básica se expresa de la siguiente manera:

$$F_t = F_{t-1} + \alpha (A_{t-1} - F_{t-1}) \quad (5)$$

Donde:

F_t = Nuevo pronóstico

F_{T-1} = Pronóstico anterior, es decir, la estimación del parámetro b realizada al final del período $T - 1$.

A_{t-1} = Demanda real en el periodo anterior.

α = Constante de suavización (Inicialmente definida en el intervalo $0 \leq \alpha \leq 1$)

Suavización Exponencial Doble. Según Chopra y Miendl (2008) El sistema de pronósticos de suavización exponencial doble (modelo de Holt) es adecuado cuando se supone que la demanda tiene un nivel y una tendencia (creciente o decreciente) en el componente sistemático pero no estacionalidad. Este método usa tres ecuaciones fundamentales.

Pronóstico incluyendo la tendencia:

$$FIT_t = F_t + T_t \quad (6)$$

La serie suavizada exponencialmente (primera suavización):

$$F_t = \alpha (A_{t-1}) + (1-\alpha)(F_{t-1} + T_{t-1}) \quad (7)$$

El estimado de la tendencia

$$T_t = \beta(F_t - F_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1} \quad (8)$$

Donde:

- F_t = Pronostico exponencialmente suavizado de la serie de datos en el periodo t.
 T_t = Tendencia exponencialmente suavizada en el periodo t.
 A_t = Demanda real en el periodo t
 α = Constante de suavizado para el promedio ($0 \leq \alpha \leq 1$).
 β = Constante de suavizado para la tendencia. ($0 \leq \beta \leq 1$).

Suavizado Exponencial de Winters. Este método genera resultados semejantes a los del suavización exponencial doble, pero tiene la ventaja extra de ser capaz de manejar datos estacionales junto con datos que tengan una tendencia. El modelo de ajuste de tendencia-estacionalidad se construye alrededor del concepto de pronosticar el índice de la demanda real a la tendencia, y luego se desestacionaliza para generar el pronóstico (Ballou, 2004). Las ecuaciones para este modelo son:

$$S_{t+1} = \alpha \left(\frac{A_t}{I_{t-L}} \right) + (1 - \alpha)(S_t + T_t) \quad (9)$$

$$T_{t+1} = \beta(S_{t+1} - S_t) + (1 - \beta)T_t \quad (10)$$

$$I_t = \gamma \left(\frac{A_t}{S_t} \right) + (1 - \gamma)I_{t-L} \quad (11)$$

$$F_{t+1} = (S_{t+1} + T_{t+1})I_{t-L+1} \quad (12)$$

- F_{t+1} = Pronostico corregido en tendencia y estacionalidad
 γ = Constante de ajuste sobre el índice de estacionalidad ($0 \leq \gamma \leq 1$)
 I_t = Índice de estacionalidad para el periodo t.
 L = El tiempo para una estación completa.

Método de Croston. El método de Croston divide los eventos de demanda intermitente en dos. Primero, se pronostica la probabilidad de que ocurra o no una demanda en el período siguiente, de acuerdo con las observaciones anteriores. Seguidamente, se pronostica el posible tamaño de la demanda, de acuerdo con las

observaciones anteriores sin tener en cuenta las demandas iguales a cero. (Vidal, 2010). Este método usa las siguientes ecuaciones:

$$\hat{n}_t = \alpha n_t + (1 - \alpha)\hat{n}_{t-1} \quad (13)$$

$$\hat{Z}_t = \alpha x_t + (1 - \alpha)\hat{Z}_{t-1} \quad (14)$$

Finalmente, el pronóstico al final del período t para el período siguiente se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\hat{x}_t = \frac{\hat{Z}_t}{\hat{n}_t} \quad (15)$$

4.1.3 Sistema de control de inventario. Vidal (2010) Menciona que hay tres preguntas claves a responder en cualquier sistema de control de inventarios:

¿Cada cuánto se debe revisar el inventario?

¿Cuándo se debe emitir una orden de compra?

¿Cuánta cantidad se debe pedir?

Para responder estas preguntas, existen diferentes tipos de sistemas de control de inventario que se pueden utilizar, teniendo en cuenta que existen dos sistemas de revisión; Continuo y Periódico. En donde la notación básica es la siguiente:

s = Punto de reorden o de pedido, o sea el nivel de inventario efectivo para el cual debe emitirse una nueva orden.

Q = Cantidad a ordenar en cada pedido.

R = Intervalo de revisión del nivel de inventario efectivo.

S = Nivel máximo de inventario efectivo hasta el cual debe ordenarse.

Para entrar en más detalle Es necesario definir claramente algunos conceptos sobre el inventario:

- **Inventario a la mano:** Es el inventario que está en el almacén.
- **Inventario neto:** Inventario a la mano - las órdenes pendientes por cumplir. Puede llegar a ser negativo.
- **Inventario efectivo:** Inventario a la mano + ordenes pendientes por llegar ordenes pendientes con clientes – ordenes comprometidas
- **Inventario de seguridad:** Nivel promedio de inventario neto justo antes de llegar un pedido.

Sistema de revisión Continuo. En la revisión continua, como su nombre lo indica, teóricamente se revisa el nivel de inventario en todo momento. Sin embargo, esto no es posible en la práctica. Lo que se hace entonces es revisar el inventario cada vez que ocurre una transacción, es decir, un despacho, recepción, demanda, etc. (Zapata, 2014)

Sistema continuo (s, Q), En este sistema, cada vez que el inventario efectivo es igual o menor al punto de reorden s , se ordena una cantidad fija Q . Se denomina también el “sistema de los dos cajones” (*two-bin system*), ya que se puede implementar físicamente teniendo dos cajones para el almacenamiento de un ítem. (Vidal, 2010).

Sistema continuo (s, S), En este sistema se genera un pedido cuando el nivel del inventario llega al punto de reorden o más bajo, pero en lugar de ordenar una cantidad Q , se ordena una cantidad para que el nivel de inventario efectivo llegue hasta S . Este sistema es denominado sistema min-máx, ya que el inventario se encuentra entre un valor mínimo s y un valor máximo S , para algunos casos el inventario efectivo es menor que s , en este sentido no es válido este sistema. (Vidal, 2010).

Sistema de revisión Periódico. Como su nombre lo indica se realiza cada cierto tiempo (periodos), en los cuales se calcula la cantidad de inventario disponible en

la empresa y cuanta cantidad se requiere para llegar a un nivel de inventario deseado. Esta política se utiliza cuando en la compañía es difícil realizar una revisión continua del inventario o cuando simplemente se define que los niveles de inventario se van a revisar cada determinado tiempo. (Zapata, 2014)

Sistema periódico (R, S), Este sistema se conoce también como el sistema del ciclo de reposición y se encuentra a menudo en organizaciones que no utilizan control sistematizado de los inventarios. Aquí, cada R unidades de tiempo se revisa el inventario efectivo, y se ordena una cantidad tal que este inventario suba al valor máximo S . (Vidal, 2010)

Sistema (R, s, S), Este es una combinación de los sistemas (s, S) y (R, S) y podría considerarse como un sistema híbrido. Consiste en que cada R unidades de tiempo, se revisa el inventario efectivo. Si éste es menor o igual que el punto de reorden s , entonces se emite un pedido por una cantidad tal que el inventario efectivo se recupere hasta un nivel máximo S . Si el nivel de inventario efectivo es mayor que s , no se ordena cantidad alguna hasta la próxima revisión que tendrá lugar en R unidades de tiempo. (Vidal, 2010)

4.2 ESTADO DEL ARTE

El tema de control de inventarios ha sido un tema ampliamente tratado en la literatura, según Chu, Liang & Liao (2008)

El control de inventario ha sido un problema clásico. Un número extremadamente grande de modelos se han desarrollado para resolver los problemas de inventario. Cada modelo utiliza un conjunto particular de hipótesis. En la práctica, las organizaciones tienen diferentes tipos de materiales y repuestos, sin embargo la gestión eficaz de los materiales puede tornarse compleja (p.843).

La importancia de la gestión eficiente de los inventarios ha traído consigo, un crecimiento en la aplicación de métodos y técnicas para administrarlos correctamente (Insuasty, 2015).

Por lo anterior y con el fin de contextualizar el tema a tratar en el presente trabajo de grado, se expondrán investigaciones realizadas sobre el control de inventarios, especialmente de repuestos. En primer lugar se mostrará la revisión de aquellas investigaciones que tratan sobre la clasificación ABC multicriterio, la cual según la literatura es una de las técnicas más utilizadas en las organizaciones ya que permite categorizar los inventarios de acuerdo a diferentes criterios. Se continuará con aquellos autores que realizaron aportes sobre sistemas de pronósticos, profundizando en aquellos estudios que se enfocan en las proyecciones de repuestos. Finalmente, se presentarán aportes al problema control de inventario.

Para la clasificación ABC y la aplicación de las técnicas multicriterio, autores como (Wan Lung, 2007), en su artículo llamado "*A simple classifier for multiple criteria ABC analysis*" propone un modelo sencillo para clasificación de inventario bajo múltiples criterios. El modelo convierte todas las medidas de criterios de un ítem de inventario en una puntuación escalar. A continuación se aplica la clasificación basada en los resultados calculados que utilizan el principio de ABC. Con la transformación adecuada, se puede obtener las puntuaciones de los ítems del inventario sin un optimizador lineal.

Por otra parte, (Rezaei, 2007) en su trabajo "*A Fuzzy Model for Multi-Criteria Inventory Classification*" utiliza la teoría de conjuntos difusos y el proceso de jerarquía analítica difusa, presenta un enfoque sencillo y aplicable para la clasificación de inventario ABC. Este enfoque es aplicable a cualquier problema de clasificación multi criterio con cualquier número de clases.

De igual forma (Chu, et al., 2008) en su artículo "*Controlling inventory by combining ABC analysis and fuzzy classification.*" proponen sistemas de clasificación de

inventario basados en el proceso de jerarquía analítica (AHP), pero aplicando conceptos de la lógica difusa, lo cual se convierte en una herramienta de uso común para los problemas de decisión multicriterio. Se integran conceptos difusos con los datos de inventario de bienes y se diseña un sistema de soporte de decisiones contribuyendo a una clasificación razonable.

(Molenaers et al., 2012) En su estudio “*Criticality classification of spare parts: A case study*” proponen un método de clasificación de repuestos basado en la criticidad del ítem. Partiendo de un análisis multicriterio, el modelo propuesto convierte los criterios relevantes que afectan la criticidad del ítem en una sola puntuación que presenta el nivel de criticidad. El nivel de criticidad obtenido se utiliza para racionalizar la eficiencia de la política de inventario de piezas de repuesto. El método de clasificación multicriterio se basa en el AHP y la lógica de diagramas de decisión. Mediante la combinación de estas dos técnicas, numerosos atributos potenciales que influyen en la criticidad de piezas de repuestos se tienen en cuenta de una manera fácil y racional. El método fue probado y aplicado en una planta petroquímica. El desarrollo de la herramienta de clasificación multicriterio ayudó a la organización a identificar los artículos críticos disponibles, que se considera como información valiosa para los gestores de activos y mantenimiento.

(Hadi-Vencheh, 2014) En su trabajo “*An improvement to multiple criteria ABC inventory classification*”, presenta una versión extendida del modelo de W.L. Ng [A simple classifier for multiple criteria ABC analysis, European Journal of Operational Research 177 (2007) 344–353] para múltiples criterios de clasificación de inventario. La metodología propuesta es un modelo de programación lineal que determina un conjunto común de pesos para todos los elementos. Este nuevo modelo no sólo incorpora múltiples criterios en la clasificación ABC, sino que también mantiene los efectos de los pesos en la solución final.

Finalmente, (Roda et al., 2014) en su artículo “*A review of multi-criteria classification of spare parts: From literature analysis to industrial evidences.*” presentan una revisión de los métodos y criterios de clasificación de piezas de repuesto para equipos de fabricación mediante la presentación de un extenso análisis de la literatura seguido de una evaluación industrial, con el objetivo final de identificar eventuales discrepancias. El documento describe las barreras existentes que dejan brechas entre la teoría y la práctica real de la aplicación de un programa eficaz de múltiples criterios para la clasificación de partes de repuesto.

Después de revisar en la literatura los estudios realizados sobre clasificación, a continuación se presentan los estudios realizados por diferentes autores sobre sistemas de pronósticos.

El sistema de pronósticos es un elemento clave para el cumplimiento de los objetivos de la organización y para el mejoramiento de su competitividad, ya que no tomar las decisiones correctas, se puede caer en extremos como el deficiente servicio al cliente, el exceso de inventarios o ambos factores en forma simultánea cuando se presenta el desbalanceo de los inventarios (Vidal, 2010).

Según (Snyder, 2002) para patrones de demanda con movimientos rápidos, tradicionalmente se utilizan los métodos de suavización exponencial como sistema de pronósticos. Pero, para inventarios con movimiento lento, erráticos, tales como los repuestos, la técnica más utilizada para las proyecciones es el método de Croston.

(Willemain et al., 2004) en su artículo “*A new approach to forecasting intermittent demand for service parts inventories*” abordan el problema de previsión de demanda intermitente (o irregular), es decir la demanda aleatoria con una gran proporción de valores cero. Este patrón es difícil de predecir. Ellos prevén la distribución acumulada de la demanda en un plazo de ejecución fijado utilizando un conjunto de

datos que muestra el método bootstrapping. Para evaluar la exactitud en el pronóstico de una distribución entera, adaptan la probabilidad de transformación integral a la demanda intermitente. Usando nueve grandes conjuntos de datos industriales, se muestra que el método de bootstrapping produce predicciones más precisas de la distribución de la demanda en un plazo de ejecución fijado por suavización exponencial y Croston.

(Teunter & Duncan, 2009) en su artículo *“Forecasting intermittent demand: a comparative study”* comparan métodos para pronosticar la demanda intermitente utilizando un gran conjunto de datos de la fuerza aérea británica. Se encuentran varios resultados importantes. En primer lugar, muestran que las medidas tradicionales de error de pronóstico por período no son adecuadas para la demanda intermitente, aunque se utilizan sistemáticamente en la literatura. En segundo lugar, comparando la capacidad de aproximar los niveles de servicio objetivo y las implicaciones en la participación de stocks, muestran que el método de Croston (y una variante) y bootstrapping superan claramente al promedio móvil y la suavización exponencial simple. En tercer lugar, muestran que el rendimiento de Croston y bootstrapping se puede mejorar significativamente teniendo en cuenta que un pedido en un período es provocado por una demanda en ese período.

(Wang & Syntetos, 2011) en su estudio *“Spare parts demand: Linking forecasting to equipment maintenance.”*; presentan una idea novedosa para pronosticar la demanda de que se basa en las fuentes mismas del proceso de generación de demanda y lo comparan con un método de series de tiempo conocido (Syntetos-Boylan aproximación, SBA). Llegan a la conclusión de que los modelos de mantenimiento están asociados con un mejor rendimiento en determinadas condiciones.

(Romeijnnders et al., 2012) En su trabajo *“A two-step method for forecasting spare parts demand using information on component repairs.”* Proponen un método que,

además de la demanda de piezas de repuesto, considera el tipo de componente reparado. Este método de pronóstico de dos pasos actualiza por separado el número medio de piezas necesarias por reparación y el número de reparaciones para cada tipo de componente. Sus resultados muestran que el método de dos pasos es uno de los métodos más precisos, y que se lleva a cabo considerablemente mejor que el método de Croston. Además, contrariamente a otros métodos, el método de dos etapas puede utilizar la información sobre las operaciones de mantenimiento y reparación planificados para reducir las previsiones de los errores hasta en un 20%.

Por último, (Bacchetti & Sacconi, 2012) investigan en su artículo "*Spare parts classification and demand forecasting for stock control: Investigating the gap between research and practice.*" la brecha entre la investigación y la práctica en la gestión de piezas de repuesto, con referencia específica a los bienes duraderos dirigida a clientes particulares o profesionales. El documento ofrece una revisión de la literatura fundamental de las contribuciones teóricas sobre la clasificación de piezas de repuesto y la previsión de la demanda para el control de existencias. Se proponen cuatro direcciones principales para la investigación con el fin de cerrar la brecha, a saber: el desarrollo de enfoques integrados de gestión de las piezas; definir directrices de gestión basada en la contingencia, para favorecer el proceso de acumulación de conocimiento en las empresas, y como complemento a los modelos teóricos con relevancia práctica.

Finalmente, después de revisar estudios sobre los sistemas de pronósticos, a continuación se presentan trabajos de diferentes autores que abordan el problema de control de inventario.

Autores como (Porras & Dekker, 2008) comparan en su trabajo "*An inventory control system for spare parts at a refinery: An empirical comparison of different re-order point methods*" diferentes métodos de punto re-orden para el control eficaz de

inventario de piezas de repuesto. Utilizando dos enfoques diferentes, un enfoque ex-post y un enfoque ex-ante. Como resultado de ello, para el enfoque ex post se demostró que las prácticas actuales de control de existencias pueden mejorarse utilizando los modelos teóricos considerados, sin embargo utilizando el enfoque ex-ante los resultados son menos evidentes. Consecuentemente, se puede lograr un ahorro total de hasta un 6,4% en los costos de tenencia al tener un mejor control de inventario. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el uso de valores redondeados para los plazos de entrega generalmente perjudica los niveles de servicio realizados.

(Jin & Liao, 2009) En su documento "*Spare parts inventory control considering stochastic growth of an installed base*" proponen un modelo para la demanda de mantenimiento generado por un producto cuya base instalada crece de acuerdo con un proceso de Poisson homogéneo. La demanda de mantenimiento resultante se formuló debido a las nuevas ventas; su media y varianza se obtienen cuando la vida útil del producto sigue la distribución exponencial. Se propone un modelo de optimización de inventario multi-resolución para hacer frente a la demanda de mantenimiento no estacionario. Dos ejemplos numéricos se proporcionan para demostrar la aplicación del método propuesto en el control de inventario de piezas de repuesto bajo una restricción de nivel de servicio. La simulación se utiliza para explorar la eficacia del enfoque multi-resolución.

Factores clave como los costos de faltantes o la tasa de llenado mínimo fueron considerados por (Jaarsveld y Dekker, 2011) en su trabajo "*Spare parts stock control for redundant systems using reliability centered maintenance data*" para intentar estimar los costos de escasez o la determinación de tasas de utilización mínimos adecuados. Los autores, en un intento por superar este problema, proponen el uso de los datos recogidos en los estudios de mantenimiento centrado en la fiabilidad (RCM). Además desarrollan un marco que permite el modelado de los sistemas más

complicados a partir del cual proponen un método aproximado para determinar la cantidad mínima de inventario.

Por último (do Rego & de Mesquita, 2015) En su artículo “*Demand forecasting and inventory control: A simulation study on automotive spare parts*” presentan los resultados de un estudio de simulación a gran escala sobre la predicción de la demanda de piezas de repuesto y el control de inventario para seleccionar las mejores políticas dentro de cada categoría de SKU. La revisión de la literatura llevó a la selección de diferentes modelos simulados. El estudio incluyó tres alternativas para registrar datos de demanda, dando como resultado 17 políticas “combinadas”. Las principales contribuciones de la investigación son las recomendaciones de políticas dentro de cada categoría de SKU, un nuevo procedimiento Bootstrapping y el punto culminante del enfoque de demanda única (SDA) como área prometedora para futuros estudios teóricos y empíricos.

4.3 MARCO CONCEPTUAL

Mantener un inventario para su venta o uso futuro, es una práctica común en el mundo de los negocios empresariales; pero no es factible llevar un simple recuento y tomar decisiones de cuándo, cuánto y cómo se restablece. De allí la importancia de llevar una buena gestión o administración de los inventarios (Guerrero, 2009). Según el mismo autor “**Inventario** es un conjunto de recursos que se mantienen ociosos hasta el instante mismo en que se necesiten”

De acuerdo a (Vidal, 2010), existen cuatro tipos básicos de inventarios:

Los inventarios cíclicos. Estos resultan del hecho de producir u ordenar en lotes en vez de unidad por unidad y están directamente relacionados con la demanda promedio del ítem.

Inventario de seguridad. El inventario de seguridad es el que se conserva disponible para responder a todas las fluctuaciones aleatorias que puedan existir en el sistema. Las más importantes son la variabilidad de la demanda y la variabilidad

de los tiempos de reposición. El inventario de seguridad afecta directamente el nivel del servicio al cliente, el cual puede definirse como la frecuencia con que la demanda del cliente es satisfecha del inventario disponible.

Inventario de anticipación o estacional. Este es el inventario acumulado con anterioridad para responder a picos de demanda. Se maneja en empresas para las cuales es más costoso satisfacer dichos picos a partir de la contratación adicional de personal, a la programación de horas extras y/o a la compra a proveedores externos durante los períodos de alta demanda.

Inventario en tránsito o en proceso. Este tipo de inventario incluye productos que se encuentran en tránsito entre diversas estaciones de producción, o en los sistemas de transporte entre una instalación y otra de la cadena de abastecimiento.

Según Vidal (2010) los inventarios también pueden ser clasificados según su forma, a continuación se exponen las principales clasificaciones.

Inventario materia prima. Conjunto de ítems que se encuentran a disposición del proceso de transformación, que al final se convierten o forman parte del producto terminado.

Inventario de producto en proceso. Corresponde al conjunto de productos que se encuentran en medio del proceso de productivo, es decir que no han sido fabricados en su totalidad y mientras no se terminen en su totalidad seguirán siendo inventario en proceso.

Inventario de producto terminado. Hace referencia al conjunto de ítems que ya fueron elaborados en su totalidad, incluye los que se encuentran almacenados y están disponibles para la venta.

¿Qué es un modelo de control de inventarios?

El control de inventario es el proceso de adoptar procedimientos para limitar el costo total del inventario. Los procedimientos de control concluyen pedidos de balances contra fondos que están disponibles para elementos o productos en el inventario, salidas de despensa de la mercadería que ya no es necesaria y mantener un nivel de almacenamiento adecuado para cumplir con los pedidos. El control de inventario es una operación principal de una compañía u organización logística que maneja la recepción almacenamiento y distribución de elementos

Según Vidal (2010) en los inventarios es de gran importancia los siguientes factores:

Factores de costo

El valor unitario del ítem, v. El valor unitario de cada ítem v está expresado en \$/unidad, pudiendo ser la unidad cualquier medida adecuada de cantidad de producto, como pueden ser litros, metros cúbicos, toneladas, unidades físicas, cajas, etc. Este costo es muy importante, ya que el costo de llevar el inventario depende de él.

La tasa o rata del costo de llevar o mantener el inventario, r. El costo de llevar o mantener el inventario comprende por lo tanto los costos de servicio del inventario (almacenamiento y manejo), el costo del espacio utilizado, los costos de capital y los costos de riesgo del inventario (los costos de obsolescencia, daños y filtraciones y los seguros e impuestos).

Por lo tanto:

Los **costos de almacenamiento y manejo** se refieren a los costos de operar la bodega, teniendo en cuenta la mano de obra utilizada, las actividades desarrolladas, tales como recepción, almacenamiento, inspección, recolección y despacho.

El **costo de espacio** es el reflejo del uso del volumen dentro del edificio de la bodega.

Los **costos de capital o costos de oportunidad** representan la mayor proporción de los costos de llevar el inventario.

El costo de ordenamiento o de alistamiento, A. Estos costos corresponden al procesamiento, transmisión, manejo y compra de la orden.

El costo de faltante o de bajo inventario, B. Este costo se produce cuando se recibe una orden y no hay suficiente inventario disponible para cubrirla (puede ser que el ítem esté completamente agotado o que haya bajo inventario). Generalmente se expresa como un porcentaje del valor v del ítem. Los principales tipos de costos de faltantes son los siguientes:

Factores relacionados con los tiempos de reposición y con la demanda

Tiempo de reposición (Lead Time), L. Es el tiempo que transcurre entre el momento de expedir una orden de compra o de producción y el instante en que se tienen los artículos listos para ser demandados por el cliente.

Demanda. También denominada consumo o uso, es el factor más importante en el control de los inventarios. La principal finalidad de un análisis de los inventarios consiste en prever lo que se ha de consumir en un tiempo futuro, con objeto de mantener existencias suficientes para las necesidades de ventas y producción y no excederse en la inversión y en los costos de almacenamiento.

Tipo y patrón de demanda, D. La demanda se puede caracterizar como dependiente e independiente. La demanda independiente es generada por entes

externos a la empresa. La demanda dependiente, por el contrario, como su nombre lo indica, depende de otras demandas.

Otro aspecto de fundamental importancia para el diseño de un sistema de administración de inventarios es el patrón que sigue la demanda.

-La demanda perpetua estable o uniforme, cuyo promedio se mantiene por largos períodos de tiempo y su fluctuación permanece dentro de rangos pequeños

-La demanda con tendencia (creciente o decreciente) ocurre si el promedio de demanda varía significativamente con el tiempo, la cual generalmente se toma como lineal.

-Demanda periódica o estacional ocurre cuando se esperan picos en determinadas épocas del año, como los artículos de Navidad o productos relacionados con las estaciones climáticas.

-El patrón de demanda errática presenta grandes variaciones a lo largo del tiempo, pasando de períodos de cero demanda a grandes picos. La diferencia de entre este patrón y el periódico o estacional es que en el errático los picos no son predecibles, por lo cual es una de las demandas más complejas de administrar.

Otros conceptos que se consideran importantes para este trabajo son:

Planificación manual del punto de pedido. Es el método de planificación utilizado actualmente por el proceso de Ingeniería de planta para realizar la reposición de repuestos de consumo al stock.

SAP-PM. Son las siglas para definir el ERP SAP (Sistema integra de información SAP) en el módulo de PM o Mantenimiento de Panta.

Stock mínimo. Es la cantidad mínima de inventario a ser mantenidas en el almacén.

Stock máximo. Existe el riesgo que el nivel del inventario pueda llegar demasiado alto para algunos artículos. Por lo tanto se establece un nivel de inventario máximo, con el objetivo de no incrementar el inventario sin control

5. DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA ACTUAL DE INVENTARIO DE REPUESTOS DE LA EMPRESA CASO DE ESTUDIO.

Con el fin de conocer, comprender y analizar el estado actual que concierne al control de inventario de repuesto de la empresa caso de estudio, se recolectó la siguiente información por medio de encuestas, visitas y documentos.

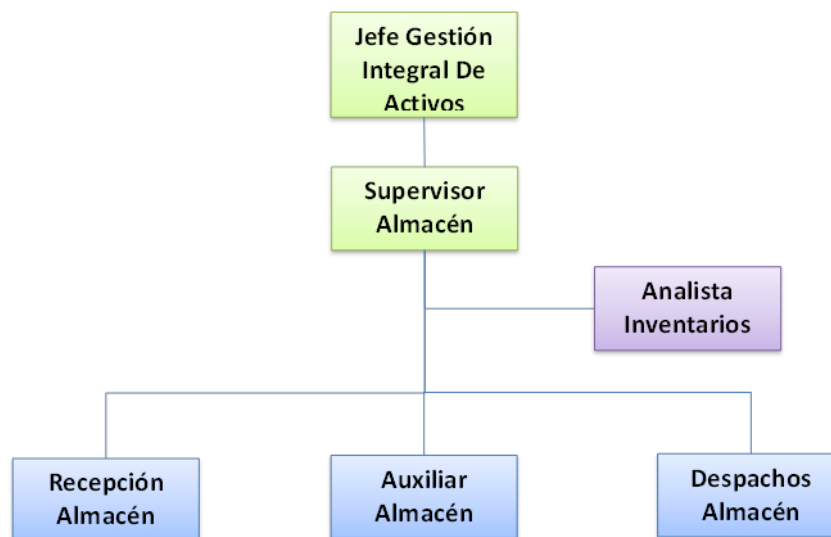
Actualmente, la empresa cuenta con una bodega para almacenar repuestos, la cual debe tener condiciones especiales de temperatura, iluminación y ventilación (ver tabla 7). Los materiales recibidos son transportados a los lugares asignados en montacargas hidráulicos, carros manuales o a mano, de acuerdo con la forma, tamaño o cantidad y almacenados en estanterías lejos de la materia prima para evitar la contaminación cruzada.

Tabla 7. Condiciones especiales para almacén de repuestos

Lugar	Humedad Relativa (%)	Temperatura (°C)	Luminosidad Artificial
Almacén de repuestos	50-60%	29-33 (°C)	Normal

Fuente: los autores con información de la empresa caso de estudio

La estructura básica de la gestión de almacén de repuestos (figura 6), está encabezada por el jefe de gestión integral de activos, en segundo lugar se encuentra el supervisor de almacén, en tercer lugar está el analista de inventarios, y por último en un mismo nivel se encuentran el recibidor, el despachador y el auxiliar de almacén.



Fuente: los autores

Figura 6. Estructura básica de la gestión de almacén de repuestos.

El Jefe de Gestión integral de activos es el encargado de administrar y coordinar todas las actividades realizadas en la gestión del almacén de repuestos (figura 7).

El supervisor del almacén es el encargado de Administrar y gestionar la planificación de necesidades de recursos (MRP); garantizando que los materiales de uso común y de alta rotación estén incluidos en el MRP y siempre disponibles en el Almacén; de igual forma, gestionar y coordinar el proceso de compra de repuestos urgentes de acuerdo al procedimiento establecido; generar informes mensuales del área, realizar el respectivo análisis y gestionar los planes de acción; administrar, gestionar y controlar una adecuada recepción, un adecuado almacenamiento de inventario y un adecuado despacho.

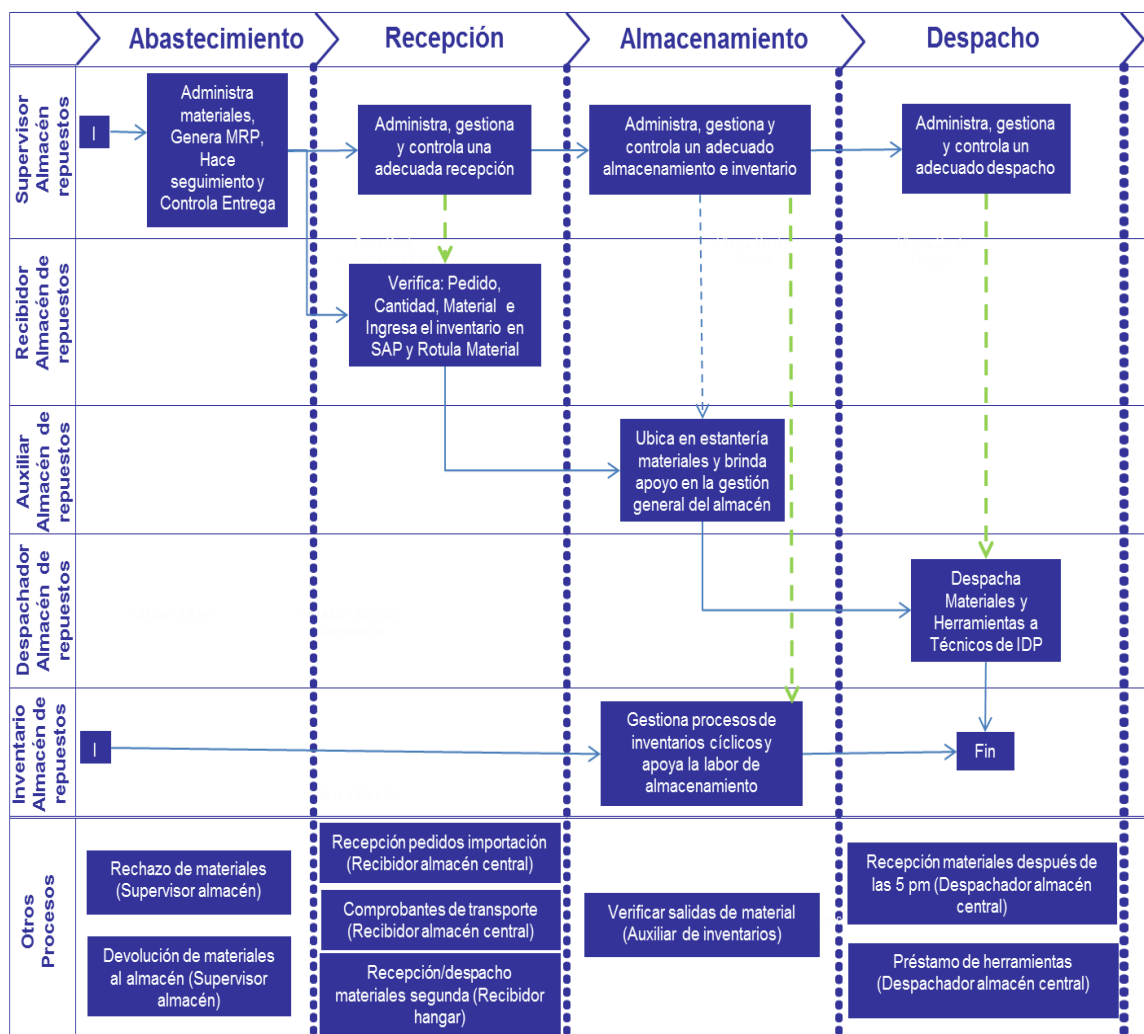
El analista de inventarios se encarga de administrar y planificar los inventarios de repuestos al almacén, garantizar la ejecución de inventarios cíclicos de repuestos tanto en el almacén de repuestos, garantizar la correcta y oportuna documentación en SAP de todos los movimientos que puedan afectar el inventario, apoyar la gestión de disminuir el valor del inventario de repuestos activando el consumo de los

materiales, apoyar la generación de informes mensuales del área, realizar el respectivo análisis y gestionar los planes de acción, brindar apoyo administrativo en la elaboración, gestión y seguimiento a los presupuestos de inventarios de repuestos y planificar provisiones para bajas de materiales resultantes de las revisiones y procesos de depuración.

El receptor del almacén debe realizar la recepción de materiales en el almacén de repuestos según procedimientos establecidos, realizar la ubicación física de los materiales en la respectiva estantería del almacén de repuestos, garantizar la correcta y oportuna documentación en SAP de todos los movimientos que puedan afectar el inventario y realizar proceso de comprobante de transporte, su respectivo seguimiento y control de acuerdo al procedimiento establecido.

El despachador de almacenamiento es el encargado de realizar el despacho de repuestos y suministros solicitados, realizar la verificación de la salida de materiales del almacén de repuestos, realizar el acompañamiento en la revisión física de materiales, realizar el despacho de préstamo de herramientas solicitadas por el proceso de mantenimiento, garantizar el pre alistamiento de materiales solicitado por el área de planeación de mantenimiento, realizar la recepción de materiales a proveedores después de las 5:00 pm y hasta la 7:30 am, según procedimiento establecido, garantizar la correcta y oportuna documentación en SAP de todos los movimientos que puedan afectar el inventario.

El auxiliar del almacén debe brindar ayuda en la ubicación física de los materiales en estantería en el almacén central, brindar apoyo en la revisión de materiales en estantería y revisión de guías de despacho, brindar apoyo en el despacho de herramientas, brindar apoyo en el despacho de materiales y suministros solicitados, brindar apoyo en el pre alistamiento de materiales solicitado por el área de planeación de mantenimiento y brindar apoyo administrativo en la gestión general de almacén técnico.



Fuente: los autores

Figura 7. Gestión almacén de repuestos.

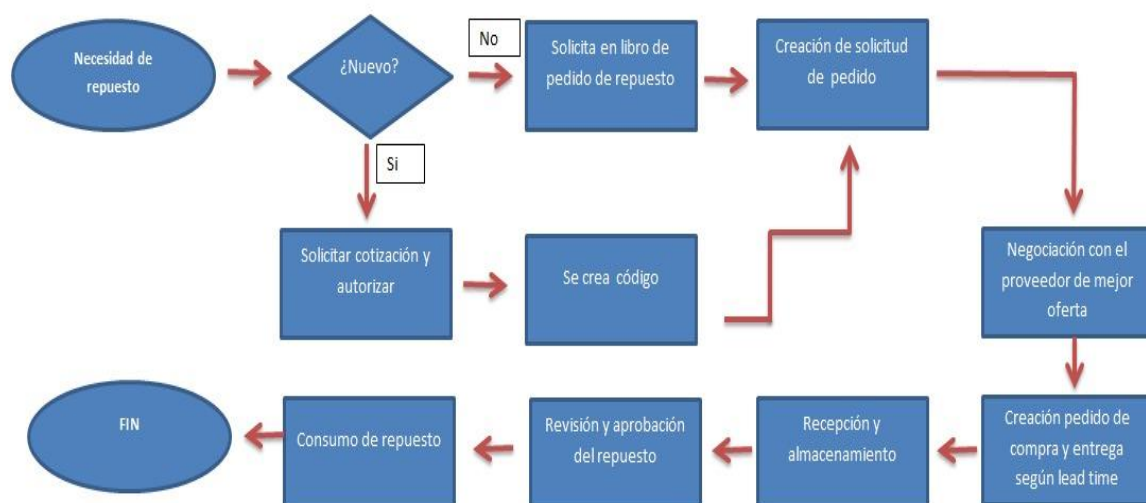
Una vez mencionado los diferentes cargos que intervienen dentro del proceso de gestión de activos y sus responsabilidades, enseguida se expone el proceso de solicitud de repuestos. Este proceso surge a partir de una necesidad de compra y solicitud de pedido y termina con el material puesto en el almacén de cada planta y/o distrito, recibido a satisfacción por parte del solicitante y pago al proveedor.

Para la necesidad de repuestos, el solicitante debe registrar en el libro de solicitudes previamente establecido el código del repuesto que necesita, la cantidad requerida,

la fecha en que se realiza el requerimiento, el destino y la justificación; el solicitante verifica si el código está creado; de no ser así, el solicitante debe notificar en el libro y el coordinador debe verificar la necesidad, para luego realizar la respectiva cotización y diligenciar el formato de creación de código. Una vez creado el código, el coordinador firma el pedido para autorizar la creación de la solicitud y de allí se procede a realizar el movimiento o transacción en el sistema de información de la empresa.

La solicitud de pedido es generada por el Planeador de Mantenimiento, donde dicha solicitud es liberada en el sistema dependiendo del monto o valor del pedido (ver tabla 8); después el área de compras de suministros genera la orden de compra o pedido al proveedor acorde a las necesidades.

El proveedor confirma la orden de compra, disponibilidad de mercancía y la fecha de entrega según el lead time, para después entregarlo directamente a la planta, donde es recibido, verificado, aprobado y almacenado por el recibidor del almacén para finalmente ser consumido. Este proceso es ilustrado en la figura 8.



Fuente: los autores

Figura 8. Proceso de solicitud de repuestos.

Tabla 8. Estrategia de liberación

Estrategia para liberaciones de solicitudes de pedido de materiales	
1. Repuestos por valor superior a 50 dólares libera:	Jefe de Mto. Mecánico
2. Repuestos por valor superior a 100 dólares libera:	Jefe de Mto. Mecánico Jefe de GIA
3. Repuestos por valor superior a 1000 dólares libera:	Jefe de Mto. Mecánico Jefe de GIA Director IDP Director Administrativo
4. Repuestos por valor superior a 5000 dólares libera:	Jefe de Mto. Mecánico Jefe de GIA Director IDP Director Administrativo Gerente Planta
5. Repuestos por valor superior a 20000 dólares libera:	Jefe de Mto. Mecánico Jefe de GIA Director IDP Director Administrativo Gerente Planta Director Operaciones Financieras

Fuente: Empresa caso de estudio, 2017.

Para determinar el tamaño de la orden la empresa utiliza un sistema de planificación de repuestos o MRP que se llama VB (planificación manual del punto de pedido), el cual es el que realmente planifica aquellos repuestos que tienen consumo y que debería siempre permanecer con un stock mínimo en el almacén para atender reparaciones correctivas y preventivas en los equipos, cabe mencionar que este inventario es revisado semanalmente por el supervisor del almacén quien en este caso es el que emite la orden previsional. Para determinar si el repuesto debe estar o no planificado, el coordinador debe hacer un análisis de consumo y/o criticidad del material a través de un formato y después de ser autorizado para ser planificado este material, se configuran los datos del método de planificación de materiales en el dato maestro del material del sistema de información SAP. Este método de planificación maneja un punto de pedido y un stock máximo. Por medio de una fórmula que calcula la diferencia entre el inventario actual y el stock máximo documentado en el dato maestro del repuesto, en el momento de generar el proceso; el sistema SAP-MM propone a través de la generación de un listado por cuanto se debería realizar la solicitud de compra, este método tiene en cuenta reservas abiertas para sugerir la cantidad a comprar. El proceso de este método genera una orden previsional la cual una vez analizada es convertida en una solicitud de compra de repuestos.

Para realizar la solicitud de pedido para repuestos específicos importantes que tienen muy poco movimiento, pero que pueden ocasionar muchos problemas en caso de que no existan y ocurra una falla; además, son repuestos de muy difícil consecución; se utiliza método Planificación necesidades de reposición o RP, el cual es un desarrollo interno en SAP-MM que permite solo consultar a través de un tratamiento de lista el nivel de stock. El sistema genera un listado de acuerdo a un mínimo y un máximo que asigna anteriormente el coordinador de mantenimiento al repuesto en el dato maestro y en este listado le sugiere la cantidad a pedir. El inventario de este método al igual que el anterior se revisa semanalmente.

Aunque con base en lo anterior se evidencia que la compañía tiene establecido un método para planificación de repuestos, no existe por parte de la misma un registro de un modelo compacto de administración de inventarios que incorpore las técnicas más relevantes en este aspecto, es decir, la empresa emplea un promedio simple para estimar el valor futuro de la demanda de los ítems, además de la experticia personal, ignorando el patrón y variabilidad de la demanda a través del tiempo.

Con respecto al nivel de servicio la empresa actualmente no cuenta con un indicador, sin embargo, para efectos del modelo propuesto se utilizará un nivel de servicio de 95% que es el nivel genérico sugerido para la construcción de sistemas de gestión de inventarios (Vidal, 2010)

Finalmente, los repuestos son clasificados en familias de acuerdo a la naturaleza de su funcionalidad dentro del proceso de producción, con la finalidad de facilitar la recolección de información como se muestra a continuación:

Mecánico: Materiales de naturaleza mecánica, tales como sellos, poleas, sinfines, empacaduras, válvulas, correas, entre otros.

Eléctrico: Materiales cuya aplicación es en esencia de tipo eléctrica. Por ejemplo, contactores, capacitores, cables, estatores, imanes, etc.

Instrumentación: Piezas o partes que componen automatismos, como tarjetas de control, sensores, entre otros.

Rodamientos: Esta categoría se creó puesto que existe un elevado inventario de rodamientos, pudieron haberse agrupado dentro del rubro de materiales mecánicos, sin embargo, por el alto volumen que suele mantenerse en stock se optó por delimitarlos en un grupo diferente.

Estos últimos como se mencionaba anteriormente son los ítems correspondientes a las referencias analizadas en el presente trabajo, estos comprenden una cantidad de 813 ítems, los cuales se pueden observar en el [Anexo 1](#).

6. CLASIFICACIÓN ABC MULTICRITERIO

6.1 GENERALIDADES

Para este capítulo se ha planteado una clasificación ABC multicriterio para los ítems que presentan mayor participación en el valor total de consumo en los últimos 18 meses como se ilustró anteriormente. Esta clasificación se basa en la técnica multicriterio AHP, tomando como referencia el trabajo realizado por Cortes y Morales (2012).

Después de realizada la técnica de Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), se toman los dos criterios con mayor peso según el vector prioridad, para luego así aplicar la metodología de dos criterios que propone Flores et al. (1992)

El desarrollo de la clasificación ABC multicriterio mediante el AHP inicia con la identificación de los criterios relevantes a considerar basándose en prioridades o importancia de criterios establecidos por la empresa caso estudio, luego mediante la encuesta realizada a algunas personas de la compañía se encontró la preferencia relativa de cada criterio.

Con la calificación dada a cada criterio, se estableció un peso de importancia para cada uno y se evaluaron todos los repuestos de acuerdo al peso de cada criterio, obteniendo así una clasificación ABC, donde los repuestos A son aquellos con mayor calificación, catalogándose como críticos para la operación y se les debe prestar por lo tanto mayor atención; los repuestos B son importantes para la operación y se deben manejar con cuidado pero no tienen tanto impacto como los A. Por último, los repuestos C son aquellos que tienen poco impacto pero representan la mayor cantidad de piezas. Posterior a esto, se inicia una nueva clasificación la cual se enfoca solo en los ítems tipo A clasificados anteriormente y tomando los dos criterios con mayor peso asignado.

6.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

6.2.1 Selección de Criterios Relevantes. Para la selección de criterios, inicialmente se toma como referencia la propuesta planteada por (Castro, et al. 2011), en la cual se identifican algunos criterios como lo son: consumo, inventario promedio, costo unitario, Volumen, Criticidad y Rotación. Después de una reunión con el Coordinador de Gestión Integral de Activos (GIA) se determinaron los siguientes criterios:

- **Consumo:** se basa en el total de unidades que fueron consumidas en los últimos 18 meses. Suministrado por la empresa
- **Costo:** Valor unitario del repuesto. (Silver *et al*, 1998).
- **Rotación:** la rotación de inventarios indica la eficiencia de la empresa para manejar el nivel de inventarios, se calcula al dividir el consumo para un período determinado, entre el promedio de inventarios durante ese mismo período. Díaz (como se citó en Farfán, 2005).

6.2.2 Establecimiento de las preferencias relativas – Vector Prioridad. Para encontrar las preferencias relativas se realizó un proceso en el que se involucró el conocimiento y la experiencia de cinco personas de diferentes áreas que involucran el almacén de repuestos, mediante el desarrollo de una encuesta, la cual consistió en realizar una comparación por pares de criterios con el fin de obtener los datos de entrada para la matriz de comparación de criterios y se tuvo en cuenta la metodología de clasificación AHP utilizando la siguiente escala de medición:

- 1 Igualmente preferido
- 3 Moderadamente Preferido
- 5 Fuertemente preferido
- 7 Muy fuertemente preferido
- 9 Extremadamente preferido

Además, se tuvieron en cuenta valores intermedios, que según Saaty (como se citó en Orjuela, 2008) se utilizan cuando no se puede definir con claridad la preferencia entre los factores. Su escala de medición es la siguiente.

2 Preferencia igual a moderada

4 Preferencia moderada a fuerte

6 Preferencia fuerte a muy fuerte

8 Preferencia muy fuerte a extrema

Los resultados de la encuesta se encuentran reflejados en la tabla 9.

Tabla 9. Resultado de encuesta

Entrevistados \ Criterios	Costo	Costo	Consumo
	Consumo	Rotación Inv	Rotación Inv
Tecnico Mecanico	1/7	5	9
Almacenista de respuestas	2	2	1
Supervisor de mantenimiento	1/6	1/2	3
Coordinador de almacen	2	4	1
Supervisor de producción	1/4	2	1

Fuente: los autores

Debido a que los valores dados por los involucrados difieren unos de otros, se calcula la media geométrica para cada pareja de criterios con el fin de obtener un único valor de estas ponderaciones, este resultado se muestra en la tabla 10. Por ejemplo, Para la pareja de criterios Costo Vs Consumo se calculó de la siguiente manera.

$$\widehat{X}_g = \sqrt[5]{\frac{1}{7} * 2 * \frac{1}{6} * 2 * \frac{1}{4}} = \mathbf{0.47}$$

Donde cada elemento dentro de la raíz, corresponde a los valores presentados en la tabla 9, en la columna Costo Vs Consumo en frente de cada uno de los entrevistados.

Tabla 10. Media geométrica

Criterios	Costo	Costo	Consumo
	Consumo	Rotación Inv	Rotación Inv
Media Geométrica	0.47	2.09	1.93

Fuente: los autores

Una vez calculada la media geométrica, se procede a realizar la matriz de comparación de criterios (tabla 11) de acuerdo a la técnica AHP. Cada celda del recuadro muestra la comparación de un par de criterios, entonces es razonable que siempre exista una diagonal con números iguales a 1, dado que se trata de comparar a cada criterio consigo mismo.

Los resultados de la tabla 11 se indican en las celdas superiores de la diagonal en la matriz, mientras que en las celdas inferiores se les aplica el principio de relación inversa, es decir, que el número que debe aparecer en las celdas inferiores a la diagonal deber ser igual al recíproco de las superiores, por ejemplo para la comparación de Costo Vs Consumo con un valor de 0.47 para la parte superior, la parte inferior debe ser igual a $1/0.47 = 2.11$ y así sucesivamente para los demás términos de la matriz.

Tabla 11. Matriz de comparación de criterios

	Costo Unitario	Consumo	Rotación Inventario
Costo Unitario	1.00	0.47	2.09
Consumo	2.11	1.00	1.93
Rotación Inv	0.48	0.52	1.00
Suma	3.59	1.99	5.02

Fuente: los autores

Posteriormente se construye la matriz normalizada (tabla 12), la cual se calcula dividiendo cada término de la matriz de comparación de criterios entre la suma de su respectiva columna como se muestra a continuación.

$$\frac{0.47}{1.99} = 0.24$$

Tabla 12. Matriz normalizada

	Costo unitario	Consumo	Rotación Inventario
Costo Unitario	0.28	0.24	0.42
Consumo	0.59	0.50	0.38
Rotación Inventario	0.13	0.26	0.20

Fuente: los autores

A partir de la matriz normalizada se procede a calcular el vector prioridad que es igual al promedio de la fila de la matriz y representa la importancia relativa de los criterios comparados.

Vector prioridad para el consumo

$$VP = \frac{0.59 + 0.50 + 0.38}{3} = 49.18\%$$

La tabla 13 presenta la matriz normalizada con el vector de prioridad

Tabla 13. Matriz Normalizada y Vector prioridad

	Matriz normalizada			
	Costo unitario	Consumo	Rotación Inv	Vector Prioridad VP
Costo Unitario	0.28	0.24	0.42	31.09%
Consumo	0.59	0.50	0.38	49.18%
Rotación Inventario	0.13	0.26	0.20	19.74%
Suma				100.00%

Fuente: los autores

De acuerdo con los resultados, se puede concluir que el criterio más importante para los encuestados es el consumo con un 49.18%, el segundo más importante es el costo unitario con un 31.09% y por último se encuentra rotación del inventario el cual es el menos importante según los resultados con un 19.74%.

6.2.3 Análisis de consistencia. Antes de concluir este análisis, se debe calcular el coeficiente de consistencia, el cual según (Orejuela y Osorio, 2008) valida que los juicios no tengan errores entre ellos, es decir, que no se haya producido contradicciones en los mismos. Un valor de este coeficiente inferior a 0.10 es considerado aceptable. Para aquellos casos en que sea mayor, las opiniones y los juicios deben ser reevaluados.

Para comenzar el análisis se debe determinar una suma ponderada, la cual se calcula multiplicando matricialmente los valores de la matriz de comparación de criterios por el vector prioridad de cada alternativa o criterio correspondiente como se muestra a continuación:

$$SP = \begin{pmatrix} 1 & 0.47 & 2.09 \\ 2.11 & 1 & 1.93 \\ 0.48 & 0.52 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0.3109 \\ 0.4918 \\ 0.1974 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.956 \\ 1.530 \\ 0.600 \end{pmatrix}$$

Después, se divide el valor obtenido de la suma ponderada entre el vector prioridad de su criterio correspondiente.

$$0.956/0.3109 = 3.077$$

$$1.530/0.4918 = 3.111$$

$$0.600/0.1974 = 3.042$$

Luego se determina la media del resultado del paso anterior ($\lambda_{\text{máx}}$)

$$\lambda_{\text{Max}} = \frac{\text{Suma elementos vector anterior}}{m} = \frac{3.077 + 3.111 + 3.042}{3} = 3.077$$

Donde m es igual número de criterios, en este caso es 3.

Se calcula el índice de consistencia para cada criterio con la siguiente fórmula:

$$CI = \frac{\lambda_{\text{Max}} - m}{m - 1} \rightarrow \frac{3.077 - 3}{3 - 1} = 0.0383$$

Por último se calcula el cociente de consistencia:

$$CCI = \frac{CI}{IA} \rightarrow \frac{0.0383}{0.58} = 0.0660 < 0.1$$

Donde $IA = 0.58$ cuando $m = 3$ (Orejuela y Osorio, 2008)

Tabla 14. Análisis de consistencia

Análisis de consistencia						
Suma ponderada SP	SP/VP	λ Max	Indice de consistencia IC	Indice Aleatorio	Consistencia	Consistencia %
0.956	3.077	3.077	0.0383	0.58	0.0660	6.60%
1.530	3.111					
0.600	3.042					

Fuente: los autores

Con base en lo anterior se puede determinar que no existen problemas de consistencia en la matriz, pues como se observa el resultado arroja un valor menor a 0,1 el cual es considerado aceptable.

6.2.4 Clasificación de repuestos por peso de cada criterio. Una vez obtenido el peso de los criterios, se procede a calificar cada repuesto de acuerdo al peso obtenido, esto con el fin de clasificar los repuestos y encontrar los ítems tipo A. En este trabajo los ítems se clasifican por cada criterio individualmente y se normalizan los datos mediante la asignación del 100% al ítem que presente el máximo valor y desde allí se le asigna a los otros un peso proporcional al mayor. Por medio de este procedimiento se establece un peso a cada ítem, como se muestra a continuación:

6.2.4.1 Clasificación de repuesto por costo unitario. Dado que los costos de los repuestos varían unos de otros de \$78 pesos m/cte. a \$3.700.000 pesos m/cte. poniendo en evidencia la existencia de ítems muy costosos en comparación con otros. Es necesario normalizar el costo de los repuestos a fin de realizar una buena clasificación. Para esto se divide el costo unitario de cada ítem entre el costo unitario mayor (\$3.700.000). Una vez normalizados los valores, se calcula el peso del

repuesto para el criterio evaluado, multiplicando el valor normalizado por el peso del criterio, en este caso 0.31 como se muestra a continuación.

$$\text{Peso del repuesto} = \frac{\$1.048.000}{\$3.700.000} * 0.31 = 0.0881$$

Tabla 15. Resumen del peso de los repuestos (costo unitario)

REPUESTO	COSTO UNITARIO(\$/U)	NORMALIZACIÓN	PESO DEL CRITERIO	PESO REPUESTO
511350	\$ 3,700,000.00	1.0000	0.31	0.3109
534806	\$ 2,300,000.00	0.6216	0.31	0.1932
577541	\$ 1,700,000.00	0.4595	0.31	0.1428
538627	\$ 1,630,530.50	0.4407	0.31	0.1370
568823	\$ 1,400,000.00	0.3784	0.31	0.1176
577916	\$ 1,362,000.00	0.3681	0.31	0.1144
555792	\$ 1,048,000.00	0.2832	0.31	0.0881
534843	\$ 1,011,056.00	0.2733	0.31	0.0849
543841	\$ 970,000.00	0.2622	0.31	0.0815
501147	\$ 944,750.00	0.2553	0.31	0.0794

Fuente: los autores

6.2.4.2 Clasificación de repuesto por consumo. Para la clasificación de los repuestos por consumo se tomó información histórica desde enero del año 2016 hasta Junio del año 2017.

El procedimiento que se realiza para la clasificación de los repuestos por consumo es igual al procedimiento descrito anteriormente. En la tabla No.16 Se presenta el resumen del peso de los repuestos por consumo.

$$\text{Peso del repuesto} = \frac{562}{1773} * 0.49 = 0.1559$$

Tabla 16. Resumen del peso de los repuestos (Consumo)

REPUESTO	CONSUMO	NORMALIZACIÓN	PESO DEL CRITERIO	PESO DEL REPUESTO
500015	1773.00	1.000000	0.49	0.4918
508265	1120.00	0.631698	0.49	0.3106
501162	1029.00	0.580372	0.49	0.2854
508296	1003.00	0.565708	0.49	0.2782
508193	845.00	0.476593	0.49	0.2344
508262	844.00	0.476029	0.49	0.2341
508319	829.00	0.467569	0.49	0.2299
508297	679.00	0.382967	0.49	0.1883
500010	623.00	0.351382	0.49	0.1728
508309	562.00	0.316977	0.49	0.1559

Fuente: los autores

6.2.4.3 Clasificación de repuesto por Rotación. La rotación del inventario se obtiene al dividir el consumo de cada repuesto para un período de 18 meses, entre el promedio de inventarios durante ese mismo período, ambos expresados en número de piezas. La tabla 18 muestra el resumen del peso de los repuestos para la Rotación, el cual se desarrolla con el mismo procedimiento de los dos criterios anteriores (Costo Unitario y Consumo).

$$\text{Peso del repuesto} = \frac{75.47}{150.94} * 0.20 = 0.0987$$

Tabla 17. Resumen del peso de los repuestos (Rotación)

RESPUESTO	ROTACIÓN INV	NORMALIZACIÓN	PESO DEL CRITERIO	PESO REPUESTO
509114	150.94	1.00000000	0.20	0.1974
551235	95.01	0.62945368	0.20	0.1242
581102	75.83	0.50236967	0.20	0.0991
524915	75.47	0.50000000	0.20	0.0987
544239	59.48	0.39405204	0.20	0.0778
570122	50.18	0.33246041	0.20	0.0656
542401	47.62	0.31547619	0.20	0.0623
501226	47.53	0.31487643	0.20	0.0621
540947	38.10	0.25238095	0.20	0.0498
529563	38.10	0.25238095	0.20	0.0498

Fuente: los autores

6.2.5 Peso final del repuesto. Por último, para realizar la clasificación ABC tradicional de los repuestos, se agrupan en una sola tabla los pesos de los repuestos obtenidos anteriormente para cada criterio y se suman entre ellos para obtener el peso total como se muestra en el siguiente ejemplo:

$$\text{Peso final del repuesto} = 0.3109 + 0.0019 + 0.0092 = 0.3220$$

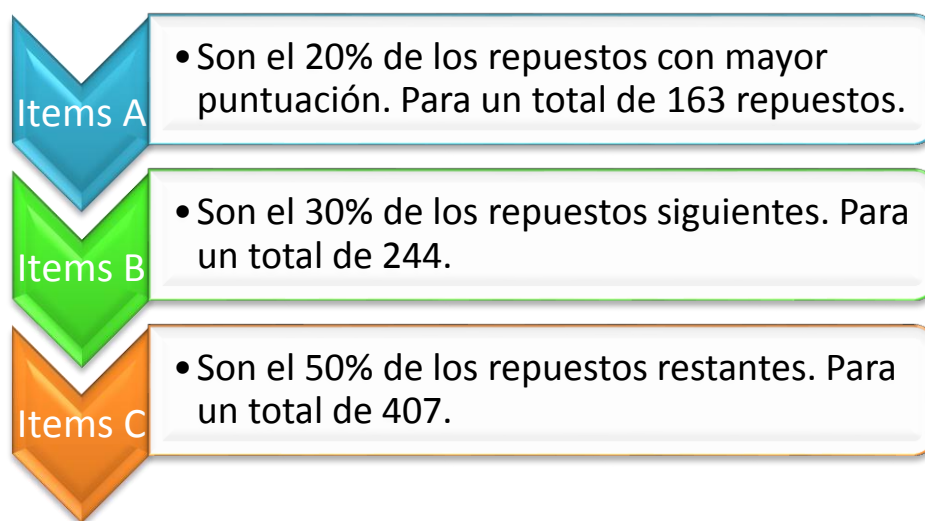
Después de obtener el peso final para cada uno de los ítems, se ordena de mayor a menor como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 18. Resumen del peso final de los repuestos

ARTICULO	PESO VALOR UNITARIO	PESO DEMANDA	PESO ROTACIÓN INV	PESO FINAL DEL REPUESTO
500015 Casquillo De Agujas HK 0408 Tn	0.0005	0.4918	0.0150	0.5073
508265 Rto.Rig.Bolas 6001 2RSH (6001-C2HRS)	0.0006	0.3106	0.0244	0.3356
511350 Trinquetera FSO400/750, 3.437-3/4 x 3/16	0.3109	0.0019	0.0092	0.3220
501162 Rto.Rig.Bolas 6000 NSK	0.0006	0.2854	0.0246	0.3106
508296 Rto.Rig.Bolas 6000 2RS1 (6000-C2HRS)	0.0005	0.2782	0.0207	0.2993
508193 Casquillo De Agujas HK 0609	0.0004	0.2344	0.0214	0.2562
508319 Rto.Rig.Bolas 6005 2RSH (6005-2RSR)	0.0008	0.2299	0.0216	0.2523
508262 Rto.Rig.Bolas 608 2RSH (608 2RSR)	0.0005	0.2341	0.0130	0.2476
509114 Rto.Bolas 4311	0.0332	0.0022	0.1974	0.2328

Fuente: los autores

La clasificación ABC de los repuestos se realizó como se muestra en la siguiente figura:



Fuente: los autores

Figura 9. Clasificación ABC con técnica AHP

Después de finalizado el proceso de Análisis Jerárquico (AHP), se procede a realizar la segunda técnica llamada “Matriz de dos criterios de Flores (1992)” para los ítems clase A, la cual se hace con base en los dos criterios que obtuvieron mayor ponderación en el vector prioridad según la primera técnica, que para este caso

corresponde al costo unitario (en pesos) y al consumo (en unidades). Esto se hace con el fin de seleccionar los ítems clase A más importantes.

6.3 APLICACIÓN DEL MÉTODO MATRIZ DE DOS CRITERIOS DE FLORES

Para realizar la metodología de dos criterios de Flores, inicialmente se realiza una clasificación ABC tradicional para los 163 ítems tipo A bajo cada uno de los criterios seleccionados, para posterior a esto ubicarlos dentro de una matriz, reclasificándolos nuevamente y obteniendo la clasificación ABC bajo dos criterios. El resultado de esta clasificación se ilustra en la siguiente tabla.

Tabla 19. Matriz de resultado de clasificación de dos criterios de Flores.

Matriz de dos criterios		Costo unitario		
		A	B	C
Consumo	A	1	7	22
	B	0	5	25
	C	1	43	59
TOTAL		163		

Fuente: los autores

La consolidación de los resultados de la anterior matriz, se ilustran en la Tabla 20, la cual indica que según la metodología de dos criterios de Flores et al. (1992), de los 163 ítems, los nuevos ítems tipo A son la intersección de los AA, AB y BA de los criterios costo y consumo respectivamente para un total de 8 ítems. Los nuevos B son la intersección de los AC, BB y CA de los criterios costo y consumo respectivamente para un total de 28 ítems. El restante, 127, corresponden a los nuevos ítems tipo C, los cuales son la intersección de los BC, CB y CC de los criterios Costo y Consumo respectivamente.

Tabla 20. Matriz de resultado de 2 criterios de Flores et al. (1992)

Clasificación	No. ITEM	% Total
A	8	5%
B	28	17%
C	127	78%
TOTAL	163	100%

Fuente: los autores

Con base en lo anterior el presente trabajo se va a centrar en los 8 repuestos resultantes de la clasificación de la matriz de dos criterios propuesta por flores et al. (1992), dichos repuestos se ilustran en la siguiente tabla.

Tabla 21. Repuestos clase A

ITEM		CLASE
500015	Casquillo De Agujas HK 0408 Tn	A
508265	Rto.Rig.Bolas 6001 2RSH (6001-C2HRS)	A
501162	Rto.Rig.Bolas 6000 NSK	A
530363	Rto.Cont.Angul 3804 B-2RS-TVH FAG	A
509859	Articulacion Macho Derecha 6 mm IKO	A
510249	Casquillo De Agujas HK 1216 2RS	A
530364	Rto.Rig.Bolas 638/8 2RS	A
570121	Rto.Cont.Angul 7201 B TVP FAG	A

Fuente: los autores

Los resultados obtenidos de la clasificación ABC multicriterio para cada uno de los repuestos se encuentran en el [Anexo 2](#)

7. SISTEMAS DE PRONÓSTICOS

Una vez realizada la clasificación ABC multicriterio, se procede con el desarrollo del sistema de pronósticos, que tiene como función principal prever el comportamiento de la demanda de repuestos. Con el fin de darle alcance al presente proyecto se enfocarán los esfuerzos en los ítems clase A, que se deriva en la clasificación ABC multicriterio expuesta en el capítulo anterior. Los datos utilizados corresponden a la demanda mensual de los repuestos de enero de 2015 a Junio de 2017, que equivale a un total de 30 meses.

Para iniciar, se identificó el patrón de demanda de cada repuesto y se categorizaron como erráticos y no erráticos. De acuerdo a esto, se procedió con la aplicación de las técnicas de pronósticos. Para repuestos con demanda errática se utilizó la técnicas de simulación de pronósticos como promedio móvil, suavización exponencial simple, suavización exponencial doble, Croston y combinación de pronósticos; para repuestos con demanda no errática se utilizaron técnicas como promedio móvil, suavización exponencial simple, suavización exponencial doble y combinación de pronósticos, utilizando como criterio de selección el menor ECM.

7.1 PATRÓN DE DEMANDA DE LOS REPUESTOS.

Para identificar el patrón de demanda de los repuestos se utilizó la fórmula del coeficiente de variación de la demanda.

$$\text{Coeficiente de Variación de Demanda} = \frac{\text{Desviación Estandar de la Demanda}}{\text{Demanda Promedio}}$$

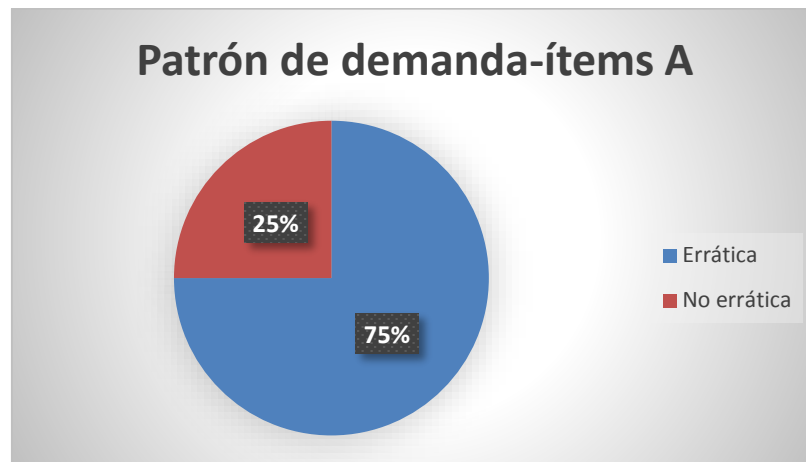
Categorizando como repuestos con demanda errática aquellos que tienen un coeficiente de variación mayor o igual a 1, de lo contrario, se categorizan los repuestos como demanda no errática. La siguiente tabla muestra los resultados

Tabla 22. Coeficiente de variación de los repuestos

ÍTEM	Demanda Promedio	Desviación Estándar	Coeficiente de Variación
500015	100,03	119,62	1,20
501162	43,80	56,61	1,29
530363	29,53	39,72	1,35
509859	24,93	14,24	0,57
510249	21,33	30,87	1,45
570121	16,70	24,02	1,44
508265	66,03	39,39	0,60
530364	13,87	18,19	1,31

Fuente: los autores

En total, el 75% de los repuestos clase A tienen una demanda errática y el 25% restante tienen demanda no errática. En la figura 10 se ilustra esta categorización.



Fuente: los autores

Figura 10. Patrón de demanda- ítems A

De acuerdo a lo anterior el 75% de los ítems presentan grandes variaciones a lo largo del tiempo pasando por periodos de demanda cero a grandes picos, mientras que en el 25% de los ítems se presenta una demanda más constante.

7.2 IMPLEMENTACIÓN DE PRONÓSTICOS

7.2.1 Pronósticos para repuestos con demanda errática. Los repuestos con demanda errática se evaluaron por medio de las técnicas de promedio móvil, suavización exponencial simple, suavización exponencial doble, método de Croston

y Combinación de pronósticos, seleccionando como mejor opción aquella con menor error cuadrático medio (ECM).

A continuación se presentan como ejemplo los cálculos obtenidos para el repuesto Ref. 500015 con los diferentes métodos de pronósticos:

Promedio Móvil

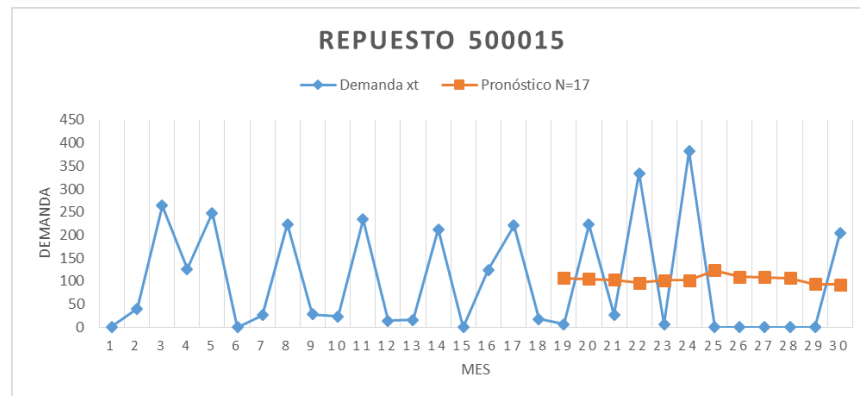
Para este método de pronóstico se determina un valor de n que minimice el ECM, este varía de 6 a 18.

En la tabla se muestran los cálculos obtenidos al utilizar promedio móvil para los datos históricos de la demanda y en la gráfica se ilustra la demanda real y la demanda pronosticada.

Tabla 23. Pronósticos de promedio móvil – Repuesto 500015

Pronóstico						
Mes	Per. T	Demanda x_t	$N=17$ $\bar{x}_t$	e_t	$ e_t $	e_t^2
1		1				
2		40				
3		264				
4		126				
5		248				
6		0				
7		26				
8		224				
9		28				
10		23				
11		234				
12		14				
13		16				
14		212				
15		0				
16		124				
17		221				
18	0	18				
19	1	6	106,94	-100,94	100,94	10189,12
20	2	223	104,94	118,06	118,06	13937,89
21	3	27	102,53	-75,53	75,53	5704,69
22	4	334	96,71	237,29	237,29	56308,50
23	5	6	101,76	-95,76	95,76	9170,88
24	6	382	102,12	279,88	279,88	78334,13
25	7	0	123,06	-123,06	123,06	15143,47
26	8	0	109,88	-109,88	109,88	12074,13
27	9	0	108,24	-108,24	108,24	11714,88
28	10	0	106,88	-106,88	106,88	11423,84
29	11	0	93,12	-93,12	93,12	8670,90
30	12	204	92,29	111,71	111,71	12478,20
31	13		103,35	pronostico en tiempo real		
				-66,47	1560,35	245150,63
				MAD y ECM →		130,03
				Desv. estándar estimada → $\hat{\sigma}_1$		162,97
						20429,22
						142,93

Fuente: los autores



Fuente: los autores

Figura 11. Demanda y pronóstico promedio móvil

La selección del valor n se realizó mediante iteraciones que varían a n desde 6 hasta 18, pues de acuerdo a Vidal (2010), dentro de este rango se encuentra el n que arroja el pronóstico con menor ECM. Valores inferiores a 6 pierden demasiada información histórica de demanda y pueden tornar el pronóstico demasiado nervioso al darle demasiado peso a los últimos datos de demanda; por el contrario, valores superiores a 20 pueden considerar historia de demanda muy antigua que ya no refleja la situación actual del sistema.

El cuadro 24 presenta los resultados de las iteraciones realizadas para el repuesto 500015, donde $n = 17$ tiene el menor ECM

Tabla 24. Resultados Iteraciones de n

Valor de N	MAD	ECM	Min MAD	Min ECM
6	142,35	23777,30	130,03	20429,22
7	143,67	23551,81		
8	137,84	21791,17		
9	137,97	22374,13		
10	134,83	21472,34		
11	135,12	21524,33		
12	135,57	21927,98		
13	132,88	21099,81		
14	132,39	20991,53		
15	132,73	21282,41		
16	131,7	20876,82		
17	130,03	20429,22		
18	131,94	20923,60		

Fuente: los autores

Suavización exponencial simple

El pronóstico para suavización exponencial simple se realizó con un α igual a 0.01, el cual se obtuvo mediante la herramienta solver de Excel, variando el valor de entre 0.01 y 0.3 de manera que se obtenga el menor ECM. La inicialización del pronóstico se obtuvo promediando los últimos 18 meses.

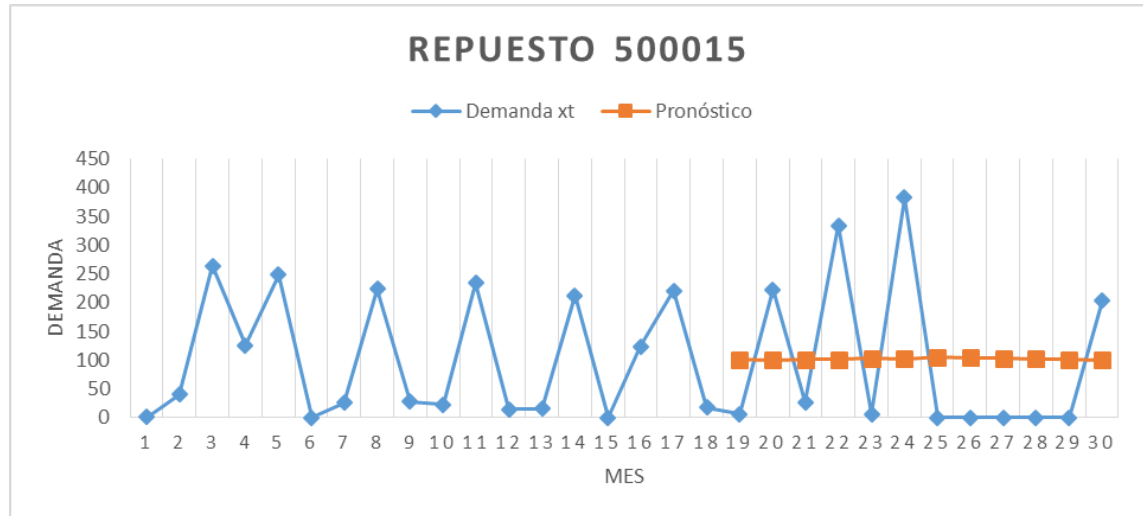
En la tabla se muestran los cálculos obtenidos al utilizar suavización exponencial simple para los datos históricos de la demanda y en la gráfica se ilustra la demanda real y la demanda pronosticada.

Tabla 25. Pronósticos de suavización exponencial simple-Repuesto 500015

Mes	Per. T	Demanda x_t	Pronóstico $\hat{x}_t$	e_T	$ e_T $	e_T^2
1		1				
2		40				
3		264				
4		126				
5		248				
6		0				
7		26				
8		224				
9		28				
10		23				
11		234				
12		14				
13		16				
14		212				
15		0				
16		124				
17		221				
18	0	18				
19	1	6	101,06	-95,06	95,06	9035,56
20	2	223	100,11	122,90	122,90	15103,18
21	3	27	101,33	-74,33	74,33	5525,54
22	4	334	100,59	233,41	233,41	54479,94
23	5	6	102,92	-96,92	96,92	9394,40
24	6	382	101,96	280,04	280,04	78424,95
25	7	0	104,76	-104,76	104,76	10973,80
26	8	0	103,71	-103,71	103,71	10755,42
27	9	0	102,67	-102,67	102,67	10541,39
28	10	0	101,64	-101,64	101,64	10331,61
29	11	0	100,63	-100,63	100,63	10126,01
30	12	204	99,62	104,38	104,38	10894,80
31	13		100,67	Pronóstico en tiempo real		
Sumas				-39,00	1520,45	235586,60
MAD,ECM $\rightarrow$					126,704	19632,21698
Desv. estándar estimada $\hat{\sigma}_{T+}$					158,798	140,115
ALPHA				0.01		

Fuente: los autores

Como se puede observar los resultados obtenidos para la MAD y ECM fueron 126,704 y 19632,21 respectivamente del cálculo de la suavización exponencial simple.



Fuente: los autores

Figura 12. Demanda y pronóstico suavización exponencial simple

Suavización exponencial doble

Para determinar el pronóstico con el método suavización exponencial doble se realizó con un α igual a 0.01, el cual se obtuvo mediante la herramienta solver de Excel, variando el valor entre 0.01 y 0.3 de manera que se obtenga el menor ECM.

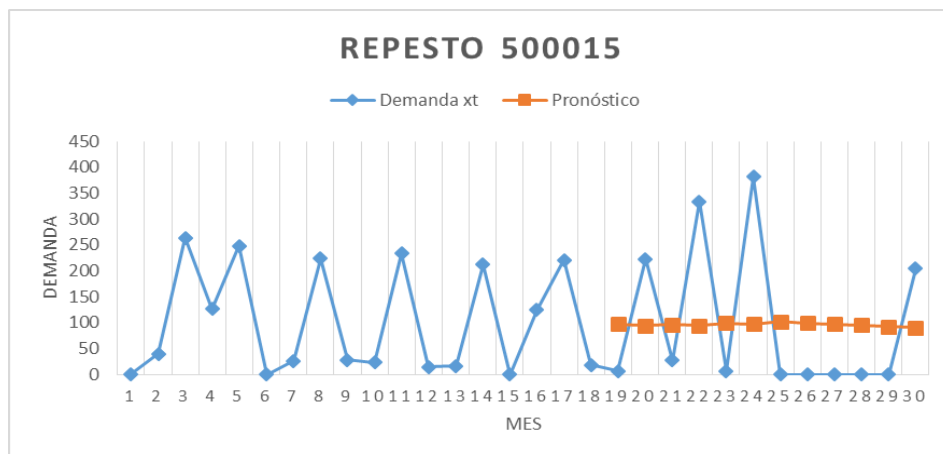
En la tabla se muestran los cálculos obtenidos al utilizar suavización exponencial doble para los datos históricos de la demanda y en la gráfica se ilustra la demanda real y la demanda pronosticada.

Tabla 26. Pronósticos de suavización exponencial doble

Mes	Per. T	Demanda x_t	S_T	$S_T^{[2]}$	Pronóstico $\hat{x}_t$	e_T	$ e_T $	e_T^2
1		1						
2		40						
3		264						
4		126						
5		248						
6		0						
7		26						
8		224						
9		28						
10		23						
11		234						
12		14						
13		16						
14		212						
15		0						
16		124						
17		221						
18	0	18	142,99	188,86				
19	1	6	141,62	188,39	96,65	-90,65	90,65	8218,07
20	2	223	142,43	187,93	94,38	128,62	128,62	16543,84
21	3	27	141,28	187,46	96,48	-69,48	69,48	4827,08
22	4	334	143,21	187,02	94,63	239,37	239,37	57298,92
23	5	6	141,83	186,57	98,95	-92,95	92,95	8639,52
24	6	382	144,24	186,15	96,65	285,35	285,35	81426,08
25	7	0	142,79	185,71	101,90	-101,90	101,90	10384,14
26	8	0	141,37	185,27	99,44	-99,44	99,44	9888,56
27	9	0	139,95	184,82	97,02	-97,02	97,02	9412,66
28	10	0	138,55	184,35	94,64	-94,64	94,64	8955,79
29	11	0	137,17	183,88	92,29	-92,29	92,29	8517,29
30	12	204	137,84	183,42	89,98	114,02	114,02	13000,39
31	13	?			91,79	Pronostico en tiempo real		
					Sumas	29,00	1505,73	237112,34
						MAD y ECM →	125,48	19759,36
						Desv. estándar estimada $\hat{\sigma}_1$	157,26	140,57
					ALPHA	0,01		
					BETA	0,99		
		PENDIENTE $b_2(0) =$	-0,46336429					
		CORTE $a_1(0) =$	105,457516					
		CORTE $b_1(0) =$	97,1169591					

Fuente: los autores

Como se puede observar los resultados obtenidos para la MAD y ECM fueron 125,48 y 19759,36 respectivamente del cálculo de la suavización exponencial doble.



Fuente: los autores

Figura 13. Demanda y pronóstico suavización exponencial doble

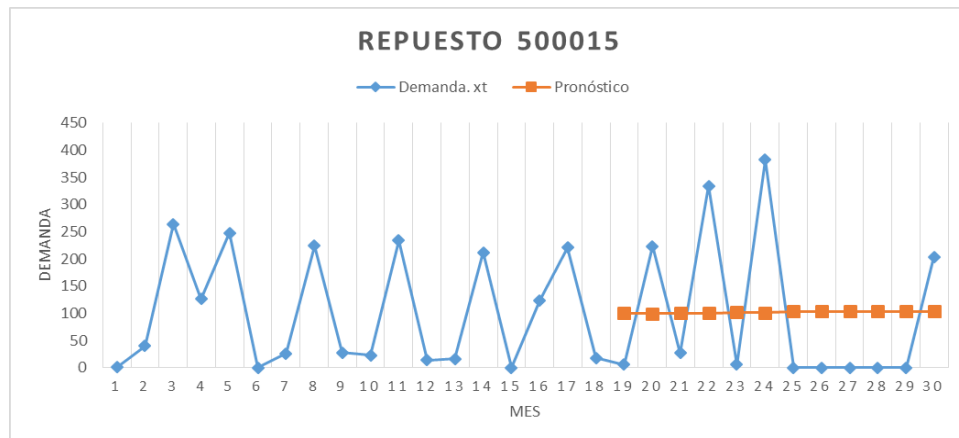
Croston

En la tabla se muestran los cálculos obtenidos al utilizar el método de Croston para los datos históricos de la demanda y en la gráfica se ilustra la demanda real y la demanda pronosticada.

Tabla 27. Método de Croston – Repuesto 500015

Mes	Demanda. xt	Cálculo n 0	Cálculo n 0 (2)	Nt	Zt	Contador nt	Pronóstico $\hat{x}_t$	e_T	$ e_T $	e_T^2
1	1	1								
2	40	1	1							
3	264	1	1							
4	126	1	1							
5	248	1	1							
6	0	2	0							
7	26	1	2							
8	224	1	1							
9	28	1	1							
10	23	1	1							
11	234	1	1							
12	14	1	1							
13	16	1	1							
14	212	1	1							
15	0	2	0							
16	124	1	2							
17	221	1	1							
18	18	1	1	1,13	113,6875					
19	6	1		1,13	112,6106	1	100,3125	-94,31	94,31	8894,85
20	223	1		1,13	113,7145	1	99,4794	123,52	123,52	15257,35
21	27	1		1,13	112,8474	1	100,5718	-73,57	73,57	5412,81
22	334	1		1,13	115,0589	1	99,9204	234,08	234,08	54793,28
23	6	1		1,13	113,9683	1	101,9954	-96,00	96,00	9215,11
24	382	1		1,13	116,6486	1	101,1435	280,86	280,86	78880,40
25	0	2		1,13	116,6486	1	103,6388	-103,64	103,64	10741,00
26	0	3		1,13	116,6486	2	103,6388	-103,64	103,64	10741,00
27	0	4		1,13	116,6486	3	103,6388	-103,64	103,64	10741,00
28	0	5		1,13	116,6486	4	103,6388	-103,64	103,64	10741,00
29	0	6		1,13	116,6486	5	103,6388	-103,64	103,64	10741,00
30	204	1		1,17	117,5221	6	103,6388	100,36	100,36	10072,37
31							100,0806	Pronostico en tiempo real		
							Sumas	-43,26	1520,89	236231,16
								MAD y ECM →	126,74	19685,93
								Desv. estándar estimada $\hat{\sigma}_1$ →	158,84	140,31
							ALPHA	0,01		

Fuente: los autores



Fuente: los autores

Figura 14. Demanda y pronóstico Método de Croston

Combinación de pronósticos

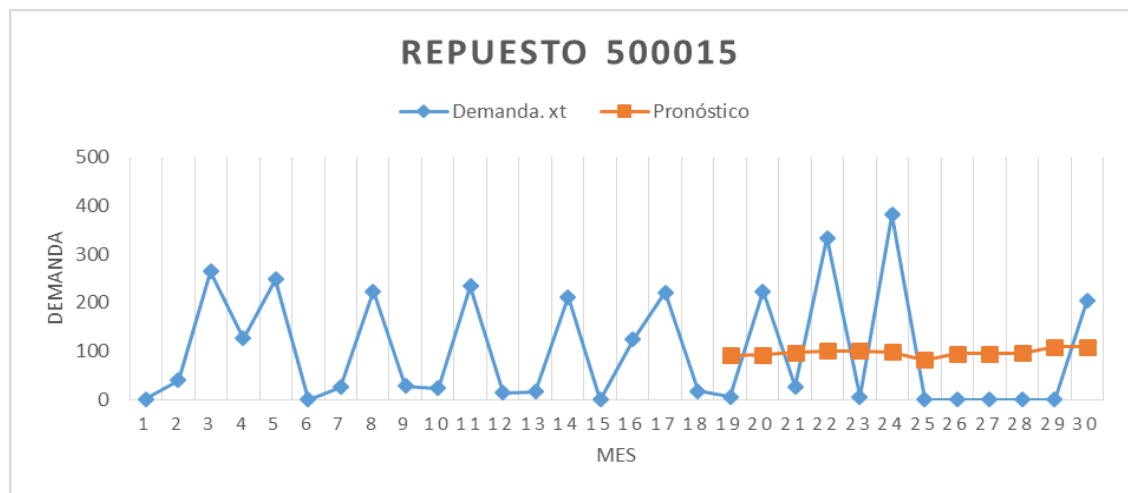
Se implementa un sistema de pronósticos calculado como una combinación lineal de los cuatro métodos anteriores, es decir, promedio móvil, suavización simple, suavización exponencial doble y el método de Croston. Se realizan 3 combinaciones, donde la primera combinación consiste en asignar la misma ponderación a los factores a_i de los pronósticos considerados. El segundo método de combinación de pronósticos consiste en encontrar el valor de los factores a_i cuyo rango de variación se encuentre entre 0 y 1 y su suma sea igual a uno. Por último el tercer método de combinación consiste en encontrar el valor de los factores a_i cuyo rango de variación esta entre -1 y 1.

A continuación se muestra los resultados del tercer método de combinación, debido a que este es el que presenta el menor ECM.

Tabla 28. Combinación lineal 3 - Repuesto 500015

Mes	Per. T	Demanda. xt	Pronóstico	e_T	$ e_T $	e_T^2
1		1				
2		40				
3		264				
4		126				
5		248				
6		0				
7		26				
8		224				
9		28				
10		23				
11		234				
12		14				
13		16				
14		212				
15		0				
16		124				
17		221				
18	0	18				
19	1	6	91,648	-85,648	85,65	7335,618
20	2	223	91,930	131,070	131,07	17179,355
21	3	27	96,603	-69,603	69,60	4844,542
22	4	334	101,085	232,915	232,92	54249,557
23	5	6	100,311	-94,311	94,31	8894,515
24	6	382	98,203	283,797	283,80	80540,860
25	7	0	82,406	-82,406	82,41	6790,798
26	8	0	94,606	-94,606	94,61	8950,290
27	9	0	95,286	-95,286	95,29	9079,343
28	10	0	95,680	-95,680	95,68	9154,729
29	11	0	108,496	-108,496	108,50	11771,393
30	12	204	108,380	95,620	95,62	9143,249
51	13	?	94,754	Pronóstico en tiempo real		
Sumas			17,367	1469,439	227934,249	
			MAD y ECM $\rightarrow$		122,45	18994,52074
			Desv. estándar estimada $\sigma_{\rightarrow 1}$		153,47	137,821
			a1=	-1		
			a2=	1		
			a3=	-0,028748635		
			a4=	1		

Fuente: los autores



Fuente: los autores

Figura 15. Demanda y pronóstico combinación de pronósticos

Se realizó una comparación entre los métodos utilizados para pronosticar los repuestos con demanda errática, con el fin de seleccionar el que más se ajustara al comportamiento de la demanda, se tuvo como criterio de selección el sistema de pronóstico que presentara menor error cuadrático medio ECM. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 29. Comparación de ECM para los repuestos erráticos

Metodo de Pronóstico	Parámetro Optimo	MAD	ECM
Promedio móvil	17	137,970	20429,220
Suavización exponencial Simple	0,01	126,704	19632,217
Suavización exponencial doble	0,01	125,478	19759,362
Método de Croston	0,01	126,741	19685,930
Combinado 1		127,238	19858,125
Combinado 2	entre 0 y 1	126,704	19632,217
Combinado 3	entre -1 y 1	122,453	18994,521

Fuente: los autores

Como se puede observar para el repuesto seleccionado como ejemplo, el método que presenta el menor ECM es la combinación 3.

7.2.2 Pronósticos para repuestos con demanda no errática. Los repuestos con demanda errática se evaluaron por medio de las técnicas mostradas anteriormente a excepción del método de Croston, ya que este se usa específicamente para demanda con un patrón errático.

A manera de resumen se realiza una tabla mostrando los ECM obtenidos con cada uno de los métodos usados según el tipo de ítem, el N óptimo para cada caso y patrón de demanda.

Tabla 30. ECM de cada sistema de pronósticos

Repuestos	Pronóstico (ECM)							N Óptimo prom movil	Patron de Demanda
	S.Simple	S.Doble	Croston	Combinado 1	Combinado 2	Combinado 3	P.Móvil		
500015	19632,22	19759,36	19685,93	19858,12	19632,22	18994,52	20429,22	17	Errático
508265	1663,91	2358,11	--	1869,78	1663,91	1547,92	1772,47	18	No errático
501162	4081,30	4435,32	4063,55	4094,19	4056,21	4029,33	4179,95	15	Errático
530363	826,71	832,17	821,57	769,88	740,03	703,66	784,96	6	Errático
509859	230,08	286,14	--	246,44	230,08	208,48	230,08	17	No errático
510249	955,13	1253,31	952,31	989,36	941,76	801,44	942,05	18	Errático
530364	427,79	481,53	424,14	432,81	406,64	358,42	406,64	14	Errático
570121	734,67	778,35	731,30	734,20	729,24	722,80	737,53	10	Errático

Fuente: los autores

7.3 SEÑAL DE RASTREO

Con el objetivo de identificar posibles desviaciones, sesgos y problemas del sistema de pronósticos seleccionados se calculó la señal de rastreo. El cálculo de la señal de rastreo se realizó a partir de los errores suavizados tal como lo propone (Vidal, 2010) en su libro Fundamentos de Control y Gestión de Inventarios.

A continuación se muestra una tabla con los datos obtenidos del repuesto 500015

Tabla 31. Señal de rastreo – Repuesto 500015

Dem. (Regresión)	Residuos	Error Suavizado Q(T)	MAD Suavizada MAD(T)	ECM Suavizado ECMS(T)	Señal de rastreo Q(T)/MAD(T)	Qutliers eT/MAD(T)
104,994	-103,994					
104,531	-64,531					
104,067	159,933					
103,604	22,396					
103,141	144,859					
102,677	-102,677					
102,214	-76,214					
101,751	122,249					
101,287	-73,287					
100,824	-77,824					
100,361	133,639					
99,897	-85,897					
99,434	-83,434	Alpha	0,01			
98,970	113,030	Beta	0,99			
98,507	-98,507	Constante w =	0,1			
98,044	25,956	Constante c1 =	1,012613381			
97,580	123,420					
97,117	-79,117					
		0,00	85,77	11350,68		
		-8,565	85,756	10949,176	0,100	0,999
		5,399	90,29	11572,194	0,060	1,452
		-2,101	88,22	10899,429	0,024	0,789
		21,400	102,69	15234,442	0,208	2,268
		9,829	101,85	14600,449	0,097	0,926
		37,226	120,05	21194,490	0,310	2,364
		25,263	116,28	19754,121	0,217	0,709
		13,276	114,11	18673,738	0,116	0,829
		2,420	112,23	17714,298	0,022	0,849
		-7,390	110,58	16858,341	0,067	0,865
		-17,501	110,37	16349,646	0,159	0,983
		-6,189	108,89	15629,007	0,057	0,878

Fuente: los autores

Como se puede observar, los resultados obtenidos revelan que el sistema de pronóstico utilizado está bajo control, ya que ninguna señal de rastreo supera un valor absoluto mayor a 0,60. Finalmente, se muestra también, el cálculo para el control de datos atípicos de demanda, el cual sugiere que ningún dato se puede declarar como atípico, dado que todos los valores son menores a 5.

Los resultados obtenidos del patrón de demanda, simulación de pronósticos y señales de rastreo para los repuestos clase A se encuentran en el [Anexo 3](#).

8. DETERMINACIÓN DE LA POLITICA DE CONTROL

Una vez identificados los sistemas de pronósticos con menor ECM para cada repuesto, se procede a determinar la política de control de inventarios que resulte más apropiada para reducir los costos totales de inventario en el área del almacén de repuestos y que permita responder a los interrogantes ¿Cuánto ordenar?, ¿Cuándo ordenar? Y ¿Con que frecuencia de deber revisar el inventario efectivo? A continuación, se presenta la metodología desarrollada para dar cumplimiento a este objetivo. Para ello se utilizan algunos sistemas de control y se comparan entre si detectando los costos asociados y el CTR propuesto.

8.1 PARÁMETROS

para calcular los sistemas de control para cada uno de los repuestos clase A, en necesario tener en cuenta los siguientes parámetros o Datos: Demanda (d), Error cuadrático medio (ECM), Tiempo de Reposición (L), Valor unitario del ítem (\$), Costo de ordenamiento (\$), Costo de mantener el inventario (\$), Déficit esperado (U) y el nivel de servicio.

Los datos de tiempo de reposición y el valor del ítem se obtuvieron de la información suministrada por la empresa caso de estudio a partir de datos históricos. La demanda promedio y el ECM se obtuvieron del sistema de pronóstico realizado anteriormente. El déficit esperado se calcula con el consumo diario promedio.

Otro parámetro es el costo de llevar o mantener el inventario, el cual incluye los costos de: Operar la bodega, el costo de espacio, costos de oportunidad. Otros costos que se incluyen son los costos de riesgo y los costos de seguros e impuestos los cuales dependen del inventario disponible. El costo de llevar o mantener inventario se determina como un porcentaje anual.

Tabla 32. Costo anual de llevar o mantener inventario.

Tabla 2.2. Componentes del costo de mantenimiento del inventario

[Fuente: Complementada de Bowersox et al. (2007), p. 137]

Componente de la tasa de costo de mantenimiento del inventario r	Rango de valores (% anual)	Ejemplo (% anual)	Porcentaje del total en el ejemplo (%)
Interés y costos de oportunidad	4.0-40.0%	30.0	83.33
Obsolescencia y depreciación	0.5-2.0	2.0	5.56
Almacenamiento y manejo	0.0-4.0	2.0	5.56
Impuestos	0.5-2.0	1.0	2.78
Seguros	0.0-2.0	1.0	2.77
TOTAL	5.0-50.0%	36.0	100.00

Fuente: (Vidal, 2010)

La tabla anterior muestra los diferentes costos de mantenimiento del inventario; la cual para efectos del presente trabajo y teniendo en cuenta que la empresa caso estudio no suministró información de estos costos por razones de confidencialidad, se utilizaran los valores de esta tabla para los respectivos cálculos; esto teniendo en cuenta que están dentro del rango generalmente usado para los cálculos en control y gestión de inventario. Para este caso fue de un 36%, de igual forma se tomó como referente el trabajo de grado de (Millan, 2013) para poder estimar dicho valor.

Igualmente otro de los parámetros es el costo de ordenar o pedir inventario. Cada orden para reponer el inventario tiene varios costos asociados, los cuales generalmente son fijos y no dependen del tamaño de la orden de pedido, estos corresponden al procesamiento, transmisión, manejo y compra de la orden. Para efectos del costo de ordenamiento que se va a tener en el presente trabajo, se usará el valor de \$4.000, el cual fue dado por el jefe de compras de repuestos de la empresa caso estudio.

Para el costo de faltante la empresa no contaba con una cifra, por lo tanto se dejó fuera del estudio, ya que el cálculo implicaba tomar en consideración diversos factores de los cuales la empresa tampoco tenía información.

8.2 PROPUESTA DE CONTROL DE INVENTARIOS Y CTR ASOCIADO

Para establecer el sistema de control de inventarios más adecuado para los ítems clase A, se plantearon 2 sistemas que propone (Vidal, 2010); el primero es el sistema (s, S) también llamado por Ballou (2004) sistemas de Min-Max para repuestos con demanda errática, en este sistema cada vez que el inventario efectivo cae al punto de reorden s o por debajo de él, se ordena una cantidad tal que se incremente el inventario efectivo hasta el nivel de inventario máximo S . El segundo es el sistema (R, S) el cual se conoce también como el sistema del ciclo de reposición. Aquí, cada R unidades de tiempo se revisa el inventario efectivo, y se ordena una cantidad tal que este inventario suba al valor máximo S . Los sistemas tenidos en cuenta para realizar la propuesta de control de inventarios corresponden tanto a sistemas continuos como periódicos y se trabajarán bajo el supuesto de que las transacciones de demanda se harán de manera unitaria, seleccionando al final el que ofrezca un menor costo total relevante.

Para este caso no se utilizara la técnica de revisión continua (s, Q) , ya que según (Insuasty, 2015) está solo funciona adecuadamente siempre y cuando no exista más de un pedido de reposición pendiente en cualquier instante de tiempo, obteniendo un CTR mayor o igual a la técnica (s, S) , además, se va a trabajar bajo el supuesto de transacciones de demandas unitarias (sin caídas de inventario por debajo del punto de reorden s), por lo tanto, el tamaño del pedido resulta ser igual a $s - S$ permitiendo que ambos sistemas sean iguales en su totalidad. Tampoco se utilizara la política (R, s, S) , ya que Vidal (2010) menciona que es más difícil de comprender y aplicar, lo que la hace más susceptible de errores humanos.

Es importante aclarar que las políticas de control periódico suponen una revisión del inventario cada cierto tiempo ordenando una cantidad de pedido. Por otra parte, las políticas de revisión continua suponen la emisión de un nuevo pedido siempre y cuando el inventario efectivo sea menor o igual al punto de reorden. Además, dentro del análisis realizado a los productos clase A, se decidió omitir la aplicación de métodos que toleraran demanda determinística, debido que en el caso objeto de estudio se presenta una demanda aleatoria.

8.2.1 Metodología de la selección del sistema. Con el fin de dar claridad a los sistemas de control de inventario (s, S) y (R, S), se muestra un ejemplo usando un repuesto del caso de estudio.

8.2.1.1 Sistema de Revisión Continuo (s, S). Los pasos realizados para el cálculo de esta política de control son: determinar el valor del Q, hallar el valor de s y de S, identificar el costo total relevante y por ultimo hallar el nivel de servicio correspondiente. El siguiente ejemplo se desarrolla para un sistema (s, S) con P_1 especificado para un repuesto errático.

Calculo de Q

$$Q = EOQ = \sqrt{\frac{2AD}{vr}} = \sqrt{\frac{2 * 4,000 * (94.75 * 12)}{5,683 * 0.36}} = 67 \text{ Unidades}$$

Donde:

A = costo de ordenamiento

D = demanda pronosticada

v = valor unitario del ítem

r = costo anual de llevar el inventario

Cálculo del valor s y S

Inicialmente se calcula la desviación estándar con base en el tiempo de reposición

$$\sigma_L = \sigma_1 \sqrt{L} = 137.82 * \sqrt{0.8} = 123 \text{ Unidades}$$

Se determina el factor de seguridad k considerando un nivel de servicio deseado de 95%, con una fórmula de Excel.

$$k = \text{DISTR.NORM.ESTAND.INV}(0.95) = 1.64$$

Luego se calcula el inventario de seguridad (SS) y la demanda estimada durante el tiempo de reposición ($\widehat{X}_L$).

$$SS = \sigma_L k = 123 * 1.64 = 203 \text{ Unidades}$$

$$\widehat{X}_L = DL = 94.75 * 0.8 = 76 \text{ Unidades}$$

Por último, se obtienen los valores del punto de reorden s y los valores del nivel máximo S .

$$s = SS + \widehat{X}_L + U = 203 + 76 + 3 = 282 \text{ Unidades}$$

$$S = Q + s - U = 67 + 282 - 3 = 345 \text{ Unidades}$$

Por lo tanto, con la política (s, S) cada vez que el nivel de inventario llegue a $s=282$, se ordenará un pedido con cantidad igual al inventario máximo $S=345$ menos el inventario efectivo en el momento de la revisión. Con lo cual se obtendría un nivel de servicio P_1 de 95%.

Para los repuestos con demanda no errática se hace el mismo procedimiento anterior, excepto que el déficit U no se tiene en cuenta.

El nivel de servicio P_2 logrado mediante esta política puede obtenerse asumiendo que todos los faltantes se convierten en ordenes pendientes y determinando $G_z(k)$ del apéndice A del libro de (Vidal, 2010) para el factor de seguridad $k = 1.64$ hallado anteriormente. Así el nivel de servicio P_2 viene dado por:

$$P_2 = 1 - \frac{\sigma_L G_z(k)}{Q} = \frac{123 * 0.021137}{67} = 96.09\%$$

En decir que el 96.09% de las unidades demandadas podrán ser satisfechas del inventario a la mano.

Calculo del CTR

$$CTR = \frac{AD}{Q} + \left(\frac{Q}{2} + SS \right) vr$$

$$\frac{4,000 * 94.75 * 12}{67} + \left(\frac{67}{2} + 203 \right) * 5,683 * 0.36 = \$551,261$$

De igual forma se realizan los mismos cálculos desarrollados anteriormente para el sistema revisión continua (s, S) con P_2 especificado y se selecciona el que arroje un menor CTR y un Nivel de servicio mayor.

La siguiente tabla muestra los cálculos realizados para la política con P_1 y P_2 especificado de todos los repuestos Clase A según las formulas expuestas anteriormente.

Tabla 33. Calculo de valores con sistema (s, S) para repuestos clase A

SISTEMA (s, S)																
CONCEPTO	500015		501162		530363		510249		570121		530364		509859		508265	
Nivel de servicio especificado (95%)	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
Demanda promedio (Mes)	94,75		49,89		34,33		24,79		16,62		8,38		25,48		63,74	
Desviación estandar (Mes)	9,73		63,48		26,53		28,31		26,88		18,93		14,44		39,34	
Tiempo de entrega (Mes)	0,8		0,3		1,5		0,3		1,0		0,3		0,6		0,4	
Costo Unitario (\$)	\$ 5.683		\$ 7.196		\$ 67.604		\$ 9.086		\$ 33.661		\$ 38.700		\$ 23.134		\$ 6.708	
Costo de Ordenar (\$)	\$ 4.000		\$ 4.000		\$ 4.000		\$ 4.000		\$ 4.000		\$ 4.000		\$ 4.000		\$ 4.000	
Tasa de mantener Inv. (Anual)	0,36		0,36		0,36		0,36		0,36		0,36		0,36		0,36	
EOQ	67		43		12		27		11		8		17		50,336074	
σ_L	123		35		32		15		27		10		11		25	
U	3		1		1		1		1		0					
Patron de demanda	Errático		Errático		Errático		Errático		Errático		Errático		No errático		No errático	
k(0.95)	1,64	1,53	1,64	1,15	1,64	1,71	1,64	0,97	1,64	1,64	1,64	1,40	1,64	1,05	1,64	0,90
Nivel de servicio obtenido	96,1%	93,7%	98,3%	87,5%	94,1%	95,6%	98,8%	83,4%	95,0%	94,9%	97,1%	91,9%	98,6%	85,3%	99,0%	81,6%
s (Min)	282	267	73	56	106	108	33	23	62	62	20	17	34	27	66	48
S (Max)	345	331	115	98	117	119	59	49	72	72	27	25	51	44	117	98

Fuente: los autores

8.2.1.2 Sistema de Revisión Periódico (R, S). Los pasos realizados para el cálculo de esta política de control son: determinar el valor del R, lo que indica cada cuanto se debe revisar el inventario, hallar el valor de S, el cual es el nivel máximo al cual debe llegar el inventario del repuesto, identificar el costo total relevante y por último, hallar el nivel de servicio correspondiente. El siguiente ejemplo se desarrolla para un sistema (R, S) con P_2 especificado, asumiendo que todos los faltantes se convierten en ordenes pendientes.

Calculo de R

$$R = \frac{EOQ}{D} = \frac{67}{94.75 * 12} = 0.0586 \text{ Años} \approx 0.7 \text{ Meses} \approx 3 \text{ Semanas}$$

Cálculo de S

Inicialmente se calcula la desviación estándar con base en el tiempo de reposición.

$$\sigma_{R+L} = \sigma_1 \sqrt{R + L} = 137.82 * \sqrt{0.70 + 0.8} = 169 \text{ Unidades}$$

Después se determina el factor de seguridad k para un nivel de servicio $P_2 = 95\%$ con la siguiente formula.

$$G_z(k) = \frac{DR}{\sigma_{R+L}} (1 - P_2) = \frac{94.75 * 12 * 0.059}{169} * (1 - 0.95) = 0.0197271$$

Del Apéndice A, del libro de (Vidal, 2010) para un valor de $G_z(k) = 0.0197271$, se obtiene un valor de $k=1.67$

Después se calcula el inventario de seguridad y la demanda estimada durante el tiempo de reposición.

$$SS = \sigma_{R+L}k = 169 * 1.67 = 282 \text{ Unidades}$$

$$\widehat{X_{R+L}} = D * (L + R) = 94.75 * (0.8 + 0.704) = 142 \text{ Unidades}$$

Por último se obtienen los valores de S.

$$S = SS + \widehat{X_{R+L}} = 282 + 142 = 425 \text{ Unidades}$$

La política de inventario (R, S) es por lo tanto, revisar el inventario cada R= 0.7 meses, es decir, aproximadamente 3 semanas y ordenar una cantidad igual a 425 unidades menos el inventario efectivo al momento de la revisión. Mediante este método, se conseguirá un nivel de servicio aproximado de P2= 95%

Para un valor de $k = 1.67$, se encuentra que $P_z(k) = 0.04746$, es decir que $P_1 = 1 - 0.04746 = 95.25\%$.

Calculo del CTR

$$CTR = \frac{A}{D} + \left(\frac{DR}{2} + SS \right) vr$$

$$\frac{4,000}{94.75 * 12} + \left(\frac{94.75 * 12 * 0.059}{2} + 282 \right) * 5,683 * 0.36 = 645,652$$

De igual forma se realizan los mismos cálculos desarrollados anteriormente para el sistema revisión periódica (R, S) con P_1 especificado y se selecciona el que arroje un menor CTR y un Nivel de servicio mayor.

La siguiente tabla muestra los cálculos realizados para la política con P_1 y P_2 especificado de todos los repuestos Clase A según las formulas expuestas anteriormente.

Tabla 34. Calculo de valores con sistema (R, S) para repuestos clase A

SISTEMA (R, S)																
CONCEPTO	500015		501162		530363		510249		570121		530364		509859		508265	
Nivel de servicio especificado (95%)	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
Demanda promedio (Mes)	94,75		49,89		34,33		24,79		16,62		8,38		25,48		63,74	
Desviación estandar (Mes)	9,73		63,48		26,53		28,31		26,88		18,93		14,44		39,34	
Tiempo de entrega (Mes)	0,8		0,3		1,5		0,3		1,0		0,3		0,6		0,4	
Costo Unitario (\$)	\$ 5.683		\$ 7.196		\$ 67.604		\$ 9.086		\$ 33.661		\$ 38.700		\$ 23.134		\$ 6.708	
Costo de Ordenar (\$)	\$ 4.000		\$ 4.000		\$ 4.000		\$ 4.000		\$ 4.000		\$ 4.000		\$ 4.000		\$ 4.000	
Tasa de mantener Inv. (Anual)	0,36		0,36		0,36		0,36		0,36		0,36		0,36		0,36	
EOQ	67		43		12		27		11		8		17		50,336074	
σR+L	169															
Patron de demanda	Errático		Errático		Errático		Errático		Errático		Errático		No errático		No errático	
k(0.95)	1,64	1,67	1,64	1,47	1,64	1,74	1,64	1,35	1,64	1,76	1,64	1,69	1,64	1,27	1,64	1,18
Nivel de servicio obtenido	94,6%	95,3%	96,6%	92,9%	93,6%	95,9%	97,4%	91,1%	93,3%	96,1%	94,4%	95,4%	97,8%	89,8%	98,2%	88,1%
R (semanas)	3		4		2		5		3		4		3		3	
S (Unidades)	420	425	171	159	123	126	89	79	85	89	45	46	66	60	146	126

Fuente: los autores

A continuación, se realiza la comparación entre el CTR (Costo Total Relevante) de las dos políticas evaluadas para cada referencia, esto con un nivel de servicio P_1 y P_2 igual a 95%. Además, se muestra el nivel de servicio obtenido para cada uno.

Tabla 35. Comparación de CTR y nivel de servicio

Item	Nivel de servicio especificado (95%)	Sistema (s, S)		Sistema (R, S)	
		Costo Total Relevante	Nivel de servicio obtenido	Costo Total Relevante	Nivel de servicio obtenido
500015	P1	\$ 551.261	96,1%	\$ 636.957	94,6%
	P2	\$ 522.294	93,7%	\$ 645.652	95,3%
501162	P1	\$ 259.533	98,3%	\$ 347.239	96,6%
	P2	\$ 214.964	87,5%	\$ 316.248	92,9%
530363	P1	\$ 1.583.794	94,1%	\$ 1.590.191	93,6%
	P2	\$ 1.635.304	95,6%	\$ 1.673.729	95,9%
510249	P1	\$ 170.625	98,8%	\$ 223.102	97,4%
	P2	\$ 136.822	83,4%	\$ 191.020	91,1%
570121	P1	\$ 674.939	95,0%	\$ 757.437	93,3%
	P2	\$ 674.335	94,9%	\$ 805.794	96,1%
530364	P1	\$ 343.465	97,1%	\$ 541.830	98,3%
	P2	\$ 308.092	91,9%	\$ 555.171	87,7%
509859	P1	\$ 295.939	98,6%	\$ 310.392	97,8%
	P2	\$ 240.530	85,3%	\$ 255.792	89,8%
508265	P1	\$ 220.409	99,0%	\$ 230.472	98,2%
	P2	\$ 175.648	81,6%	\$ 182.403	88,1%

Fuente: los autores

De acuerdo al análisis realizado en la tabla anterior, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Para la política de control (s, S), el 87.5% de los repuestos clase A arrojaron un mejor nivel de servicio P2 con P1 especificado de 95%. Aunque se puede observar que el CTR obtenido es mayor para P1 especificado que para P2 especificado, esto se debe a que para este estudio no se tuvo en cuenta el costo de faltantes.
- Para la política de control (s, S), el 12.5% de los repuestos clase A, es decir, un solo repuesto arrojó un mejor nivel de servicio P1 con P2 especificado de 95%.
- Para la política de control (R, S), el 62.5% de los repuestos clase A arrojaron un mejor nivel de servicio P2 con P1 especificado del 95%.
- Para la política de control (R, S), el 37.5% de los repuestos clase A restantes arrojó un mejor nivel de servicio P1 con P2 [CR1] especificado del 95%.
- Se puede observar que tanto para la política (s, S) como para la (R, S) el CTR fue más bajo para un nivel de servicio obtenido menor ya que no se tienen en cuenta los costos de faltantes. Por este motivo para el presente trabajo se le da prioridad al mejor nivel de servicio obtenido.

Finalmente, la siguiente tabla muestra la comparación entre los valores obtenidos de los costos totales relevantes (CTR) que presenten el mejor nivel de servicio de los repuestos clase A para las políticas de control de inventarios (s, S) y (R, S).

Tabla 36. Comparación CTR

Item	Costo Total Relevante		Disminución %
	Sistema (s, S)	Sistema (R, S)	
500015	\$ 551.261	\$ 645.652	17%
501162	\$ 259.533	\$ 347.239	34%
530363	\$ 1.635.304	\$ 1.673.729	2%
510249	\$ 170.625	\$ 223.102	31%
570121	\$ 674.939	\$ 805.794	19%
530364	\$ 343.465	\$ 541.830	58%
509859	\$ 295.939	\$ 310.392	5%
508265	\$ 220.409	\$ 230.472	5%
Total	\$ 4.151.474	\$ 4.778.210	15%

Fuente: los autores

Como se puede observar en los resultados obtenidos de la tabla anterior, la política que arroja un menor costo total relevante es la revisión continua (s, S) para el 100% de los ítems. Por lo tanto, esta es la política que se recomienda usar para el resto de los repuestos.

Los resultados obtenidos del control de inventario para los repuestos del presente trabajo se encuentran en el [Anexo 4](#)

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En el diagnóstico de la situación actual del almacén de repuestos en la empresa caso de estudio se pudo evidenciar que, aunque la compañía tiene establecido un método para planificación de repuestos en apoyo al sistema de gestión empresarial SAP, existen numerosos datos relacionados con la formulación del inventario que requieren mayor veracidad y exactitud con el fin de lograr en proyecciones futuras una mejor estimación.
- La clasificación ABC multicriterio resulta relevante para el trabajo presentado ya que a diferencia de la clasificación ABC tradicional permite clasificar los ítems teniendo en cuenta diversos criterios tales como, costo, rotación, criticidad, demanda, lead time, entre otros, que son relevantes para determinar la importancia de cada ítem. Además, Realizar dos métodos de clasificación ABC multicriterio, permitió enfocar los estudios del presente trabajo en los ítems más relevantes.
- En la clasificación de los ítems, los criterios considerados con mayor importancia fueron el consumo y el costo unitario con un peso de 49,18% y 31,09% respectivamente.
- En el análisis del patrón de demanda de los ítems clase A obtenidos mediante la clasificación ABC multicriterio, se encontró que el 75% de los repuestos tienen una demanda errática y el 25% restante tienen demanda no errática, categorizando como repuestos con demanda errática aquellos que tienen un coeficiente de variación mayor o igual a 1, de lo contrario, se categorizan los repuestos como demanda no errática.

- El método de pronóstico que presentó mejores resultados tanto para los repuestos con demanda errática como para los repuestos con demanda no errática fue el método de combinación lineal convexa, cuyo rango de variación de los factores a_i se encuentran entre -1 y 1.
- Para el alcance del presente proyecto los análisis se enfocaron en los ítems clase A, sin embargo, la metodología se puede aplicar también a los ítems clase B y C, dependiendo de las necesidades y expectativas de la compañía que la aplique.
- Con el objetivo de establecer el sistema de control de inventarios se realizó la simulación de dos métodos: El sistema (s, S) y el sistema (R, S). Como resultado se obtuvo que para el 100% de los ítems clase A evaluados, el sistema (s, S) arrojó el CTR (Costo Total Relevante) más bajo. Adicionalmente con la aplicación de este diseño de control de inventarios se garantiza bajo un nivel de servicio de 95% la reducción de los costos de inventario en un 15% aproximadamente que, aunque parece poco, solo estamos hablando de una porción muy pequeña de repuestos (8 referencias).
- El sistema de control min-máx (s, S) funciona correctamente para los repuestos, debido a que este sistema puede adaptarse al comportamiento de la demanda que estos presentan (errática y no errática).
- Respondiendo a la pregunta de investigación de la política de inventario planteada que propone responder a los interrogantes: ¿cuánto producto ordenar?, ¿cuándo ordenarlo? y ¿con qué frecuencia?, se puede concluir que para el caso estudiado donde el 100% del CTR de las referencias se ve minimizado para el caso del sistema (s, S) se debe ordenar una cantidad Q

que eleve el inventario hasta un nivel máximo S cada vez que el inventario sea igual al punto de reorden s .

- Implementar un indicador de nivel de servicio ya que actualmente no existe y es importante conocerlo para establecer metas.
- Para el cálculo de CTR no se tuvo en cuenta el costo esperado de faltante por año, ya que la empresa no tiene un valor estimado para B_1 . Sin embargo, se propone como investigaciones futuras tomar en consideración el costo de faltante para evaluar las técnicas de control.
- También como extensión de este trabajo de grado se recomienda considerar la variabilidad del lead time en la definición y aplicación de sistema de control de inventarios; debido a que para la realización de este trabajo se asumió que el lead time es constante.

10. BIBLIOGRAFÍA

Arboleda, J., & Castillo, J. A. (2017). Modelo integrado de clasificación abcmulticriterio, aplicado en el área de picking de un centro de distribución de repuestos. *Revista de investigación en ciencias estratégicas*, 3(2), 15-34.

Bacchetti, A., & Saccani, N. (2012). Spare parts classification and demand forecasting for stock control: Investigating the gap between research and practice. *Omega*, 40(6), 722-737.

Ballou, R. H. (2004). *Logística: Administración de la cadena de suministro*. Pearson Educación.

Benavides Salazar, D., & Yangana Payán, I. C. (2015). *Sistematización de metodologías para el análisis de sistemas de inventarios de dos escalones aplicada a una cadena de supermercados de la ciudad de Cali [recurso electrónico]* (Doctoral dissertation).

Castro, C. Vélez, M., & Castro, J. (2011). Clasificación ABC multicriterio: tipos de criterios y efectos en la asignación de pesos. *Iteckne*, 8(2), 163-170.

Chopra, S., & Meindl, P. (2008). Administración de la cadena de suministro. *Estrategia, planeación y operación*, 3.

Chu, C. W., Liang, G. S., & Liao, C. T. (2008). Controlling inventory by combining ABC analysis and fuzzy classification. *Computers & Industrial Engineering*, 55(4), 841-851.

Cortes, B., & Morales, L. (2014). Diseño de un sistema de control de inventarios de repuestos en una empresa manufacturera de la ciudad de Cali.

Do Rego, J. R., & de Mesquita, M. A. (2015). Demand forecasting and inventory control: A simulation study on automotive spare parts. *International Journal of Production Economics*, 161, 1-16.

Farfan Aguilar, E. (2005). Propuesta de mejoras en la gestión de repuestos.

Flores, B. E., Olson, D. L., & Dorat, V. K. (1992). Management of Multicriteria Inventory Classification. *Mathl. Comput. Modeling*, 71-82.

Hadi-Vencheh, A. (2010). An improvement to multiple criteria ABC inventory classification. *European Journal of Operational Research*, 201(3), 962-965.

Heizer, J., & Render, B. (2004). *Principios de administración de operaciones*. Pearson Educación, p. 109-111.

Holguin, C. J. V. (2010). *Fundamentos de control y gestión de inventarios*. Programa Editorial Universidad del Valle.

Hurtado, T., & Bruno, G. (2005). El Proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores. *Trabajo de grado (Licenciado en Investigación Operativa)*, Universidad Nacional de San Marcos. Facultad de Ciencias Matemáticas. EAP de Investigación Operativa., Lima.

Insuasty Peña, A. F. (2015). *Diseño de un sistema de control de inventarios de repuestos para cosechadoras en un ingenio azucarero del Valle del Cauca* (Bachelor's thesis, Universidad Autónoma de Occidente).

Jin, T., & Liao, H. (2009). Spare parts inventory control considering stochastic growth of an installed base. *Computers & Industrial Engineering*, 56(1), 452-460.

Kennedy, W. J., Patterson, J. W., & Fredendall, L. D. (2002). An overview of recent literature on spare parts inventories. *International Journal of production economics*, 76(2), 201-215.

Kennedy, W. J., Patterson, J. W., & Fredendall, L. D. (2002). An overview of recent literature on spare parts inventories. *International Journal of production economics*, 76(2), 201-215.

Liu, Y., Ni, W., & Ge, Z. (2017). Fuzzy decision fusion system for fault classification with analytic hierarchy process approach. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*.

Molenaers, A., Baets, H., Pintelon, L., & Waeyenbergh, G. (2012). Criticality classification of spare parts: A case study. *International Journal of Production Economics*, 140(2), 570-578.

Osorio Gómez, J. C., & OREJUELA CABRERA, J. P. (2008). El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. *Scientia et technica*, 14(39).

Partovi, F. Y., & Burton, J. (1993). Using the analytic hierarchy process for ABC analysis. *International Journal of Operations & Production Management*, 13(9), 29-44.

Pérez-Vergara, I., Cifuentes-Laguna, A. M., Vásquez-García, C., & Marcela-Ocampo, D. (2013). Un modelo de gestión de inventarios para una empresa de productos alimenticios. *Ingeniería Industrial*, 34(2), 227-236.

Porras, E., & Dekker, R. (2008). An inventory control system for spare parts at a refinery: An empirical comparison of different re-order point methods. *European Journal of Operational Research*, 184(1), 101-132.

Ramanathan, R. (2006). ABC inventory classification with multiple-criteria using weighted linear optimization. *Computers & Operations Research*, 33(3), 695-700.

Rezaei, J. (2007). A fuzzy model for multi-criteria inventory classification. *Analysis of Manufacturing Systems*, 167-172.

Roda, I., Macchi, M., Fumagalli, L., & Viveros, P. (2014). A review of multi-criteria classification of spare parts: From literature analysis to industrial evidences. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 25(4), 528-549.

Romeijnders, W., Teunter, R., & van Jaarsveld, W. (2012). A two-step method for forecasting spare parts demand using information on component repairs. *European Journal of Operational Research*, 220(2), 386-393.

Snyder, R. (2002). Forecasting sales of slow and fast moving inventories. *European Journal of Operational Research*, 140(3), 684-699.

Teunter, R. H., & Duncan, L. (2009). Forecasting intermittent demand: a comparative study. *Journal of the Operational Research Society*, 60(3), 321-329.

Van Jaarsveld, W., & Dekker, R. (2011). Spare parts stock control for redundant systems using reliability centered maintenance data. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(11), 1576-1586.

Wan Lung, Ng (2007). A simple classifier for multiple criteria ABC analysis. *European Journal of Operational Research*, 177(1), 344-353.

Wang, W., & Syntetos, A. A. (2011). Spare parts demand: Linking forecasting to equipment maintenance. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(6), 1194-1209.

Willemain, T. R., Smart, C. N., & Schwarz, H. F. (2004). A new approach to forecasting intermittent demand for service parts inventories. *International Journal of forecasting*, 20(3), 375-387.

Yu, M. C. (2011). Multi-criteria ABC analysis using artificial-intelligence-based classification techniques. *Expert Systems with Applications*, 38(4), 3416-3421.