

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**SECCIÓN DE POSTGRADO**



**MODELOS DE CONTROL DE INVENTARIOS PARA LA  
REDUCCIÓN DE COSTOS DE REPUESTOS DE MANTENIMIENTO  
EN TALADROS DE PERFORACIÓN OFFSHORE EN LA  
PROVINCIA DE TUMBES**

**TESIS**

PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CON  
MENCIÓN EN GERENCIA E INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

**ELABORADO POR**

DAVID BARRETO LARA

**ASESOR**

DR. ALBERTO CORONADO MATUTTI

**LIMA-PERÚ**

**2015**

## DEDICATORIA

*A mi madre y hermana, Sonia y Dayhana, por ser los pilares fundamentales en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como para la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.*

*Especialmente mi madre Sonia Lara Monge, por darme la vida, quererme mucho, creer en mí y porque siempre me apoyó con sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.*

*Por último, también dedico esta tesis a todos aquellos que me apoyaron moral y económicamente.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Esta tesis es el último paso de la maestría en ingeniería en la especialidad de Gerencia e Ingeniería de Mantenimiento de la Universidad Nacional de Ingeniería. Quiero expresar mi gratitud a las personas que me guiaron y apoyaron durante todo este largo proceso.

En primer lugar quiero agradecer a mi asesor el Dr. Alberto Coronado por su orientación y guía durante todo el desarrollo de este trabajo. Asimismo, quiero agradecer a todos mis amigos y mi familia por su apoyo durante los últimos dos años.

A todos ellos se los agradezco desde el fondo de mi alma.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA .....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	IV
LISTA DE FIGURAS .....	VII
LISTA DE TABLAS.....	X
RESUMEN.....	XII
ABSTRACT .....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XIV
<b>CAPÍTULO I. DESCRIPCIÓN Y ASPECTOS METODOLÓGICOS DE LA INVESTIGACIÓN . 16</b>	
1.1 ÁMBITO DEL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN .....	16
1.2 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	16
1.3 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	35
1.3.1 PLANTEAMIENTO DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA .....	35
1.3.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	36
1.4 OBJETIVOS .....	36
1.4.1 OBJETIVO GENERAL .....	36
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	36
1.5 HIPÓTESIS .....	37
1.5.1 HIPÓTESIS GENERAL .....	37
1.5.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS .....	37
1.6 VARIABLES E INDICADORES.....	37
1.7 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	38
1.7.1 UNIDAD DE ANÁLISIS .....	38
1.7.2 TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN .....	38
1.7.3 PERIODO DE ANÁLISIS.....	39
1.7.4 FUENTES DE INFORMACIÓN E INSTRUMENTOS UTILIZADOS .....	39
1.7.5 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS .....	39
1.8 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	39
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO..... 42</b>	
2.1 MARCO DE LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO .....	42
2.2 GESTIÓN DE REPUESTOS Y CADENA DE SUMINISTROS .....	44
2.2.1 PLANIFICACIÓN DE REQUERIMIENTOS DE MATERIALES PARA MANTENIMIENTO .....	44
2.2.2 PROPÓSITOS DEL INVENTARIO , TIPOS Y DECISIONES BÁSICAS RELACIONADAS A LOS INVENTARIOS DE MANTENIMIENTO.....	46
2.2.3 STOCK DE SEGURIDAD.....	48
2.3 REPUESTOS DE MANTENIMIENTO EN OPERACIONES DE PERFORACIÓN OFFSHORE.....	50
2.3.1 INTRODUCCIÓN .....	50
2.3.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS REPUESTOS DE MANTENIMIENTO.....	51

2.3.3 DEMANDA Y CLASIFICACIÓN DE REPUESTOS .....	51
2.3.4 REPUESTOS PARA TALADROS DE PERFORACIÓN .....	54
2.3.5 PROBLEMAS EN LAS OPERACIONES OFFSHORE .....	54
2.3.6 LA PARADOJA DE LA GESTIÓN DE REPUESTOS EN LAS OPERACIONES OFFSHORE.....	56
2.4 CLASIFICACIÓN DE INVENTARIOS .....	57
2.4.1 ENFOQUE DE CLASIFICACIÓN ABC PARA EL CONTROL DE INVENTARIO DE MANTENIMIENTO .....	57
2.4.1.1. POLÍTICAS DE CONTROL PARA ÍTEMS CON CLASIFICACIÓN A,B Y C ...	58
2.5 PRONÓSTICO DE LA DEMANDA.....	60
2.6 MODELOS DE CONTROL DE INVENTARIOS .....	61
2.6.1 MODELO DETERMINÍSTICO DE LA CANTIDAD ECONÓMICA DE PEDIDO.....	61
2.6.1.1. LAS SUPOSICIONES DEL MODELO EOQ .....	67
2.6.1.2. VARIACIÓN EN LA CANTIDAD ÓPTIMA.....	68
2.6.1.3. INCERTIDUMBRE EN LA DEMANDA Y LOS COSTOS.....	71
2.6.1.4. CUANDO UTILIZAR EL MODELO EOQ.....	73
2.6.2 MODELOS DE INVENTARIO PROBABILÍSTICOS.....	74
2.6.2.1. EL EOQ CON DEMANDA INCIERTA: LOS MODELOS (r,q) Y (s,S).....	74
2.6.2.1.1. DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE PEDIDO: EL CASO DE PEDIDOS PENDIENTES.....	77
2.6.2.1.2. DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE PEDIDO: EL CASO DE LAS VENTAS PERDIDAS.....	83
2.6.2.1.3. POLÍTICAS DE REVISIÓN CONTINUA (r, q).....	84
2.6.2.1.4. POLÍTICAS DE REVISIÓN CONTINUA (s, S).....	84
2.6.2.2. POLÍTICA DE REVISIÓN PERIÓDICA (R, S) .....	85
2.6.2.2.1. DETERMINACIÓN DE R.....	89
2.6.2.3. EL ENFOQUE DEL NIVEL DE SERVICIO PARA DETERMINAR EL NIVEL DE STOCK DE SEGURIDAD.....	90
2.7 MARCO CONCEPTUAL .....	92

### **CAPÍTULO III. EVALUACIÓN DEL ESTADO SITUACIONAL DE LA GESTIÓN DE REPUESTOS EN EL ALMACÉN DE ZORRITOS Y LOS TALADROS DEL LOTE Z-1 EN BASE A DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS, SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE MODELOS DE CONTROL DE INVENTARIOS..... 96**

3.1 DESCRIPCIÓN GENÉRICA DEL PROCESO DE GESTIÓN DE MATERIALES DE LOS TALADROS DEL LOTE Z-1 Y ALMACÉN ZORRITOS.....	96
3.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS COMPONENTES EN LOS TALADROS PER21 Y PER28.....	98
3.3 ANÁLISIS DE INVENTARIO .....	105
3.3.1 NIVEL DE INVENTARIO Y VALORIZACIÓN DE STOCK .....	107
3.3.2 ANÁLISIS DE LOS MOVIMIENTOS .....	111
3.3.2.1. ANÁLISIS DE LOS ÍTEMS DEL GRUPO 3.....	114
3.3.3 CLASIFICACION ABC .....	119
3.3.4 ANÁLISIS DE LA DEMANDA HISTÓRICA .....	123
3.3.5 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD ECONÓMICA DE PEDIDO .....	128
3.3.6 ANALISIS DEL TIEMPO DE ESPERA.....	131
3.3.7 DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE PEDIDO Y STOCK DE SEGURIDAD .....	133
3.3.8 DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS VARIABLES TEORICOS.....	142
3.3.9 DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS VARIABLES REALES .....	145

<b>CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN Y CONTRASTACIÓN DE LAS HIPÓTESIS .....</b>	<b>148</b>
4.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL NIVEL DE INVENTARIO Y VALORIZACIÓN DEL STOCK .....	148
4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS MOVIMIENTOS DE MATERIALES .....	149
4.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN ABC .....	151
4.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA DEMANDA HISTÓRICA .....	153
4.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD ECONÓMICA DE PEDIDO .....	153
4.6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL TIEMPO DE ESPERA .....	154
4.7 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS PUNTOS DE PEDIDO Y STOCK DE SEGURIDAD .....	154
4.8 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS COSTOS VARIABLES TEÓRICOS Y REALES .....	155
4.9 CONTRASTACIÓN DE LAS HIPÓTESIS .....	156
CONCLUSIONES.....	159
RECOMENDACIONES .....	161
BIBLIOGRAFÍA.....	163
ANEXO: ESTIMACIÓN DE COSTO POR PEDIDO ( $C_0$ ) Y TASA ANUAL DEL COSTO DE TENENCIA (h) .....	168

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Distribución de lotes petroleros de la provincia de Tumbes. ....	16
<b>Figura 1.2.</b> Repuestos críticos gestionados por condición según Godoy et al. ....	29
<b>Figura 1.3.</b> Diagrama de decisión de clasificación de criticidad según Molenaers et al. ...	34
<b>Figura 1.4.</b> Esquema KPMG de iniciativas en base a su facilidad relativa de implementación vs su potencial de ahorros relativos .....	40
<b>Figura 2.1.</b> Marco de mantenimiento de acuerdo a Wireman.....	43
<b>Figura 2.2.</b> Marco de mantenimiento de acuerdo a Campbell. ....	43
<b>Figura 2.3.</b> El inventario de mantenimiento y su impacto en el retorno en los activos netos (RONA).....	46
<b>Figura 2.4.</b> Propósitos importantes del inventario.....	47
<b>Figura 2.5.</b> Actividades típicas del mantenimiento correctivo .....	50
<b>Figura 2.6.</b> Consumo típico de repuestos .....	52
<b>Figura 2.7.</b> Principales patrones para la caracterización de la demanda de repuestos. ...	53
<b>Figura 2.8.</b> Distribución de los campos de petróleo en el mar de Tumbes.....	56
<b>Figura 2.9.</b> Pasos para la agrupación por el uso anual en dólares.....	59
<b>Figura 2.10.</b> Patrón de inventario para el modelo EOQ.....	64
<b>Figura 2.11.</b> Costos anuales de tenencia, pedidos y totales .....	66
<b>Figura 2.12.</b> Muestra de la curva de costo variable poco profunda alrededor de la EOQ	70
<b>Figura 2.13.</b> Grafico del incremento en la variable costo contra el error en el pronóstico de la demanda .....	73
<b>Figura 2.14.</b> Evolución de inventario sobre el tiempo en el modelo del punto de pedido.	76
<b>Figura 2.15.</b> Equilibrio entre costos de tenencia y costos de desabastecimiento.....	81
<b>Figura 3.1.</b> Disposición del almacén en Zorritos y los taladros PER21 y PER28 en el mar de Tumbes.....	97
<b>Figura 3.2.</b> Flujo de trabajo para la satisfacción de la demanda de materiales en los taladros del lote Z-1. ....	97
<b>Figura 3.3.</b> Esquema de la distribución de las bases de datos de gestión de inventarios	98
<b>Figura 3.4.</b> Cantidad de ítems del taladro PER21 agrupados por zona. ....	107
<b>Figura 3.5.</b> Valor de material en almacén del taladro PER21 agrupado por zona.....	107
<b>Figura 3.6.</b> Cantidad de ítems del taladro PER28 agrupados por zona. ....	108
<b>Figura 3.7.</b> Valor de material en almacén del taladro PER28 agrupado por zona.....	108
<b>Figura 3.8.</b> Cantidad de ítems agrupados por caso de análisis.....	109

<b>Figura 3.9.</b> Valor de material en almacén agrupado por caso de análisis. ....	109
<b>Figura 3.10.</b> Cantidad de ítems agrupados por zona.....	110
<b>Figura 3.11.</b> Valor de material en almacén agrupado por zona.....	110
<b>Figura 3.12.</b> Cantidad de ítems en cada taladro disgregados por grupo.....	112
<b>Figura 3.13.</b> Valor de material en cada taladro disgregado por grupo.....	112
<b>Figura 3.14.</b> Cantidad de ítems en cada grupo disgregados por taladro.....	113
<b>Figura 3.15.</b> Valor de material en cada grupo disgregado por taladro.....	113
<b>Figura 3.16.</b> Valor de material sin consumo en cada zona agrupado por taladro. ....	114
<b>Figura 3.17.</b> Valor de material sin consumo en cada taladro agrupado por zona. ....	114
<b>Figura 3.18.</b> Valor de material sin consumo en los taladros agrupado por número de locaciones en las que se encuentra. ....	115
<b>Figura 3.19.</b> Valor de material sin consumo en múltiples locaciones agrupado por el taladro al cual pertenece. ....	115
<b>Figura 3.20.</b> Valor de material sin consumo histórico en el taladro PER21 agrupado por fabricante.....	116
<b>Figura 3.21.</b> Valor de material sin consumo histórico en el taladro PER28 agrupado por fabricante.....	117
<b>Figura 3.22.</b> Valor de material sin consumo histórico en el caso PER21/28 agrupado por fabricante.....	118
<b>Figura 3.23.</b> Valor de material sin consumo en el propio taladro pero con consumo en el otro taladro.....	119
<b>Figura 3.24.</b> Cantidad de ítems en cada taladro agrupados por categoría ABC. ....	119
<b>Figura 3.25.</b> Porcentaje en cantidad de ítems en cada taladro agrupados por categoría ABC. ....	120
<b>Figura 3.26.</b> Valor-Uso en cada taladro agrupado por categoría ABC .....	120
<b>Figura 3.27.</b> Valor de material en los almacenes de cada taladro agrupado por categoría ABC. ....	121
<b>Figura 3.28.</b> Cantidad de ítems que cambian de categoría al comparar los casos aislados contra el caso consolidado agrupado por taladro.....	121
<b>Figura 3.29.</b> Valores de $CV^2_D$ para ítems con $CV^2_D \leq 1$ , caso PER21. ....	124
<b>Figura 3.30.</b> Valores de $CV^2_D$ para ítems con $CV^2_D \leq 1$ , caso PER28. ....	125
<b>Figura 3.31.</b> Valores de $CV^2_D$ para ítems con $CV^2_D \leq 1$ , caso PER21/28. ....	126
<b>Figura 3.32.</b> Patrón de demanda para algunos materiales del PER21 con $CV^2_D < 0.49$ . 127	



<b>Figura 3.33.</b> Patrón de demanda para algunos materiales del PER21 con $CV^2_D$ entre 0.8 y 1.5.....	127
<b>Figura 3.34.</b> Patrón de demanda para algunos materiales del PER21 con $CV^2_D$ mayores a 2.....	128
<b>Figura 3.35.</b> Análisis de sensibilidad del EOQ para varios valores de h, caso PER21/28. .....	131
<b>Figura 3.36.</b> Análisis de sensibilidad del punto de pedido para varios valores de h y un nivel de servicio de 95%, caso PER21/28. ....	141
<b>Figura 3.37.</b> Análisis de sensibilidad del stock de seguridad para varios valores de h y un nivel de servicio de 95%, caso PER21/28. ....	141

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.1.</b> Lista de criterios de criticidad según Molenaers et al.....	33
<b>Tabla 2.1.</b> Elementos del costo de tenencia de inventarios.....	62
<b>Tabla 3.1.</b> Datos técnicos de los componentes criticidad A del taladro PER21.....	99
<b>Tabla 3.2.</b> Datos técnicos de los componentes criticidad A del taladro PER28.....	100
<b>Tabla 3.3.</b> Datos técnicos de los componentes criticidad B del taladro PER21.....	101
<b>Tabla 3.4.</b> Datos técnicos de los componentes criticidad B del taladro PER21.....	102
<b>Tabla 3.5.</b> Datos técnicos de los componentes criticidad B del taladro PER28.....	103
<b>Tabla 3.6.</b> Datos técnicos de los componentes criticidad B del taladro PER28.....	104
<b>Tabla 3.7.</b> Materiales con mayor valor uso en las distintas categorías y casos.....	122
<b>Tabla 3.8.</b> Cantidad de ítems que caen en diferentes intervalos de $CV_D^2$ .....	123
<b>Tabla 3.9.</b> EOQ y EOQ' para diferentes valores de h, caso PER21.....	129
<b>Tabla 3.10.</b> EOQ y EOQ' para diferentes valores de h, caso PER28.....	129
<b>Tabla 3.11.</b> EOQ y EOQ' para diferentes valores de h, caso PER21/28.....	130
<b>Tabla 3.12.</b> EOQ' para los casos aislados comparado contra el caso consolidado.....	131
<b>Tabla 3.13.</b> Media y varianza del tiempo de espera para ítems de categoría A con $CV_D^2 \leq 0.49$ , caso PER21.....	132
<b>Tabla 3.14.</b> Media y varianza del tiempo de espera para ítems de categoría A con $CV_D^2 \leq 0.49$ , caso PER28.....	132
<b>Tabla 3.15.</b> Media y varianza del tiempo de espera para ítems de categoría A con $CV_D^2 \leq 0.49$ , caso PER21/28.....	133
<b>Tabla 3.16.</b> Parámetros estadísticos de los ítems de la categoría A y $CV_D^2 \leq 0.49$ , caso PER21.....	134
<b>Tabla 3.17.</b> Parámetros estadísticos de los ítems de la categoría A y $CV_D^2 \leq 0.49$ , caso PER28.....	135
<b>Tabla 3.18.</b> Parámetros estadísticos de los ítems de la categoría A y $CV_D^2 \leq 0.49$ , caso PER21/28.....	136
<b>Tabla 3.19.</b> Punto de pedido para diferentes niveles de servicio y un $h=25\%$ , caso PER21.....	137
<b>Tabla 3.20.</b> Punto de pedido para diferentes niveles de servicio y un $h=25\%$ , caso PER28.....	137
<b>Tabla 3.21.</b> Punto de pedido para diferentes niveles de servicio y un $h=25\%$ , caso PER21/28.....	138

<b>Tabla 3.22.</b> Stock de seguridad para diferentes niveles de servicio y un $h=25\%$ , caso PER21. ....	139
<b>Tabla 3.23.</b> Stock de seguridad para diferentes niveles de servicio y un $h=25\%$ , caso PER28. ....	139
<b>Tabla 3.24.</b> Stock de seguridad para diferentes niveles de servicio y un $h=25\%$ , caso PER21/28. ....	140
<b>Tabla 3.25.</b> Costos de tenencia, pedido y total según el modelo de demanda incierta para varios niveles de servicio, caso PER21. ....	142
<b>Tabla 3.26.</b> Costos de tenencia, pedido y total según el modelo de demanda incierta para varios niveles de servicio, caso PER28. ....	143
<b>Tabla 3.27.</b> Costos de tenencia, pedido y total según el modelo de demanda incierta para varios niveles de servicio, caso PER21/28. ....	144
<b>Tabla 3.28.</b> Nivel de inventario promedio y costo de tenencia reales para los materiales del caso PER21/28. ....	145
<b>Tabla 3.29.</b> Nivel de inventario promedio y costo de tenencia reales para los materiales del caso PER21. ....	146
<b>Tabla 3.30.</b> Nivel de inventario promedio y costo de tenencia reales para los materiales del caso PER28. ....	146
<b>Tabla 3.31.</b> Cantidad de pedidos y costos de pedido real. ....	147
<b>Tabla 3.32.</b> Costos de tenencia, pedido y total reales. ....	147
<b>Tabla 4.1.</b> Resumen de los costos teóricos obtenidos para varios niveles de servicio comparados contra los costos reales para los diferentes casos de análisis .....	155
<b>Tabla A.1:</b> Estimaciones de las tasas de costo de tenencia por zona. ....	172

## RESUMEN

En los últimos años se han iniciado varios proyectos de perforación en el lote Z-1, en este contexto la compañía “DRILLER” logra hacerse con dos contratos para perforar con los taladros PER21 y PER28, y a la vez implementa un almacén en tierra para proveer soporte logístico a dichos taladros, al evaluar la gestión de repuestos de mantenimiento en dicho contexto se observaron las siguientes situaciones: no se tenían identificados repuestos críticos de mantenimiento, ni se había evaluado la cantidad mínima de estos a mantener en stock, los pedidos de compra solo se basaban en la experiencia del personal en campo, y finalmente se desconocían parámetros básicos como demanda, tiempo de entrega entre otros. Como consecuencia, se propuso la presente investigación cuyo propósito es analizar en qué medida un modelo de control de inventarios influye en la reducción de los costos de repuestos de mantenimiento en las operaciones de la empresa “DRILLER” en la zona de Tumbes. Los resultados del análisis muestran que alrededor del 70% del valor del material en almacén no era utilizado y que para niveles de servicio cercanos al 85% se obtiene una disminución de costos en los materiales de uso constante.

**PALABRAS CLAVE:** Taladro de Perforación, Offshore, Gestión de Repuestos, Costos, Demanda, Tiempo de espera, Zorritos, modelos de control de inventarios.

## ABSTRACT

In recent years several drilling projects have started in the department of Tumbes, in this context the company "DRILLER" manages to take two contracts to operate with the drilling rigs PER21 and PER28 and, at the same time, implements an onshore warehouse to provide logistical support to those rigs, when assessing the maintenance spare parts management of this warehouse the following situations were observed: the critical maintenance spares parts had not been identified, neither the minimum quantity of them to keep stored, material requests were only based on the staff's experience, and finally basic parameters such as demand forecast, delivery time among others were unknown. As a consequence, it was proposed the following research whose purpose is to analyze to what extent an inventory control model influences the reduction of maintenance costs of spare parts in the operations of the company "DRILLER" in the area of Tumbes. The results show that about the 70% of the warehouse value was not used and for service levels around 85% it can be obtained a reduction in costs for critical materials with steady use.

**KEYWORDS:** Drilling Rigs, Offshore, Spare parts management, Costs, Demand, Lead Time, Zorritos, inventory control models.

## INTRODUCCIÓN

El tema de optimización de inventarios siempre ha sido materia de constantes estudios por diversos investigadores debido a la incidencia directa que tiene en las finanzas de las organizaciones y a los potenciales ahorros, en cuanto a capital de trabajo, que podrían ser obtenidos al aplicar nuevas metodologías de control.

En el presente trabajo se busca la reducción de costos de los inventarios de repuestos en los taladros de perforación en la provincia de Tumbes en base al estudio, selección y aplicación de los modelos de control de inventarios. En el desarrollo de este trabajo se han empleado diversos análisis, métodos de clasificación y estimación de parámetros para observar su impacto en la reducción de los costos de inventario.

Debido a temas de confidencialidad el verdadero nombre de la organización en donde se realiza esta investigación se mantiene en reserva y dentro del trabajo se le hará referencia como la compañía "DRILLER", asimismo, los taladros que operan en el lote Z-1 serán denominados PER21 y PER28.

Esta tesis consta de 4 capítulos y un apartado final en donde se exponen las conclusiones y recomendaciones. Se finaliza con la lista de las referencias bibliográficas en la cual se sustenta la investigación y un anexo que muestra cómo han sido estimados ciertos parámetros.

En el **primer capítulo** revisamos el estado del arte sobre el tema de gestión de inventarios, describimos el ámbito del desarrollo de la investigación, planteamos la problemática y establecemos los objetivos, hipótesis y variables de la investigación, así como su importancia y justificación.

En el **segundo capítulo** presentamos los fundamentos teóricos que sostienen este trabajo, se revisan temas como la planificación de repuestos, características y problemas de los repuestos en operaciones de perforación offshore, metodología de clasificación de inventarios ABC, métodos de pronóstico de demanda y los modelos de control de inventarios. Al final de este capítulo se presenta un marco conceptual.

En el **tercer capítulo** se analiza el estado situacional de la gestión de repuestos de los taladros del lote Z-1 y almacén Zorritos, se presentan los equipos principales de los taladros PER21 y PER28, y se muestran los resultados de los análisis realizados sobre los materiales en los almacenes.

En el **cuarto capítulo** se realiza el análisis de los resultados presentados en el tercer capítulo y al final del capítulo se contrasta cada una de las hipótesis específicas establecidas en el primer capítulo así como la hipótesis general.

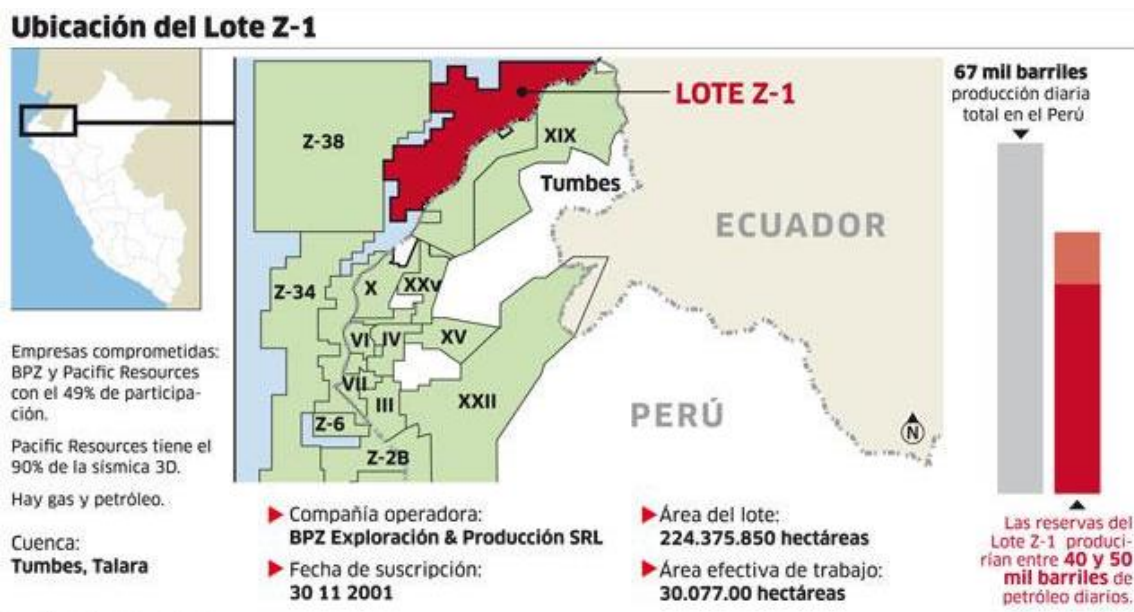
La tesis finaliza exponiendo las conclusiones y recomendaciones obtenidas, así como la bibliografía de las fuentes utilizadas y un anexo detallado de la estimación de los parámetros de costo de repuestos.

# CAPÍTULO I. DESCRIPCIÓN Y ASPECTOS METODOLÓGICOS DE LA INVESTIGACIÓN

## 1.1 ÁMBITO DEL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación se desarrolla en el contexto del almacén de la empresa DRILLER S.A. ubicado en la localidad de Zorritos, provincia de Contralmirante Villar, departamento de Tumbes y de los 2 taladros de perforación, PER21 y PER28, los cuales operan en el lote Z-1 que está ubicado en el mar de Tumbes.

Figura 1.1. Distribución de lotes petroleros de la provincia de Tumbes.



Fuente: Tomada de edición digital del diario "La Republica". Disponible en: <http://www.larepublica.pe/infografias/ubicacion-del-lote-z-1-26-02-2013>

## 1.2 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

El tema de optimización de inventarios siempre ha sido materia de constantes investigaciones por diversos autores debido a la incidencia directa que tiene en las finanzas de las organizaciones y a los potenciales ahorros, en cuanto a capital de trabajo, que podrían ser obtenidos al aplicar nuevas metodologías de control; entre estos autores tenemos a:



**Kennedy, Wayne y Fredendall (2001)**<sup>1</sup> , los cuales hacen un análisis sobre el estado del arte con respecto a la literatura en inventarios de repuestos y cuyo objetivo final es el poder definir las necesidades de investigaciones futuras a través de una revisión exhaustiva de investigaciones anteriores. Mientras realizan esta revisión, ellos resaltan las principales diferencias entre los principales tipos de inventarios y los inventarios de repuestos para mantenimiento.

La primera diferencia que ellos mencionan es en cuanto a su función, mientras que la función de inventarios de trabajos-en-proceso (WIP) es suavizar las irregularidades en el flujo de producción, y la función de los inventarios de productos terminados es la de proveer una fuente de productos para entregar a clientes y son diseñados para proteger contra irregularidades en la demanda de tiempos de entrega, diferencia en niveles de calidad, etc.; la función de los inventarios de mantenimiento es la asistencia al personal de mantenimiento en mantener los equipos en condiciones operativas.

La segunda diferencia es en cuanto a las políticas que gobiernan los inventarios de repuestos, los inventarios WIP y de productos terminados pueden disminuir o aumentar al cambiar las tasas y programas de producción, al mejorar la calidad, al reducir los tiempos de entrega, etc. En cambio los niveles de los inventarios de mantenimiento son en gran medida función de cómo son utilizados los equipos y como son mantenidos. Los mantenimientos que requieren cierto repuesto algunas veces pueden ser pospuestos o evitados, y así la elección de una acción de mantenimiento puede tener un impacto inmediato en el inventario.

También son evaluados los aspectos únicos de los inventarios de mantenimiento, uno de ellos, ya mencionado, es el tipo de políticas que se manejan y como esta es afectada por la decisión de si una pieza dañada es reparada o reemplazada, otro aspecto es la utilización de sistemas redundantes, ambos puntos influyen directamente en los niveles de inventario. Un segundo punto es la información de confiabilidad que se tenga ya que este puede ayudar en las predicciones del momento en que se debe reemplazar un componente. Un tercer aspecto es que

---

<sup>1</sup> **WILLIAM J.KENNEDY, J. WAYNE PATTERSON & LAWRENCE D. FREDENDALL.** An overview of recent literature on spare parts inventories [en línea]. Artículo publicado. International Journal of production economics. 2002. [Fecha de acceso 11 de marzo del 2015]. URL disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527301001748>

las fallas de las piezas son frecuentemente dependientes de algún factor adicional. El cuarto aspecto es que la demanda de piezas a veces se satisface con canibalismo de otros componentes. Un quinto aspecto son los costos de no tener un repuesto a la mano (merma de calidad, pérdida de producción, etc.), estos costos generalmente son difíciles de cuantificar, el incremento de riesgo al personal también es un factor y los costos asociados no son fáciles de calcular. El sexto aspecto es la obsolescencia ya que las máquinas para las cuales fueron diseñados los repuestos se vuelven obsoletas y son reemplazadas. El último aspecto es que es más común almacenar sub partes de un equipo que el equipo entero y si la unidad mayor es cara, la reparación es preferible al reemplazo.

Dentro del desarrollo de la investigación se hace la diferenciación entre los dos tipos de mantenimiento fundamentales: el mantenimiento preventivo o planificado y las reparaciones o mantenimientos no planificados, para el primero, la demanda de repuestos es predecible y se podría evitar el almacenamiento al realizar órdenes que lleguen cuando sea necesario utilizarlos. Para los mantenimientos no planeados, las consecuencias del desabastecimiento frecuentemente incluyen pérdidas de producción con costos significantes y es necesario algún tipo de stock de seguridad. Si el stock de seguridad es necesario, la cantidad depende de las políticas de gestión, obsolescencia, etc. En base a esto, las investigaciones del área se enfocan principalmente en los siguientes temas:

- a) Investigaciones generales, estos revisan la función de mantenimiento y describen algunos de los principales problemas a resolver.
- b) Problemas de gestión, como métodos de organización y reducción de repuestos.
- c) Reemplazos basados en la edad.
- d) Problemas de múltiple escalón (varios centros de almacenamiento).
- e) Problemas que involucran obsolescencia.
- f) Repuestos reparables.
- g) Aplicaciones especiales.

Como conclusión los autores de esta investigación identifican que las necesidades futuras de investigación en este campo serán con respecto al uso del internet y las bases de datos y como estas podrán interactuar para acelerar y mejorar la comunicación entre los proveedores de repuestos y los usuarios finales con su consecuente impacto en la mejora del mantenimiento.

Diez años después, **Rego y Mesquita (2011)**<sup>2</sup> vuelven a realizar una revisión de la literatura existente en la época pero esta vez enfocándose solamente en el control de inventarios de piezas de repuestos con ubicaciones únicas, resaltando principalmente las técnicas de predicción de la demanda y las decisiones en el control de inventarios.

De acuerdo a la investigación de estos autores, algunos de los factores importantes en la gestión de inventarios son:

- Los clientes tienen grandes expectativas en cuanto a la calidad de los productos y servicios, además, la ocurrencia de fallas y el retraso en la reparación debido a la falta de repuestos son ya una principal preocupación, y la ocurrencia de estos empeoran la percepción negativa de los clientes.
- Algunos ítems tienen alta demanda, pero la gran mayoría tiene una demanda intermitente.
- La creciente complejidad de los productos y la reducción de los ciclos de vida incrementa la cantidad de piezas con riesgo de obsolescencia.
- También se remarca la diferencia entre repuestos desechables y repuestos reparables, debido principalmente al alto costo de los segundos

Otra dimensión del control de inventarios está asociada con la existencia de inventarios con ubicaciones únicas o varias ubicaciones, estos autores enfocan su revisión sobre las investigaciones de inventarios con ubicaciones únicas. La investigación empieza analizando los métodos para predecir la demanda

---

<sup>2</sup> **JOSE ROBERTO DO REGO & MARCO AURÉLIO DE MESQUITA.** Controle de estoque de peças de reposição: uma revisão da literatura [en línea]. Artículo publicado. Produção. 2011. [Fecha de acceso 11 de marzo del 2015]. URL disponible en: <http://www.prod.org.br/doi/10.1590/S0103-65132011005000002>

intermitente, después se enfocan en la clasificación de ítems, decisiones de almacenar o no un ítem, ordenes iniciales, control de inventarios, obsolescencia y órdenes finales para finalmente brindar sus conclusiones.

- 1. Predicción de la demanda:** muchos repuestos tienen demanda intermitente, es decir, son necesarios en momentos dados y después hay periodos largos en que no son necesarios. La demanda intermitente es difícil de predecir y la escasez puede generar altos costos.
- 2. Clasificación de repuestos:** esta es una parte esencial de los sistemas de gestión de inventarios para: i) determinar el nivel adecuado de atención en cuanto a gestión, ii) Permitir la elección de los métodos de predicción de la demanda y del control de inventario y iii) establecer metas de desempeño sobre la rotación del inventario (*turnover*) y los niveles de servicio entre las categorías. También, es recomendable que los repuestos sean clasificados en las categorías: Vital, Esencial y deseable –VED, y que los bienes consumibles sean clasificados en las categorías: valor alto, medio y bajo. También los repuestos pueden ser clasificados en base a la variabilidad de la demanda durante el tiempo de entrega, la cantidad demanda por orden y el tiempo de reaprovisionamiento, en básicamente tres categorías: Intermitente, movimiento lento y suave.
- 3. Decisión de almacenar o no:** una alternativa para reducir los niveles de inventario de repuestos es la revisión crítica de la necesidad de mantener o no un ítem. Los modelos desarrollados bajo la premisa de que todos los ítems deben ser almacenados deberían ser reconsiderados, en algunos casos es mejor adquirir un ítem solo bajo demanda.
- 4. Ordenes iniciales:** cuando nuevos productos surgen, los administradores de repuestos pueden decidir anticiparse a la aparición de la demanda, creando un inventario inicial de repuestos, o pueden dejar que aparezca la demanda, y solo entonces, generar las órdenes. Aunque los errores en las órdenes iniciales pueden ser corregidos en el futuro, es difícil establecer el tamaño de la orden inicial, debido a la falta de demanda histórica.

**5. Control de inventarios:** este tema se subdivide en dos partes, la primera parte trata sobre los modelos de control de inventario clásicos, mientras que la segunda parte se enfoca en los modelos específicos para demanda intermitente.

a. **Modelos Clásicos:** los modelos de inventario para productos con demanda alta e independiente están consolidados en el área de gestión de operaciones. Desde el trabajo original de la cantidad económica de pedido (EOQ) se han desarrollado diferentes modelos de inventario, los dos primeros son básicos para inventarios con demanda alta y estable, mientras que el tercero es mejor para inventarios con baja demanda:

i. **Revisión Continua (R, Q),** el inventario es continuamente monitoreado y, cuando el nivel alcanza el punto de pedido R se hace un pedido de Q ítems.

ii. **Revisión periódica (T, S):** las órdenes son colocadas en un intervalo fijo de tiempo T, en cantidades que reemplacen el inventario para que alcancen el máximo nivel S.

iii. **Stock base (B):** en este, por cada salida del inventario, se coloca una orden del mismo tamaño para reemplazar, manteniendo el inventario constante e igual a B.

b. **Modelos de gestión de repuestos:** los autores citados al inicio , dentro de su revisión literaria, hacen referencia a varias metodologías desarrolladas para este tema, entre ellas destacan: formulaciones similares al modelo (R,Q) considerando intervalos variables entre demandas de acuerdo a la distribución gamma para demandas intermitentes y posteriormente expandida hacia los ítems con movimiento lento, otras formulaciones se valen de modelos bayesianos para predecir la demanda así como los historiales de falla para modelar la demanda y los niveles requeridos. otros modelos se basan en clasificar la demanda en crítica y no crítica y hacer reservas para suplir la demanda crítica. Finalmente otro de los

modelos propuestos se enfoca en los niveles de inventario deseados, minimizando solo los costos de desabastecimiento.

- 6. Obsolescencia y ordenes finales:** la parada de producción de cierto producto causa que el ciclo de vida de los repuestos exclusivos de este producto entren a una fase de decremento, lo cual trae importantes preguntas: ¿por cuánto tiempo deberían ser reemplazados los repuestos del inventario? ¿Cuánto debería ser ordenado en el último pedido? Después del último pedido, dado que se tendrá una cantidad excesiva de repuestos almacenados, ¿Cuánto debería ser desechado debido a la disminución de la demanda?

Como conclusiones se obtiene que el objetivo de este trabajo era la búsqueda del estado del arte actual y la identificación los vacíos que puedan guiar los trabajos futuros. También se menciona que existe un gran vacío en cuanto a investigaciones sobre decisiones de almacenar o no. De la investigación también se desprende que gracias a los actuales recursos computacionales es posible realizar clasificación de ítems dinámicamente y finalmente la conclusión principal es que la selección de un modelo de control de inventario es una actividad crítica dentro del proceso general de gestión de inventarios con muchos ítems.

De lo visto hasta este punto podemos notar que existen varios temas a estudiar dentro del área de gestión de repuestos, en esta tesis nos enfocaremos en: predicción de la demanda, clasificación de repuestos y modelos de control de inventarios ya que son estos los que están alineados con los objetivos planteados.

### **Predicción de la demanda**

**Aronis, Magou, Dekker y Tagaras (2004)**<sup>3</sup> en su afán de afrontar el problema de la predicción de la demanda de repuestos proponen una metodología bayesiana con el objetivo de predecir la demanda y determinar el parámetro  $S$  de un sistema de inventario tipo  $(S-1, S)$  para el control de repuestos de equipos electrónicos. La metodología seguida por los autores fue la de describir el problema y la política

---

<sup>3</sup> **KOSTAS-PLATON ARONIS, IOULIA MAGOU, ROMMERT DEKKER & GEORGE TAGARAS.** Inventory control of spare parts using a Bayesian approach: A case study [en línea]. Artículo publicado. European Journal of Operational Research. 2004. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221702008378>

actual, después muestran los elementos básicos de la metodología bayesiana y el procedimiento de cálculo del parámetro S apropiado. Finalmente para validar sus resultados aplican el modelo en un caso real donde existen tres tipos de paquetes de circuitos. Utilizando unos valores estimados iniciales y el historial de fallas pueden determinar la distribución de la demanda para los repuestos y calcular los niveles requeridos en almacén, como conclusión del trabajo se obtiene que un nivel más bajo de repuestos que el actual es suficiente para lograr los niveles de servicio deseado.

Ese mismo año aparece la investigación realizada por **Willemain, Smart y Schwarz (2004)**<sup>4</sup> quienes buscan implementar un nuevo enfoque para predecir la demanda intermitente para inventarios de piezas de servicio a través de la predicción de la distribución acumulativa de la demanda sobre un periodo fijo de tiempo utilizando un nuevo tipo de series de tiempo de arranque (*bootstrap*), en el trabajo también se hace mención de otros dos métodos: el de suavizado exponencial y el método de Croston. Para validar su formulación teórica utilizan nueve grandes conjuntos de datos industriales y con eso demuestran que el método de arranque (*bootstrapping method*) propuesto, produce predicciones más precisas de la distribución de la demanda sobre un periodo fijo de tiempo que los métodos de suavizado exponencial o el método de Croston.

Otro enfoque brindado en la investigación de **Dekker, Pinçe, Zuidwijk y Jalil (2013)**<sup>5</sup> es que la predicción de la demanda es difícil si uno se basa solamente en la información histórica, así que proponen el uso de la información de la base instalada para que sirva de soporte en las predicciones, la base instalada viene definida como todos los sistemas/componentes que una compañía tiene en uso dentro de su área operativa y son abastecidos por los almacenes más cercanos, para demostrar su punto de vista se valen de cuatro casos de compañías.

---

<sup>4</sup> **THOMAS R. WILLEMMAIN, CHARLES N. SMART & HENRY F. SCHWARZ.** A new approach to forecasting intermittent demand for service parts inventories [en línea]. Artículo publicado. International journal of forecasting. 2004. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016920700300013X>

<sup>5</sup> **ROMMERT DEKKER, ÇERAĞ PINÇE, ROB ZUIDWIJK & MUHAMMAD NAIMAN JALIL.** On the use of installed base information for spare parts logistics: A review of ideas and industry practice [en línea]. Artículo publicado. International Journal of Production Economics. 2013. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527311004889>

Adicionalmente, dentro de la investigación se hace mención a los principales problemas presentes en la logística de piezas de repuesto, estos problemas son:

- a) **Tiempos de espera:** es conocido que en la logística de repuestos se manejan tiempos de espera largos lo cual dificulta su gestión, en este tiempo también están incluidos los tiempos de fabricación de la pieza y los tiempos de transporte. También, si los costos de parada son altos, los tiempos de espera de repuestos de un día no son aceptables, en estos casos se tiene que balancear los costos de desabastecimiento con los costos de tenencia y los costos de obsolescencia.
- b) **Características de la demanda:** esta es generalmente intermitente, errática de lento movimiento, como resultado pocos datos están disponibles para realizar predicciones basadas en análisis de series de tiempo.
- c) **Intercambio de información:** hay oportunidades para compartir inventarios entre diferentes sitios operativos cercanos en vez de que cada uno maneje su propio inventario.
- d) **Fase del ciclo de vida del producto y repuestos:** la demanda depende en gran medida de la fase en que se encuentran los equipos, al iniciar la vida útil la mortalidad infantil hace que la demanda vaya cayendo hasta estabilizarse en cambio al final de la vida las fallas son más recurrentes y se requiere mayor cantidad de repuestos.

Otra de las investigaciones del área brindada por **Wang y Syntetos (2011)**<sup>6</sup> analiza la relación entre la predicción de la demanda y el mantenimiento de los equipos, estos autores concuerdan con los anteriores en que la demanda de repuestos es intermitente y la predicción de ellos es desafiante. Con su investigación ellos pretenden responder las siguientes preguntas: ¿Por qué la demanda de repuestos es intermitente? y ¿cómo podemos utilizar los modelos desarrollados en mantenimiento para predecir dicha demanda? En este estudio,

---

<sup>6</sup> **WENBIN WANG & ARIS A. SYNTETOS.** Spare parts demand: Linking forecasting to equipment maintenance [en línea]. Artículo publicado. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2011. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554511000585>



las respuestas a estas preguntas se logran comparando pronósticos de demanda obtenidos de un método de previsión estadístico de series de tiempo y métodos basados en mantenimiento, utilizando datos simulados de un modelo de mantenimiento bien establecido.

Desde el punto de vista de optimización de inventarios, ya se han visto varias metodologías en las investigaciones mostradas anteriormente, sin embargo, en este estudio se mencionan los esfuerzos en el campo de la optimización del mantenimiento, optimización de los intervalos del mantenimiento preventivo, programas de reemplazo y mejoras en confiabilidad, pero también se remarca que estos estudios se enfocan netamente en el mantenimiento y pocas veces son tratados en conjunto con relación al pronóstico de demanda de repuestos. La principal conclusión de este trabajo es que si los datos de fallas y averías de los ítems pueden ser capturados, es decir la información de confiabilidad, entonces los modelos basados en mantenimiento deberían ser usados para propósitos de pronóstico de demanda.

**Romeijnders, Teunter y Jaarsveld (2012)**<sup>7</sup> plantean una metodología basándose en la información de operaciones de reparación que para ellos es lo que causa que la demanda sea intermitente y abultada, el método de dos pasos (two-step method) para pronóstico de demanda que proponen actualiza dos variables el número promedio de repuestos necesarios por reparación y el número de reparaciones por cada tipo de componente. Este método es probado en un estudio comparativo y empírico para un proveedor de servicios de la industria de la aviación, y posteriormente utilizando una simulación, sus resultados arrojan que el método de dos pasos es uno de los métodos más precisos y es considerablemente mejor que el método de Croston y mencionan que, a diferencia de los otros métodos, el método de dos pasos puede utilizar información del mantenimiento planeado y reparaciones para reducir los errores de pronósticos hasta un 20%.

---

<sup>7</sup> **WARD ROMEIJNDERS, RUUD TEUNTER & WILLEM VAN JAARSVELD.** A two-step method for forecasting spare parts demand using information on component repairs [en línea]. Artículo publicado. European Journal of Operational Research. 2012. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221712000392>

Es importante resaltar que en esta investigación se enumeran los principales métodos para pronosticar la demanda, los cuales son:

- 1) Pronostico cero.
- 2) Pronostico ingenuo.
- 3) Pronostico de movimiento promedio.
- 4) Pronostico de suavizado exponencial.
- 5) Método de pronóstico de Croston.
- 6) Aproximación de Syntetos-Boylan.
- 7) Método de pronóstico de Teunter-Syntetos-Babai.
- 8) Pronostico de dos pasos.

Como se puede notar el principal problema que uno enfrenta al investigar el área de gestión de inventarios es el pronóstico de la demanda, muchos autores han propuesto metodologías basadas en información histórica de consumo y reparaciones, formulaciones estadísticas y nuevas filosofías, sin embargo hay otra corriente que considera que la demanda de repuestos puede ser pronosticada valiéndose del monitoreo basado en la condición, entre estos autores destacan:

**Liao y Rausch (2010)**<sup>8</sup> quienes indican que una vez que una falla se manifiesta se necesita realizar actividades de mantenimiento con el soporte de repuestos, sin embargo, usualmente la disponibilidad de estos repuestos se convierte en el cuello de botella del proceso lo que origina que se deban generar órdenes de compra muy caras por emergencias para poder lograr las restricciones de calendario. El objeto del estudio propuesto por estos autores es utilizar el monitoreo de condición como una estrategia en integración con una política de gestión de inventarios de tipo Stock Base (B) con el objetivo de determinar el nivel de servicio de repuestos y reducir al mínimo el costo operativo total. Para lograr

---

<sup>8</sup> **HAITAO LIAO & MITCHELL RAUSCH.** Spare part inventory control driven by condition based maintenance [en línea]. Artículo publicado. In Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2010 Proceedings-Annual, IEEE. 2011. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://dx.doi.org/10.1109/RAMS.2010.5448059>

esto emplean un enfoque de dos etapas utilizando una aproximación restringida de mínimos cuadrados y técnicas de optimización basadas en simulación, finalmente el modelo es puesto a prueba en un proceso de manufactura de motores de auto para demostrar el uso de la estrategia propuesta.

Sobre el mismo asunto, los investigadores **Louit, Pascual, Banjevic y Jardine (2011)**<sup>9</sup> proporcionan otra metodología enfocada en el monitoreo de condición de componentes de alta criticidad. Su modelo está orientado hacia la determinación de decisiones de pedir repuestos cuando el componente está sujeto a un programa de monitoreo de condición, la variable del modelo propuesto es la vida útil remanente la cual es estimada a través de evaluaciones de la edad del componente y los indicadores de condición que representan la situación de la salud del componente, las suposiciones del modelo son: tiempos de esperas aleatorios, y un componente simple con configuración simple de repuestos, estos autores también manifiestan que su modelo solo es aplicable si el periodo entre la detección de la falla potencial y la ocurrencia de la falla funcional es mayor que el tiempo de espera del repuesto requerido. Al final muestran un caso de estudio de una pala minera para probar la metodología que proponen.

Siguiendo la misma línea, **Jaarsveld y Dekker (2011)**<sup>10</sup> centran su atención en la determinación de costos de desabastecimiento o de las tasas mínimas de reabastecimiento utilizando datos de mantenimiento centrado en confiabilidad, los autores manifiestan que para responder la pregunta sobre cuantos repuestos se debe almacenar, la tasa de reabastecimiento y los costos de desabastecimiento son factores claves, sin embargo, estas variables frecuentemente son difíciles de estimar, con el objetivo de superar este problema se propone una metodología basada en los datos recolectados de estudios de mantenimiento centrado en confiabilidad para determinar los costos de desabastecimiento, también se explica que el hecho de utilizar información del mantenimiento centrado en confiabilidad

---

<sup>9</sup> **DARKO LOUIT, RODRIGO PASCUAL, DRAGAN BANJEVIC & ANDREW K.S. JARDINE.** Condition-based spares ordering for critical components [en línea]. Artículo publicado. Mechanical Systems and Signal Processing. 2011. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327011000148>

<sup>10</sup> **WILLEM VAN JAARVELD & ROMMERT DEKKER.** Spare parts stock control for redundant systems using reliability centered maintenance data [en línea]. Artículo publicado. Reliability Engineering & System Safety. 2011. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832011001347>

genera complicaciones ya que existe una relación compleja entre este y los costos de desabastecimiento cuando existen múltiples piezas de equipo, una complicación adicional es la redundancia de sistemas, sin embargo el método aproximativo-analítico propuesto permite modelar dichos sistemas complejos, esto permite determinar las cantidades mínimas a mantener en almacén. Para validar sus resultados los autores hacen uso de un análisis cuantitativo sobre los datos una gran compañía petroquímica el cual arroja que el modelo se desempeña bien bajo las condiciones explicadas.

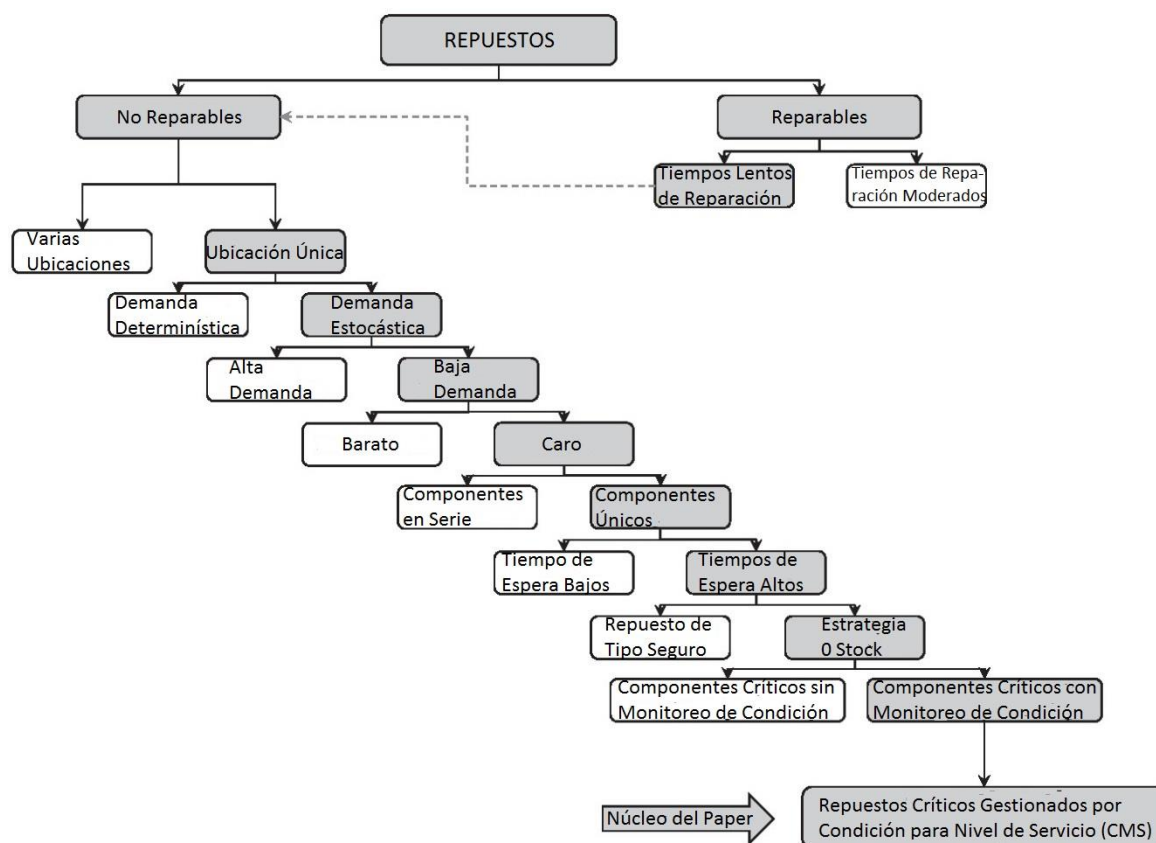
Una investigación similar es la propuesta por **Godoy, Pascual y Knights (2013)**<sup>11</sup> quienes centran sus esfuerzos en el desarrollo de una técnica de ayuda a las decisiones de adquisición de repuestos que utiliza una medida de desempeño del repuesto, basados en la teoría de interferencia esfuerzo-resistencia, lo cual llaman nivel de servicio basado en la condición (CBSL), el cual es definido como la probabilidad de que el esfuerzo aplicado sobre el sistema no sobrepase la resistencia del sistema. Ellos se enfocan principalmente en los repuestos críticos gestionado por condición (CMS) los cuales son repuestos caros, muy confiables, con tiempos de espera grandes, y no disponibles en el almacén, además están sometidos al monitoreo de condición (Ver figura 1.2.) . El objetivo de este trabajo es orientar el momento de decidir cuándo pedir repuesto CMS o si solo se debe continuar con la operación. El trabajo también presenta una técnica grafica basado en el indicador CBSL que considera una regla para decisiones sustentadas en la función de la confiabilidad basada en la condición y tiempos de espera estocásticos y fijos. Sus resultados arrojan que para el caso de un tiempo de espera estocástico la técnica es efectiva para determinar cuando la operación del sistema es confiable y puede resistir la variabilidad del tiempo de entrega, satisfaciendo el nivel de servicio requerido. Para el caso de un tiempo de espera fijo, la técnica ayuda a definir repuestos de seguro. El caso de estudio presentado es un motor eléctrico de un camión de transporte de minería y el aceite es el factor clave para modelar la condición del proceso. La conclusión es que con el

---

<sup>11</sup> **DAVID R. GODOY, RODRIGO PASCUAL & PETER KNIGHTS.** Critical spare parts ordering decisions using conditional reliability and stochastic lead time [en línea]. Artículo publicado. Reliability Engineering & System Safety. 2013. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832013001579>

fin de lograr la continuidad operacional, los datos del monitoreo de condición pueden ser una herramienta muy poderosa para la gestión de repuestos.

**Figura 1.2.** Repuestos críticos gestionados por condición según Godoy et al.



Fuente: Godoy, D. R., Pascual, R., & Knights, P. (2013). Critical spare parts ordering decisions using conditional reliability and stochastic lead time. *Reliability Engineering & System Safety* [en línea]. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832013001579>

**Kocer y Tamer (2011)**<sup>12</sup> se centran en el tema de los ítems con demanda lenta o también llamados *slow-moving* ítems, estos autores a través de una comparación de los diferentes métodos para modelar la demanda del tiempo de entrega logran identificar los puntos de pedido óptimos en un caso de estudio de un establecimiento minorista, también manifiestan que en la literatura del área existen pocas investigaciones sobre ejemplos de aplicación con datos reales.

<sup>12</sup> **UMAY UZUNOGLU KOCER & SEZIN TAMER.** Determining the Inventory Policy for Slow-Moving Items: A Case Study [en línea]. Artículo publicado. In *Proceedings of the World Congress on Engineering*. 2011. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: [http://www.iaeng.org/publication/WCE2011/WCE2011\\_pp139-143.pdf](http://www.iaeng.org/publication/WCE2011/WCE2011_pp139-143.pdf)

Asimismo **Liu (2013)**<sup>13</sup> centra su atención en los repuestos de movimiento lento, el manifiesta que los repuestos *slow-moving* son más caros, más críticos, y más difícil de prever que los repuestos de alta rotación, por lo cual su gestión es más complicada. En su tesis, este autor analiza el caso específico de los repuestos de lento de movimiento de la planta nacional de electricidad de china (NEPP), presenta las desventajas del tradicional método ABC y desarrolla un modelo mejorado de clasificación ABC basado en el método de dos etapas que involucra la criticidad de los equipos. Así, usando el modelo de dos etapas y considerando la dificultad del control de repuestos lentos se genera un modelo de inventario. Mediante este modelo él logra encontrar el tamaño y punto de pedido óptimo, además muestra la efectividad del modelo utilizado con diferentes casos reales, concluyendo que el modelo de inventario es efectivo y tiene un buen desempeño en la mayoría de los casos.

Hasta este punto hemos revisado la literatura relacionada a los pronósticos de la demanda y como estos pueden ser afrontados con diversas metodologías, algunas basadas en series de tiempo, aproximaciones estadísticas, datos históricos, monitoreo basado en la condición, etc. También hemos revisado las investigaciones correspondientes a los ítems de movimiento lento y las dificultades que presenta su gestión. Ahora corresponde revisar el tema sobre clasificación de repuestos, tema que nos permitirá ahorrar muchos esfuerzos al momento de definir las políticas de control de inventarios.

### **Clasificación de Repuestos**

**Flores, Olson y Dorai (1992)**<sup>14</sup> indican que el método más común para clasificar piezas de inventario es el enfoque ABC, sin embargo manifiestan que la clasificación ABC algunas veces no puede ser tan útil por solo basarse en el criterio del valor anual por lo cual se ha venido proponiendo utilizar una

---

<sup>13</sup> **LIU ZONGJIAN.** Inventory management of slow moving spare parts in National Electricity Power Plant of China [en línea]. Tesis de maestría. Molde University College, Noruega. 2013. [Fecha de acceso 11 de marzo del 2015]. URL disponible en: <http://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/153668>

<sup>14</sup> **BENITO E. FLORES, DAVID L. OLSON & V.K. DORAI.** Management of multicriteria inventory classification [en línea]. Artículo publicado. Mathematical and Computer Modelling. 1992. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/089571779290021C>

clasificación ABC de múltiple criterio para incluir factores adicionales como los tiempos de entrega y la criticidad. El objetivo de este estudio es proponer y analizar el uso del proceso analítico jerárquico (AHP) para reducir el enfoque de múltiple criterio a una sola medida consistente e invariante, para verificar las hipótesis del trabajo se utiliza un ejemplo numérico y luego los resultados son discutidos.

En la misma línea, **Rezai y Dowlatshahi (2010)**<sup>15</sup> proponen un enfoque basado en reglas de múltiple criterio, para lo cual diseñan un método simple, efectivo y practico basado en reglas y lógica difusa el cual es implementado en el software MATLAB para ser puesto a prueba en un caso de una compañía de fabricación de comida, los autores manifiestan que la más importante característica de su propuesta es que toma en cuenta las ambigüedades inherentes que existen en el proceso de razonamiento en el sistema de clasificación y al utilizar la lógica difusa les permite utilizar palabras del mundo real (o lenguaje natural) tanto en la computación como en el razonamiento del problema descrito, también indican que su metodología es fácil para ser implementado por los administradores de inventarios ya que ellos prefieren valores lingüísticos en vez de numéricos. Para validar su modelo, los resultados obtenidos son comparados con el enfoque AHP.

**Molenaers, Baets, Pintelon y Waeyenbergh (2011)**<sup>16</sup> por su parte, proponen un método para clasificar los repuestos en base a la criticidad del ítem. Comenzando con un análisis de criterio múltiple, su modelo convierte criterios relevantes de la criticidad del ítem en un puntaje simple que representa el nivel de criticidad. Este nivel de criticidad es utilizado para racionalizar la eficiencia de la política de inventarios de repuestos. El modelo propuesto por los autores presenta el problema de clasificación de criterio múltiple en un diagrama de decisión lógico donde el AHP (Proceso analítico jerárquico) es usado para resolver subproblemas de decisión de múltiple criterio en los diferentes nodos de decisión

---

<sup>15</sup> **JAFAR REZAEI & SHAD DOWLATSHAHI.** A rule-based multi-criteria approach to inventory classification [en línea]. Artículo publicado. International Journal of Production Research. 2010. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207540903348361>

<sup>16</sup> **AN MOLENAERS, HERMAN BAETS, LILIANE PINTELON & GEERT WAEYENBERGH.** Criticality classification of spare parts: A case study [en línea]. Artículo publicado. International Journal of Production Economics. 2012. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527311003549>

del diagrama. Para validar sus formulaciones teóricas prueban su modelo en una planta petroquímica.

Dentro de su formulación, los autores manifiestan que la clasificación de repuestos permite a los administradores enfocarse en los ítems más “importantes” y facilita el proceso de toma de decisiones. Sin embargo, estos ítems “importantes” desde la perspectiva del mantenimiento son diferentes comparados con aquellos “importantes” desde el punto de vista de la logística o inventario. Esos repuestos para los cuales la indisponibilidad resultaría en consecuencias severas para la planta son percibidos como ítems importantes para los gerentes de mantenimiento. Desde la perspectiva de gestión de inventarios, otros parámetros como costos de tenencia o patrones de demanda parecen criterios clasificación más valiosos cuando definimos políticas de almacenamiento para las diferentes clases. Debido a los altos requerimientos de servicio y recursos financieros involucrados, es obvio que la clasificación es un área importante de investigación.

Los autores también mencionan que en términos de clasificación de repuestos desde el punto de vista de mantenimiento, emergen criterios de clasificación como falla de máquinas, tiempos de espera, confiabilidad del proveedor y criticidad del ítem. Este último, la criticidad del ítem, ha sido reconocido en la literatura, pero no está bien definido y ciertamente no se ha llegado a un consenso sobre cómo medirlo. Usualmente la criticidad de un ítem está expresado como el impacto que podría tener su desabastecimiento en la producción, seguridad y medio ambiente.

El número de atributos utilizados en la metodología indicada se pueden ver en la tabla 1.1. Un punto interesante en la investigación es el diagrama de decisión desarrollado por los autores, este diagrama lo podemos apreciar en la figura 1.3.

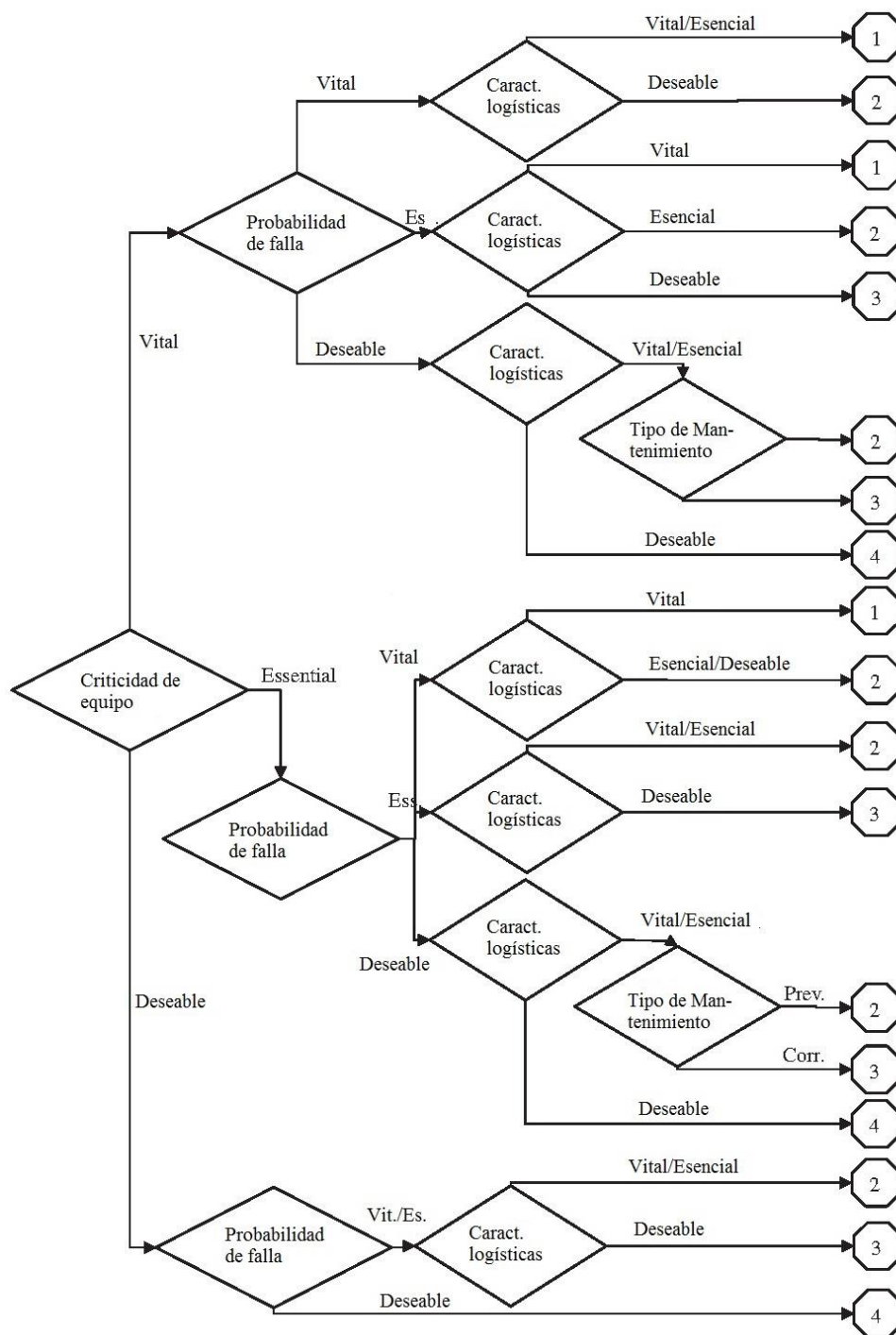


**Tabla 1.1.** Lista de criterios de criticidad según Molenaers et al.

<b>Criterio de Criticidad</b>	<b>Descripción</b>
Criticidad del equipo	La criticidad del equipo se refiere a la clase de criticidad que posee el equipo. La organización distingue entre seis casos posibles, denominados, A, B, C, D, E y F. Basados en una matriz de riesgo, la categoría de riesgo es evaluada como la frecuencia de falla de un equipo y las posibles consecuencias de la falla.
Probabilidad de falla del ítem	La probabilidad de falla es la posibilidad de falla o avería de la pieza de repuesto.
Tiempo de reaprovisionamiento	El tiempo total transcurrido desde que la necesidad de un material es comunicado hasta que el ítem ha sido recibido, chequeado, ingresado al sistema de gestión y está disponible para su uso.
Número de proveedores potenciales	El número de proveedores potenciales (fuera de sitio) que son capaces de entregar el repuesto específico al solicitante.
Disponibilidad de especificaciones técnicas	La disponibilidad de información técnica (BOM, dibujos CAD-CAM, etc.) del artículo.
Tipo de mantenimiento	El tipo de mantenimiento realizado en el equipo.

Fuente: Molenaers, A., Baets, H., Pintelon, L., & Waeyenbergh, G. (2012). Criticality classification of spare parts: A case study. *International Journal of Production Economics* [en línea]. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527311003549>

**Figura 1.3.** Diagrama de decision de clasificacion de criticidad según Molenaers et al.



Fuente: Molenaers, A., Baets, H., Pintelon, L., & Waeyenbergh, G. (2012). Criticality classification of spare parts: A case study. International Journal of Production Economics [en línea]. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527311003549>

### **1.3 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

#### **1.3.1 PLANTEAMIENTO DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA**

En los últimos años se han iniciado varios proyectos de perforación en la provincia de Tumbes. La empresa DRILLER, empresa dedicada al servicio de perforación y mantenimiento de pozos petroleros, logró hacerse con contratos para proveer dos taladros de perforación a la empresa operadora del lote Z-1, los taladros PER21 y PER28, ambos taladros para operación en mar.

En vista de la falta de espacio a bordo de las plataformas y para mejorar el soporte logístico de las operaciones, se estableció una base en tierra (almacén) en el distrito de Zorritos, cuya función principal sería la de servir como almacén intermedio de todos los elementos necesarios que apoyen la operación (repuestos de mantenimiento, elementos de seguridad, equipos de protección personal, etc.).

Al realizar una evaluación de la gestión de repuestos de este almacén se observa que esta no está estandarizada para todos los elementos, es decir, se tiene metodologías de control de inventarios para elementos de seguridad, pero no se tienen ninguna metodología para la gestión del inventario de repuestos de mantenimiento.

De lo señalado líneas arriba se desprenden las siguientes situaciones asociadas:

- No se tienen clasificados los repuestos de mantenimiento bajo ningún criterio de gestión.
- No se tiene evaluada la demanda de los repuestos de mantenimientos ni los puntos de pedido.
- No se tienen estimados los tiempos promedios de entrega de pedidos de ítems críticos.
- No se ha evaluado la cantidad necesaria de repuestos de mantenimiento críticos a mantener en almacén
- Los pedidos de nuevas adquisiciones de repuestos no son basados en algún tipo de análisis científico o paramétrico, sino que recaen en la

experiencia del personal en campo, entiéndase personal de mantenimiento u operaciones.

Estos hechos evidencian que la actual gestión de repuestos de mantenimiento en las operaciones de perforación offshore en la zona de Tumbes debe ser mejorada.

### **1.3.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿En qué medida un modelo de control de inventarios se constituye en una herramienta para reducir los costos de repuestos de mantenimiento de los equipos de perforación offshore en la provincia de Tumbes?

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

Reducir, en base a la selección y aplicación de un modelo de control de inventarios, los costos de repuestos de mantenimiento de los taladros de perforación offshore de la provincia de Tumbes.

### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Reducir, en base a evaluar la tasa de consumo histórica, los costos de repuestos de mantenimiento de los taladros de perforación offshore de la provincia de Tumbes.
- b) Reducir, en base a estimar el tamaño óptimo de pedido, los costos de repuestos de mantenimiento de los taladros de perforación offshore de la provincia de Tumbes.
- c) Reducir, en base a estimar tiempo de entrega, los costos de repuestos de mantenimiento de los taladros de perforación offshore de la provincia de Tumbes.
- d) Reducir, en base a establecer puntos de pedido para ítems críticos, los costos de repuestos de mantenimiento de los taladros de perforación offshore de la provincia de Tumbes.

## **1.5 HIPÓTESIS**

### **1.5.1 HIPÓTESIS GENERAL**

Aplicando como herramienta un modelo de control de inventarios se reducirán los costos de repuestos de mantenimiento de los taladros de perforación offshore de la provincia de Tumbes.

### **1.5.2 HIPÓTESIS ESPECIFICAS**

- a) Aplicando como herramienta la evaluación de la tasa de consumo histórica se reducirán los costos de repuestos de mantenimiento de los taladros de perforación offshore de la provincia de Tumbes.
- b) Aplicando como herramienta la estimación el tamaño óptimo de pedido se reducirán los costos de repuestos de mantenimiento de los taladros de perforación offshore de la provincia de Tumbes.
- c) Aplicando como herramienta la estimación del tiempo de entrega se reducirán los costos de repuestos de mantenimiento de los taladros de perforación offshore de la provincia de Tumbes.
- d) Aplicando como herramienta el establecimiento de los puntos de pedido para ítems críticos se reducirán los costos de repuestos de mantenimiento de los taladros de perforación offshore de la provincia de Tumbes.

## **1.6 VARIABLES E INDICADORES**

### **VARIABLE INDEPENDIENTE O EXPLICATIVA**

X: Modelo de control de inventario

Indicadores:

X1: Consumo histórico de repuestos.

X2: Tamaño de pedido.

X3: Tiempo de entrega.

X4: Punto de pedido.

## VARIABLE DEPENDIENTE

Y: Reducir los costos de repuestos de mantenimiento en los taladros de perforación offshore de la provincia de Tumbes.

Indicadores

Y1: Costos de repuestos de mantenimiento.

## 1.7 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.7.1 UNIDAD DE ANÁLISIS

La unidad de análisis comprende a los taladros PER21 y PER28, a sus almacenes en mar, los cuales los abastecen en el día a día y al almacén central en tierra que los abastece en un horizonte de tiempo que va desde semanas a meses.

### 1.7.2 TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN

Puesto que el objetivo principal de la investigación es evaluar y analizar las relaciones de causa-efecto entre las variables “modelo de control de inventario” y “reducir los costos de repuestos de mantenimiento en taladros de perforación offshore en la provincia de Tumbes” , entonces, el tipo de investigación es de carácter Analítica Explicativa, y de los siguiente niveles:

- a) **Descriptiva:** Se describen detalladamente los diversos hechos, razones o causas incidentes en la realidad problemática, las mismas que se constituyeron en las causas fundamentales que motivaron la necesidad de investigar.
- b) **Explicativa:** Se explicaron cada uno de los hechos, causas o acciones generadoras del problema.
- c) **Correlacional:** La investigación es correlacional porque sigue una secuencia lógica desde la descripción de la realidad problemática, el planteamiento del problema, los objetivos, las hipótesis, la determinación de las variables, hasta la formulación de los respectivos indicadores y debido a que establece correlaciones entre variables.

### **1.7.3 PERIODO DE ANÁLISIS**

Para la mayor parte de los análisis se tomó información comprendida entre el 01 de Abril del 2014 hasta el 31 de Marzo del 2015, excepto para el análisis del tiempo de espera (*lead time*) en donde se utilizó toda la información histórica disponible.

### **1.7.4 FUENTES DE INFORMACIÓN E INSTRUMENTOS UTILIZADOS**

Las fuentes de información para comprender, modelar y resolver el problema planteado fueron revistas indexadas y tesis de maestría, en algunos casos se recurrió a fuentes de internet, principalmente para algunas figuras.

Las fuentes de información para la realización de los análisis provienen de los sistemas informáticos de la empresa, los datos se obtienen del ERP SAP® y del CMMS AMOS®.

### **1.7.5 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS**

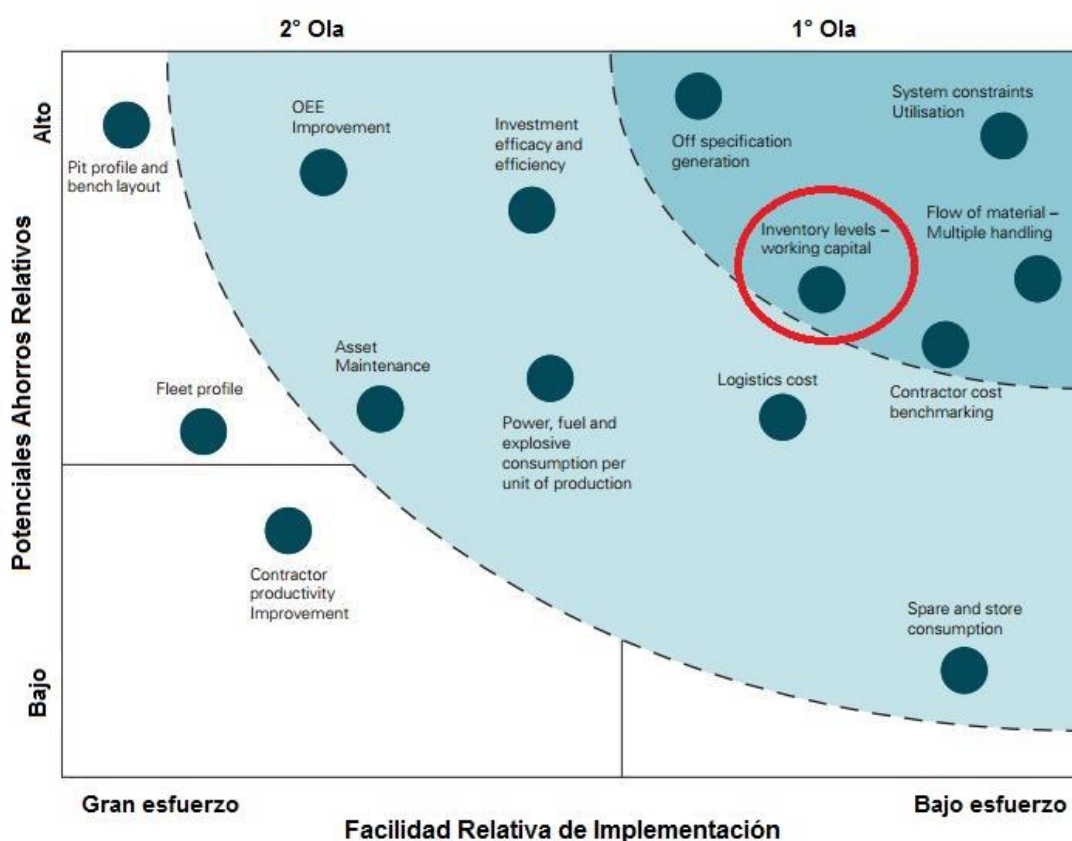
La información es recolectada autónomamente accediendo a las bases de datos de SAP® y AMOS®, esta es colocada en hojas de cálculo y los datos son ordenados para facilitar su posterior análisis. Una vez que la información es obtenida y ordenada, esta pasa a un proceso de depuración para identificar valores fuera de rango o información incompleta, solo con los datos depurados se procede a realizar los análisis correspondientes que proporcionarán los parámetros para los modelos de control de inventarios.

### **1.8 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN**

La importancia de esta investigación se sustenta en que debido al contexto económico actual, las restricciones presupuestarias y la posibilidad de utilizar los recursos en otros planes de inversión, la evaluación de la eficiencia del uso de los recursos en inventarios de la empresa es relevante para la alta gerencia de las compañías que basan su desarrollo en el uso intensivo de sus activos.

De acuerdo a un reporte de la consultora KPMG<sup>17</sup> del año 2011 tenemos que las actividades ligadas a la optimización de los inventarios están dentro de las iniciativas que requieren bajo esfuerzo y tienen un alto potencial de ahorros (Zona Wave 1), Ver Figura 1.4.

**Figura 1.4.** Esquema KPMG de iniciativas en base a su facilidad relativa de implementación vs su potencial de ahorros relativos



Fuente: Tomado de “KPMG Mining Operational Excellence Framework”,2011. Disponible en <https://www.kpmg.com/Global/en/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/mining-operational-excellence.pdf>

Si buscamos casos de éxito en la industria de petróleo y gas podemos citar el trabajo de **Zhigao, S. (2013)**<sup>18</sup> en un taladro de perforación offshore en la bahía de Bohai en China, quien en una primera etapa identificó que un 35% del costo

<sup>17</sup> **KPMG GLOBAL ENERGY INSTITUTE.** KPMG Mining Operational Excellence Framework [en línea]. Publicación corporativa. 2014. [Fecha de acceso 11 de enero del 2015]. URL disponible en: <https://www.kpmg.com/Global/en/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/mining-operational-excellence.pdf>

<sup>18</sup> **ZHIGAO SHANGGUAN.** Spare parts management in Bohai bay [en línea]. Tesis de maestría. Universidad de Stavanger, Noruega. 2013. [Fecha de acceso 11 de enero del 2015]. URL disponible en: <http://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/183117>



total del inventario no había sido utilizado en los últimos 5 años, también encontró que este inventario sin rotación pertenecía a 3 componentes principales, después de analizar el inventario el autor logró reducir en un 27% el costo del inventario de un componente crítico y adicionalmente logró identificar que un 33% del total del costo debía moverse hacia otros sitios ya que no se utilizarían más en el taladro analizado, todo esto se logró con la aplicación de la clasificación de inventarios y los métodos de control de inventarios.

El valor agregado que se da en esta tesis, además del análisis y evaluación del estado situacional de la gestión de repuestos de mantenimiento en taladros de perforación offshore y el gran potencial de obtener una conclusión o resultado que permitiría liberar una importante suma de dinero comprometida en los almacenes, es el de identificar mejoras en los procesos actuales, evaluar si la actual estructura organizativa del almacén en Zorritos es eficiente o si esta podría ser optimizada.

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 MARCO DE LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO<sup>19</sup>

¿Cuál es el marco - la estructura de soporte esencial y el sistema básico - necesario para gestionar el mantenimiento de manera efectiva? Para empezar, vamos a revisar algunas de las aportaciones más interesantes y útiles que se encuentran en la literatura sobre este tema.

**Wireman**<sup>20</sup> propone una aplicación secuencial de pasos para garantizar que todas las funciones para la gestión de mantenimiento estén en su lugar. Considera que un programa básico de mantenimiento preventivo (PM) debe estar en su lugar antes de que avancemos hacia el siguiente nivel, la implementación del CMMS. Él afirma que un "sistema de lanzamiento de órdenes de trabajo" adecuado (para programar y activar las tareas adecuadamente priorizadas) y un sistema de gestión de los recursos de mantenimiento son necesarios antes de que uno considere la implementación del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) y programas de mantenimiento predictivo. Los operadores también deben ser conscientes de la importancia de su propio papel en la función de mantenimiento. De este modo, el operador además de la participación general de los empleados sería el siguiente nivel a abordarse en el proceso de implementación. Para una visión general del modelo de Wireman ver figura 2.1.

**Campbell**<sup>21</sup> también sugiere una estructura formal para la gestión eficaz del mantenimiento (ver figura 2.2). El proceso se inicia con el desarrollo de una estrategia para cada activo. Está totalmente integrado con el plan de negocios. Al mismo tiempo, se ponen de relieve los aspectos de recursos humanos

---

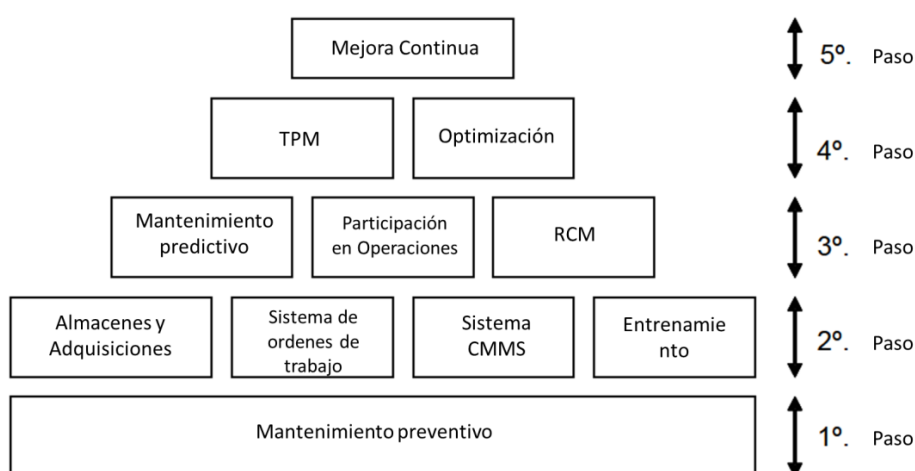
<sup>19</sup> **ADOLFO CRESPO MÁRQUEZ.** The maintenance management framework: models and methods for complex systems maintenance. Sevilla España. Editorial Springer Science & Business Media. 2007. PP 333

<sup>20</sup> **TERRY WIREMAN.** Developing performance indicators for managing maintenance. 2da Edición. New York, USA. Industrial Press, Inc. 2005. PP 288

<sup>21</sup> **JOHN D. CAMPBELL.** Uptime: Strategies for Excellence in Maintenance Management. 2da Edición. Portland, USA. Productivity Press. 2006. PP 384

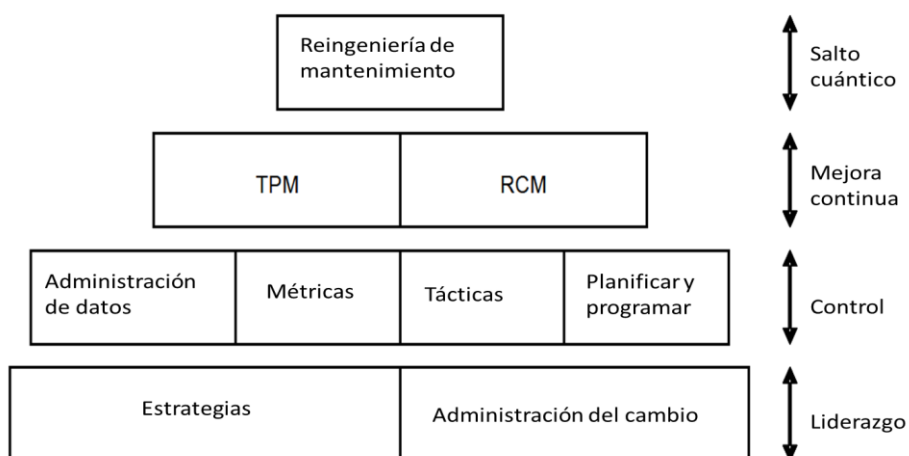
relacionados para producir el cambio cultural necesario. A continuación, la organización gana el control para garantizar la funcionalidad de cada activo a lo largo de su ciclo de vida. Esto se lleva a cabo a través de la implementación de un CMMS, un sistema de medición de la función de mantenimiento, y la planificación y la programación de las actividades de mantenimiento se llevan a cabo de acuerdo con diversas tácticas empleadas en función del valor que estos activos representan y los riesgos que conllevan para la organización.

**Figura 2.1.** Marco de mantenimiento de acuerdo a Wireman.



Fuente: Márquez, A. C. (2007). The maintenance management framework: models and methods for complex systems maintenance. Sevilla España. Editorial Springer Science & Business Media. PP 333

**Figura 2.2.** Marco de mantenimiento de acuerdo a Campbell.



Fuente: Márquez, A. C. (2007). The maintenance management framework: models and methods for complex systems maintenance. Sevilla España. Editorial Springer Science & Business Media. PP 333

## 2.2 GESTIÓN DE REPUESTOS Y CADENA DE SUMINISTROS

### 2.2.1 PLANIFICACIÓN DE REQUERIMIENTOS DE MATERIALES PARA MANTENIMIENTO

Mantener las piezas de repuesto y otros materiales de mantenimiento en inventario requiere un esfuerzo financiero importante para muchas organizaciones. Manteniendo este inventario las empresas garantizan un cierto nivel de disponibilidad de los equipos y reducir el riesgo, pero ese esfuerzo tiene un costo que a menudo es difícil de estimar. Los componentes de costo de los inventarios de mantenimiento pueden ser clasificados como sigue:

- **Costos de tenencia de inventario (*Holding cost*):**
  - **Costo de capital del dinero invertido en el inventario.** Aunque siempre hay componentes importantes con un costo de adquisición elevado, este costo no es alto para muchas otras partes y componentes para los cuales varios pequeños almacenes diseminados aparecen tradicionalmente en las fábricas;
  - **Costo físico de tener el inventario** (los costos de almacenamiento en el espacio de almacenamiento, impuestos, seguros, sistemas de información, el re trabajo, rotura, deterioro);
- **Costos de devaluación del precio del componente (*Devaluation cost*):** Muchos componentes pueden bajar de precio durante su ciclo de vida , y las penalidades por tenencia de partes en exceso cuando ocurre una caída de precio puede ser importante para tener en cuenta;
- **Costos de obsolescencia de los componentes (*Obsolescence cost*):** Amortizaciones al final de la vida. Muchas partes que se mantienen en stock podrían ser inútiles para el departamento de mantenimiento después de cierto equipo/activo sea removido o reemplazado;
- **Costo de pedido de inventario (*Ordering cost*):** Costos asociados al lanzamiento de un pedido de repuestos de mantenimiento a los proveedores. En el caso de repuestos de mantenimiento programados,

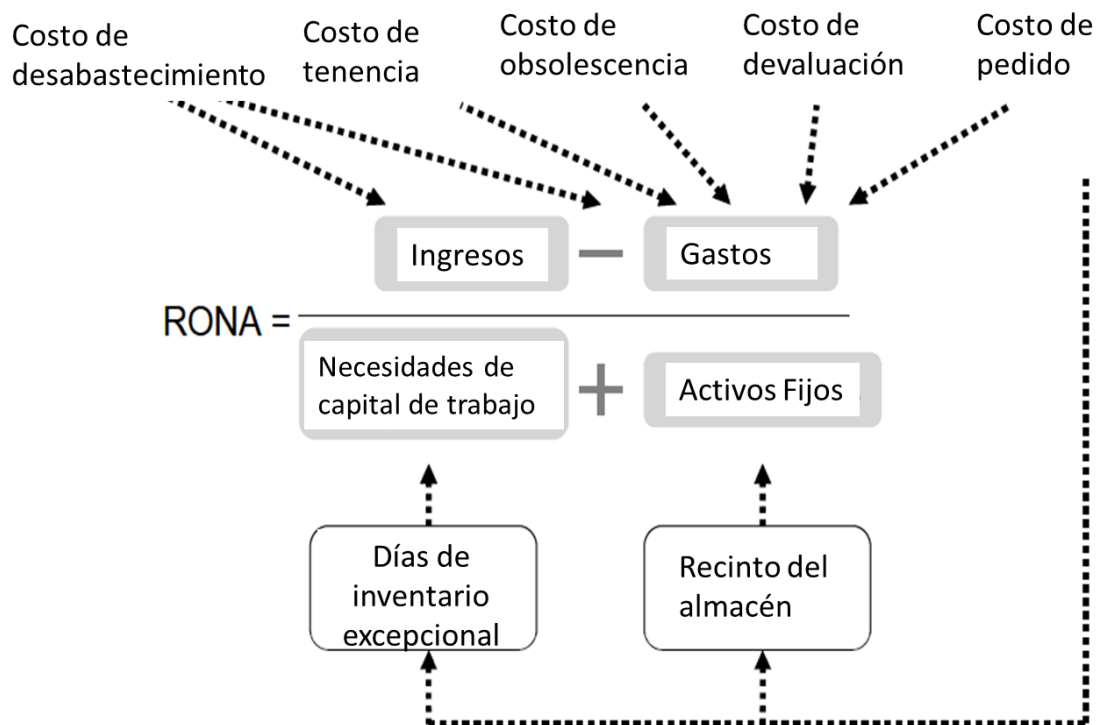
muchos materiales se pueden comprar en pequeñas cantidades, con alta frecuencia, de acuerdo con el calendario de las órdenes de trabajo preventivo. En caso de mantenimiento correctivo, son comunes compras de última hora realizados por la persona responsable del trabajo correctivo;

- **Costos de desabastecimiento (*Stock-out cost*):** Aumento del riesgo asociado a la falta de material de mantenimiento cuando sea necesario (pérdida de producción, accidentes, riesgos ambientales, etc.). Normalmente, el tiempo de producción que se pierde cuando un desabastecimiento sucede es muy difícil de recuperar después.

Las inversiones en materiales de mantenimiento, como cualquier otra inversión en una empresa, pueden ser justificados de acuerdo con el retorno que pueden producir en dicha inversión. Con el fin de hacer un análisis podemos utilizar la relación del Retorno en los activos netos (RONA) (figura 2.3) y traducir a esta fórmula la influencia de los elementos mencionados anteriormente del costo de mantenimiento dirigido por el inventario.

Hay que tener en cuenta que un aspecto muy importante en este punto es la correcta evaluación del costo de desabastecimiento de material de mantenimiento. Este costo está estrechamente relacionado con la criticidad de los equipos y el modo de fallo para los cuales mantenemos el inventario. El sistema logístico de mantenimiento debe garantizar niveles de servicio de alto estándar para los componentes considerados críticos, pero hay que ver cómo traducir estas ideas para el cálculo de los niveles de stock adecuados.

**Figura 2.3.** El inventario de mantenimiento y su impacto en el retorno en los activos netos (RONA)



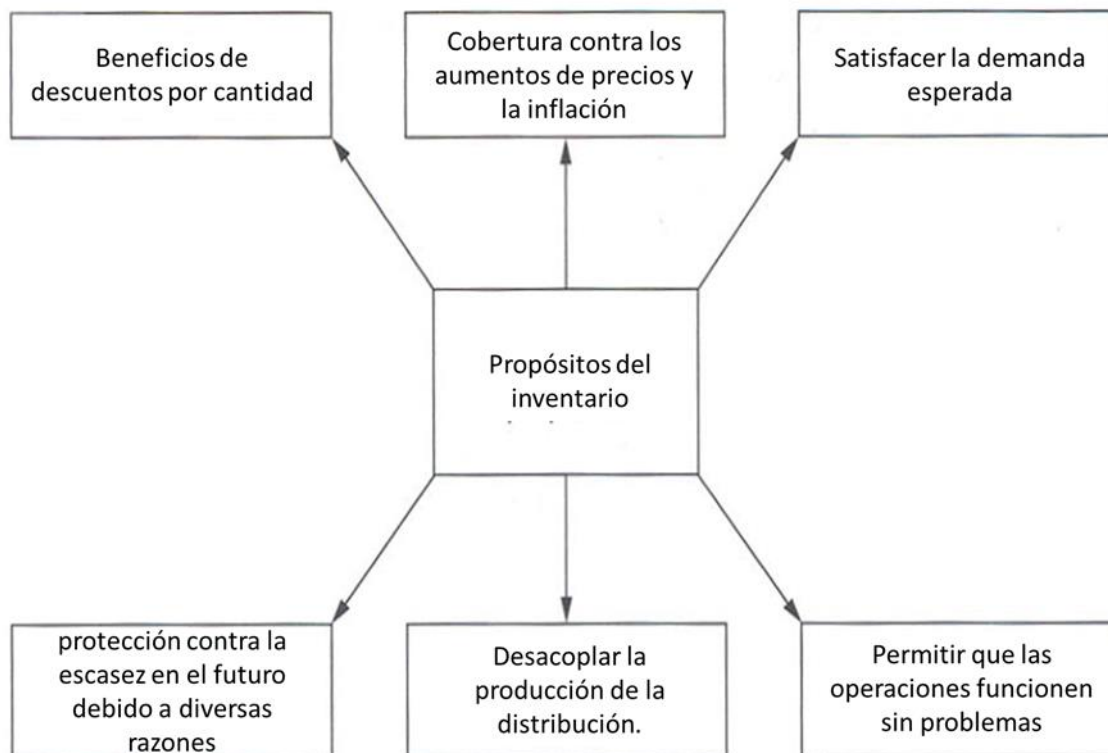
Fuente: Márquez, A. C. (2007). The maintenance management framework: models and methods for complex systems maintenance. Sevilla España. Editorial Springer Science & Business Media. PP 333

### 2.2.2 PROPÓSITOS DEL INVENTARIO , TIPOS Y DECISIONES BÁSICAS RELACIONADAS A LOS INVENTARIOS DE MANTENIMIENTO<sup>22</sup>

El inventario puede ayudar a las organizaciones de muchas maneras. La figura 2.4 presenta seis propósitos importantes. Hay muchos tipos de inventarios. Los tipos identificados incluyen comúnmente inventario de **materias primas**, **inventario de productos terminados**, **inventario de suministros**, **inventario de trabajos-en-proceso (WIP)**, **inventario de transporte**, e **inventario de piezas de repuesto**.

<sup>22</sup> **BALBIR S. DHILLON**. Engineering maintenance: A modern approach. USA. CRC Press LLC. 2002. PP 223

**Figura 2.4.** Propósitos importantes del inventario.



Fuente: Dhillon, B. (2002). Engineering maintenance: A modern approach. FloridaUSA. CRC Press LLC. PP 223

El personal de gestión de mantenimiento toma decisiones sobre las áreas básicas, como las enumeradas a continuación con respecto al inventario.

- **Artículos / materiales a ser almacenados:** Las decisiones requieren la consideración de factores tales como la capacidad del proveedor para suministrar en el momento de necesidad, costo y el grado de deterioro en el almacenamiento.
- **Cantidad de artículos / materiales a ser almacenados:** Las decisiones son tomadas considerando factores como el grado de uso y tiempo de entrega.
- **Proveedores de los artículos / materiales:** Las decisiones sobre proveedores de artículos / materiales son hechos considerando factores como precio, entrega, calidad y servicio.

- **Los niveles de suministro más bajos:** Decisiones sobre los niveles más bajos de los suministros, en particular, artículos de almacén principales, se hacen considerando factores como los registros históricos de compra y las necesidades proyectadas.
- **Los niveles de suministro más altos:** Como de tiempo en tiempo la tasa de uso cae, las decisiones sobre los niveles de suministro más altos se hacen manteniendo en cuenta factores tales como la experiencia de pedido pasado y el período pico de vacaciones.
- **Tiempo para comprar y pagar:** Las decisiones sobre estos dos temas son a menudo entrelazados. Tales decisiones son tomadas considerando factores como los anuncios del vendedor sobre descuentos especiales, registros de compras pasadas, y almacenar los historiales de retiros y reparaciones de equipos.
- **El lugar para guardar los artículos / materiales:** Como el control de la ubicación es fundamental para un departamento de mantenimiento productivo, las decisiones relativas al almacenamiento de objetos/materiales se hacen teniendo presente que se pueden obtener con eficacia. Experiencias pasadas indican que una sola ubicación física para cada elemento es la mejor.
- **Precio adecuado a pagar:** El precio es un problema constante, y las decisiones concernientes a él, se rigen principalmente por la oferta y la demanda percibida, no la real.

### 2.2.3 STOCK DE SEGURIDAD

El propósito principal de tener el stock de seguridad es mitigar el riesgo de quedarse sin productos al momento de necesidad. Una técnica para proporcionar el stock de seguridad es conocida como el "sistema de dos contenedores". En este caso, una orden de reabastecimiento fija es colocada en cuanto el nivel de stock alcanza el punto de pedido preestablecido. Más específicamente, los artículos se almacenan en dos contenedores, la orden de reabastecimiento se coloca tan pronto como el primer contenedor se vacía, se utilizan los elementos



del segundo contenedor hasta recibir los artículos pedidos. El valor del punto de pedido preestablecido depende de factores tales como la tasa de demanda y su variabilidad asociada, el costo de desabastecimiento y el tiempo de espera y su variabilidad asociada. Los siguientes son los cinco factores de los cuales depende el stock de seguridad requerido:

- Frecuencia de pedido.
- Nivel de servicio deseado.
- Habilidad para prever/controlar los tiempos de entrega.
- Variabilidad de la demanda durante el tiempo de espera.
- Tamaño del intervalo del tiempo de espera.

A medida que la incertidumbre en la demanda plantea la posibilidad de un desabastecimiento, la demanda de artículos se puede especificar por medio de una distribución de probabilidad. La experiencia pasada indica que a menudo la demanda durante el tiempo de espera sigue la distribución de probabilidad normal. Por lo tanto, el stock de seguridad necesario para conseguir un nivel deseado de servicio está dada por:

$$ST = z\sigma \quad (2.1)$$

Dónde:

**ST** = Stock de seguridad necesario para lograr un nivel de servicio deseado,

$\sigma$  = Desviación estándar de la demanda durante el tiempo de espera.

**z** = Numero de desviaciones estándares desde la media para obtener el nivel de servicio deseado.

Consecuentemente, el punto de pedido es expresado por:

$$ODP = \mu + z\sigma \quad (2.2)$$

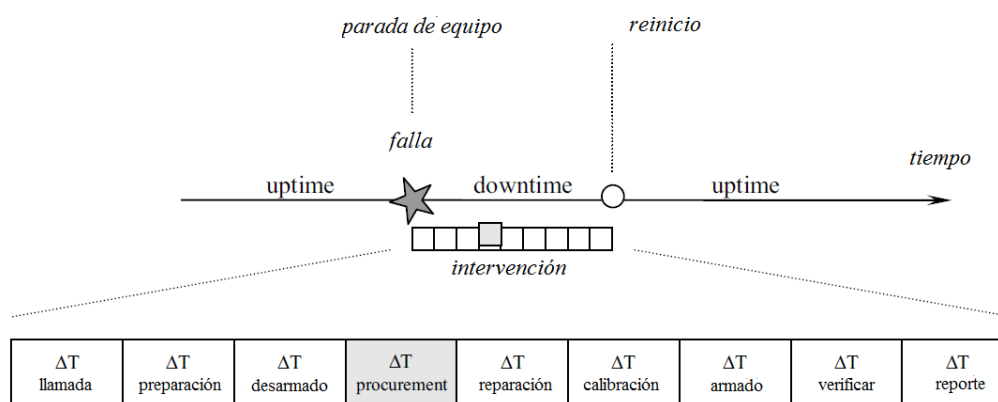
Dónde: **ODP** = Punto de pedido;  $\mu$  = Demanda promedio durante el tiempo de espera. El valor de z es estimado de acuerdo al nivel de servicio deseado.

## 2.3 REPUESTOS DE MANTENIMIENTO EN OPERACIONES DE PERFORACIÓN OFFSHORE

### 2.3.1 INTRODUCCIÓN<sup>23</sup>

En el ciclo de vida normal de un sistema industrial, o simplemente un equipo, como consecuencia de las averías, derivado del fenómeno inevitable del desgaste, hay la necesidad de reemplazar partes o componentes. Por esta razón, el problema crucial de la gestión de repuestos cae en la problemática del mantenimiento. Algunas veces, en la realidad industrial este aspecto es ignorado pero, como veremos, tiene una gran relevancia tanto desde el punto de vista técnico como económico. La figura 2.5 muestra una secuencia típica de actividades durante un mantenimiento correctivo con utilización de repuestos. *Uptime*, es el tiempo de funcionamiento, mientras que el *downtime* es el tiempo requerido para reparar el sistema.

**Figura 2.5.** Actividades típicas del mantenimiento correctivo



Fuente: Manzini, R., Regattieri, A., Pham, H., & Ferrari, E. (2009). Maintenance for industrial systems. Londres UK. Springer-Verlag London Media. PP 479]

Dentro de la estructuras de las actividades ejecutadas en la intervención de mantenimiento hay frecuentemente una fase de suministrar el repuesto de mantenimiento. La duración de esta fase es sustancialmente influenciada por la presencia o no del repuesto en el almacén local del negocio. El tiempo de espera para suministrar el repuesto puede durar unos pocos minutos, si los materiales

<sup>23</sup> **ANDREA CALLEGARO.** Forecasting Methods for Spare Parts Demand [en línea]. Tesis de grado. UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA, Italia. 2010. [Fecha de acceso 11 de marzo del 2015]. URL Disponible en: <http://tesi.cab.unipd.it/25014/1/TesiCallegaro580457.pdf>

necesarios están a la mano, algunos días o semanas en caso de que el ítem este en alguna locación geográficamente alejada o también, el ítem podría no estar disponible. Por lo tanto, un vínculo importante a la pérdida de producción puede ser asociada al ciclo de suministro de los repuestos y, a causa de la complejidad de los sistemas de producción, estos costos pueden ser significantes.

### **2.3.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS REPUESTOS DE MANTENIMIENTO**

Los repuestos de mantenimiento tienen características que los distinguen de otros materiales utilizados en los sistemas productivos. La principal característica reside en el perfil de consumo: la demanda de repuestos es, en la mayor parte de los casos, intermitente (una demanda intermitente es una demanda con intervalos de tiempos irregulares y sobretodo con cantidades muy variables)

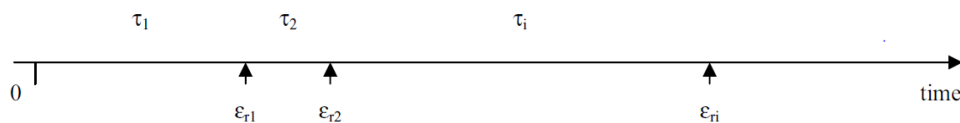
Otra característica distintiva de los repuestos de mantenimiento es la especificidad de su empleo. Usualmente, los repuestos no son del tipo “propósito general” así que ellos tienen que ser usados solo para el uso y la función para la que fueron diseñados. Esto, inevitablemente, oculta grandes riesgos de obsolescencia lo cual se experimenta cuando la sustitución de un equipo se decide: el grupo de repuestos que no son reusables en otros sistemas se vuelven inmediatamente obsoletos. En la mejor de las hipótesis el grupo de repuestos puede ser vendido con el sistema que se da de baja.

Los repuestos tienen generalmente un gran contenido técnico y, por esto, un alto costo. Por lo tanto, ellos requieren esfuerzos financieros significantes para su compra y consumen costos significantes para su mantenimiento. Es necesario añadir, a menudo, para el almacenamiento de material técnico para los repuestos, dispositivos costosos que son esenciales; por ejemplo, dispositivos vinculados a la protección, o a la necesidad de establecer condiciones particulares, e incluso otros.

### **2.3.3 DEMANDA Y CLASIFICACIÓN DE REPUESTOS**

La demanda de repuestos es muy particular. En la mayoría de casos, se da con intervalos irregulares de tiempo y sobretodo con cantidades muy variables, como se puede ver en la figura 2.6.

**Figura 2.6.** Consumo típico de repuestos



Fuente: Manzini, R., Regattieri, A., Pham, H., & Ferrari, E. (2009). Maintenance for industrial systems. Londres UK. Springer-Verlag London Media. PP 479]

Para una valoración de esta doble caracterización de la demanda de repuestos, dos parámetros reconocidos en el campo internacional son utilizados:

- **ADI-Intervalo promedio entre demandas:** el intervalo promedio de tiempo entre dos consumos sucesivos. Es expresado usualmente en periodos de tiempo (ejemplo: meses).
- **CV<sup>2</sup>-Coeficiente cuadrado de variación:** desviación estándar del consumo dividido por el valor promedio del consumo elevado al cuadrado.

$$ADI = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i}{N} \quad (2.3)$$

$$CV^2 = \left( \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\epsilon_{ri} - \epsilon_a)^2}{N}}}{\epsilon_a} \right)^2 \quad (2.4)$$

$$\epsilon_a = \frac{\sum_{i=1}^N \epsilon_{ri}}{N} \quad (2.5)$$

Dónde:

$\epsilon_{ri}$ =demanda del repuesto (unidades).

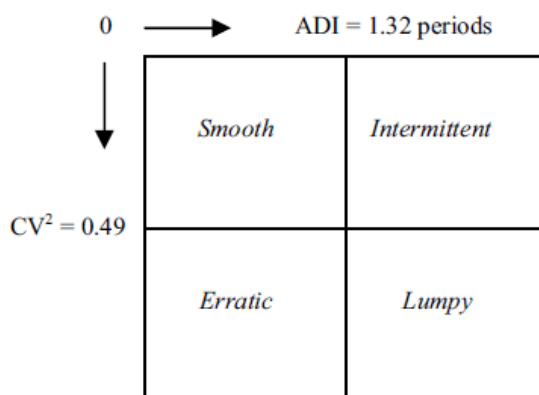
$\tau_i$ =es el intervalo de tiempo entre dos demandas sucesivas (periodos), y

N=el número de intervalos de tiempo analizados.

Para el ADI, N es el número de periodos con demanda diferente de cero, mientras que para el CV<sup>2</sup> es el número de todos los periodos.

En la figura 2.7. Se presentan cuatro categorías para la demanda de repuestos (patrones):

**Figura 2.7.** Principales patrones para la caracterización de la demanda de repuestos.



Fuente: Manzini, R., Regattieri, A., Pham, H., & Ferrari, E. (2009). Maintenance for industrial systems. Londres UK. Springer-Verlag London Media. PP 479|

Cuatro tipologías son reconocidas:

- **Movimiento suave (*Smooth*):** estos ítems tienen un comportamiento similar a aquellos artículos tradicionales, con baja rotación, de un sistema productivo.
- **Estrictamente intermitente (*Intermittent*):** ellos están caracterizados por una demanda extremadamente esporádica (hay muchos periodos sin demanda).
- **Errática (*Erratic*):** la característica fundamental es la gran variabilidad de las cantidades requeridas, pero la demanda es constante como distribución en el tiempo.
- **Abultada (*Lumpy*):** Es la más difícil en la categoría de control, porque es categorizada por muchos intervalos con demanda cero y una gran variabilidad en la cantidad.

### **2.3.4 REPUESTOS PARA TALADROS DE PERFORACIÓN<sup>24</sup>**

Hay muchos equipos, personal y dinero involucrado en la operación total de un taladro de perforación. Esto involucra no solo al operador que controla la operación de perforación, sino también el sistema entero que hace posible dicha operación. Las operaciones son planeadas y ejecutadas sobre varios años con grandes inversiones de las compañías operadoras, compañías proveedoras de servicios e inversionistas. Más aún, las operaciones de perforación, donde un taladro es normalmente alquilado para una compañía operadora por un periodo de tiempo determinado, pueden durar entre 2 a 5 años, con posibilidades de extensión de los contratos. Después de que las operaciones acaben, el taladro es removido y llevado a la siguiente locación, ya sea para perforar otro pozo o para trabajar para un nuevo contrato con un nuevo cliente. Operar de esta manera involucra periodos cortos de trabajo en cada locación e incluye cambios de ambiente, con mayor presión sobre el taladro y el equipamiento utilizado.

Cuando se perfora costa afuera hay muchos componentes que pueden fallar durante las operaciones, la tecnología avanzada es presionada duramente para dar lo mejor bajo condiciones hostiles en donde una falla puede tener consecuencias severas, no solo económicamente, sino también al personal y al medio ambiente. Para minimizar los tiempos de parada de eventos no planeados como una avería de equipo hay necesidad de reemplazar partes que estén listas para ser instaladas cuando se necesiten. Adicionalmente, para tener repuestos disponibles, es necesario planear como, cuando y donde hacer las reparaciones, modernizaciones y almacenaje de los equipos.

### **2.3.5 PROBLEMAS EN LAS OPERACIONES OFFSHORE**

Los repuestos son esenciales para las operaciones efectivas, especialmente en considerables distancias de los fabricantes y suministros. Traer los repuestos al taladro y tenerlos disponibles todo el tiempo no es una opción realista, para taladros costa afuera el espacio es una limitación y uno no puede ofrecer espacio para todos los repuestos deseados.

---

<sup>24</sup> **RUNAR SAMLAND.** Drilling spare parts: Identifying and evaluating critical parameters [en línea]. Tesis de maestría. Universidad de Stavanger, Noruega. 2011. [Fecha de acceso 11 de marzo del 2015]. URL disponible en: <http://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/182744>

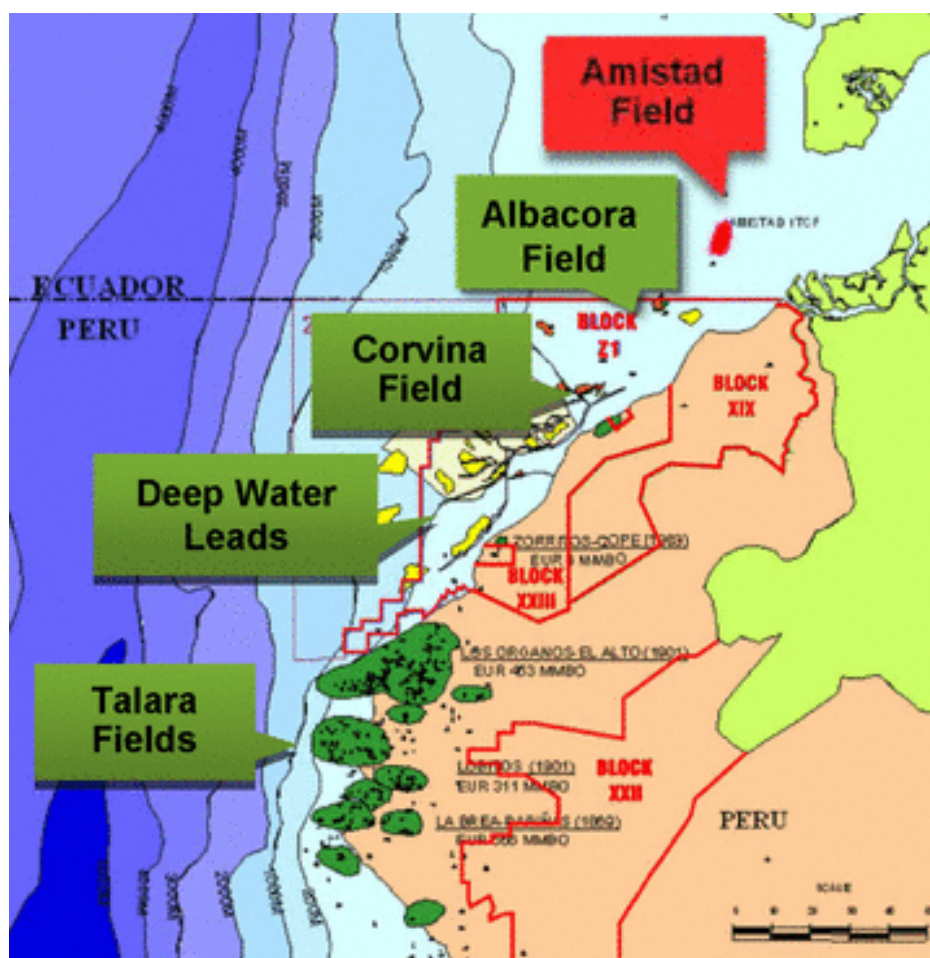
Cuando se planifican los repuestos y se intenta obtener un número ideal, a menudo se llegará a un exceso o defecto en la cantidad de repuestos a mantener. Los repuestos no utilizados resultarán en costos innecesarios, especialmente si ellos se degradan con el tiempo y nuevos repuestos tienen que ser comprados para los proyectos futuros. Algunos pocos repuestos, en cambio, pueden tener consecuencias más severas como violaciones de las reglamentaciones, tiempo de parada y posiblemente riesgo incrementado, para el personal y el medio ambiente, si una falla ocurriese.

La demanda fluctuante es un problema asociado con los repuestos donde la tasa de uso es difícil de predecir. Para estas situaciones puede haber una pequeña ayuda en el uso promedio de piezas o tiempo estadístico de vida de un componente. Además puede haber mayores incertidumbres, tanto en la tasa de uso y la confiabilidad de los equipos y componentes resultando en dificultades en la predicción de un número razonable de piezas.

El transporte de las piezas de repuesto ofrece algunos desafíos especiales para los equipos de perforación costa afuera. Debido a los plazos relativamente cortos de tiempo en cada locación, existen retos en la logística de transporte en una base más frecuente que para un contrato de transporte de largo plazo bien establecido. En varios lugares, la disponibilidad de almacenes cercanos y el tiempo necesario para transportar los equipos imponen nuevos desafíos.

En la figura **2.8**, por ejemplo, podemos ver la distribución de los campos de petróleo en el mar de Tumbes, tenemos el campo Albacora en donde opera el taladro PER21 y también tenemos el campo Corvina en donde opera el taladro PER28 ambos poseen un almacén de materiales en mar y un espacio físico para materiales en la base operativa en tierra en el distrito de Zorritos.

**Figura 2.8.** Distribución de los campos de petróleo en el mar de Tumbes



Fuente: Tomada de [http://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1023734/000110465911000526/a11-1722\\_1ex99d2.htm](http://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1023734/000110465911000526/a11-1722_1ex99d2.htm) [Fecha de acceso 11 de marzo del 2015]

### 2.3.6 LA PARADOJA DE LA GESTIÓN DE REPUESTOS EN LAS OPERACIONES OFFSHORE<sup>25</sup>

El personal de mantenimiento normalmente cree que mientras más repuestos se tengan en el almacén más seguridad se tendrá. En realidad, no es una buena idea tener demasiados repuestos en el almacén. El exceso ocuparía una gran cantidad de dinero, con el aumento del stock, se requeriría más espacio y dinero para almacenar. La tasa de equidad (ROE) y los ingresos per cápita disminuirían. Por otro lado, el exceso prolongaría el periodo de almacenamiento y causaría envejecimiento e incluso daños en las piezas de repuestos sofisticados. Los valores originales de los repuestos se reducirían. En comparación con el

<sup>25</sup> **ZHIGAO SHANGGUAN.** Spare parts management in Bohai bay [en línea]. Tesis de maestría. Universidad de Stavanger, Noruega. 2013. [Fecha de acceso 11 de enero del 2015]. URL disponible en: <http://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/183117>



transporte terrestre, las plataformas marinas tienen enorme retos para la logística. Debido a la severa influencia de las condiciones climáticas, como las tormentas o el viento fuerte, el oportuno y adecuado suministro de piezas es difícil de lograr. Por otra parte, si el stock no es suficiente para la plataforma marina, no se puede responder a la demanda de repuestos para el consumo diario. Así, la compra frecuente de repuestos aumentaría los costos de compra y disminuiría la disponibilidad de los equipos. En una palabra, es una paradoja entre la demanda de la producción y un control de inventario óptimo. La proporción de stock razonable, volumen de stock y el periodo de compra es una cuestión clave para la gestión de la producción costa afuera.

## **2.4 CLASIFICACIÓN DE INVENTARIOS**

### **2.4.1 ENFOQUE DE CLASIFICACIÓN ABC PARA EL CONTROL DE INVENTARIO DE MANTENIMIENTO<sup>26</sup>**

En cualquier sistema de control de inventario de mantenimiento, las partes / materiales necesarios para el mantenimiento rutinario deben estar fácilmente disponibles. En el caso de mantenimiento no rutinario, los artículos deben ser controlados de tal manera que la inversión en capital de inventario sea más eficaz. En el control de inventario, hay que buscar la información en áreas tales como los que se enumeran a continuación:

- Importancia del ítem del inventario.
- La manera en que debe ser controlado.
- La cantidad a pedir por vez.
- Punto específico en el tiempo para lanzar un pedido.

El enfoque de clasificación ABC proporciona información para el mantenimiento rutinario y no rutinario. Consecuentemente, permite diferentes niveles de control basado la importancia relativa de los ítems. El enfoque ABC está basado en el razonamiento de que un porcentaje pequeño de ítems usualmente dicta los resultados obtenidos en cualquier condición. Este razonamiento se refiere a

---

<sup>26</sup> **BALBIR S. DHILLON.** Engineering maintenance: A modern approach. USA. CRC Press LLC. 2002. PP 223

menudo como principio de Pareto, nombrado en honor a Vilfredo Pareto (1848-1923), un sociólogo y economista italiano.

El enfoque ABC clasifica el inventario interno en tres categorías (es decir, A, B y C) basado en el volumen anual de dólares. Se observa la siguiente relación aproximada entre el porcentaje de artículos de inventario y el porcentaje de uso anual de dólares:

- **A:** De los ítems, el 20% son responsables del 80% del uso del dinero.
- **B:** De los ítems, el 30% son responsables del 15% del uso del dinero.
- **C:** De los ítems, el 50% son responsables del 5% del uso del dinero.

Los siguientes tres pasos son asociados con el enfoque de clasificación ABC:

- 1) Determinar las características de los ítems que pueden influir los resultados de la gestión del inventario. A menudo, eso es el uso anual en dólares.
- 2) Agrupar ítems en base a los criterios establecidos anteriormente.
- 3) Practicar el control relativo a la importancia del grupo.

Factores tales como el uso anual en dólares, la escasez de materiales y costo unitario afectan a la importancia de un elemento. La figura 2.9 presenta el enfoque de la agrupación por el uso anual en dólares.

#### **2.4.1.1. POLÍTICAS DE CONTROL PARA ÍTEMS CON CLASIFICACIÓN A,B Y C**

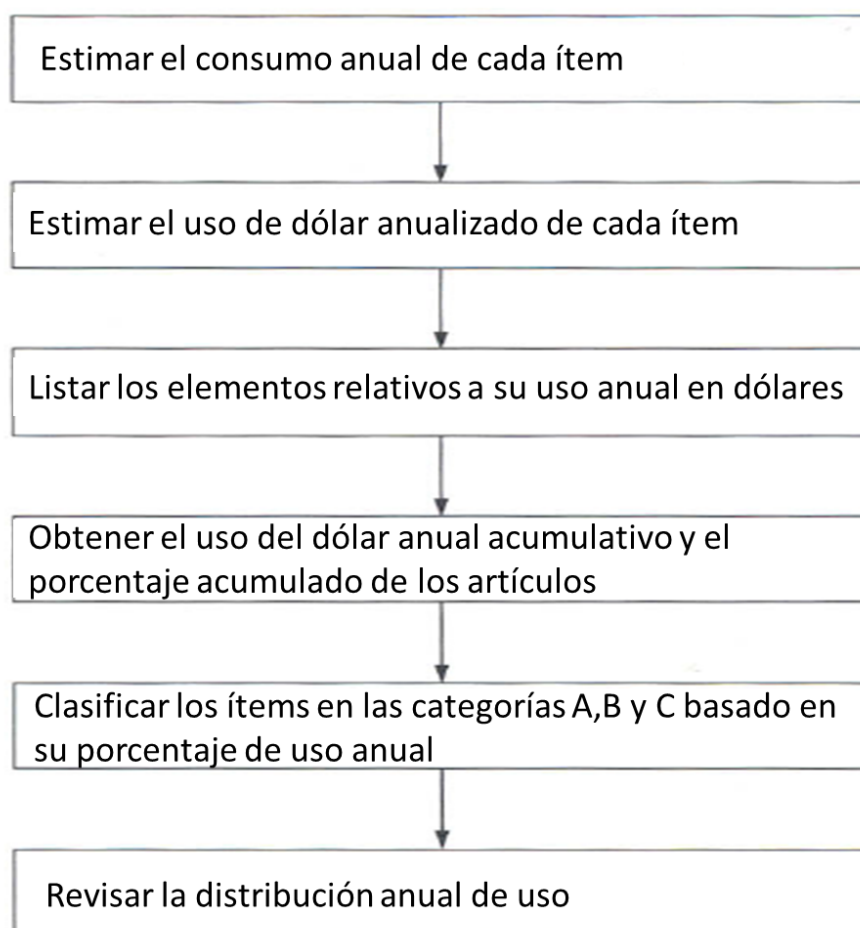
Después de la clasificación de los artículos del inventario, se pueden establecer las políticas de control. Algunas de estas políticas asociadas a cada clasificación son los siguientes:

- **Ítems con clasificación A:** Estos son elementos con alta prioridad. Practicar un control estricto incluyendo: revisión frecuente de los pronósticos de demanda, registros precisos y completos, revisión periódica y frecuente por la administración, seguimiento cercano, y acelerar para reducir al mínimo tiempo de espera.

- **Ítems con clasificación B:** Estos son los elementos de prioridad media. Practicar controles regulares, incluyendo: buenos registros, procesamiento normal, y atención normal.
- **Ítems con clasificación C:** Estos son los de menor prioridad. Practicar controles simples, pero asegurar que estos son suficientes para satisfacer la demanda.

Mantenga un montón de artículos de bajo costo, y utilice el esfuerzo de dinero y control ahorrado para minimizar el inventario de artículos de alto costo.

**Figura 2.9.** Pasos para la agrupación por el uso anual en dólares.



Fuente: Dhillon, B. (2002). Engineering maintenance: A modern approach. Florida USA. CRC Press LLC. PP 223

## 2.5 PRONÓSTICO DE LA DEMANDA<sup>27</sup>

Debido a que la demanda futura juega un rol muy importante en la planificación de la producción y en la gestión de inventarios de repuestos, se necesitan pronósticos bastantes precisos. El sector de manufactura ha estado intentado gestionar la incerteza de la demanda de repuestos de mantenimiento por años, lo cual ha traído muchos métodos y técnicas de pronósticos. Métodos estadísticos clásicos, como el suavizado exponencial y el análisis de regresión, han sido utilizados por los tomadores de decisiones por muchas décadas para pronosticar la demanda de repuestos. Además, de los métodos para reducir la incertidumbre como el pronóstico o previsión, también se han ideado métodos de gestión de la incerteza, tales como la adición de piezas redundantes para hacer frente a la incertidumbre de la demanda en los sistemas de planificación y control de la producción. Muchos métodos de previsión han sido elaborados y estudiados en el campo de la demanda de repuestos.

Entre los métodos de pronóstico de la demanda más conocidos tenemos:

- Suavizado exponencial simple (SES)
- Metodo de croston (CR)
- Aproximación de syntetos-boylan (SBA)
- Movimiento promedio (MA)
- Movimiento promedio ponderado (WMA)
- Métodos holt-winters (AM y MW)
- Método de arranque (BOOT)
- Método de poisson (PM)
- Método binomial (BM)
- Modelo de predicción gris (GM)

---

<sup>27</sup> **ANDREA CALLEGARO.** Forecasting Methods for Spare Parts Demand [en línea]. Tesis de grado. UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA, Italia. 2010. [Fecha de acceso 11 de marzo del 2015]. URL Disponible en: <http://tesi.cab.unipd.it/25014/1/TesiCallegaro580457.pdf>

## 2.6 MODELOS DE CONTROL DE INVENTARIOS<sup>28</sup>

Se han desarrollado varios modelos matemáticos de control de inventarios, muchos de los cuales se pueden aplicar al control de inventarios de mantenimiento. Estos modelos se basan en el supuesto de que la demanda de un artículo individual puede ser independiente o dependiente de la demanda de otros artículos.

Antes de describir estos modelos, examinemos primero los siguientes tipos de costos asociados con los modelos:

- **Costo de tenencia:** Esto se asocia con mantener o sostener un inventario en el tiempo. También Incluye elementos como costos de seguro, personal, y pagos de intereses. Para determinar el costo de almacenamiento, se debe evaluar los tipos de costos que se muestran en la Tabla 2.1 se destaca que las cifras indicadas en la tabla son aproximadas y pueden variar sustancialmente debido a factores tales como la naturaleza de la empresa, tipo de interés actual, y la ubicación.
- **Costo de pedido:** Esto se asocia con el procesamiento de pedidos, apoyo administrativo, formularios, materiales, etc.
- **Costo de instalación:** Esto se asocia con la preparación de un equipo / máquina o el proceso de la fabricación de una orden.

Tenga en cuenta que el costo anual de inventario a menudo enfoca alrededor del 40% del valor de inventario.

### 2.6.1 MODELO DETERMINÍSTICO DE LA CANTIDAD ECONÓMICA DE PEDIDO<sup>29</sup>

El modelo de la orden económica de pedido (EOQ) es aplicable cuando la demanda de un ítem muestra una tasa constante, o casi constante, y cuando la cantidad total ordenada llega al inventario en un mismo momento. La suposición

<sup>28</sup> **BALBIR S. DHILLON.** Engineering maintenance: A modern approach. USA. CRC Press LLC. 2002. PP 223

<sup>29</sup> **DAVID R. ANDERSON, DENNIS J. SWEENEY, THOMAS A. WILLIAMS, JEFFREY D. CAMM, JAMES J. COCHRAN, MICHAEL J. FRY & JEFFREY W. OHLMANN.** Quantitative methods for business. 12va Edición. USA. Cengage South-Western. 2012. PP 911

de la tasa de demanda constante significa que el mismo número de unidades es sacado del inventario cada periodo de tiempo como 5 unidades por día, 25 unidades por semana, 100 unidades cada semana, etc.

**Tabla 2.1.** Elementos del costo de tenencia de inventarios.

Elemento	Subelemento	Rango aproximado de costo como porcentaje del valor del inventario (%)
Costo de la vivienda	Costo operativo, alquiler del edificio, depreciación, etc.	3-10
Costo de inversión	Costo de préstamo, costo de seguro del inventario, impuestos, etc.	6-24
Costo laboral (asociado con manipulación adicional)	-	3-5
Costo de manipulación de materiales	Arrendamiento de equipos, energía, costos operativos, etc.	1-3.5
Costos misceláneos	Los costos asociados con la chatarra, hurtos, obsolescencia, etc.	2-5

Fuente: Dhillon, B. (2002). Engineering maintenance: A modern approach. Florida USA. CRC Press LLC. PP 223

Una de las suposiciones más criticadas del modelo EOQ es la tasa de demanda constante. Obviamente, el modelo sería inapropiado para elementos con tasa de demanda ampliamente fluctuante y variable. Sin embargo, el modelo EOQ puede proveer una aproximación realista de la cantidad óptima de pedido cuando la demanda es relativamente estable y ocurre a una tasa casi constante.

La decisión de cuanto ordenar involucra la selección de una cantidad de pedido que llama al compromiso entre (1) mantener inventarios pequeños y ordenar frecuentemente, y (2) mantener grandes inventarios y no ordenar muy frecuentemente. La primera alternativa puede resultar en costos de pedido indeseablemente altos, mientras que la segunda alternativa puede resultar en costos de tenencia indeseablemente altos. Para encontrar un compromiso óptimo entre estas alternativas conflictivas, consideremos un modelo matemático que muestre el costo total como la suma del costo de tenencia y el costo de pedido.

Los **costos de tenencia** son los costos asociados con mantener o sostener un nivel de inventario dado; estos costos dependen del tamaño del inventario. El primer costo de tenencia a considerar es el costo de financiar la inversión en el inventario. Cuando una compañía se presta dinero, se genera un cargo por intereses, si la compañía usa su propio dinero, se experimenta un costo de oportunidad asociado con no ser capaz de usar el dinero para otras inversiones, En cualquier caso, un costo de interés existe por el capital retenido en el inventario. Este **costo de capital** es usualmente expresado como un porcentaje de la cantidad invertida. Un número de otros costos de tenencia, como son seguros, impuestos, roturas, robos, y los gastos generales de almacén también son considerados.

El siguiente paso en el análisis de inventario es determinar el **costo de pedido**. Este costo, que es considerado fijo sin importar la cantidad en el pedido, cubre la preparación del documento de pedido, el procesamiento de la orden, incluyendo pagos, correo, teléfono, transporte, verificación de facturas, el recibimiento, y así sucesivamente. El **costo de tenencia, el costo de pedido, y la información de la demanda** son tres datos que deben ser conocidos antes de utilizar el modelo EOQ.

Comenzamos por definir  $Q$  como la cantidad del pedido. Por lo tanto, la decisión de cuanto ordenar involucra encontrar el valor de  $Q$  que minimice la suma de los costos de tenencia y costos de pedido. La figura **2.10** muestra el patrón del inventario completo, si el inventario promedio es  $\frac{1}{2} Q$  durante cada ciclo entonces el inventario promedio sobre cualquier número de ciclos también es  $\frac{1}{2} Q$ .

El costo de inventario puede ser calculado utilizando el inventario promedio. Esto es, podemos calcular el costo de tenencia multiplicando el inventario promedio por el costo de tener una unidad en el inventario por el periodo establecido. El periodo seleccionado para el modelo depende de uno mismo; puede ser una semana, un mes, un año, o más. Sin embargo, debido a que para muchas industrias y negocios el costo de tenencia es expresado como un porcentaje anual, la mayoría de modelos de inventario son desarrollados en base a un costo anual.

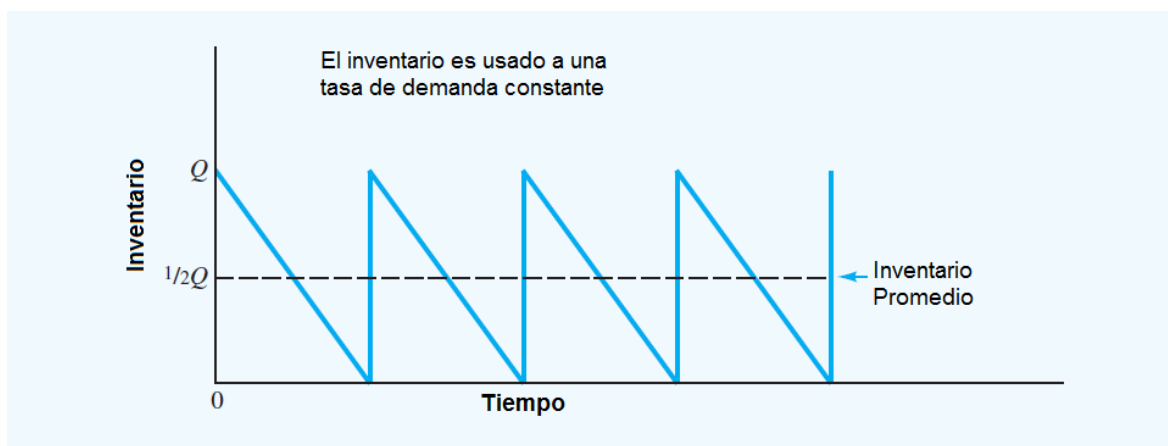
Digamos:

$h$ =Tasa anual del costo de tenencia.

$C$ =Costo unitario del ítem del inventario.

$C_h$ =Costo anual de tener un ítem en el inventario

**Figure 2.10.** Patrón de inventario para el modelo EOQ



Fuente: Anderson, D., Sweeney, D., Williams, T., Camm, J., Cochran, J., Fry M., & Ohlmann, J. (2012). Quantitative methods for business. 12va Edición. USA. Cengage South-Western. PP 911

El costo anual de tener un ítem en el inventario es:

$$C_h = hC \quad (2.6)$$

La ecuación general para el costo de tenencia anual para el inventario promedio de  $\frac{1}{2} Q$  unidades es el siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Costos anuales de tenencia} &= \left( \text{Inventario promedio} \right) \left( \text{Costos anuales de tenencia por unidad} \right) \\ &= \frac{1}{2} Q C_h \end{aligned} \quad (2.7)$$

Para completar el costo total del modelo, debemos incluir el costo anual de pedido. El objetivo es expresar el costo anual de pedido en términos de la cantidad de pedido  $Q$ . La primera pregunta es ¿cuántos pedidos serán colocados durante el año? Digamos que  $D$  denota la demanda anual del producto. Sabemos que ordenando  $Q$  unidades en cada pedido, nosotros colocaremos  $D/Q$  pedidos



por año, si el costo  $C_o$  es el costo de colocar una orden, la ecuación general para el costo anual de pedido es como sigue:

$$\begin{aligned} \text{Costos anuales} &= \left( \frac{\text{Numero de pedidos}}{\text{por año}} \right) \left( \frac{\text{Costo por}}{\text{pedido}} \right) \\ \text{de pedidos} &= \left( \frac{D}{Q} \right) C_o \end{aligned} \quad (2.8)$$

Por lo tanto, el costo anual total, denotado como TC, puede ser expresado como sigue:

$$\begin{aligned} \text{Costo anual} &= \text{Costo anual} + \text{Costo anual} \\ \text{total} &= \text{de tenencia} + \text{de pedidos} \\ TC &= \frac{1}{2} Q C_h + \left( \frac{D}{Q} \right) C_o \end{aligned} \quad (2.9)$$

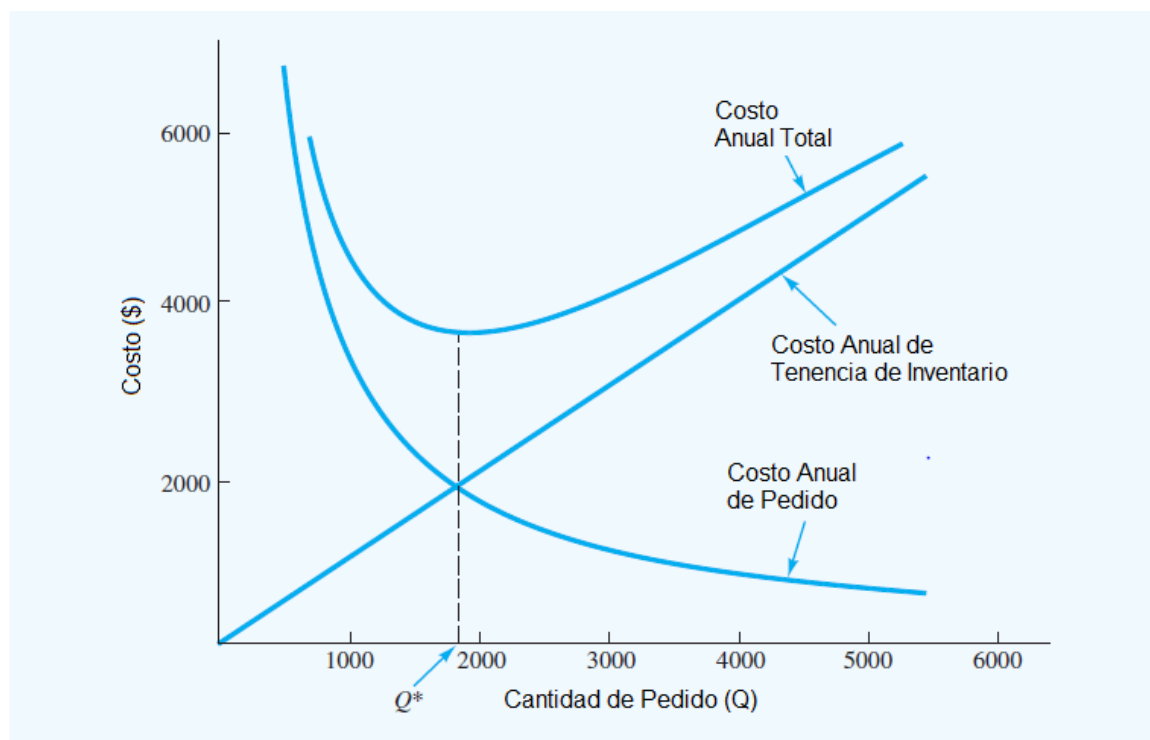
El desarrollo del modelo de costo total va hacia la solución del problema de inventario. Ahora somos capaces de expresar el costo anual total como una función de cuanto deber ser pedido. El desarrollo de modelo de costo total realista es quizás la parte más importante de la aplicación de los métodos cuantitativos para toma de decisiones en inventarios. La ecuación (2.9) es la ecuación general del costo total para situaciones de inventario en las cuales las suposiciones de modelo EOQ son válidas.

En referencia a la figura 2.11, la mínima cantidad de pedido del costo total es denotada por  $Q^*$ , mediante el uso de cálculo diferencial, puede ser demostrado que el valor de  $Q^*$  que minimiza el costo anual total está dado por la fórmula:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DC_o}{C_h}} \quad (2.10)$$

Esta fórmula es la llamada formula de la **cantidad económica de pedido**.

**Figura 2.11.** Costos anuales de tenencia, pedidos y totales



Fuente: Anderson, D., Sweeney, D., Williams, T., Camm, J., Cochran, J., Fry M., & Ohlmann, J. (2012). Quantitative methods for business. 12va Edición. USA. Cengage South-Western. PP 911

Ahora que conocemos cuánto pedir, queremos saber cuándo pedir. Para responder a esta pregunta, necesitamos introducir el concepto de **posición de inventario**. La posición de inventario se define como la cantidad de inventario en mano más la cantidad de inventario en pedido. La decisión de cuándo ordenar es expresada en términos de un **punto de pedido**- la posición de inventario al cual una nueva orden debe ser colocada. Para sistemas de inventario, utilizando la suposición de una tasa de demanda constante y un tiempo de espera fijo, el punto de pedido es el mismo que la demanda durante el tiempo de espera. Para estos sistemas, la expresión general para el punto de pedido es como sigue:

$$r = dm \quad (2.11)$$

Dónde:

r=punto de pedido; d=demanda por día; m= tiempo de espera por un nuevo pedido en días.

La pregunta de qué tan frecuente debe ser colocado el pedido puede ser respondida ahora. El periodo entre pedidos es referido como el tiempo del ciclo, previamente en la ecuación (2.8), definimos  $D/Q$  como el número de pedidos que serán colocados en un año. La expresión general por un ciclo de tiempo<sup>30</sup> de  $T$  días está dado por:

$$T = \frac{250}{D/Q^*} = \frac{250Q^*}{D} \quad (2.12)$$

#### 2.6.1.1. LAS SUPOSICIONES DEL MODELO EOQ

- 1) La demanda es determinística y ocurre a una tasa constante.
- 2) La cantidad de pedido  $Q$  es la misma por cada pedido. El nivel de inventario crece  $Q$  unidades cada vez que un pedido se recibe.
- 3) El costo por pedido,  $C_o$ , es constante y no depende de la cantidad pedida.
- 4) El costo de compra por unidad,  $C$ , es constante y no depende de la cantidad pedida.
- 5) El costo de tenencia del inventario por periodo de tiempo,  $C_h$ , es constante. El costo total de tenencia del inventario depende tanto del  $C_h$  y del tamaño del inventario
- 6) No están permitidos los desabastecimientos o pedidos pendientes.
- 7) El tiempo de espera para un pedido es constante.
- 8) La posición de inventario es revisada continuamente, como resultado, un pedido es colocado tan pronto la posición de inventario alcanza el punto de pedido.

---

<sup>30</sup> Esta expresión general por ciclo de tiempo está basado en 250 días de trabajo, si la compañía operara 300 días de trabajo por año y quiere expresar el ciclo de tiempo en términos de días de trabajo, el ciclo de tiempo estaría dado por:  $T = 300Q^*/D$ .

### 2.6.1.2. VARIACIÓN EN LA CANTIDAD ÓPTIMA<sup>31</sup>

Algunos problemas con respecto a la cantidad óptima de pedido aparecen cuando:

- El EOQ sugiere un valor fraccionario para cosas que vienen en unidades discretas (un pedido para 2.7 camiones, por ejemplo, no tiene sentido y deberíamos comprar ya sea dos o tres).
- Los proveedores no están dispuestos a dividir el tamaño estándar del paquete (227 Kg de cemento, por ejemplo, serían redondeados al múltiplo más cercano de 50 kg).
- Las entregas son hechas por vehículos con capacidades fijas, así que 12 toneladas, por decir, pueden entrar en un camión pero para un EOQ de 13 toneladas se necesitarían dos camiones y por lo tanto se duplicarían los costos de transporte.
- Es simplemente más conveniente redondear los tamaños a números convenientes.

Así que sería útil conocer que tan sensible es el costo a pequeños cambios cercanos a  $Q^*$ , si nos movemos una pequeña distancia del EOQ, ¿los costos crecen muy rápido?, o ¿es relativamente estable y solo genera pequeñas penalidades?

En práctica, nosotros podemos alejarnos del EOQ y no obtener costos altos significantes. Podemos demostrarlo comparando el costo mínimo total,  $TC_0$ , con pedidos de tamaño  $Q^*$ , con el costo total de TC, y una cantidad de pedido Q.

Sabemos que:

$$TC_0 = C_h * Q^* \quad y \quad TC = \frac{C_o * D}{Q} + \frac{C_h * Q}{2}$$

---

<sup>31</sup> **DONALD WATERS.** Inventory Control and Management. 2da Edición. Inglaterra, UK. Editorial John Wiley & Sons. 2003. PP 408

Si los dividimos obtenemos:

$$\frac{TC}{TC_0} = \frac{C_o * D}{Q * C_h * Q^*} + \frac{C_h * Q}{2 * C_h * Q^*}$$

Substituyendo  $Q^* = \sqrt{2 * C_o * D / C_h}$  da el resultado estándar de

$$\frac{TC}{TC_0} = \frac{1}{2} \left[ \frac{Q^*}{Q} + \frac{Q}{Q^*} \right]$$

Ahora podemos ver el efecto de utilizar otros valores de Q, si podemos tolerar un costo dentro, digamos, 5% del óptimo, ¿Cuánto variara la cantidad de pedido? Podemos encontrar la respuesta substituyendo  $TC=1.05TC_0$  en esta ecuación y expresando Q como una fracción de  $Q^*$  ( $Q=kQ^*$ ), Entonces tenemos:

$$\frac{1.05 * TC_0}{TC_0} = \frac{1}{2} \left[ \frac{Q^*}{k * Q^*} + \frac{k * Q^*}{Q^*} \right]$$

$$1.05 = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{k} + k \right]$$

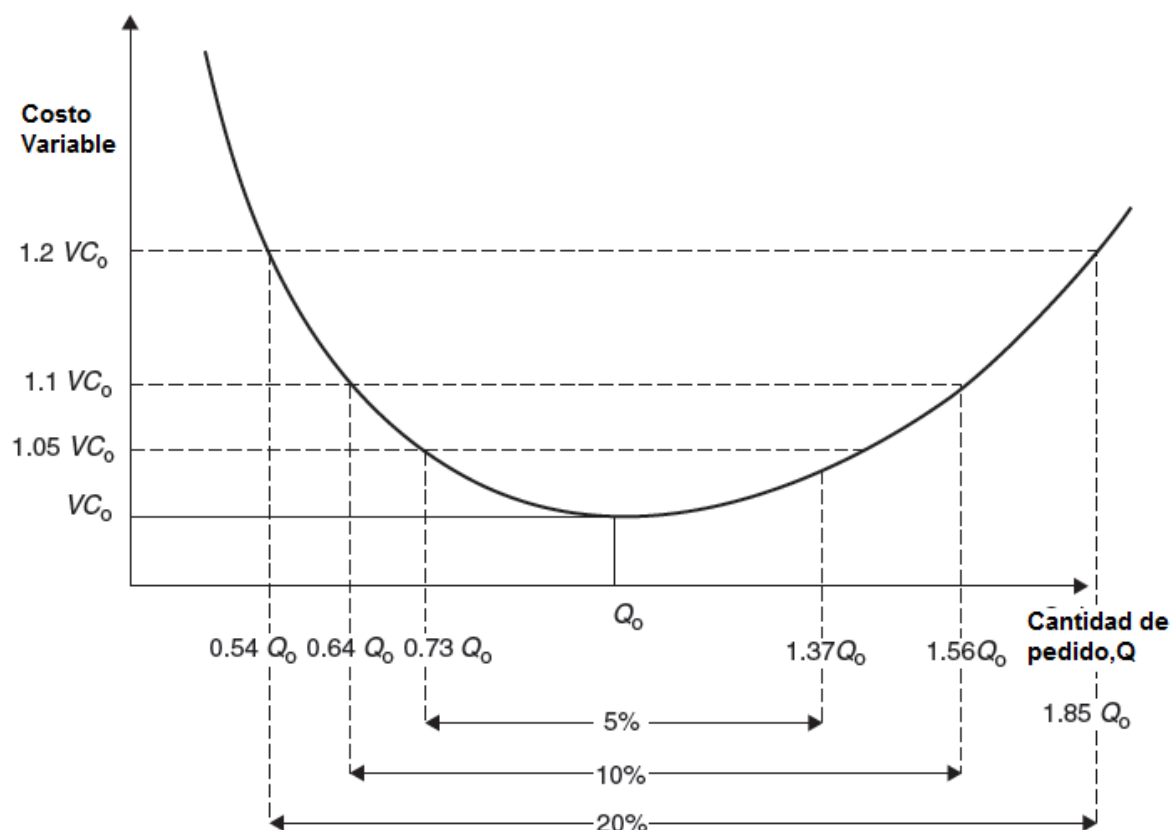
$$o \quad 2.1k = 1 + k^2$$

La cual podemos resolver para encontrar los valores de:

$$k = 1.37 \text{ ó } k = 0.73$$

En otras palabras, podemos colocar pedidos hasta 37% más o hasta 27% menos que  $Q^*$ , y aun mantendríamos la variación del costo dentro del 5% del optimo (como se muestra en la figura **2.12**), Esto sugiere que el costo total es muy estable alrededor el EOQ. Podemos obtener más evidencia para esto mediante la aceptación de una variación del costo total del 10% del optimo y repetir los cálculos para  $TC=1.1TC_0$ , entonces encontramos los valores de  $k=1.56$  o  $0.64$ , así que podemos colocar pedidos hasta 56% más o 36 % menos que  $Q^*$ , y aun mantendríamos el costo dentro del 10% del óptimo. Esto muestra porque el cálculo de la cantidad económica de pedido es tan útil. El análisis está basado en un número de suposiciones y aproximaciones, pero nos da una buena línea guía, y teniendo un tamaño de pedido que está alrededor del EOQ, los costos están propensos a mantenerse cerca del óptimo.

**Figura 2.12.** Muestra de la curva de costo variable poco profunda alrededor de la EOQ



Fuente: Waters, D. (2003). Inventory Control and Management. 2da Edición. England, UK. Editorial John Wiley & Sons. PP 408

Un problema específico con el EOQ ocurre con ítems discretos. Si, por ejemplo, el EOQ sugiere un pedido por 5.5 computadoras, obviamente no podemos colocar este pedido y debemos ordenar ya sean 5 o 6. Este tipo de problema ocurre frecuentemente cuando se trabaja con cantidades pequeñas de ítems caros, como maquinas, motores, vehículos y barriles de químicos. Nosotros podríamos simplemente redondear al entero más cercano, pero en un enfoque más formal nos preguntaríamos si es mejor redondear hacia el superior o hacia el inferior. Ya sabemos que los costos aumentan levemente alrededor del EOQ, así que usualmente esta no es una pregunta importante. Sin embargo, algunas veces, la respuesta hace una diferencia significativa.

Supongamos que calculamos el tamaño óptimo de pedido  $Q^*$ , el cual está entre los enteros  $Q'$  y  $Q'-1$ . Deberíamos redondear hacia arriba el tamaño del pedido si

el costo variable es pedir  $Q'$  unidades es menor que el costo variable de pedir  $Q'-1$  unidades. Es decir:

$$\frac{C_o * D}{Q'} + \frac{C_h * Q'}{2} \leq \frac{C_o * D}{Q' - 1} + \frac{C_h * (Q' - 1)}{2}$$

Podemos simplificar multiplicando ambos lados por  $2 * Q' * (Q' - 1)$ .

$$C_h * Q'^2 - C_h * Q' \leq 2 * C_o * D$$

Entonces podemos simplificar el resultado a:

$$Q' * (Q' - 1) \leq Q'^2 \quad (2.13)$$

Esto sugiere un procedimiento para verificar si es mejor redondear hacia arriba o hacia abajo cantidades discretas de pedido:

- Calcular el EOQ,  $Q^*$ .
- Encontrar los enteros  $Q'$  y  $Q'-1$  que rodean a  $Q^*$ .
- Si  $Q' * (Q'-1)$  es menor o igual a  $Q'^2$ , se pide  $Q'$ .
- Si  $Q' * (Q'-1)$  es mayor a  $Q'^2$ , se pide  $Q'-1$ .

### 2.6.1.3. INCERTIDUMBRE EN LA DEMANDA Y LOS COSTOS

En la derivación del modelo EOQ, asumimos que los costos y la demanda son conocidos con certeza, en práctica, esto es poco probable que sea cierto. Pocas organizaciones conocen exactamente que demanda tienen que satisfacer en el futuro, y sus costos están basados en estimados y prevalecen convenciones contables. Como sabemos, el costo variable es estable alrededor del EOQ y pequeños errores y aproximaciones generalmente hacen poca diferencia, podemos demostrar esto al observar el efecto en los costos cuando hay un error en, por decir, el pronóstico de la demanda. Suponiendo que la demanda real de un ítem es  $D$ , pero hay error proporcional en el pronóstico,  $E$ , entonces el pronóstico es  $D(1+E)$  y en cambio de usar el EOQ correcto:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2C_o * D}{C_h}}$$

Nosotros estamos realmente usando:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2C_o * D * (1 + E)}{C_h}}$$

Podemos encontrar el error resultante en los costos mediante la sustitución en:

$$\frac{TC}{TC_0} = \frac{1}{2} \left[ \frac{Q^*}{Q} + \frac{Q}{Q^*} \right]$$

Lo que puede ser simplificado como:

$$\frac{TC}{TC_0} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + E}} + \frac{\sqrt{1 + E}}{1} \right]$$

La figura **2.13** muestra el incremento en los costos contra el error en el pronóstico, De nuevo, está claro que grandes errores en los pronósticos de demanda nos llevan a relativamente pequeños movimientos lejos del mínimo valor de  $TC_0$ , incluso cuando el pronóstico subestima la demanda en 50%, el costo solo aumenta 6%, y cuando se sobrestima la demanda por 50%, el costo solo sube 2%, esto también muestra que el incremento en la variable costo es asimétrica y crece más rápidamente con subestimaciones de demanda que con las sobrestimaciones. Si, por lo tanto, la demanda es incierta y uno tiene que tomar una decisión con información limitada, es generalmente mejor colocar ordenes grandes en vez de pequeñas.

Podemos hacer un análisis similar para encontrar el efecto de los errores en los costos, supongamos, por ejemplo, que aproximamos un costo de pedido real de  $C_o$  por  $C_o(1+E_1)$ , y un costo de tenencia real  $C_h$  por  $C_h(1+E_2)$ , Entonces, Calcularemos la cantidad de pedido como:

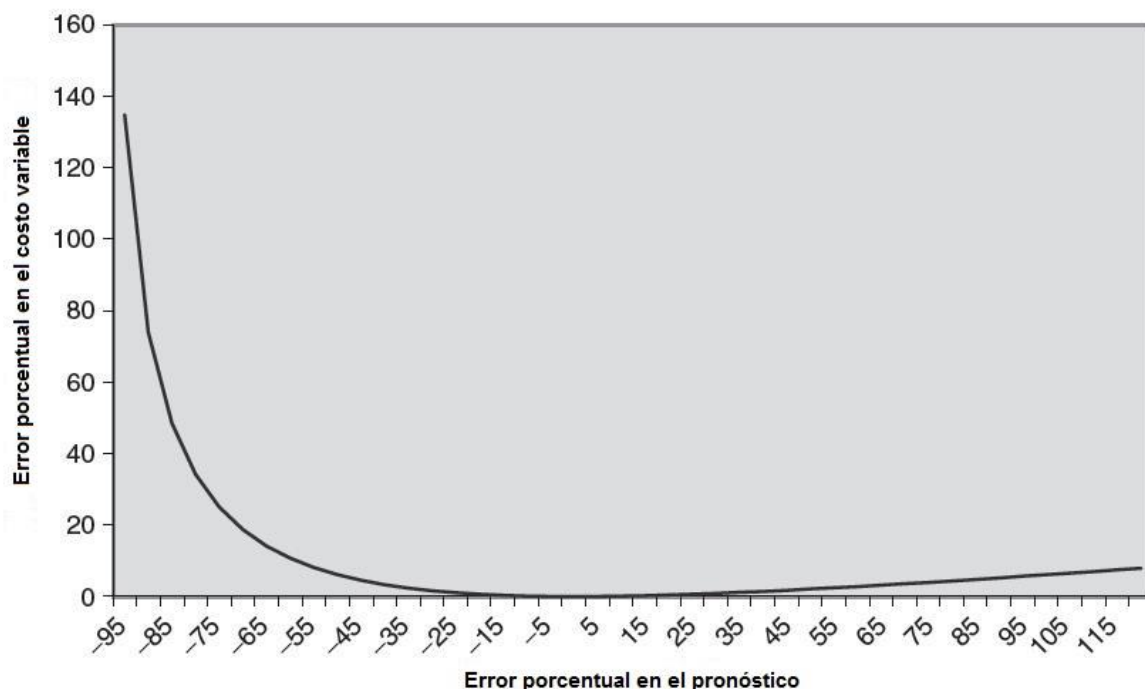
$$Q^* = \sqrt{\frac{2C_o * (1 + E_1) * D}{C_h * (1 + E_2)}}$$



Y esto nos da el incremento en la variable costo definido por:

$$\frac{TC}{TC_0} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sqrt{1+E_1}}{\sqrt{1+E_2}} + \frac{\sqrt{1+E_2}}{\sqrt{1+E_1}} \right]$$

**Figura 2.13.** Grafico del incremento en la variable costo contra el error en el pronóstico de la demanda



Fuente: Waters, D. (2003). Inventory Control and Management. 2da Edición. England, UK. Editorial John Wiley & Sons. PP 408

#### 2.6.1.4. CUANDO UTILIZAR EL MODELO EOQ<sup>32</sup>

La demanda es a menudo irregular o abultada. Este puede ser causado por estacionalidad o por otros factores. Si la demanda es irregular, la suposición de tasa de demanda constante que era requerida para todos los modelos EOQ no será satisfecha.

Para determinar si la suposición de demanda constante es razonable, supongamos que durante “n” periodos, las demandas  $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$  han sido observadas. Además, se sabe lo suficiente acerca de la demanda futura para hacer la suposición de una demanda determinista realista. Para decidir si la

<sup>32</sup> WAYNE L. WINSTON & JEFFREY B. GOLDBERG. Operations research: Applications and algorithms. USA. Thomson/Brooks/Cole. 2004. PP 1418

demanda es suficientemente regular para justificar el uso de los modelos EOQ, se recomienda hacer los siguientes cálculos.

- 1) Determinar el estimado  $\bar{d}$  de la demanda promedio para el periodo dado:

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} d_i \quad (2.14)$$

- 2) Determinar un estimado de la varianza de la demanda D por periodo:

$$\text{Varianza } D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} d_i^2 - \bar{d}^2 \quad (2.15)$$

- 3) Determinar un estimado de la variabilidad relativa de la demanda (llamado coeficiente de variabilidad). Esta cantidad es etiquetada como  $CV^2$ , donde:

$$CV^2 = \frac{\text{Varianza } D}{\bar{d}^2} \quad (2.16)$$

Notar que si todos los  $d_i$  son iguales, el estimado de la varianza de D será cero. Esto también hará  $CV^2=0$ . Por lo tanto, si  $CV^2$  es pequeño, esto indica que la suposición de demanda constante es razonable. La investigación indica que el modelo EOQ debería ser usado si  $CV^2 < 0.2$ ; de lo contrario la demanda es demasiado irregular para justificar el uso de un modelo EOQ.

## 2.6.2 MODELOS DE INVENTARIO PROBABILÍSTICOS

Todos los modelos de inventarios discutidos anteriormente requieren que la demanda durante un periodo de tiempo sea conocido con certeza. En esta parte, consideramos modelos de inventario en los cuales la demanda sobre un periodo de tiempo dado es incierta, o aleatoria; también veremos versiones del modelo EOQ para demanda incierta que incorporan los conceptos de stock de seguridad y nivel de servicio; el modelo de revisión periódica (R, S) entre otros.

### 2.6.2.1. EL EOQ CON DEMANDA INCIERTA: LOS MODELOS (r,q) Y (s,S)

En esta sección discutimos una modificación del EOQ que es usada cuando el tiempo de espera no es cero y la demanda durante cada tiempo de espera es aleatoria, Comenzamos asumiendo que toda la demanda puede ser aplazada. En

secciones anteriores, nosotros asumimos un modelo de revisión continua, es decir, los pedidos pueden ser colocados en cualquier momento, y definimos:

$C_o$ = Costo de pedido.

$C_h$ = Costo de tenencia por unidad por año.

$L$ = Tiempo de espera por cada pedido (Supuesto que se conocía con certeza).

$Q$ = Cantidad pedida cada vez que se coloca un pedido.

También requerimos las siguientes definiciones:

$D$ = Variable aleatoria (asumida como continua) que representa la demanda anual, con media  $E(D)$ , varianza  $\text{var } D$ , y desviación estándar  $\sigma_D$ .

$C_B$ = Costo incurrido por cada unidad faltante, lo cual no depende de cuánto tiempo toma compensar el desabastecimiento.

$OHI(t)$ = Inventario en mano (cantidad de stock en mano) en el tiempo  $t$ .

De la figura **2.14**, podemos ver que  $OHI(1)=100$ ,  $OHI(0)=200$  y  $OHI(6)=OHI(7)=0$

$B(t)$ = Número de pedidos atrasados pendientes en el tiempo  $t$ .

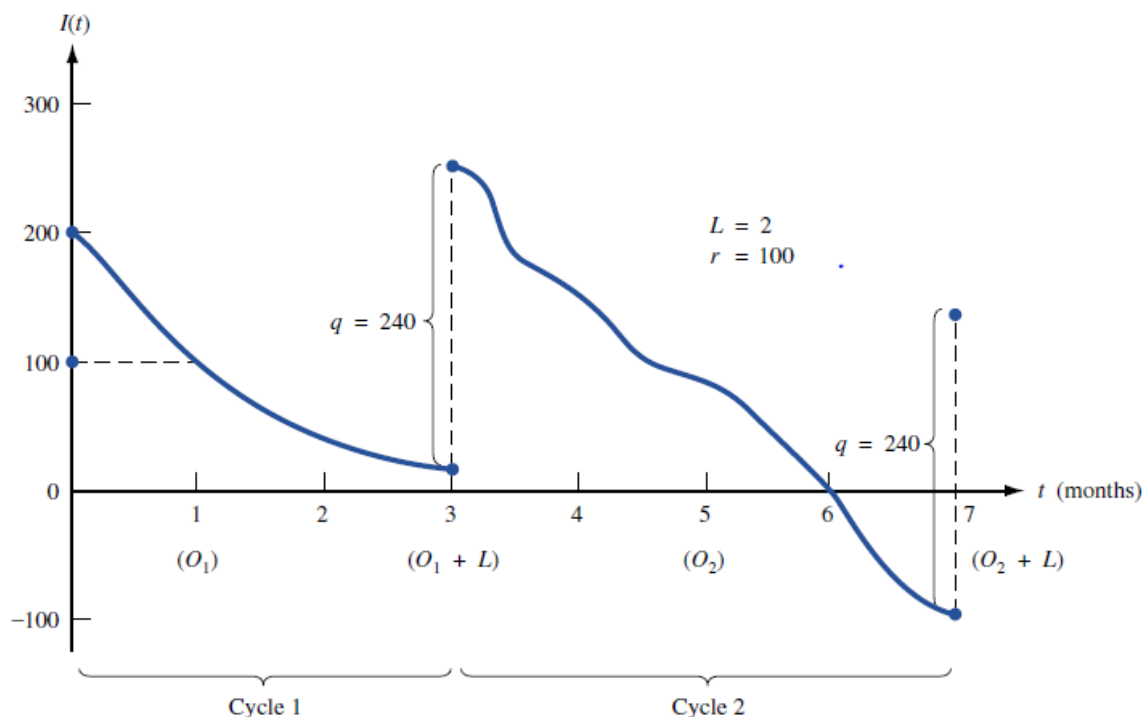
$I(t)$ = Nivel de inventario neto al momento  $t=OHI(t)-B(t)$

$r$ = Nivel de inventario al cual se coloca un pedido (punto de pedido)

En la figura **2.14**,  $B(t)=0$  para  $0 \leq t \leq 6$  y  $B(7)=100$ .  $I(t)$  concuerda con el concepto de inventario usado en secciones anteriores;  $I(0)=200-0=200$ ,  $I(3)=260-0=260$ , e  $I(7)=0-100=-100$ . El punto de pedido  $r=100$ ; cuando sea que el inventario caiga a  $r$ , un pedido es colocado por  $q$  unidades.

$X$ = variable aleatoria que representa la demanda durante el tiempo de espera

**Figura 2.14.** Evolución de inventario sobre el tiempo en el modelo del punto de pedido.



Fuente: Winston, W. L., & Goldberg, J. B. (2004). Operations research: Applications and algorithms. USA. Thomson/Brooks/Cole. PP 1418

Asumimos que  $\mathbf{X}$  es una variable aleatoria continua que tiene función de densidad  $f(x)$  y media, varianza y desviación estándar de  $E(\mathbf{X})$ ,  $\text{var } \mathbf{X}$ , y  $\sigma_{\mathbf{X}}$ . Si asumimos que las demandas en diferentes puntos de tiempo son independientes, entonces puede ser mostrado que la demanda aleatoria durante el tiempo de espera  $X$  satisface:

$$E(\mathbf{X}) = LE(\mathbf{D}), \quad \text{var } X = L(\text{var } \mathbf{D}), \quad \sigma_{\mathbf{X}} = \sigma_{\mathbf{D}}\sqrt{L} \quad (2.17)$$

Asumimos que si  $\mathbf{D}$  esta normalmente distribuida entonces  $\mathbf{X}$  también estará normalmente distribuida.

Suponiendo que permitimos que el tiempo de espera  $L$  sea una variable aleatoria (denotada por  $\mathbf{L}$ ), con media  $E(\mathbf{L})$ , varianza  $\text{var } \mathbf{L}$ , y desviación estándar  $\sigma_{\mathbf{L}}$ . Si la longitud del tiempo de espera es independiente de la demanda por unidad de tiempo durante el tiempo de espera, entonces:

$$E(\mathbf{X}) = E(\mathbf{L})E(\mathbf{D}), \quad \text{var } X = E(\mathbf{L})(\text{var } \mathbf{D}) + E(\mathbf{D})^2(\text{var } \mathbf{L}) \quad (2.18)$$

Nosotros queremos elegir  $q$  y  $r$  que minimicen el costo anual total esperado (excluyendo costos de compra). Antes de mostrar cómo se pueden encontrar valores óptimos de  $r$  y  $q$ , miremos una ilustración de como el inventario se desenvuelve en el tiempo. Asumamos que una orden  $q=240$  unidades acaba de llegar en el tiempo 3. También asumamos que  $L=2$ . En la figura **2.14**, pedidos de tamaño  $q$  son colocados en los momentos  $O_1=1$  y  $O_2=5$ . Estos pedidos son recibidos en los momentos  $O_1+L=3$  y  $O_2+L=7$ , respectivamente. Un ciclo es definido como el intervalo de tiempo entre dos instantes cualquiera en el cual un pedido es recibido. La figura **2.14** contiene dos ciclos completos: ciclo 1, de la llegada del pedido en el instante 0 al instante antes de que llegue el pedido en el momento  $O_1+L=3$ ; y el ciclo 2, desde el momento de llegada del pedido en  $O_1+L=3$  al instante antes de que llegue el pedido en el momento  $O_2+L=7$ .

Durante el ciclo 1, la demanda durante el tiempo de espera es menor que  $r$ , así que no hay retrasos escasez. Durante el ciclo 2. Sin embargo, la demanda durante el tiempo de espera excede  $r$ , así que ocurre el desabastecimiento entre el tiempo 6 y  $O_2+L=7$ . Debería ser claro que incrementando  $r$ , podemos reducir el número de desabastecimientos. Desafortunadamente, incrementando  $r$  nos forzara a mantener más inventario, de este modo resultando en altos costos de tenencia. Por lo tanto, un valor óptimo de  $r$  debe representar algún tipo de compensación entre los costos de tenencia y los costos de desabastecimiento.

Ahora mostraremos como pueden ser determinados valores óptimos para  $q$  y  $r$ .

#### **2.6.2.1.1. DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE PEDIDO: EL CASO DE PEDIDOS PENDIENTES**

La situación en la cual toda la demanda debe ser eventualmente cumplida y no hay ventas perdidas es llamada la situación de pedidos pendientes, para lo cual mostramos como determinar el punto de pedido y una cantidad de pedido que minimice el costo anual esperado.

Asumamos que cada unidad es comprada al mismo precio, así que los costos de compra son fijos. Definimos  $TC(q, r)$ =costo anual esperado (excluyendo el costo de compra) incurrido si cada pedido se hace por  $q$  unidades y es colocada cuando el punto de pedido es  $r$ . Entonces,  $TC(q, r)$ = (costo de tenencia anual esperado)+

(costo de pedido anual esperado)+ (costo anual esperado debido a los desabastecimientos). Para determinar el punto de pedido y cantidad de pedido óptimos, asumamos que el número promedio de pedidos retrasados es relativamente pequeño comparado con el nivel de inventario en mano. En muchos casos, esta suposición es razonable, porque los desabastecimientos (si ocurriesen) usualmente ocurren durante una pequeña parte del ciclo. Entonces  $I(t) = OHI(t) - B(t)$  tiende a:

$$\text{Valor esperado de } I(t) \cong \text{Valor esperado de } OHI(t) \quad (2.19)$$

Ahora podemos aproximar el costo de tenencia anual esperado. Sabemos que el costo de tenencia anual esperado es  $=h^*(\text{valor esperado del inventario en mano})$ , Entonces de (2.19), podemos aproximar el valor aproximado del costo de tenencia anual esperado con  $h^*(\text{valor esperado de } I(t))$ . El valor esperado de  $I(t)$  igualará el valor esperado de  $I(t)$  durante un ciclo. Ya que la tasa media a la que la ocurre la demanda es constante, podemos escribir:

$$\text{Valor esperado de } I(t) \text{ durante un ciclo} = \frac{1}{2} \left[ \text{Valor esperado de } I(t) \text{ al inicio del ciclo} + \text{Valor esperado de } I(t) \text{ al final del ciclo} \right] \quad (2.20)$$

Al final de un ciclo (el instante antes de que el pedido llegue), el nivel de inventario igualará el nivel de inventario en el punto de pedido ( $r$ ) menos la demanda  $X$  durante el tiempo de espera. Así que, el valor esperado de  $I(t)$  al final del ciclo  $=r-E(X)$ .

Al inicio de un ciclo, el nivel de inventario al final de un ciclo es aumentado por la llegada de un pedido de tamaño  $q$ . Así que, el valor esperado de  $I(t)$  al inicio del ciclo  $=r-E(x)+q$ . Ahora (2.20) tiende a:

$$\text{Valor esperado de } I(t) \text{ durante un ciclo} = \frac{1}{2} [r - E(X) + r - E(X) + q]$$

$$\text{Valor esperado de } I(t) \text{ durante un ciclo} = \frac{q}{2} + r - E(X)$$

Así que, el costo de tenencia anual esperado es

$$\cong C_h \left( \frac{q}{2} + r - E(X) \right)$$

Para determinar el costo anual esperado debido a los desabastecimientos o pedidos pendientes, debemos definir:

$$B_r = \text{variable aleatoria que representa el numero de desabastecimientos o pedidos pendientes durante un ciclo si el punto de reorden es } r$$

Ahora

$$\text{Costo anual esperado de desabastecimiento} = \left( \text{Costos de desabastecimiento} - \right) (\text{ciclos esperados})$$

Por la definición de  $B_r$ ,

$$\text{Costo de desabastecimiento esperado} = c_B E(B_r)$$

Ya que toda la demanda eventualmente será cumplida, un promedio de  $\frac{E(D)}{q}$  pedidos serán colocados cada año. Entonces:

$$\text{Costo anual esperado de desabastecimiento} = \frac{c_B E(B_r) E(D)}{q}$$

Finalmente,

$$\text{Costo anual esperado de pedidos} = C_o \left( \frac{\text{pedidos esperados}}{\text{por año}} \right) = \frac{C_o E(D)}{q}$$

Poniendo juntos los costos anuales esperados de tenencia, desabastecimiento y pedidos, obtenemos:

$$TC(q, r) = C_h \left( \frac{q}{2} + r - E(X) \right) + \frac{c_B E(B_r) E(D)}{q} + \frac{C_o E(D)}{q} \quad (2.21)$$

Podemos encontrar los valores de  $q$  y  $r$  que minimicen (2.21) al determinar los valores  $q^*$  y  $r^*$  de  $q$  y  $r$  que satisfagan:

$$\frac{\partial TC(q^*, r^*)}{\partial q} = \frac{\partial TC(q^*, r^*)}{\partial r} = 0 \quad (2.22)$$

En muchos casos, el valor de  $q^*$  que satisface (2.22) es muy cercano al calculado por la fórmula del EOQ. Por esta razón, asumimos que la cantidad óptima de pedido  $q^*$  puede ser adecuadamente aproximada por el valor del EOQ. Dado un valor de  $q$  para la cantidad de pedido, mostraremos como el análisis marginal puede ser usado para determinar el punto de pedido  $r^*$  que minimice  $TC(q, r)$ .

Si asumimos un valor dado de  $q$ , el costo de pedido anual esperado es independiente de  $r$ . Así que, para determinar el valor de  $r$  que minimice  $TC(q, r)$ , podemos concentrarnos en minimizar la suma de los costos anuales esperados de tenencia y de desabastecimiento. Siguiendo con el análisis marginal, supongamos que incrementamos el punto de pedido (un pequeño  $\Delta$ ) de  $r$  a  $r + \Delta$  (con  $q$  fijo), ¿esto resultara en un crecimiento o decrecimiento de  $TC(q, r)$ ?

Si incrementamos el valor  $r$  a  $r + \Delta$ , el costo de tenencia anual esperado se incrementara en:

$$C_h \left( \frac{q}{2} + r + \Delta - E(X) \right) - C_h \left( \frac{q}{2} + r - E(X) \right) = C_h \Delta$$

Si incrementamos el valor  $r$  a  $r + \Delta$ , el costo anual esperado de desabastecimiento se reducirá, debido al hecho que durante cualquier ciclo en el cual la demanda durante el tiempo de espera sea al menos  $r$ , el número de desabastecimientos durante el ciclo será reducido en  $\Delta$  unidades. En otras palabras, incrementando el punto de pedido de  $r$  a  $r + \Delta$ , se reducirán los costos de desabastecimiento en  $C_B \Delta$ , durante una fracción  $P(X \geq r)$  de todos los ciclos.

Ya que hay una demanda promedio de  $E(D)/q$  ciclos por año, incrementar el punto de pedido de  $r$  a  $r + \Delta$ , reducirá el costo de desabastecimiento en:

$$\frac{\Delta E(D) c_B P(X \geq r)}{q}$$

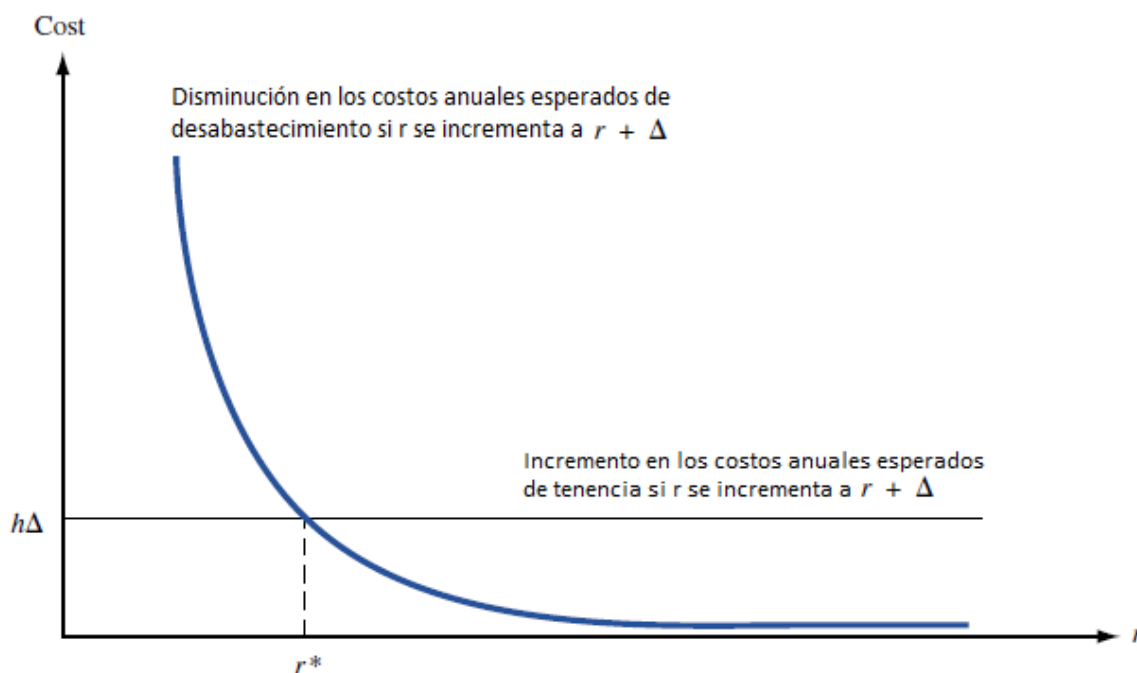


Observe que si  $r$  aumenta,  $P(X \geq r)$  disminuye, así a medida que  $r$  aumenta, la reducción resultante en el costo esperado de desabastecimiento anual al incrementar el punto de pedido en  $\Delta$  disminuirá. Esta observación nos permite dibujar la figura 2.15. Digamos que  $r^*$  es el valor de  $r$  para el cual el beneficio marginal iguala al costo marginal, o

$$\frac{\Delta E(D)c_B P(X \geq r^*)}{q} = C_h \Delta$$

$$P(X \geq r^*) = \frac{C_h q}{c_B E(D)}$$

**Figura 2.15.** Equilibrio entre costos de tenencia y costos de desabastecimiento.



Fuente: Winston, W. L., & Goldberg, J. B. (2004). Operations research: Applications and algorithms. USA. Thomson/Brooks/Cole. PP 1418

Supongamos que  $r < r^*$ . Entonces la figura 2.15 muestra que si incrementamos el punto de pedido de  $r$  a  $r^*$ , podemos ahorrar más en costos de desabastecimiento que lo que perdemos en costos de tenencia. Ahora supongamos que  $r > r^*$ . La figura 2.15 muestra que mediante la reducción del punto de pedido de  $r$  a  $r^*$ , podemos ahorrar más dinero en costos de tenencia que lo que perdemos en el costo incrementado de desabastecimiento.

En conclusión, si asumimos que la cantidad pedida puede ser aproximada por:

$$EOQ = \sqrt{\frac{2C_oE(D)}{C_h}}$$

Entonces el punto de pedido  $r^*$  y la cantidad de pedido  $q^*$  para el caso de pedidos pendientes:

$$q^* = \sqrt{\frac{2C_oE(D)}{C_h}} \quad (2.23)$$

$$P(X \geq r^*) = \frac{C_h q^*}{c_B E(D)} \quad (2.24)$$

Si

$$\frac{C_h q^*}{c_B E(D)} > 1$$

Entonces (2.24) no tiene solución, y el costo de tenencia es prohibitivamente alto en relación con el costo de desabastecimiento. La administración debería establecer el punto de pedido al nivel aceptable más pequeño. Si (2.24) tiende a un valor negativo de  $r^*$ , la administración también debería establecer el punto de pedido al nivel aceptable más pequeño.

Observaciones:

- a)  $P(x \geq r)$  es solo la probabilidad de que un desabastecimiento ocurra durante el tiempo de espera. También note que para  $C_h$  cercanos a cero, (2.24) tiende a una probabilidad de desabastecimiento cercana a cero. Para grandes  $c_B$  también, (2.24) tiende a una probabilidad de desabastecimiento cercana a cero.
- b) Después de substituir el EOQ por  $q$  en (2.24), podemos fácilmente determinar un valor óptimo aproximado de  $r$ , el punto de pedido. Note que  $r - E(X)$  es la cantidad en exceso de la demanda durante el tiempo de espera que es pedida para proteger contra la ocurrencia de desabastecimientos

durante el tiempo de espera. Por esta razón,  $r-E(X)$  es a menudo referido como el stock de seguridad.

- c) De (2.21), encontramos que el costo de tenencia anual esperado del stock de seguridad es  $h(r-E(X))$  = (nivel de stock de seguridad).

### 2.6.2.1.2. DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE PEDIDO: EL CASO DE LAS VENTAS PERDIDAS

Ahora asumimos que todos los desabastecimientos resultan en ventas perdidas y ese costo de  $c_{LS}$  dólares es incurrido en cada venta perdida. (Además de las penalidades por pérdida de la buena voluntad futura,  $c_{LS}$  debería incluir pérdida de ganancias debido a la venta perdida).

Como en el caso de los pedidos pendientes, asumimos que la cantidad óptima de pedido puede ser aproximada adecuadamente por el EOQ y usando el análisis marginal para determinar el punto de pedido óptimo  $r^*$ . La cantidad de pedido  $q^*$  y el punto de pedido  $r^*$  óptimos para el caso de las ventas pérdidas son:

$$q^* = \sqrt{\frac{2C_h E(D)}{C_h}}$$

$$P(X \geq r^*) = \frac{hq^*}{hq^* + c_{LS}E(D)} \quad (2.25)$$

La clave para la derivación de (2.25) es darse cuenta que el inventario esperado en el caso de ventas perdidas es= (inventario esperado en el caso de pedidos pendientes)+ (número esperado de escaseces por ciclo). Esta ecuación se deduce porque en el caso de ventas pérdidas, encontramos que durante cada ciclo, un promedio (escasez esperada por ciclo) de menos pedidos serán satisfechos con el inventario, elevando así el nivel promedio de inventario en una cantidad igual a la escasez esperada por ciclo. Observe que el lado derecho de (2.25) es más pequeño que el lado derecho de (2.24). Así que, la suposición del caso de ventas perdidas tendera a una probabilidad de desabastecimiento más baja (y un punto de pedido y stock de seguridad más altos) que el caso de pedidos pendientes.

### 2.6.2.1.3. POLÍTICAS DE REVISIÓN CONTINUA ( $r, q$ )

Una política de inventario de revisión continua, en la cual pedimos una cantidad  $q$  todas las veces que nuestro nivel de inventario alcance el punto de pedido  $r$ , es a menudo llamada una política  $(r, q)$ . Una política  $(r, q)$  es a menudo llamada como la política de dos contenedores, porque puede ser fácilmente implementada utilizando dos contenedores para almacenar un ítem. Por ejemplo, para implementar una política  $(30, 500)$ , cumpliremos pedidos con el contenedor 1 hasta que siga teniendo ítems. Tan pronto el contenedor 1 empiece a vaciarse y sepamos que el punto de pedido  $r=30$  ha sido alcanzado, colocamos un pedido por  $q=500$  unidades. Cuando el pedido llegue, ponemos los ítems en el contenedor 2 hasta una cantidad de 30, y colocamos las 500 unidades pedidas en el contenedor 1. Así, todas las veces el contenedor 1 haya sido vaciado, sabemos que el punto de pedido ha sido alcanzado.

### 2.6.2.1.4. POLÍTICAS DE REVISIÓN CONTINUA ( $s, S$ )

En la derivación de la mejor política  $(r, q)$ , asumimos que un pedido puede ser colocado exactamente en el punto cuando el nivel de inventario alcanza el punto de pedido. Utilizamos esta suposición para calcular el nivel de inventario esperado el inicio y al final de un ciclo. Suponiendo que una demanda de más de un ítem puede llegar en un momento dado, entonces un pedido tiene que ser colocado cuando el nivel de inventario es menor que  $r$ , y esto hace que nuestro cálculo del nivel de inventario esperado al final y al inicio del ciclo sea entonces incorrecto. Por ejemplo, supongamos que  $r=30$  y nuestro nivel de inventario actual es 35, si llega un pedido de 10 unidades, un pedido será colocado cuando el nivel de inventario es 25 (no  $r=30$ ), y esto invalida los cálculos que nos llevaron a (2.21). De esta discusión, vemos que es posible para el nivel de inventario llegar a niveles más bajos que el punto de pedido. Note que este problema no podría ocurrir si todas las demandas fueran por una unidad, así el inventario podría ir (por decir) de 32 a 31 y después a 30, y un pedido sería colocado cuando el nivel de inventario iguale el punto de pedido  $r$ . De este ejemplo, vemos que si la demanda de tamaños mayores que una unidad pueden ocurrir en algún momento, entonces el modelo  $(r, q)$  no tendería a una política que minimice el costo esperado anual.

En tales situaciones ha sido mostrado que una política  $(s, S)$  es óptima. Para implementar una política  $(s, S)$ , colocamos una orden todas las veces que el nivel de inventario es menor o igual a  $s$ . El tamaño de la orden es suficiente para alcanzar el nivel de inventario  $S$  (asumiendo tiempo de espera cero). Por ejemplo, si estuviéramos implementando una política  $(5,40)$  y el nivel de inventario repentinamente pasa de 7 a 3, colocaríamos inmediatamente un pedido por  $40-3=37$  unidades. El cálculo exacto de la política  $(s, S)$  óptima es difícil si descuidamos el problema de las caídas por debajo del punto de pedido. Sin embargo, podemos aproximar la política  $(s, S)$  óptima como sigue. Establecer  $S-s = \text{EOQ}$ , entonces  $s$  iguala al punto de pedido obtenido en (2.24) o (2.25). Finalmente, obtenemos  $S=r+q$ .

#### **2.6.2.2. POLÍTICA DE REVISIÓN PERIÓDICA (R, S)**

En esta sección, describimos una política de revisión periódica ampliamente utilizada: la política  $(R, S)$ . Antes de describir la operación de esta política, necesitamos describir el concepto de nivel de inventario en orden. El nivel de inventario en orden es simplemente la suma del inventario en mano y el inventario con pedidos. Así, si 30 unidades de un producto están a la mano, y pedimos 70 unidades (con un tiempo de espera, digamos, 1 mes), nuestro nivel de inventario en orden es 100. Ahora podemos describir la operación de la política de inventario  $(R, S)$ . Cada  $R$  unidades de tiempo (digamos, años), revisamos el nivel de inventario en orden, y colocamos un pedido para llevar el nivel del inventario hasta  $S$ . Por ejemplo si estamos usando una política  $(0.25, 100)$ , revisaríamos el nivel del inventario al final de cada trimestre (cuarto de año). Si  $i < 100$  unidades estuvieran en mano, un pedido por  $100-i$  unidades debería ser colocado. En general, una política  $(R, S)$  incurrirá en costos de tenencia más altos que una política minimizante de costo como la  $(r, q)$ , pero una política  $(R, S)$  es usualmente más fácil de administrar que una política de revisión continua. Con una política  $(R, S)$ , podemos predecir con certeza los momentos cuando un pedido será colocado. Una política  $(R, S)$  también permite a la compañía coordinar reaprovisionamientos. Por ejemplo, una compañía puede usar  $R=1$  mes para todos los productos pedidos del mismo proveedor y entonces ordenar todos los productos de ese proveedor en el primer día de cada mes.

Ahora asumimos que el intervalo de revisión  $R$  ha sido determinado y enfoquémonos en la determinación del nivel  $S$  que minimizará los costos anuales esperados. Más tarde, en esta sección, discutiremos como determinar un valor apropiado para  $R$ . Ahora asumimos que todos los desabastecimientos están retrasados y la demanda es una variable aleatoria continua cuya distribución permanece invariable sobre el tiempo. Finalmente asumimos que el precio de compra por unidad es constante. Esto implica que los costos anuales de compra no dependen de nuestra elección de  $R$  y  $S$ . Definimos:

$R$ =Tiempo (en años) entre revisiones.

$D$ = Demanda (aleatoria) durante un periodo de un año.

$E(D)$ =Demanda media durante un periodo de un año.

$C_o$ =Costo de colocar un pedido.

$J$ =Costo de revisar el nivel de inventario.

$C_h$ = Costo de tener un ítem en inventario por un año.

$C_B$ = Costo por cada unidad faltante en el caso de pedidos atrasados (asumido como independiente de la longitud del tiempo hasta que el pedido es satisfecho).

$L$ = tiempo de espera por cada pedido (asumido como constante).

$D_{L+R}$ =demanda (aleatoria) durante un intervalo de longitud  $L+R$ .

$E(D_{L+R})$ =media de  $D_{L+R}$ .

$\sigma_{D_{L+R}}$  =Desviacion estándar de  $D_{L+R}$

Dado un valor de  $R$ , podemos determinar un valor de  $S$  que minimice el costo anual esperado. Nuestra derivación es similar a (2.24). Para una elección dada de  $R$  y  $S$ , nuestros costos esperados están dados por:

$$\begin{aligned}
 & \text{Costos anuales} \\
 & \text{de compra} \\
 & \text{esperados} \quad + \quad \text{Costos anuales} \\
 & \text{de revision} \quad + \quad \text{Costos anuales} \\
 & \text{de pedido} \quad + \quad \text{Costos anuales} \\
 & \text{de tenencia} \\
 & \text{esperados} \\
 & \quad \quad \quad \text{Costos anuales} \\
 & \quad \quad \quad + \text{de desabastecimiento} \\
 & \quad \quad \quad \text{esperados}
 \end{aligned}$$

Ya que son colocadas  $1/R$  revisiones por año, los costos anuales de revisión están dados por  $J/R$ . Notar también que todas las veces que un pedido es colocado, el nivel en orden igualará a  $S$ . La única manera en que un pedido no será colocado en el siguiente periodo de revisión es si  $D_{L+R}=0$ . Ya que  $D_{L+R}=0$  es una variable aleatoria continua,  $D_{L+R}=0$  tendrá probabilidad cero. Así, es seguro que un pedido se coloque en el siguiente punto de revisión (o cualquier punto de revisión). Esto implica que el costo anual de pedido es  $C_0 (1/R) = C_0/R$ . Observar que tanto el costo anual de pedido y el costo anual de revisión son independientes de  $S$ . Así, el valor de  $S$  que minimice los costos anuales esperados será el valor de  $S$  que minimice (costos anuales de tenencia esperados)+ (costos anuales de desabastecimiento esperados).

Para determinar el costo de tenencia anual esperado para una política  $(R, S)$  dada, primero definimos un ciclo que es el intervalo entre llegadas de pedidos. Si podemos determinar el valor esperado del nivel de inventario promedio sobre un ciclo, entonces el costo de tenencia anual esperado es solamente  $C_h$  (valor esperado del nivel de inventario en mano sobre un ciclo). Como en la derivación de (2.21), asumimos que el número promedio de pedidos pendientes es relativamente pequeño al promedio del nivel de inventario promedio en mano.

Así que:

$$\begin{aligned}
 \text{Valor esperado} \\
 \text{de } I(t) \quad \cong \quad \text{Valor esperado} \\
 \text{de } OHI(t)
 \end{aligned}$$

Entonces el valor esperado de  $I(t)$  sobre un ciclo puede ser aproximado por  $0.5$  (valor esperado de  $I(t)$  justo antes de que un pedido llegue)+ $0.5$  (valor de esperado de  $I(t)$  justo después que un pedido llegue).

Justo antes de que un pedido llegue, nuestro máximo nivel de nivel de inventario en mano ( $S$ ) ha sido reducido por un promedio de  $E(D_{L+R})$ . Así, el valor esperado de  $I(t)$  justo antes de que un pedido llegue  $= S - E(D_{L+R})$ . Así,

$$\text{Valor esperado de } I(t) \text{ justo después de que un pedido llegue} = S - E(D_{L+R}) + E(D)R$$

Entonces,

$$\text{Valor esperado de } I(t) \text{ durante un ciclo} = S - E(D_{L+R}) + \frac{E(D)R}{2}$$

Así,

$$\text{Costo de tenencia anual esperados} = C_h \left[ S - E(D_{L+R}) + \frac{E(D)R}{2} \right]$$

De esta expresión, se deduce que incrementando  $S$  a  $S + \Delta$  se incrementará el costo de tenencia anual esperado en  $\Delta C_h$ . Ahora nos enfocamos en cómo un incremento de  $S$  a  $S + \Delta$  afecta los costos anuales de desabastecimiento esperados. Después podemos utilizar el análisis marginal para encontrar el valor de  $S$  que minimice la suma de los costos anuales esperados de tenencia y desabastecimiento. Definamos los desabastecimientos “asociados” con cada pedido como los desabastecimientos ocurridos en el intervalo de tiempo entre la llegada de un pedido y la llegada del siguiente pedido. Por ejemplo, un pedido es colocado en el momento 0, llega en el momento  $L$ , y el siguiente no llegará hasta el momento  $R+L$ . Así, todos los costos de desabastecimiento que ocurren entre  $R$  y  $R+L$  están asociados con el pedido del momento 0. Claramente, la suma de todos los desabastecimientos igualará a la suma de los desabastecimientos asociados con el pedido del momento 0. Ya que el siguiente pedido llega en el momento  $R+L$ , y nuestro pedido del momento 0 lleva al nivel de inventario en pedido hasta  $S$ , un desabastecimiento estará asociado con el pedido del momento 0 si y solo si la demanda entre el momento 0 y  $R+L$  excede  $S$ . Si un desabastecimiento ocurre, la magnitud del desabastecimiento igualará a  $D_{L+R} - S$ .

Ahora podemos utilizar el análisis marginal para determinar (para un  $R$  dado) el valor de  $S$  que minimice a suma de los costos anuales de tenencia y



desabastecimiento esperados. Si incrementamos  $S$  a  $S + \Delta$ , el costo anual de tenencia esperado se incrementara en  $C_h \Delta$ . Incrementando  $S$  a  $S + \Delta$ , se incrementan los desabastecimientos asociados con un pedido si  $D_{L+R} \geq S$ . Así, para una fracción  $P(D_{L+R} \geq S)$  de todos los pedidos, el incrementar  $S$  a  $S + \Delta$ , ahorrará  $c_B \Delta$  en costos de desabastecimiento. Ya que  $1/R$  pedidos son colocados cada año, incrementar  $S$  a  $S + \Delta$ , reducirá el costos de tenencia anual esperado en  $\left(\frac{1}{R}\right) c_B \Delta P(D_{L+R} \geq S)$ . El análisis marginal entonces implica que el valor de  $S$  que minimice la suma de los costos anuales de tenencia y desabastecimiento esperados ocurrirá para el valor de  $S$  que satisfaga:

$$\Delta h = \left(\frac{1}{R}\right) c_B \Delta P(D_{L+R} \geq S)$$

O

$$P(D_{L+R} \geq S) = \frac{Rh}{c_B} \quad (2.26)$$

Supongamos que todos los costos de desabastecimiento asociados resultan en perdida de ventas, y un costo de  $c_{LS}$  (incluyendo costos de desabastecimiento más pérdida de ganancia) es incurrido en cada pérdida de venta. Entonces el valor de  $S$  que minimiza la suma de los costos anuales de tenencia y desabastecimiento esperados está dado por:

$$P(D_{L+R} \geq S) = \frac{Rh}{Rh + c_{LS}} \quad (2.27)$$

#### 2.6.2.2.1. DETERMINACIÓN DE R

A menudo, el intervalo de revisión  $R$  es establecido igual a  $EOQ/E(D)$ . Esto hace que el número de pedidos colocados por año igual al número recomendado si un modelo EOQ simple fuera usado para determinar el tamaño del pedido. Ya que cada pedido es acompañado por una revisión, debemos establecer el costo por pedido en  $C_o + J$ . Esto vuelve:

$$EOQ = \sqrt{\frac{2(C_o + J)E(D)}{h}} \quad (2.28)$$

Para ilustrar la idea, supongamos que un televisor cuesta 500\$ para revisar el nivel de inventario periódico y 5000\$ para colocar un pedido por una TVs. Entonces:

$$EOQ = \sqrt{\frac{2 * 5500 * 990}{100}} = 330$$

Esto implica un intervalo de revisión  $R=330/900=1/3$  año.

### 2.6.2.3. EL ENFOQUE DEL NIVEL DE SERVICIO PARA DETERMINAR EL NIVEL DE STOCK DE SEGURIDAD

Usualmente es difícil determinar el costo de tener en falta una unidad. Por esta razón, los administradores a menudo deciden controlar los desabastecimientos mediante el establecimiento de un nivel de servicio. El nivel de servicio viene definido como, la fracción esperada (usualmente expresada como porcentaje) de toda la demanda que es satisfecha a tiempo. En esta sección asumiremos que todos los desabastecimientos están con pedidos pendientes.

Dado un valor deseado de SL, ¿Cómo podemos determinar un punto de pedido que permite el nivel de servicio deseado? Supongamos que pedimos la cantidad EOQ ( $q$ ) y usamos un punto de pedido  $r$ .

Los costos esperados de desabastecimiento son:

$$\text{Costo anual esperado de desabastecimiento} = \frac{c_B E(B_r) E(D)}{q}$$

Aquí,  $E(D)$  es la demanda anual promedio. Digamos SL es el porcentaje de toda la demanda que es satisfecha a tiempo. Entonces para valores dados de  $q$  (la cantidad de pedido) y  $r$  (punto de pedido), tenemos

$$1 - SL = \frac{\frac{E(B_r)E(D)}{q}}{E(D)} = \frac{E(B_r)}{q} \quad (2.29)$$

La ecuación (2.29) puede ser usada para determinar el punto de pedido que nos da el nivel de servicio deseado. Ahora, asumimos que la demanda durante el tiempo de espera está normalmente distribuida, con media  $E(X)$  y desviación

estándar  $\sigma_x$ . Para usar la ecuación (2.29), necesitamos determinar  $E(B_r)$ . Si  $X$  esta normalmente distribuida, la determinación de  $E(B_r)$ , requiere el conocimiento de la función normal de perdida.

**Definición:** La función normal de perdida,  $NL(y)$ , es definida por el hecho de que  $\sigma_x NL(y)$  es el número esperado de desabastecimientos que ocurrirán durante el tiempo de espera si el tiempo de espera esta normalmente distribuido con media  $E(X)$  y desviación estándar  $\sigma_x$  y el punto de pedido es  $E(X)+y\sigma_x$ . En pocas palabras, si mantenemos “ $y$ ” desviaciones estándares (en términos de tiempo de espera) del stock de seguridad, entonces  $NL(y) \sigma_x$  es el numero esperado de desabastecimientos que ocurren durante el tiempo de espera.

Asumiendo una demanda del tiempo de espera normal, podemos determinar que el punto de pedido que nos llevará al nivel de servicio deseado  $SL$  (expresado como fracción). Un punto de pedido  $r$  corresponde a mantener:

$$y = \frac{r - E(X)}{\sigma_x}$$

Desviaciones estándar del nivel de seguridad. Ahora, la definición de la función normal de pérdida implica que durante el tiempo de espera, un punto de pedido  $r$  tenderá a un número de desabastecimientos esperados  $E(B_r)$  dado por:

$$E(B_r) = \sigma_x NL\left(\frac{r - E(X)}{\sigma_x}\right) \quad (2.30)$$

Substituyendo (2.30) en (2.29) obtenemos el punto de pedido para el nivel de servicio deseado  $SL$  con un tiempo de espera durante la demanda normal:

$$1 - SL = \frac{\sigma_x NL\left(\frac{r - E(X)}{\sigma_x}\right)}{q}$$

$$NL\left(\frac{r - E(X)}{\sigma_x}\right) = \frac{q(1 - SL)}{\sigma_x} \quad (2.31)$$

Con excepción de  $r$ , todas las cantidades en (2.31) son conocidas, Así, (2.31) y la función normal de pérdida puede ser usada para determinar el punto de pedido correspondiente a un nivel de servicio  $SL$  dado.

## 2.7 MARCO CONCEPTUAL

- 1) **Análisis de sensibilidad:** El estudio de cómo los cambios en las evaluaciones de probabilidad para los estados de la naturaleza o los cambios en las ganancias afectan a la alternativa de decisión recomendada.
- 2) **Cantidad de pedido:** La cantidad a ser pedida cuando se alcanza el punto de pedido.
- 3) **Cantidad económica de pedido (EOQ):** La cantidad de pedido que minimiza el costo de tenencia anual más el costo anual de pedidos.
- 4) **Capital de trabajo:** El dinero invertido en el inventario.
- 5) **Ciclo de tiempo:** El período de tiempo entre la colocación de dos pedidos consecutivos.
- 6) **Costo de capital:** El costo en que una empresa incurre para obtener capital para inversión. Se puede declarar como un porcentaje anual, y es parte del costo de tenencia asociados con el mantenimiento de inventarios.
- 7) **Costo de la buena voluntad:** Un costo asociado a un pedido pendiente, una venta perdida, o cualquier forma de desabastecimiento o demanda insatisfecha. Este costo puede ser utilizado para reflejar la pérdida de ganancias futuras porque un cliente experimentó una demanda insatisfecha.
- 8) **Costo de pedido:** El costo fijo (sueldos, papel, transporte, etc.) asociados a realizar un pedido de un artículo.
- 9) **Costo de tenencia:** El costo asociado con el mantenimiento de una inversión en inventario, incluyendo el costo del capital invertido en el inventario, seguros, impuestos, gastos generales de almacén, y así sucesivamente. Este costo puede ser declarado como un porcentaje de la inversión en inventario o como un costo por unidad.
- 10) **Demanda durante el tiempo de espera:** El número de unidades demandadas durante el periodo del tiempo de espera.

- 11) Depósito:** El área para almacenar el inventario; a veces referido como el almacén.
- 12) Desviación estándar:** La raíz cuadrada positiva de la varianza.
- 13) Escasez o desabastecimiento:** Situación en la que la demanda no puede ser satisfecha con el inventario.
- 14) Flujo de efectivo:** Las ganancias o pérdidas netas de dinero en efectivo en un negocio a través de su ciclo de negocios.
- 15) Inventario:** Materiales y repuestos que son mantenidos para uso futuro sin saber dónde y cuándo serán usados.
- 16) Materiales:** Todos los ítems que son comprados para uso en o para el soporte de actividades de ingeniería/manufactura/operaciones o mantenimiento.
- 17) Modelo de inventario determinístico:** Un modelo en el que la demanda se considera conocida y no está sujeta a la incertidumbre.
- 18) Modelo de inventario probabilístico:** Un modelo donde la demanda no se sabe exactamente; las probabilidades deben estar asociados con los valores posibles de la demanda.
- 19) Modelo determinístico:** Un modelo en el cual todas las entradas incontrolables son conocidas y no pueden variar.
- 20) Modelo estocástico:** Un modelo en el que al menos una entrada incontrolable es incierta y sujeta a variación; los modelos estocásticos también se conocen como modelos probabilísticos.
- 21) Pedido pendiente:** La recepción de un pedido para un producto cuando no hay unidades en el inventario. Estos pedidos pendientes son finalmente satisfecho cuando un nuevo suministro del producto esté disponible.
- 22) Posición de inventario:** el inventario en mano más el inventario en pedidos.

- 23) Punto de pedido:** La posición de inventario en el que un nuevo pedido debe ser colocado.
- 24) Rotación de inventario:** El número de veces en un año que en teoría el inventario es vuelto a comprar. Si es más grande es mejor.
- 25) Sistema de inventario de revisión continua:** Un sistema en el que la posición de inventario se controla o revisa de forma continua, de modo que un nuevo pedido se puede realizar tan pronto como se alcanza el punto de pedido.
- 26) Sistema de inventario de revisión periódica:** Un sistema en el que la posición de inventario se verifica o revisa en predeterminados puntos periódicos en el tiempo. Los pedidos se colocan sólo en los puntos de revisión periódica.
- 27) Stock de seguridad:** Inventario mantenido con el fin de reducir el número de desabastecimientos resultantes de una demanda mayor a la esperada.
- 28) Tasa de demanda constante:** Un supuesto de muchos modelos de inventario que indica que el mismo número de unidades se toman del inventario cada período de tiempo.
- 29) Tasa de suministro constante:** Una situación en la que el inventario se abastece a una velocidad constante durante un periodo de tiempo.
- 30) Tiempo de espera:** El tiempo entre la realización de un pedido y su recepción en el sistema de inventario.
- 31) Valor esperado:** Una media ponderada de los valores de la variable aleatoria, para los cuales la función de probabilidad proporciona los pesos. Si un experimento se puede repetir un gran número de veces, el valor esperado puede ser interpretado como el "promedio a largo plazo."
- 32) Variable aleatoria:** Una descripción numérica de los resultados de un experimento.

**33)Variable aleatoria continua:** Una variable aleatoria que puede asumir cualquier valor en un intervalo o colección de intervalos.

**34)Variable aleatoria discreta:** Una variable aleatoria que puede asumir sólo una secuencia finita o infinita de valores.

**35)Varianza:** Una medida de la dispersión o variabilidad en la variable aleatoria. Se trata de una media ponderada de los cuadrados de las desviaciones de la media.

# **CAPÍTULO III. EVALUACIÓN DEL ESTADO SITUACIONAL DE LA GESTIÓN DE REPUESTOS EN EL ALMACÉN DE ZORRITOS Y LOS TALADROS DEL LOTE Z-1 EN BASE A DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS, SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE MODELOS DE CONTROL DE INVENTARIOS**

## **3.1 DESCRIPCIÓN GENÉRICA DEL PROCESO DE GESTIÓN DE MATERIALES DE LOS TALADROS DEL LOTE Z-1 Y ALMACÉN ZORRITOS**

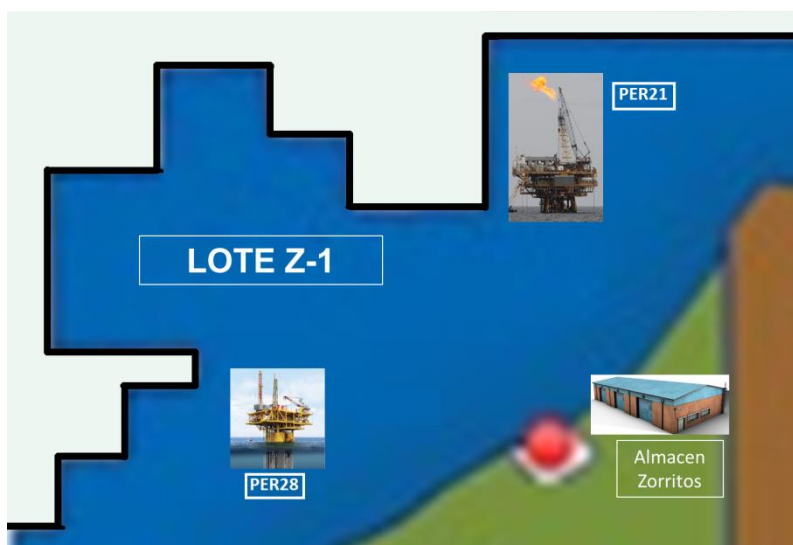
La compañía DRILLER, empresa que presta servicios de perforación y mantenimiento de pozos a la industria petrolera, gestiona los materiales de los taladros PER21 y PER28 valiéndose de una estructura particular, posee una base operativa en tierra con espacios físicos para almacenar materiales y también espacios físicos en mar, esto con el fin de proveer los elementos necesarios que den soporte a la operación de los taladros que perforan en el lote Z-1 en tiempos oportunos. En la figura 3.1 podemos ver la referencia geográfica tanto de la base operativa como de los taladros PER21 y PER28.

El stock de materiales en la base está claramente delimitado y reservado para atender al taladro al cual pertenece el material. Asimismo, hay un almacenero en Zorritos que gestiona el stock en dicha base y en cada plataforma hay un almacenero que gestiona el stock en mar, cuando las operaciones requieren algún material primero se verifica la disponibilidad a bordo, si no hay, se solicita el envío del material requerido desde la base en tierra, si no hay en base se genera un pedido de material que dará inicio a un posterior proceso logístico. También es de resaltar que los pedidos de compra de material solo los realiza el almacenero en la base y estos son independientes por cada taladro, mientras que los consumos de material se realizan en las plataformas en mar, esta idea es muy importante para entender la lógica de funcionamiento de las bases de datos y los posteriores análisis.



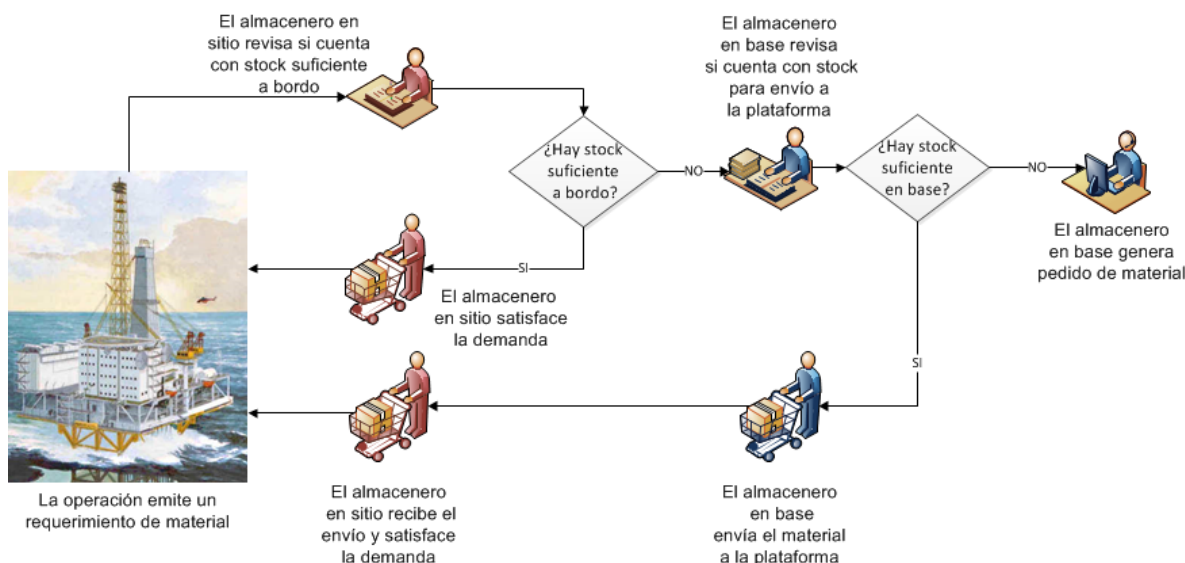
A nivel de sistema informático, se manejan 4 bases de datos para el control del inventario, dos bases de datos por cada taladro, una de ellas contiene el stock del material perteneciente al taladro en la base y la otra contiene el stock a bordo de la plataforma donde opera el respectivo taladro. La figura 3.3 explica mejor la distribución de las bases de datos.

**Figura 3.1.** Disposición del almacén en Zorritos y los taladros PER21 y PER28 en el mar de Tumbes.



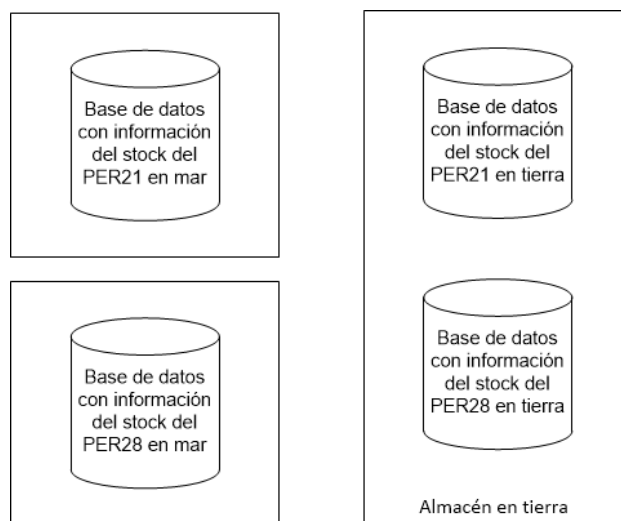
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.2.** Flujo de trabajo para la satisfacción de la demanda de materiales en los taladros del lote Z-1.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.3.** Esquema de la distribución de las bases de datos de gestión de inventarios



Fuente: Elaboración propia.

En base a la figura 3.3 podemos decir, por ejemplo, que si quisiéramos saber el nivel del inventario o el valor de todo el material perteneciente al taladro PER21 tendríamos que consolidar la información de sus dos bases de datos (una con la información onshore y la otra con la información offshore), igualmente si quisiéramos saber el valor de material que se tiene almacenado en tierra o en mar deberíamos considerar dos bases de datos (una del taladro PER21 y la otra del taladro PER28).

### 3.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS COMPONENTES EN LOS TALADROS PER21 Y PER28

Dentro de los antecedentes bibliográficos varios autores hacían referencia a conceptos como “base instalada” o que la gestión de repuestos no debería ser tratada aisladamente de la gestión del mantenimiento enfocándonos solamente en el almacén y su contenido, es por esto que es necesario tener una noción del tipo de maquinaria que opera en los taladros PER21 y PER28, ya que son estas máquinas con sus mantenimientos programados y/o no planificados los que generarán la demanda de repuestos.

En las tablas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6 se muestran los datos de los componentes críticos para la operación según su clasificación (A=Criticidad alta, B=Criticidad normal).

**Tabla 3.1.** Datos técnicos de los componentes criticidad A del taladro PER21.

Función	Descripción	Fabricante	Modelo	Serie
Top Drive	TOP DRIVE SYSTEM	VARCO	TDS-11SA	M614001869-1
Casilla de Control Top Drive	TOP DRIVE CONTROL HOUSE	VARCO	30178435	145736J
Motor Derecho Top Drive	EL/MOTOR 575V 39.5HZ 400HP 366A 1155RPM	RELIANCE ELECT.	4046Y L0896A	B9014263-070001 FL
Motor Izquierdo Top Drive	EL/MOTOR 575V 39.5HZ 400HP 366A 1155RPM	RELIANCE ELECT.	4046Y L0896A	B9014187-180001 GL
Cuarto de control de Potencia (S. C. R.)	I-DRIVE S.C.R CONTROLLER 600VAC/750VDC	IEC SYTEM	I-DRIVE M2200	JOB#08-8941
Drawwork	DRAWWORK	NATIONAL	1320UE	T-2681
Motor A Drawwork	EL/MOTOR EEXD DC 1000 HP	GENERAL ELECTRIC	GE752	8855644
Motor B Drawwork	ELECTRIC MOTOR EEXD DC 1000HP	JOLIET EQUIPMENT	C75ZB3	-
Freno Auxiliar Drawwork	BRAKE UNIT	WICHITA	7-337-310-118- 0999	131039877
Travelling Block	TRAVELLING BLOCK	OILWELL	B500	8

Fuente: Software de gestión de activos de la empresa

**Tabla 3.2.** Datos técnicos de los componentes criticidad A del taladro PER28.

Función	Descripción	Fabricante	Modelo	Serie
Top Drive	TOP DRIVE SYSTEM	VARCO	TDS-9S	TDS9SH07D47
Casilla de Control Top Drive	ADJUSTABLE FREQUENCY CONTROLLER	SIEMENS	6SE7238-6FK20-3ABO-Z	6SE72 6 2858 15
Motor Derecho Top Drive	EL/MOTOR 550V 39.2HZ 331A 1155RPM	RELIANCE ELECT.	L0719A	24KE502141-BAF-1
Motor Izquierdo Top Drive	EL/MOTOR 550V 39.2HZ 331A 1155RPM	RELIANCE ELECT.	L0719A	02K7802141-TZT-1
Cuarto de control de Potencia (S. C. R.)	I-DRIVE S.C.R CONTROLLER	IEC SYTEM	I-DRIVE M1250/1500	JOB#08-8763
Drawwork	DRAWWORK	AMC - APPLIED MACHINERY CORP.	AC 1600	7605
Motor de Drawwork	MOTOR ELECTRICO - 1500 HP	JOLIET EQUIPMENT	HTM1500	600238
Travelling Block	TRAVELLING BLOCK 6X52 500T	CONTIN.EMSCO	RA-52-6	2825

Fuente: Software de gestión de activos de la empresa

**Tabla 3.3.** Datos técnicos de los componentes criticidad B del taladro PER21.

Función	Descripción	Fabricante	Modelo	Serie
Tenaza Hidráulica	FLOORHAND	BLOHM VOSS	GF1000	FH0191BV
Corona	CROWNBLOCK SHEAVES 6-48+1-55 SHEAVES 1	BHL INTERNATIONAL	NOT DEFINED	-
Compresor #01	AIR COMPRESSOR PACK	ATLAS COPCO	GA37 PLUS	API531998
Compresor #02	AIR COMPRESSOR PACK 460V 60HZ 22KW 7.4BA	ATLAS COPCO	GA22	API466524
Bomba de Lodo #01	MUD TRIPLEX PISTON PUMP	DRILLMEC	12T1600 5000 PSI	14346
Motor A- B. L. #01	ELECTRIC MOTOR EEXD DC 1000HP	JOLIET EQUIPMENT	C75ZB3	502155 12-08-0386
Motor B- B. L. #01	ELECTRIC MOTOR EEXD DC 1000HP	JOLIET EQUIPMENT	C75ZB3	502156 12-08-385
Bomba de Lodo #02	MUD TRIPLEX PISTON PUMP	DRILLMEC	12T1600 5000 PSI	14351
Motor A- B. L. #02	ELECTRIC MOTOR EEXD DC 1000HP	JOLIET EQUIPMENT	C75ZB3	501143-1270
Motor B- B. L. #02	ELECTRIC MOTOR EEXD DC 1000HP	JOLIET EQUIPMENT	C75ZB3	501144-1285
Bomba de Lodo #03	MUD TRIPLEX PISTON PUMP 1600HP	LTI-LEWCO	WH-1612	WH1612-274
Motor A- B. L. #03	EL/MOTOR EEXD DC 1000 HP	GENERAL ELECTRIC	GE752	7429220
Motor B- B. L. #03	ELECTRIC MOTOR EEXD DC 745 KW	GENERAL ELECTRIC	5GE752AR2B	7537156

Fuente: Software de gestión de activos de la empresa

**Tabla 3.4.** Datos técnicos de los componentes criticidad B del taladro PER21.

Función	Descripción	Fabricante	Modelo	Serie
Generador #01	ALTERNATOR 1750KVA 600V 1225KW 60HZ	KATO	6P6-3150 AA27098022	24394-02
Motor Diesel #01	DIESEL ENGINE 1101 KW 1200RPM	CATERPILLAR	3512C ARR.2507623	LLA03656
Generador #02	ALTERNATOR 600V 1030KW 1240A 1200R 1030-	KATO	6P6-2700 1030-680361	82826-25
Motor Diesel #02	DIESEL ENGINE 1101 KW 1200RPM	CATERPILLAR	3512C ARR.2507623	LLA01626
Generador #03	ALTERNATOR 600V 1030KW 1240A 1200R 1030-	KATO	6P6-2700 1030-680361	82826-63
Motor Diesel #03	DIESEL ENGINE 1101 KW 1200RPM	CATERPILLAR	3512C ARR.2507623	LLA01622
Generador #04	ALTERNATOR 1785KVA 1300KW 600V 60HZ 1800	CATERPILLAR	SR4B ARR.128-7412	6WR00170
Motor Diesel #04	DIESEL ENGINE 1101 KW 1200RPM	CATERPILLAR	3512C ARR.2507623	LLA01624
B. O. P. Doble	B.O.P. DOUBLE U 13.5/8 5K FLANGED H2S	CAMERON	U D 13.5/8 5K FL H2S	4332
B. O. P. Anular	ANNULAR PREVENTER 13.5/8 5K H2S	SHAFFER	57120	4328
Acumulador	B.O.P. ACCUMULATOR CTRL SYS 320 GAL 6 ST	OPEN AND CLOSE EQUIPMENT	OCAU-6V320G 20B DR	2044
Grúa	WHEELED CRANE 4X4 47TON	LINK-BELT	HC108B	186
Mesa Rotaria	ROTARY TABLE 37.1/2#	LANZHOU ZHONG	ZP375	-

Fuente: Software de gestión de activos de la empresa

**Tabla 3.5.** Datos técnicos de los componentes criticidad B del taladro PER28

Función	Descripción	Fabricante	Modelo	Serie
Tenaza Hidráulica	IRON ROUGHNECK 100,000FT/LBS 3.1/2-9.1/	HAWK INDUSTRIES	M100K-2GSR	301
Corona	CROWNBLOCK	NATIONAL	750-FA AND 760-FA	1093
Compresor #01	AIR COMPRESSOR PACK	ATLAS COPCO	GA37 PLUS	API513005
Compresor #02	AIR COMPRESSOR PACK	ATLAS COPCO	GA37 PLUS	API512655
Bomba de Lodo #01	MUD TRIPLEX PISTON PUMP 1600HP	LTI-LEWCO	WH-1612	WH1612-275
Motor A- B. L. #01	ELECTRIC MOTOR EEXDDC 600-750VDC 800-8	GENERAL ELECTRIC	5GE752	7491246
Motor B- B. L. #01	EL/MOTOR EEXD DC 600-750VDC 60HZ 800-8	GENERAL ELECTRIC	5GE752R3A	7491242
Bomba de Lodo #02	MUD TRIPLEX PISTON PUMP 1600HP	LTI-LEWCO	WH-1612	WH1612-273
Motor A- B. L. #02	EL/MOTOR 750V 1000HP 1050A 960RPM	GENERAL ELECTRIC	5GE752U6A	7412632
Motor B- B. L. #02	EL/MOTOR EEXD DC 1000 HP	GENERAL ELECTRIC	GE752	7502353

Fuente: Software de gestión de activos de la empresa

**Tabla 3.6.** Datos técnicos de los componentes criticidad B del taladro PER28

Función	Descripción	Fabricante	Modelo	Serie
<b>Generador #01</b>	ALTERNATOR 1137 KVA 910KW 60HZ 600V 1094	CATERPILLAR	SR5 / 910 KW	G1N00521
<b>Motor Diesel #01</b>	DIESEL ENGINE 1120 KW 1800 RPM	CATERPILLAR	C32 ARR.336-7659	PRH00853
<b>Generador #02</b>	ALTERNATOR 1137 KVA 910KW 60HZ 600V 1094	CATERPILLAR	SR5 / 910 KW	G1N00521
<b>Motor Diesel #02</b>	DIESEL ENGINE 1120 KW 1800 RPM	CATERPILLAR	C32 ARR.336-7659	PRH00954
<b>Generador #03</b>	ALTERNATOR 600V 60HZ 300KVA 1200RPM	CATERPILLAR	SR4B ARR.344-6522	8HM00665
<b>Motor Diesel #03</b>	DIESEL ENGINE	CATERPILLAR	C32 ARR.367-5230	JDB00158
<b>Generador #04</b>	ALTERNATOR 1137KVA 910KW 60HZ 600V 1094A	CATERPILLAR	SR5B ARR.466-7309	G1N00828
<b>Motor Diesel #04</b>	DIESEL ENGINE 1120 KW 1800 RPM	CATERPILLAR	C32 ARR.336-7659	PRH00955
<b>B. O. P. Doble</b>	B.O.P. DOUBLE U 13.5/8 5K FLANGED H2S	CAMERON	U D 13.5/8 5K FL H2S	5038
<b>B. o. P. Anular</b>	ANNULAR PREVENTER 7012MSP 21.1/4 2K	T3 ENERGY	NOT DEFINED	-
<b>Acumulador</b>	B.O.P. ACCUMULATOR UNIT CONTROL SYSTEM	CPC - CONSOLIDATED PRESSURE CONTROL	6S-3/40-25	4373
<b>Grúa</b>	DECK CRANE 50TON	LINK-BELT	LS108B	9LNH4821
<b>Mesa Rotaria</b>	ROTARY TABLE 27.1/2	NATIONAL	C275	T-3615

Fuente: Software de gestión de activos de la empresa



### 3.3 ANÁLISIS DE INVENTARIO

Antes de proceder con los análisis sobre el inventario es necesario hacer las siguientes aclaraciones para poder entender mejor los resultados:

1. Durante el desarrollo de los análisis se considerarán 3 casos, los dos primeros casos son cuando se analiza el inventario individual de cada taladro aisladamente y un tercer caso es cuando se analiza todo el inventario en conjunto como si se tratara de un solo almacén. Para diferenciar estos casos utilizaremos la siguiente notación:
  - **PER21**: Este es el caso en que solo se analiza el inventario del taladro PER21.
  - **PER28**: Este es el caso en que solo se analiza el inventario del taladro PER28.
  - **PER21/28**: Este es el caso en que se analiza el inventario de los taladros PER21 y PER28 mezclando sus bases de datos.

También, en algunos casos se añadirá la palabra “onshore” u “offshore” lo cual indicará que solo nos referimos al stock en tierra o en mar respectivamente.

2. La mayoría de análisis se realizó con información del periodo comprendido entre el 01/04/2014 y el 31/03/2015 (12 meses), excepto para el análisis del tiempo de espera, para este se utilizó toda la información disponible en las bases de datos de los taladros.
3. Durante los análisis, a menudo nos referiremos a los materiales en el almacén como “Ítems”, este concepto es definido como un tipo específico de material el cual tiene un código identificador único y un número de parte particular provisto por el fabricante de dicho material. Por lo tanto, cuando nos refiramos a “cantidad de ítems” este reflejará la variedad de materiales en los diversos almacenes en vez de la cantidad disponible del material en sí. Por ejemplo, si tuviera dos ítems cada uno en cantidades “x” e “y” respectivamente, la “cantidad de ítems” será 2 y no “x+y”.

La notación que utilizaremos durante la presentación de los resultados será la siguiente:

$\mu_D$  = Media de la demanda histórica (en meses).

$\sigma_D$  = Desviación estándar de la demanda histórica (en meses).

$\mu_{LT}$  = Media del tiempo de espera (en meses).

$\sigma_{LT}$  = Desviación estándar del tiempo de espera (en meses).

$\mu_X$  = Media de la demanda durante el tiempo de espera.

$\sigma_X$  = Desviación estándar de la demanda durante el tiempo de espera.

$CV_D^2$  = Coeficiente de variación cuadrado de la demanda.

$h$  = Tasa anual del costo de tenencia.

$SL$  = Nivel de servicio.

$EOQ$  = Cantidad económica de pedido teórica.

$EOQ'$  = Cantidad económica de pedido ajustada.

$r @ [SL= "a" ][h= "b"]$  = Punto de pedido al nivel de servicio "a" y tasa de costo de tenencia "b".

$SS @ [SL="a" ][h="b"]$  = Stock de seguridad al nivel de servicio "a" y tasa de costo de tenencia "b".

$HC=$  Costo de tenencia (Holding Cost).

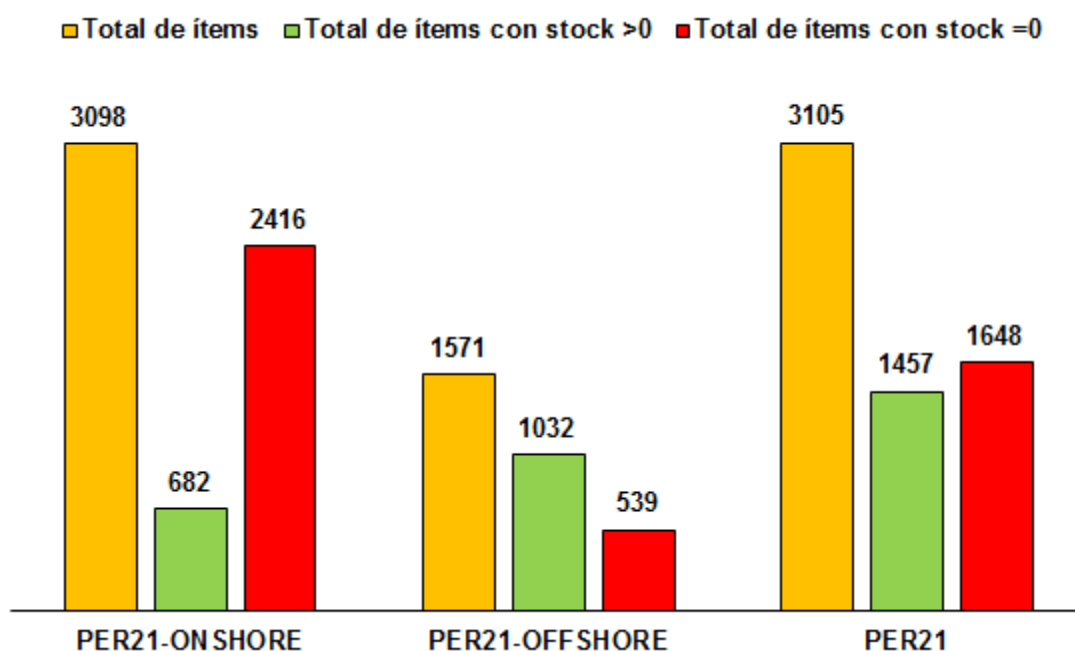
$OC=$  Costo de pedido (Ordering Cost).

$TC=$  Costo variable total (Total Cost).

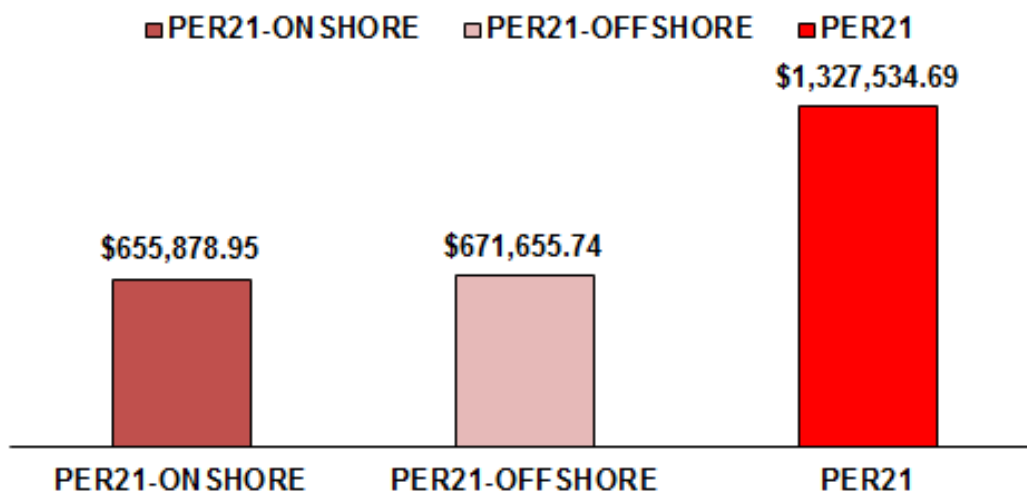
### 3.3.1 NIVEL DE INVENTARIO Y VALORIZACIÓN DE STOCK

El primer análisis realizado sirve para determinar el nivel de inventario que se tiene en los diferentes almacenes, cuantos ítems hay registrados, cuántos de ellos tienen stock y cuantos no, asimismo, el valor que dichos ítems representan en el almacén. Los resultados de estos análisis son mostrados en las figuras 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 y 3.11.

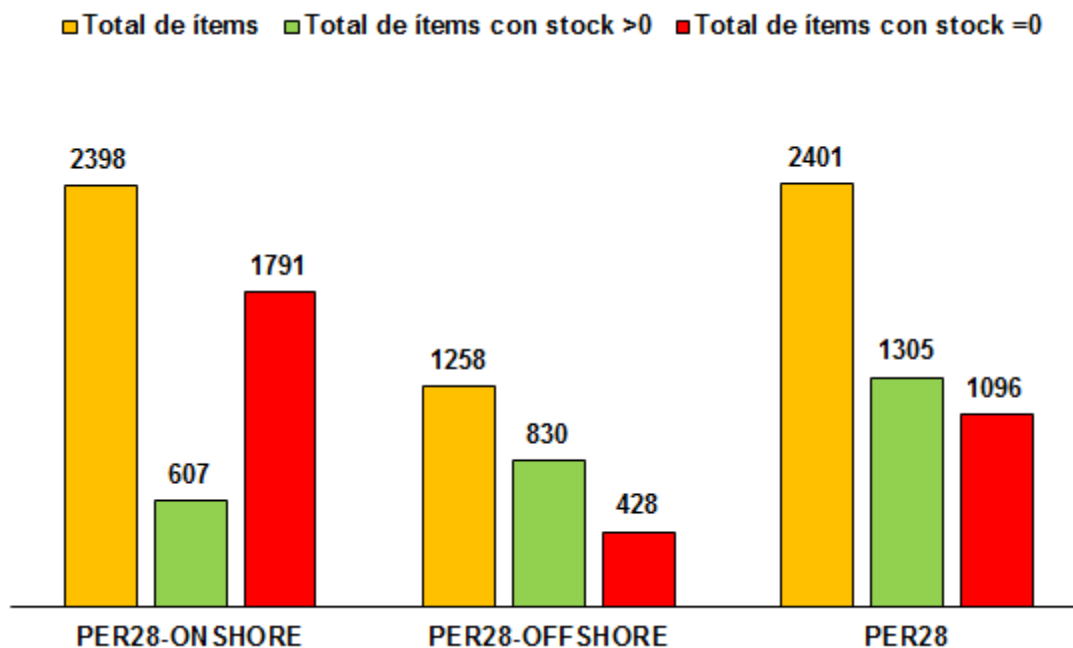
**Figura 3.4.** Cantidad de ítems del taladro PER21 agrupados por zona.



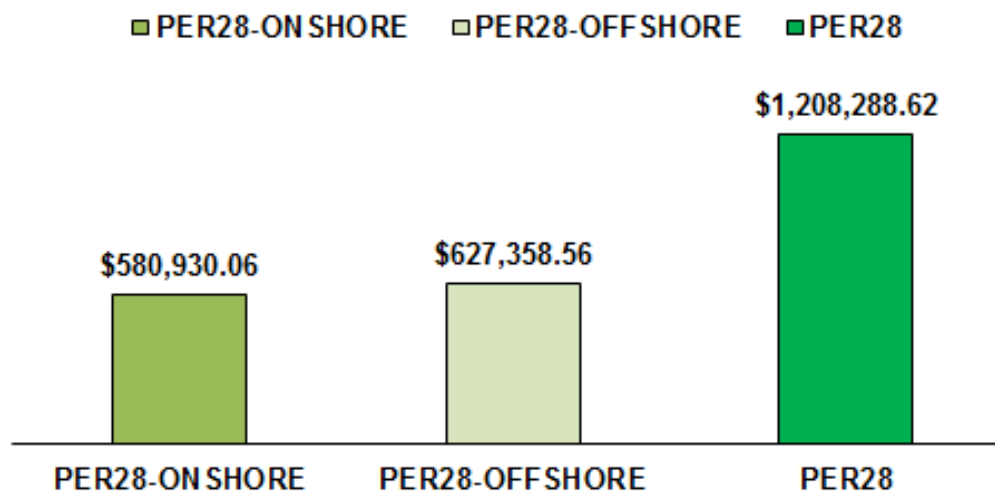
**Figura 3.5.** Valor de material en almacén del taladro PER21 agrupado por zona.



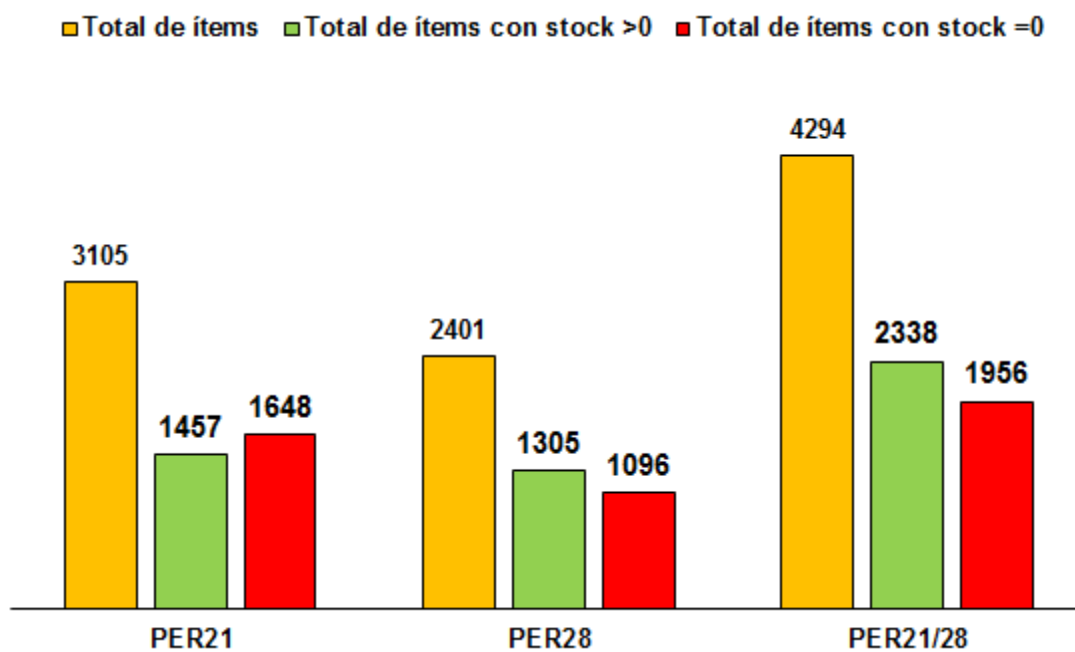
**Figura 3.6.** Cantidad de ítems del taladro PER28 agrupados por zona.



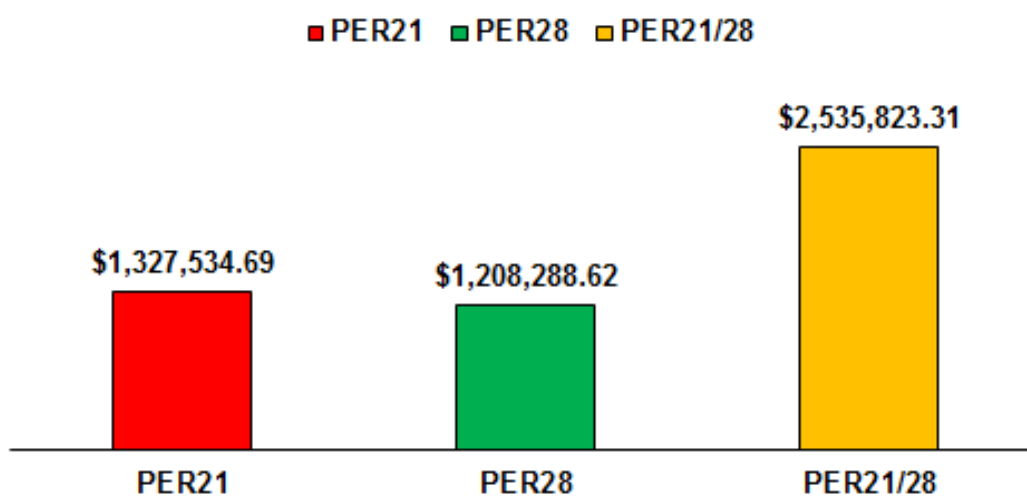
**Figura 3.7.** Valor de material en almacén del taladro PER28 agrupado por zona.



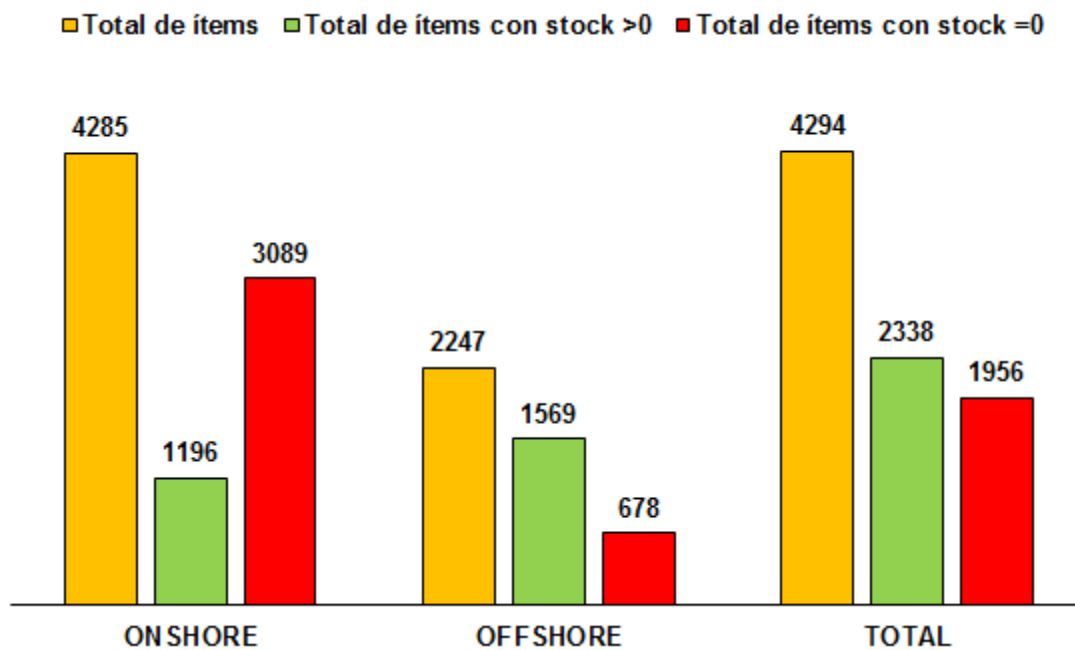
**Figura 3.8.** Cantidad de ítems agrupados por caso de análisis.



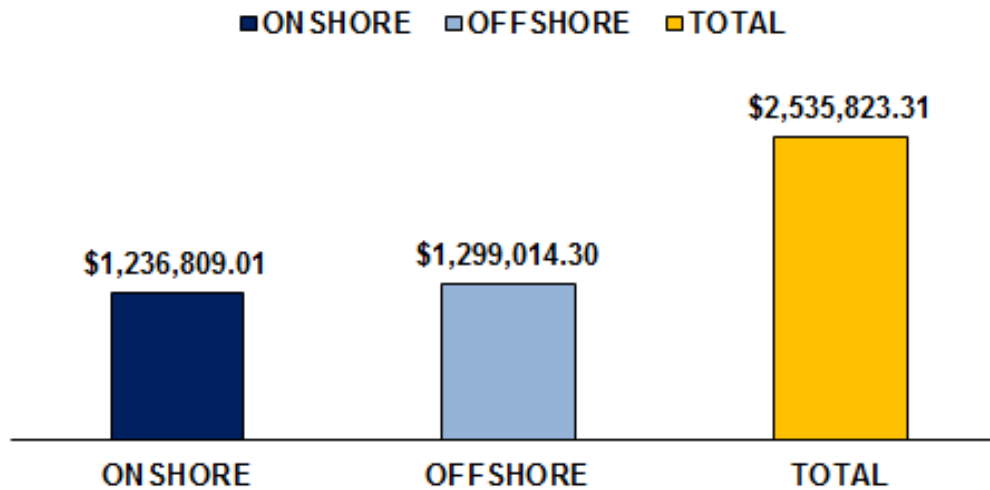
**Figura 3.9.** Valor de material en almacén agrupado por caso de análisis.



**Figura 3.10.** Cantidad de ítems agrupados por zona.



**Figura 3.11.** Valor de material en almacén agrupado por zona.



### 3.3.2 ANÁLISIS DE LOS MOVIMIENTOS

En esta parte del análisis se clasificarán los ítems de almacén en 4 grandes grupos según su consumo histórico y su nivel de stock al final del periodo, las condiciones serán las siguientes:

- **Grupo 1:** Material con consumo histórico durante el periodo de análisis y con stock mayor a 0 al final del periodo.
- **Grupo 2:** Material con consumo histórico durante el periodo de análisis y sin stock al final del periodo.
- **Grupo 3:** Material sin consumo histórico durante el periodo de análisis y con stock mayor a 0 al final del periodo.
- **Grupo 4:** Material sin consumo histórico durante el periodo de análisis y sin stock al final del periodo.

En las figuras **3.12**, **3.13**, **3.14** y **3.15** podemos observar los resultados de esta clasificación.

Para todos los análisis posteriores solo trabajaremos con los ítems que caen en los grupos 1 y 2, ya que son estos los únicos que cuentan con consumo histórico y es esa una de las principales variables que pretende analizar esta tesis.

En esta misma sección haremos un análisis del grupo 3 para obtener algunos resultados que podremos encontrar interesantes.

Figura 3.12. Cantidad de ítems en cada taladro disgregados por grupo.

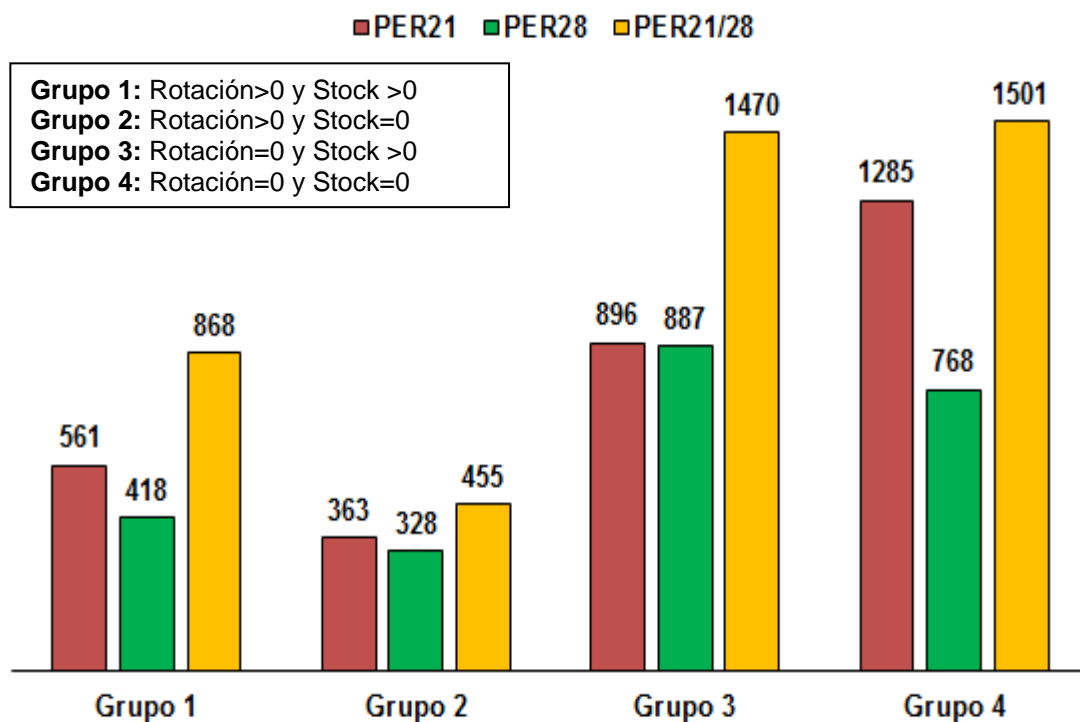


Figura 3.13. Valor de material en cada taladro disgregado por grupo.

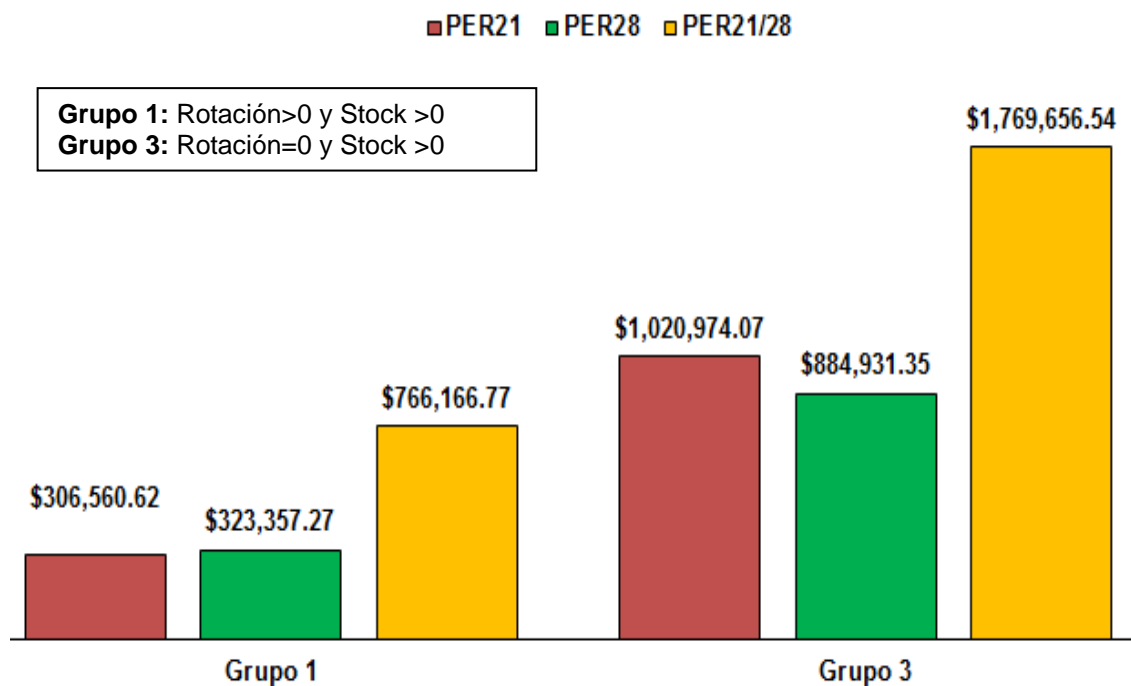




Figura 3.14. Cantidad de ítems en cada grupo disgregados por taladro.

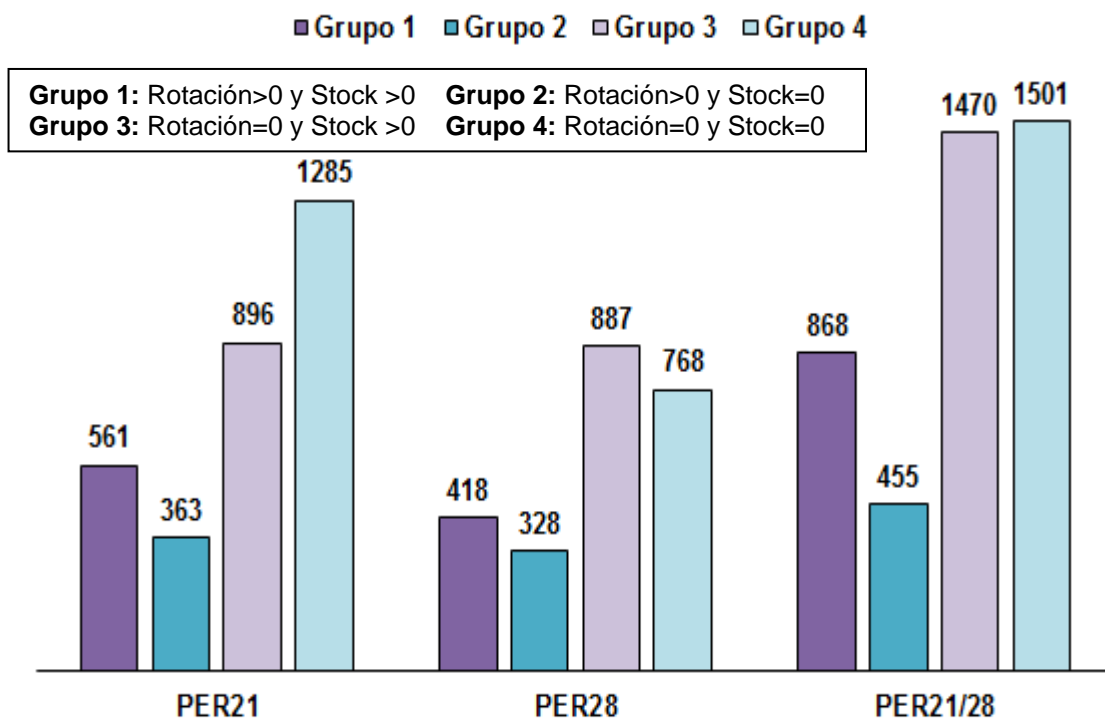
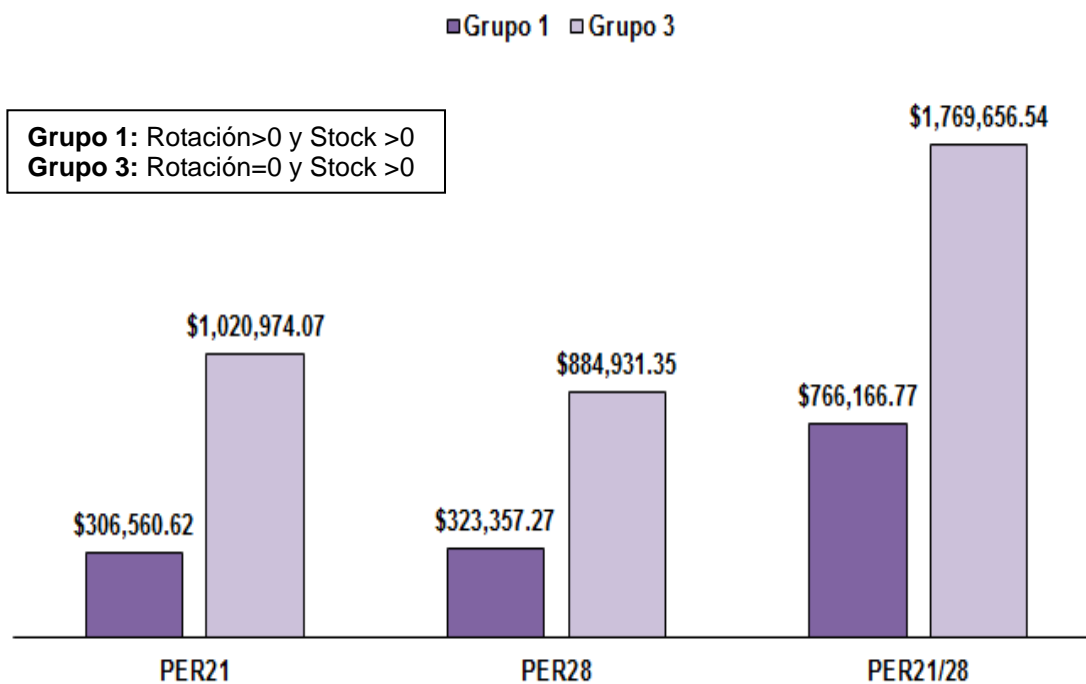


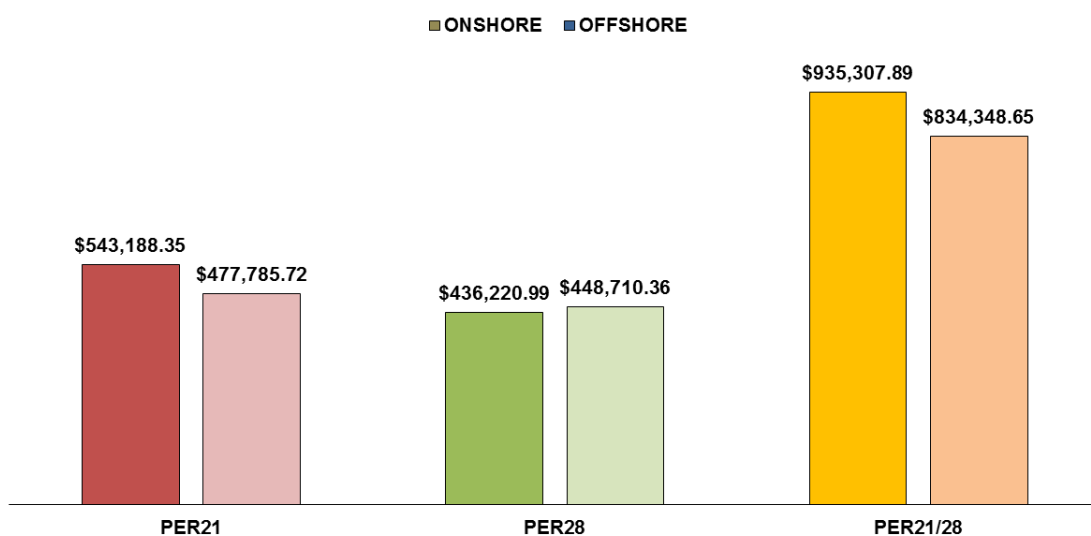
Figura 3.15. Valor de material en cada grupo disgregado por taladro.



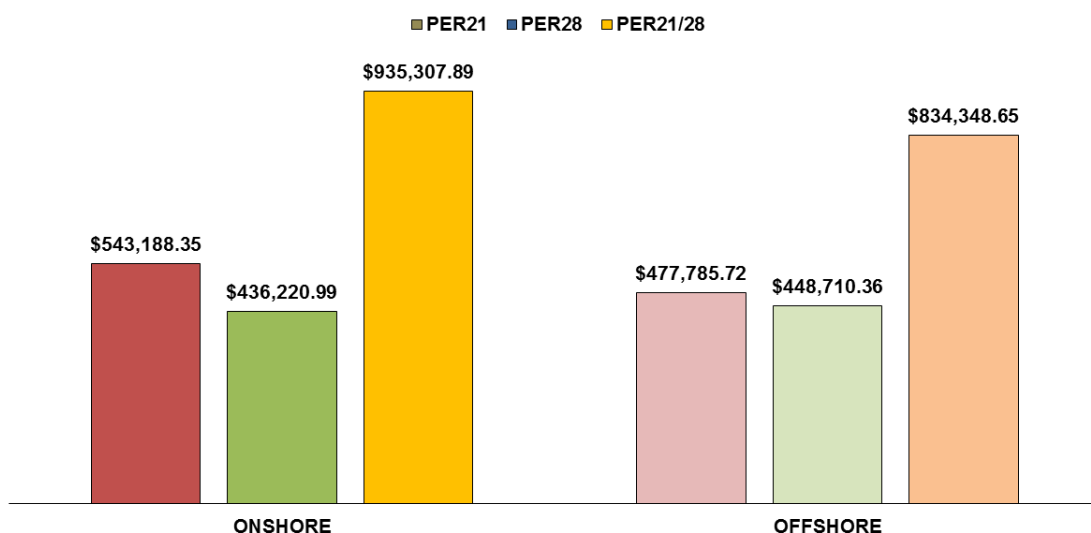
### 3.3.2.1. ANÁLISIS DE LOS ÍTEMS DEL GRUPO 3

De las figuras 3.13 y 3.15, se puede observar claramente que la mayor parte del valor del inventario se encuentra en el grupo 3, por tal motivo, se considera importante hacer un análisis más a detalle de este grupo. En las figuras 3.16 y 3.17 tenemos el valor del material agrupado tanto por taladro y por zona.

**Figura 3.16.** Valor de material sin consumo en cada zona agrupado por taladro.

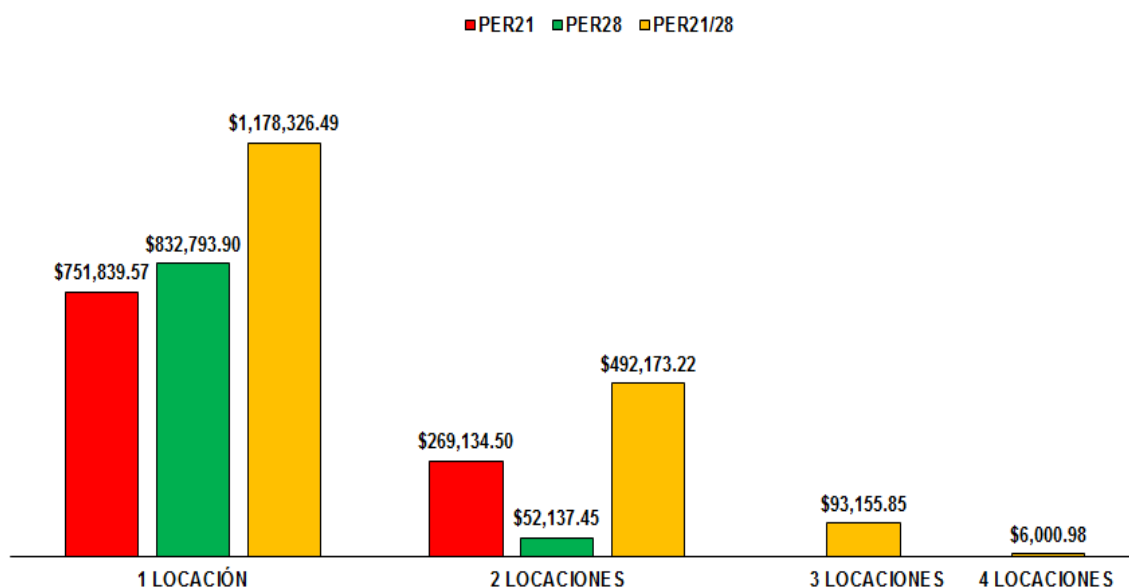


**Figura 3.17.** Valor de material sin consumo en cada taladro agrupado por zona.

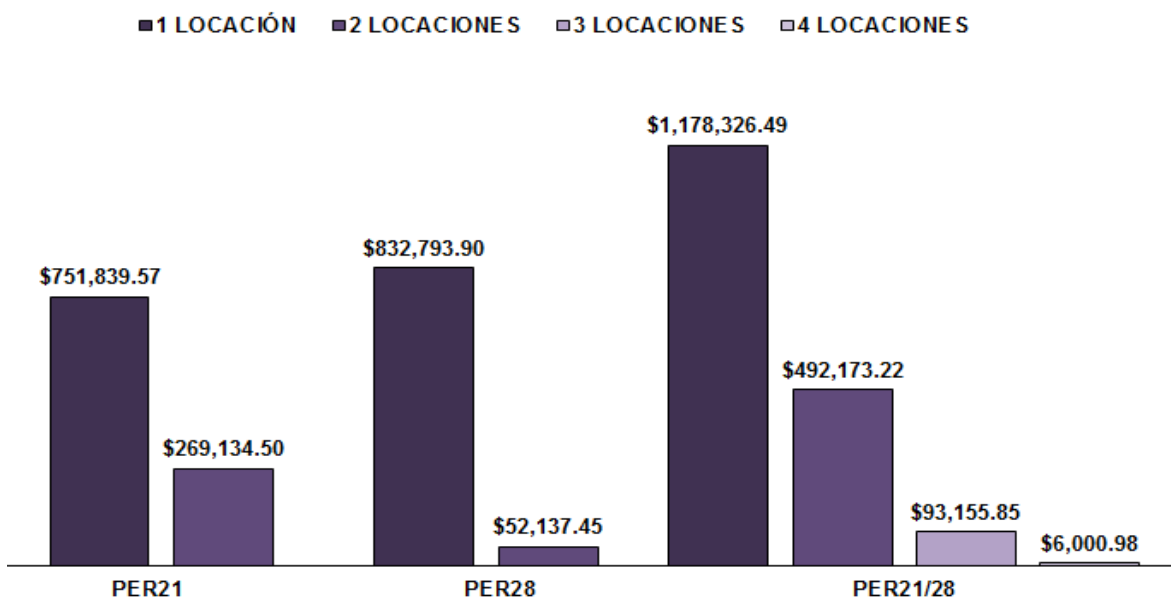


Asimismo, es interesante saber cuánto de este material que no ha tenido consumo histórico está en más de un almacén, esto lo observamos en las figuras 3.18 y 3.19

**Figura 3.18.** Valor de material sin consumo en los taladros agrupado por número de locaciones en las que se encuentra.

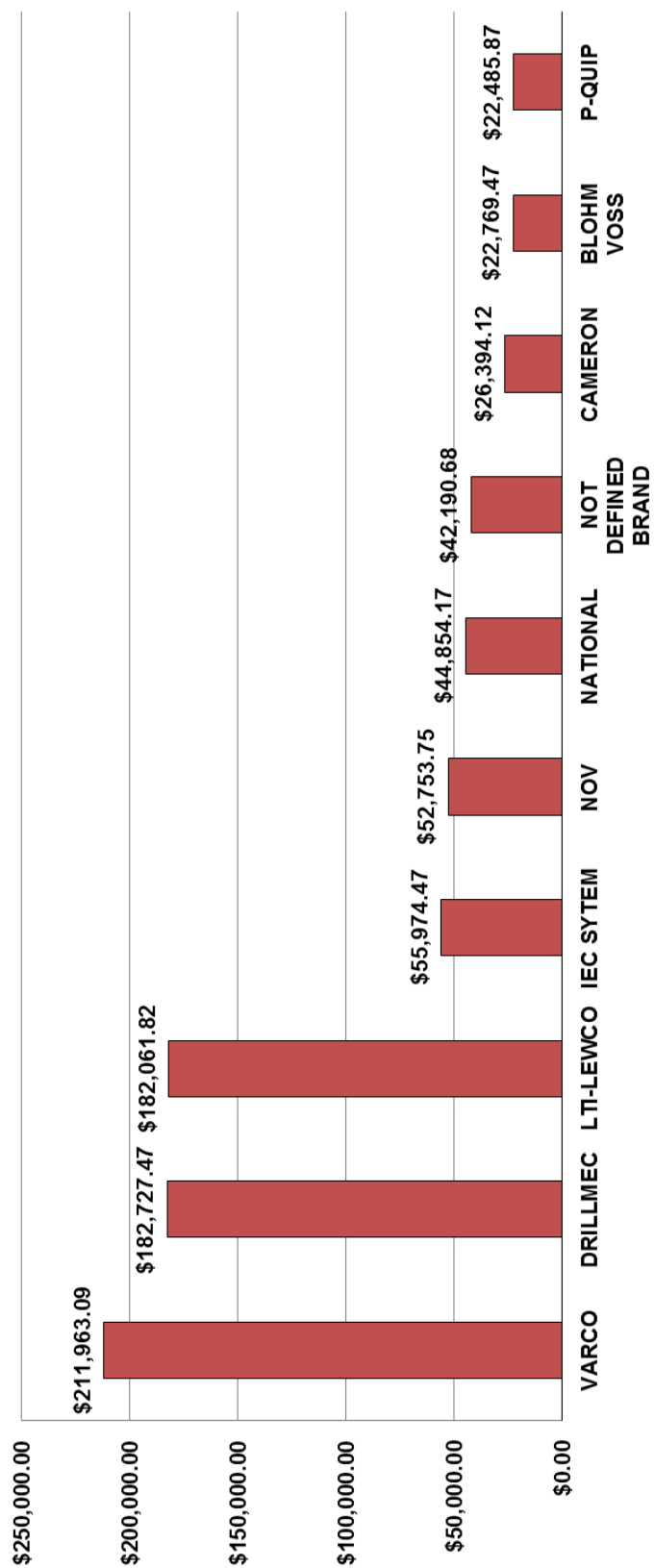


**Figura 3.19.** Valor de material sin consumo en múltiples locaciones agrupado por el taladro al cual pertenece.

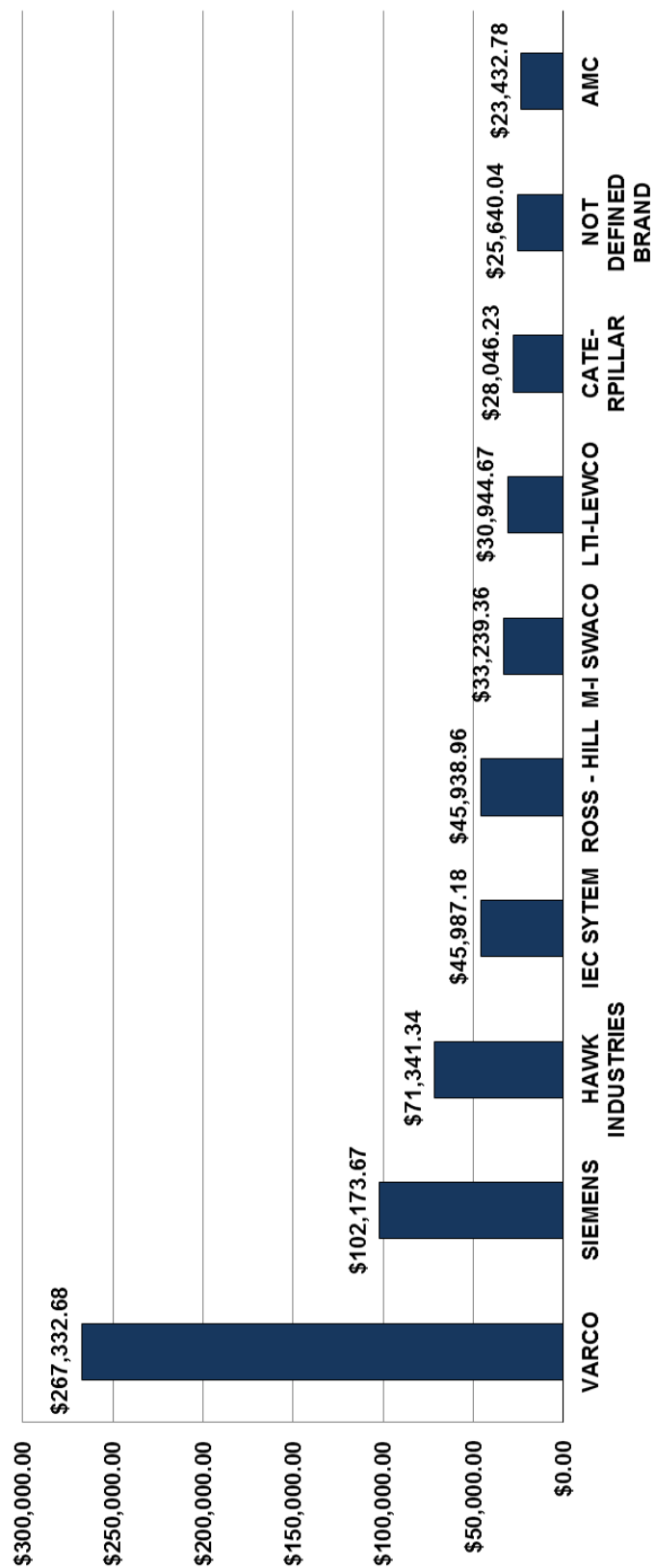


Igualmente, en las figuras 3.20, 3.21 y 3.22 observamos el valor del material sin movimiento agrupado por fabricante del material, solo se muestran los 10 principales fabricantes los cuales concentran el 82.68%, 76.17% y 74.76% del valor total del material sin movimiento, respectivamente.

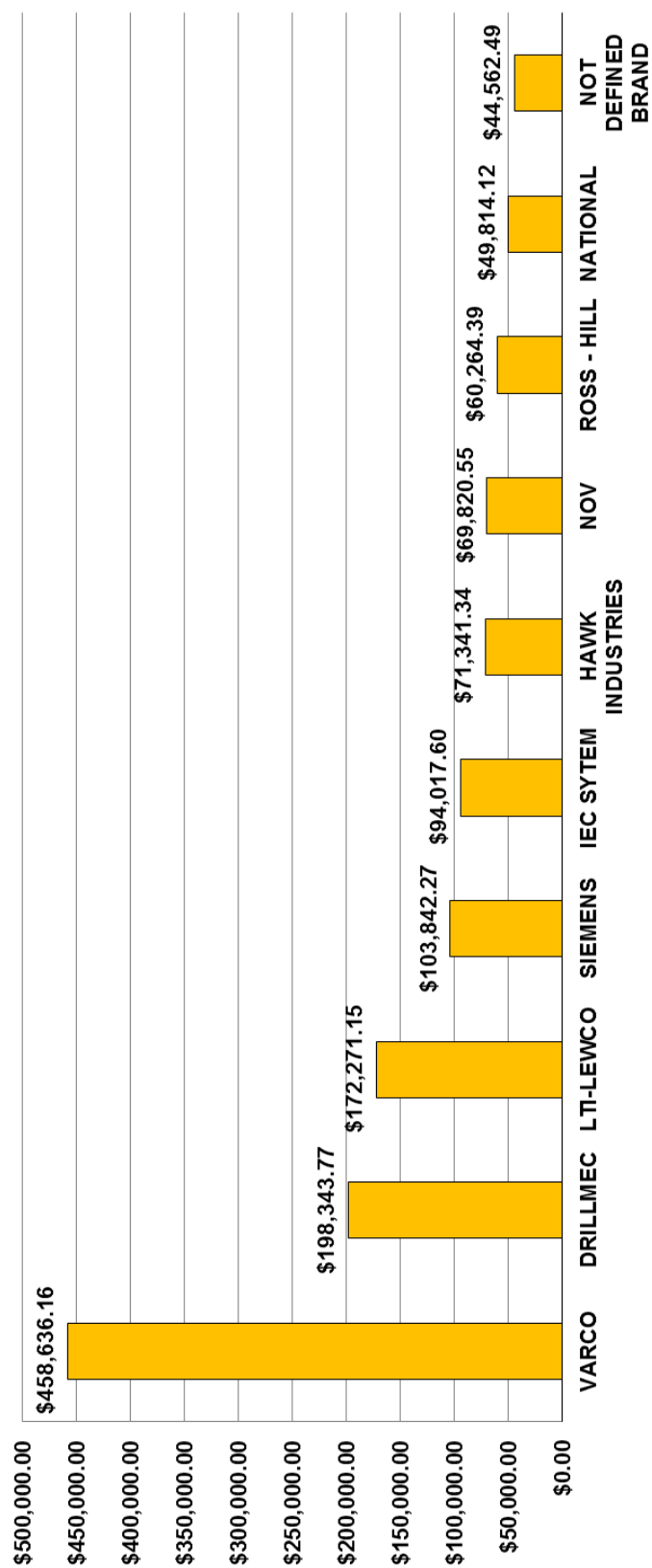
**Figura 3.20.** Valor de material sin consumo histórico en el taladro PER21 agrupado por fabricante.



**Figura 3.21.** Valor de material sin consumo histórico en el taladro PER28 agrupado por fabricante.

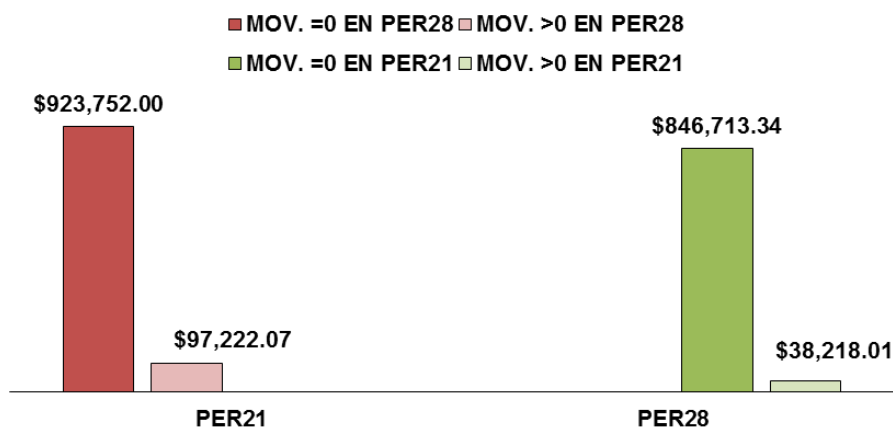


**Figura 3.22.** Valor de material sin consumo histórico en el caso PER21/28 agrupado por fabricante.



Un último análisis interesante sobre este grupo 3, es el valor del material que no ha tenido consumo histórico en un taladro pero si lo ha tenido en el otro. Esto lo podemos observar en las figuras 3.23.

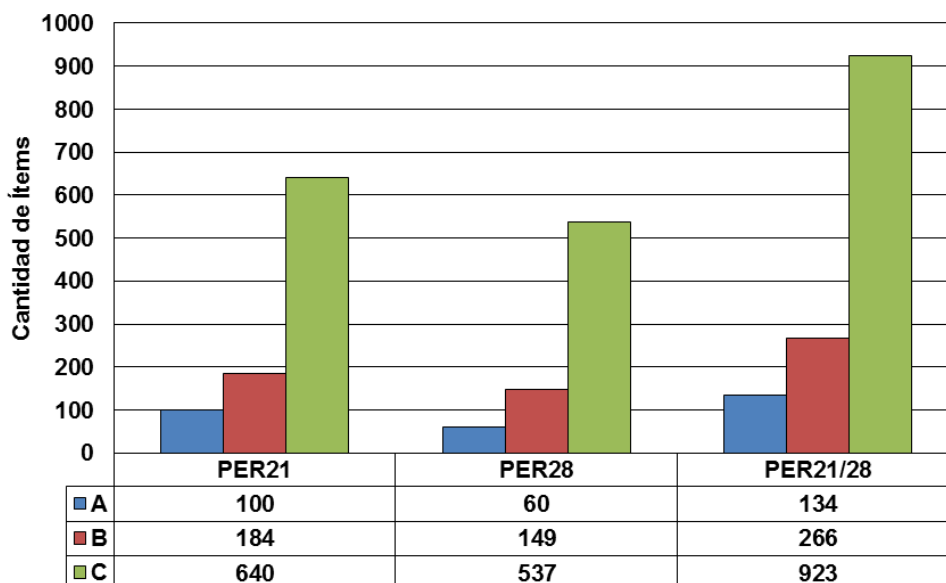
**Figura 3.23.** Valor de material sin consumo en el propio taladro pero con consumo en el otro taladro.



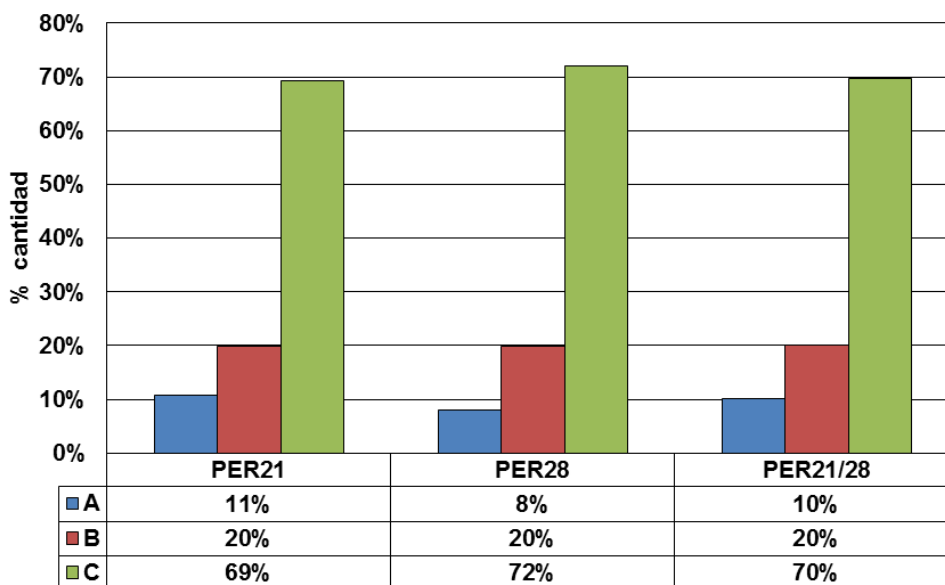
### 3.3.3 CLASIFICACION ABC

Como se mencionó en la sección anterior, de aquí en adelante solo se trabajará con los ítems de los grupos 1 y 2, ya que ellos cuentan con consumo histórico. Los resultados de la clasificación ABC se pueden ver en las figuras 3.24, 3.25, 3.26 y 3.27.

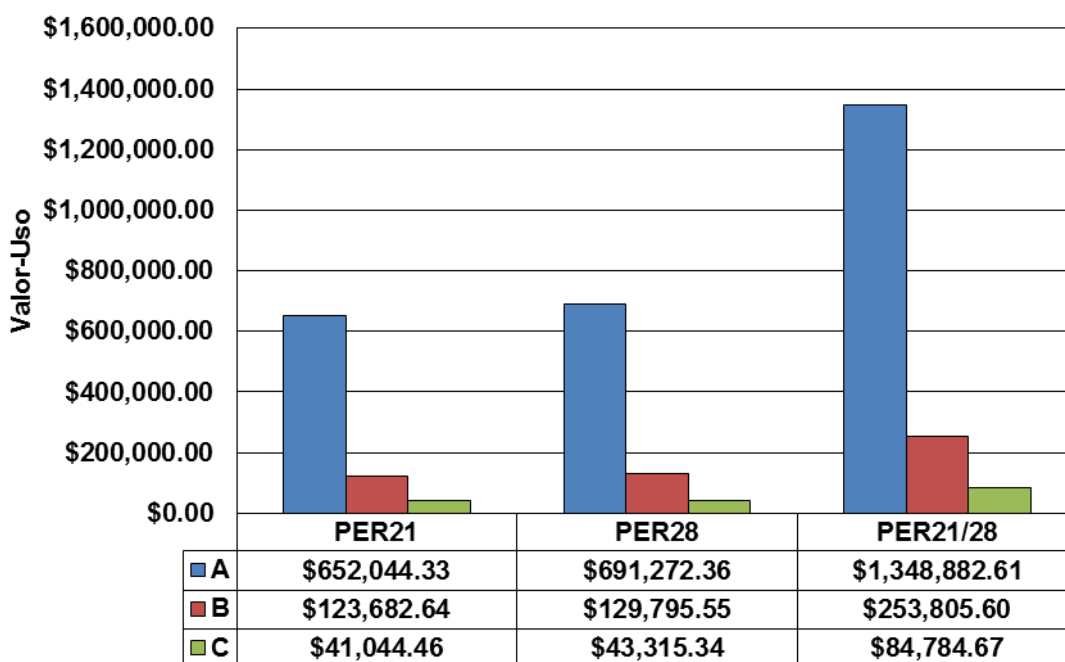
**Figura 3.24.** Cantidad de ítems en cada taladro agrupados por categoría ABC.



**Figura 3.25.** Porcentaje en cantidad de ítems en cada taladro agrupados por categoría ABC.

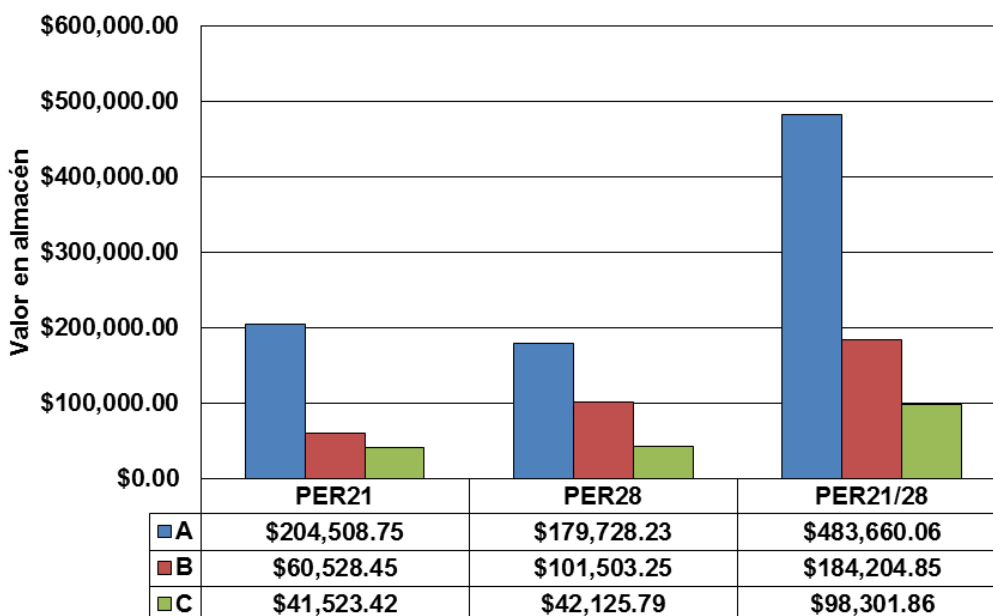


**Figura 3.26.** Valor-Usado en cada taladro agrupado por categoría ABC





**Figura 3.27.** Valor de material en los almacenes de cada taladro agrupado por categoría ABC.



En la tabla 3.7 tenemos una lista de los materiales con mayor valor-uso de cada categoría. Igualmente resulta interesante revisar cómo cambian las categorías al comparar los casos aislados del PER21 y PER28 contra el caso consolidado del PER21/28, esta comparación la podemos ver en la figura 3.28.

**Figura 3.28.** Cantidad de ítems que cambian de categoría al comparar los casos aislados contra el caso consolidado agrupado por taladro.

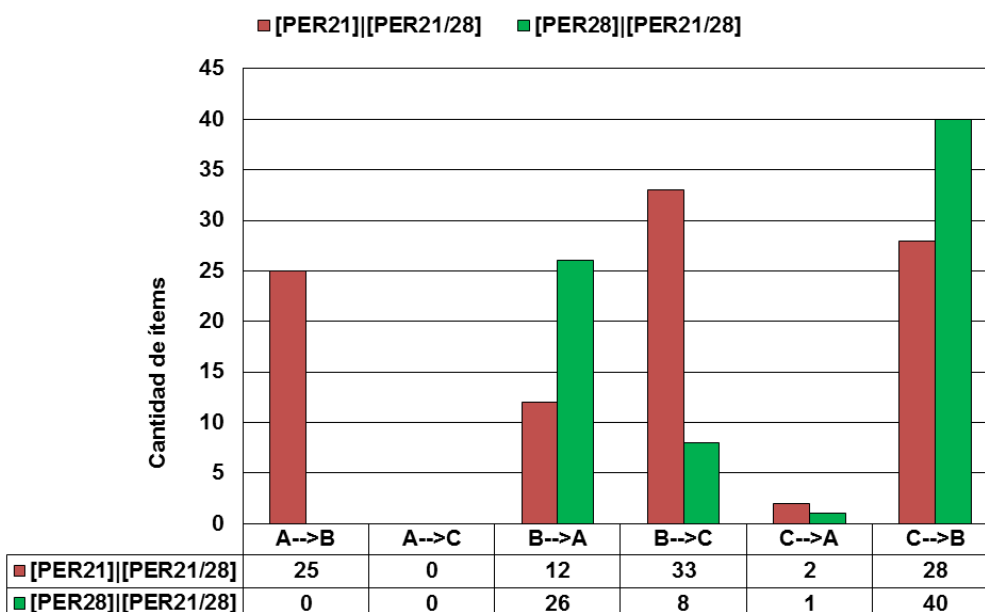


Tabla 3.7. Materiales con mayor valor uso en las distintas categorías y casos.

Caso	Código de Material	Descripción del Material	Numero de Parte	Unidad de Medida	Fabricante	Consumo Histórico	Valor-Usado	ABC
PER21	10001007533	INJECTOR GRP FUEL	20R1280	NR	CATERPILLAR	36	\$86,349.96	A
	10000010010	AEROQUIP REUSABLE FITTINGS	41132S	NR	AEROQUIP EATON	22	\$1,405.80	B
	10000749724	ENAMEL CARMINE RED RAL 3002 ENI405		GLL	NOT DEFINED BRAND	24	\$288.00	C
PER28	10000774392	SCREEN API 200 XR325	JMONXR325C	EA	M-I SWACO	120	\$58,800.00	A
	10000888891	FILTER ELEMENT AS-AIR	2262779	NR	CATERPILLAR	6	\$2,154.18	B
	33892029250	RING JOINT OVAL 4" SS 316	R39OVALS316	NR	NOT DEFINED BRAND	11	\$374.22	C
PER21/28	10001007533	INJECTOR GRP FUEL	20R1280	NR	CATERPILLAR	36	\$86,349.96	A
	10000888892	FILTER ELEMENT AS-AIR	2089066	NR	CATERPILLAR	6	\$1,995.54	B
	10000736985	WIRE ROPE SLING 3/4"X2MT		NR	NOT DEFINED BRAND	1	\$418.33	C

### 3.3.4 ANÁLISIS DE LA DEMANDA HISTÓRICA

Esta sección se puede considerar la más importante ya que a través de la evaluación del parámetro  $CV_D^2$ , definiremos que ítems pueden utilizar las formulaciones de los modelos de inventario basados en el EOQ, así como también, los cálculos posteriores del punto de pedido y stock de seguridad. Para esta parte del análisis solo tomaremos en cuenta los ítems de las categorías A y B, ya que por definición los controles sobre los ítems de la categoría C son mínimos.

Para calcular el parámetro  $CV_D^2$  nos valdremos de la fórmula **2.4**, acerca del valor límite a tomar, algunos autores lo toman en 0.2 mientras que otros lo consideran en 0.49. Para nuestro caso tomaremos 0.49 pero sin perder de vista aquellos que están por debajo de 0.2. La tabla **3.8** muestra la cantidad de ítems que caen en cada rango según el valor de  $CV_D^2$  de su respectivo patrón histórico de demanda mensual.

**Tabla 3.8.** Cantidad de ítems que caen en diferentes intervalos de  $CV_D^2$ .

Caso	Categoría	$CV_D^2 \leq 0.2$	$0.2 < CV_D^2 \leq 0.49$	$0.49 < CV_D^2 \leq 1$	$CV_D^2 > 1$
PER21	A	4	2	8	86
	B	1	4	7	172
PER28	A	2	6	3	49
	B	2	4	10	133
PER21/28	A	6	6	11	111
	B	3	13	10	240

En las figuras **3.29**, **3.30** y **3.31** podremos ver la tendencia de los  $CV_D^2$  para los materiales con  $CV_D^2 \leq 1$ .

Figura 3.29. Valores de  $CV^2_D$  para ítems con  $CV^2_D \leq 1$ , caso PER21.

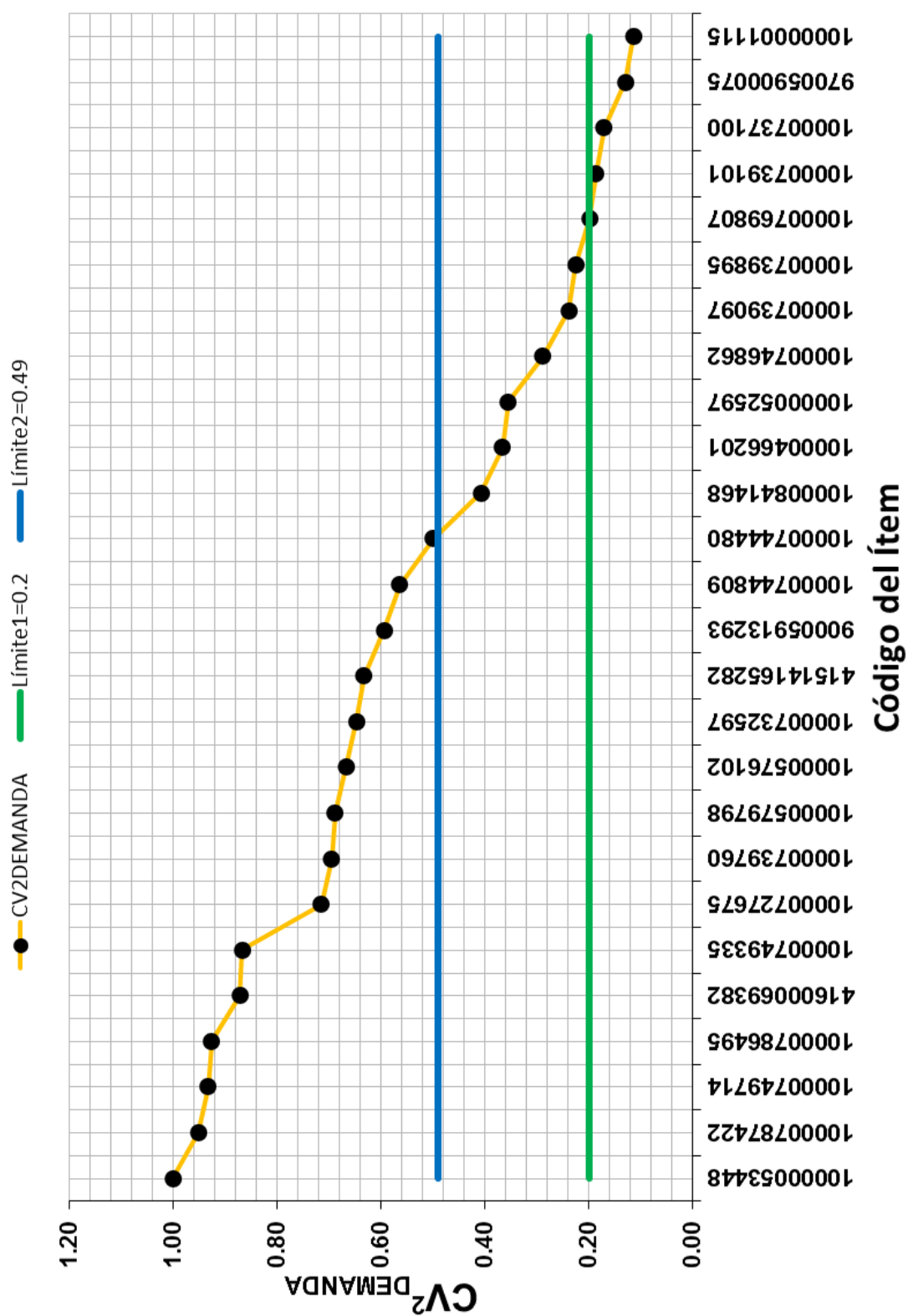


Figura 3.30. Valores de  $CV^2_D$  para ítems con  $CV^2_D \leq 1$ , caso PER28.

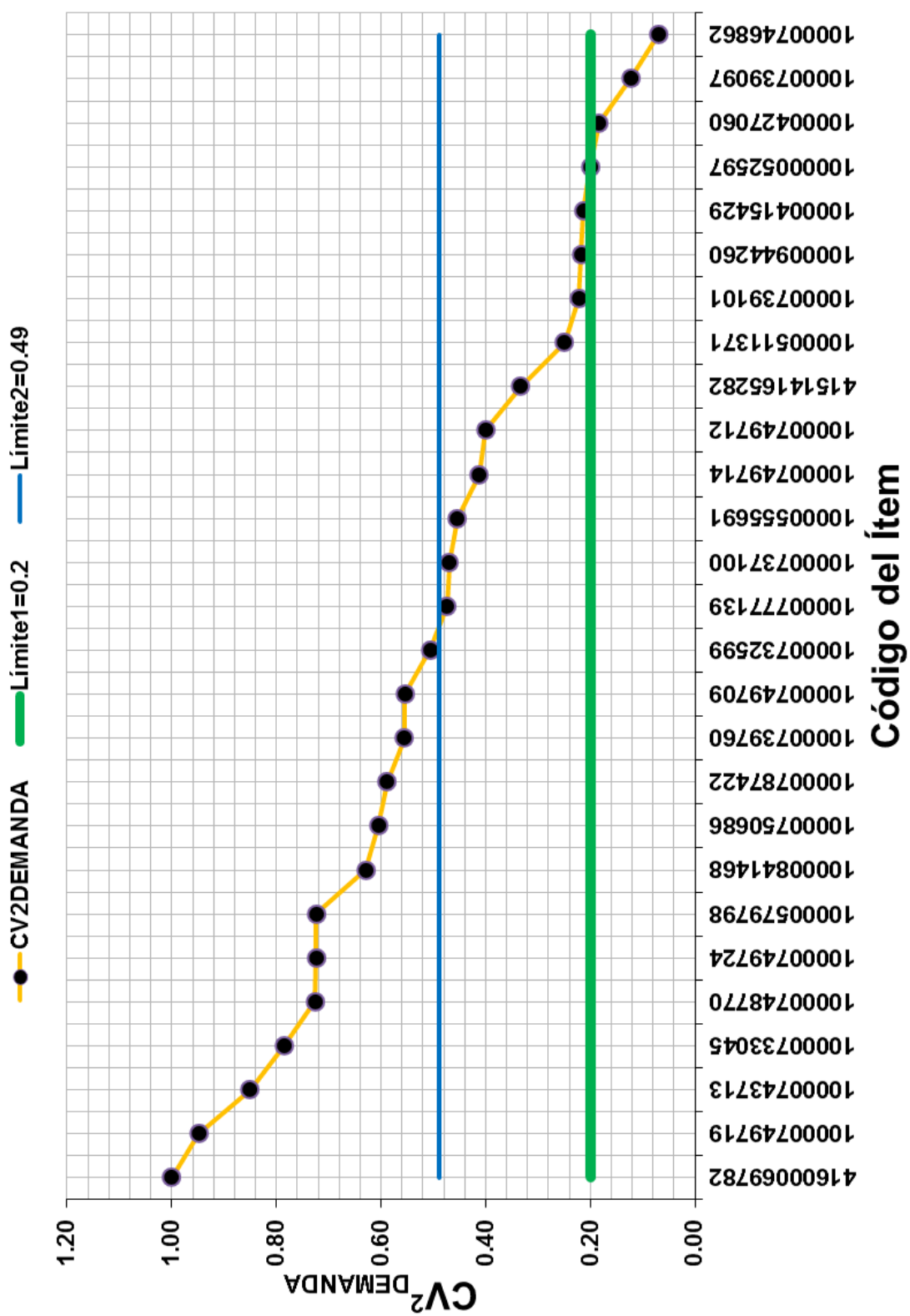
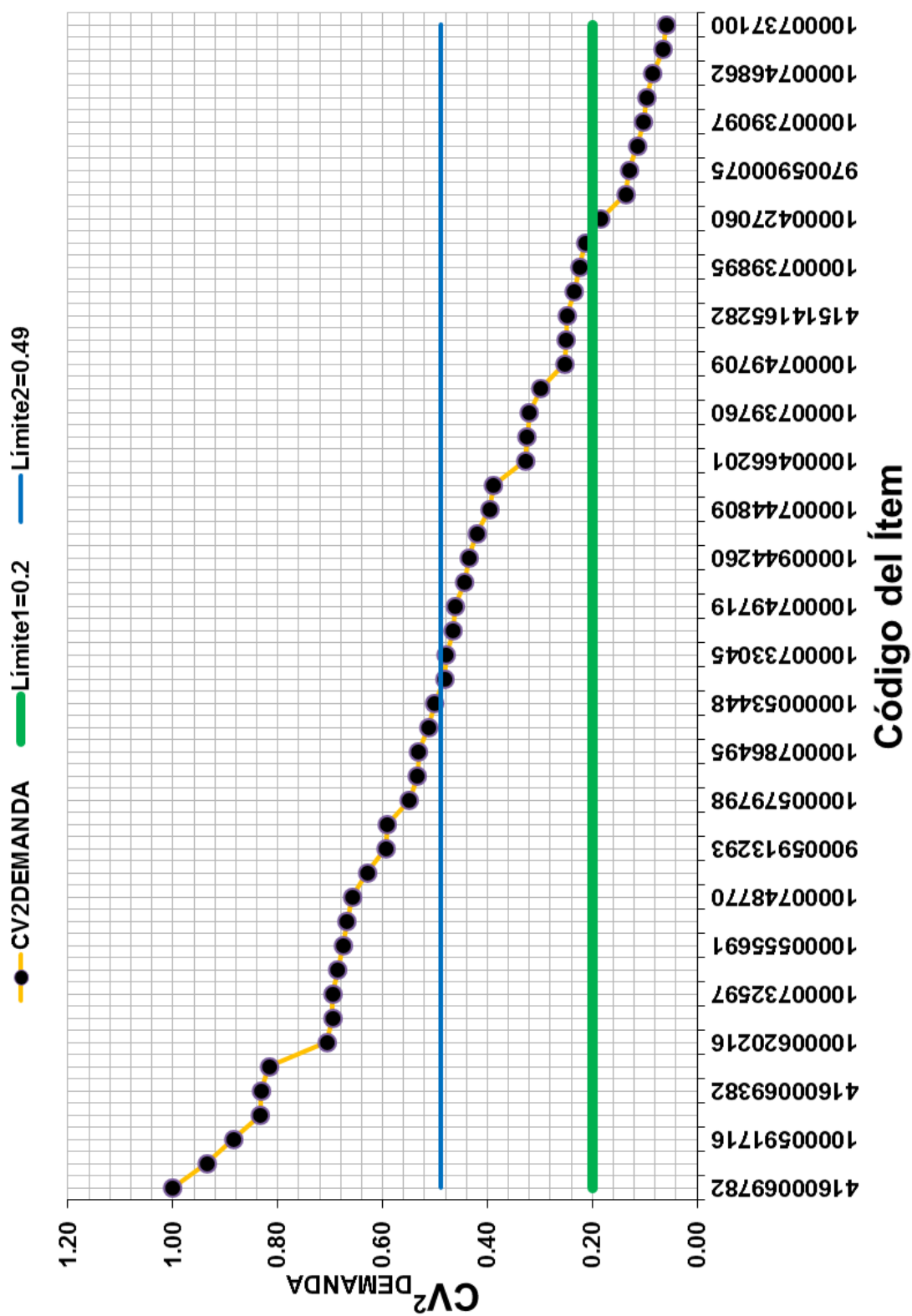
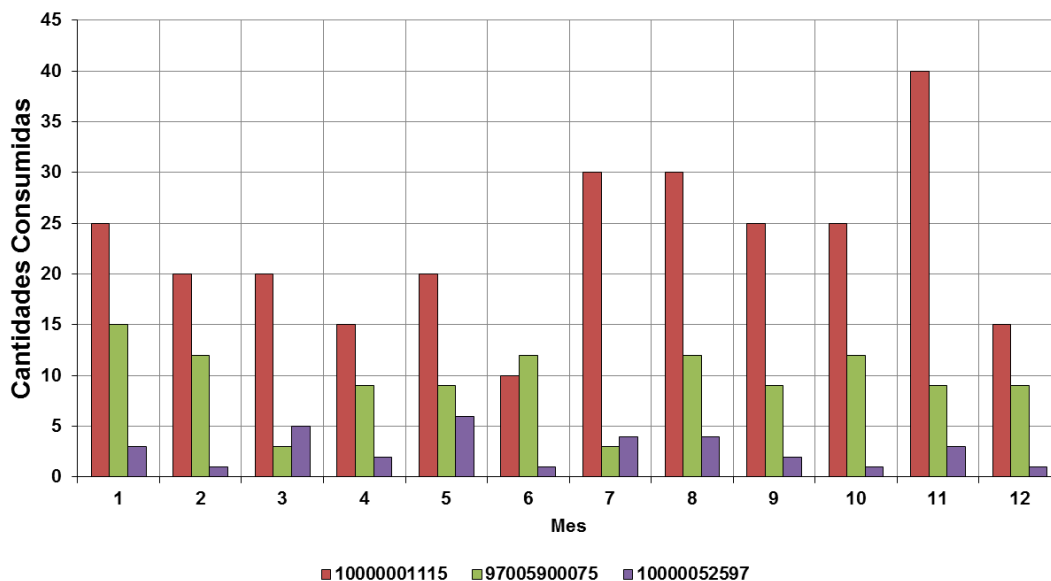


Figura 3.31. Valores de  $CV^2_D$  para ítems con  $CV^2_D \leq 1$ , caso PER21/28.

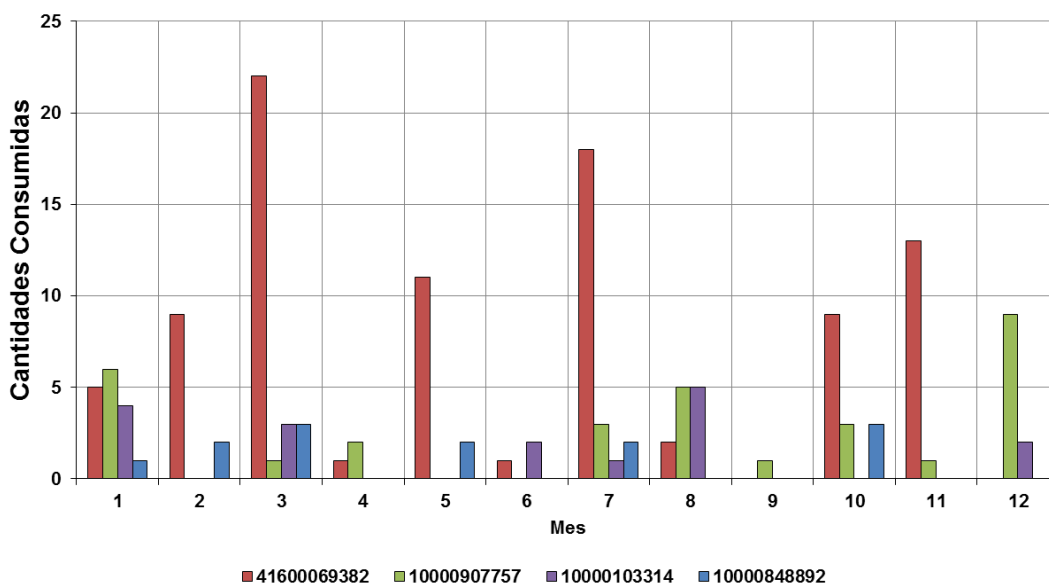


Las figuras 3.32, 3.33 y 3.34 muestran patrones de demanda de algunos ítems del PER21 de acuerdo al valor de su  $CV_D^2$ , esto permite apreciar mejor la variación de los patrones de acuerdo al valor del parámetro.

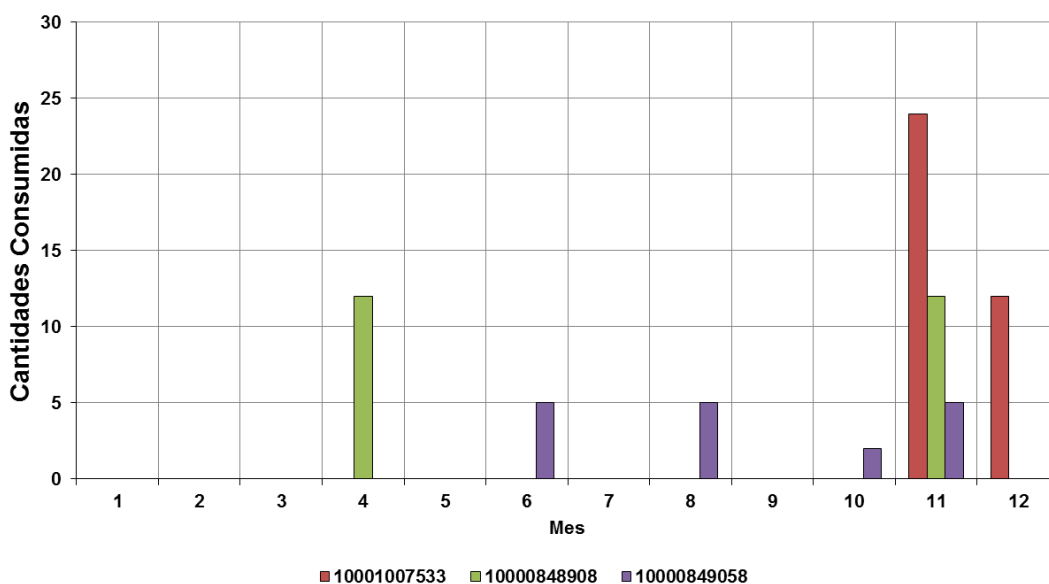
**Figura 3.32.** Patrón de demanda para algunos materiales del PER21 con  $CV_D^2 < 0.49$ .



**Figura 3.33.** Patrón de demanda para algunos materiales del PER21 con  $CV_D^2$  entre 0.8 y 1.5.



**Figura 3.34.** Patrón de demanda para algunos materiales del PER21 con  $CV_D^2$  mayores a 2.



Para los análisis posteriores solo los ítems de la categoría A con valor de  $CV_D^2 \leq 0.49$  serán considerados, ya que este tipo de análisis solo debe aplicarse a los ítems más importantes además de que cumplan con el criterio de demanda estable.

### 3.3.5 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD ECONÓMICA DE PEDIDO

Hasta este punto ya podemos decir, en base a las condiciones vistas anteriormente, que el modelo de inventario que utilizaremos es el **modelo de inventario probabilístico con demanda incierta y tiempo de espera estocástico**, en este caso se opta por una política de revisión del tipo (r, q) ya que por lo general la política de revisión (R, S) incurre en costos de tenencia más altos. Ahora procederemos a calcular el parámetro q (cantidad económica de pedido) en base a la fórmula **2.23**.

Para el cálculo del EOQ necesitaremos el valor de los parámetros h y  $C_o$ , además del precio de cada material, el valor de  $C_o$  puede estimarse en 12\$, sin embargo el valor de h no es conocido, se sabe que en general oscila alrededor del 20% dependiendo de la industria, debido a esto se realizará un análisis de sensibilidad para ver la variación del EOQ con respecto a la variación de h. También debemos recordar que los valores que proporciona el EOQ son teóricos así que debemos



redondearlos a una cantidad discreta según lo indicado en la fórmula 2.13. Los valores de precio, EOQ teóricos y EOQ ajustados los tenemos en las tablas 3.9, 3.10 y 3.11, mientras que el análisis de sensibilidad lo tenemos en la figura 3.35.

**Tabla 3.9.** EOQ y EOQ' para diferentes valores de h, caso PER21.

Código de Material	Precio	EOQ @ h=15%	EOQ @ h=20%	EOQ @ h=25%	EOQ' @ h=15%	EOQ' @ h=20%	EOQ' @ h=25%
10000001115	\$34.24	10.35	8.96	8.02	10	9	8
97005900075	\$59.42	5.06	4.38	3.92	5	4	4
10000737100	\$9.02	66.36	57.47	51.4	66	57	51
10000739101	\$2.98	105.64	91.48	81.82	106	91	82
10000052597	\$148.20	1.72	1.49	1.33	2	2	1
10000841468	\$81.87	1.71	1.48	1.33	2	2	1

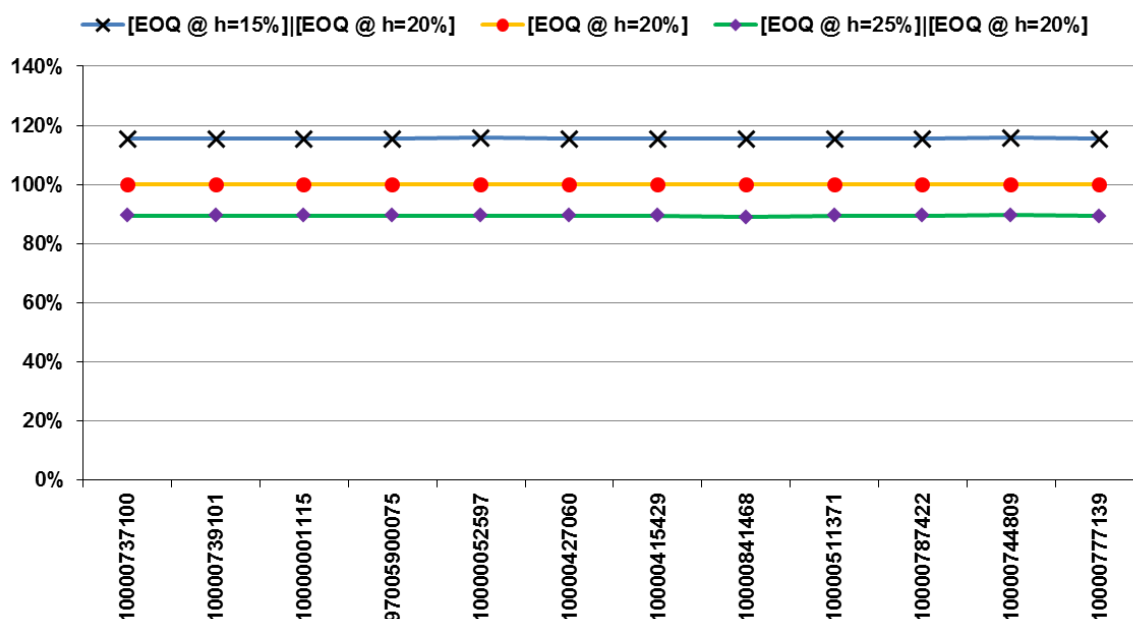
**Tabla 3.10.** EOQ y EOQ' para diferentes valores de h, caso PER28.

Código de Material	Precio	EOQ @ h=15%	EOQ @ h=20%	EOQ @ h=25%	EOQ' @ h=15%	EOQ' @ h=20%	EOQ' @ h=25%
10000427060	\$80.23	3.51	3.04	2.72	4	3	3
10000052597	\$149.29	1.34	1.16	1.04	1	1	1
10000415429	\$49.71	6.26	5.42	4.85	6	5	5
10000739101	\$3.00	100.62	87.14	77.94	101	87	78
10000511371	\$62.36	4.48	3.88	3.47	5	4	4
10000555691	\$7.48	42.22	36.56	32.7	42	37	33
10000737100	\$8.81	62.26	53.92	48.22	62	54	48
10000777139	\$60.73	4.06	3.51	3.14	4	4	3

**Tabla 3.11.** EOQ y EOQ' para diferentes valores de h, caso PER21/28.

<b>Código de Material</b>	<b>Precio</b>	<b>EOQ @ h=15%</b>	<b>EOQ @ h=20%</b>	<b>EOQ @ h=25%</b>	<b>EOQ' @ h=15%</b>	<b>EOQ' @ h=20%</b>	<b>EOQ' @ h=25%</b>
10000737100	\$9.00	90.59	78.46	70.17	91	78	70
10000739101	\$3.00	145.63	126.12	112.81	146	126	113
10000001115	\$34.24	10.35	8.96	8.02	10	9	8
97005900075	\$59.42	5.06	4.38	3.92	5	4	4
10000052597	\$149.00	2.2	1.9	1.7	2	2	2
10000427060	\$80.23	3.51	3.04	2.72	4	3	3
10000415429	\$49.71	6.26	5.42	4.85	6	5	5
10000841468	\$81.87	2.1	1.82	1.62	2	2	2
10000511371	\$62.36	4.48	3.88	3.47	5	4	4
10000787422	\$8.00	35.31	30.58	27.35	35	31	27
10000744809	\$219.00	1.9	1.64	1.47	2	2	2
10000777139	\$60.73	4.11	3.56	3.18	4	4	3

**Figura 3.35.** Análisis de sensibilidad del EOQ para varios valores de h, caso PER21/28.



Por último, en la tabla 3.12 tenemos una comparación entre las cantidades económicas de pedido ajustadas de los 3 códigos que se repiten en los 3 casos de análisis, esto con el objetivo de observar como varían las cantidades económicas de pedido al considerar el caso consolidado contra la suma de los casos aislados.

**Tabla 3.12.** EOQ' para los casos aislados comparado contra el caso consolidado.

Código de Material	EOQ' PER21/28	EOQ' PER21	EOQ' PER28	EOQ' PER21+PER28
10000737100	91	66	62	128
10000739101	146	106	101	207
10000052597	2	2	1	3

### 3.3.6 ANALISIS DEL TIEMPO DE ESPERA

Para el cálculo del parámetro  $r$  necesitaremos la estimación de la media y la varianza del tiempo de espera, estos valores son mostrados en las tablas 3.13, 3.14 y 3.15 para los diferentes casos analizados.

**Tabla 3.13.** Media y varianza del tiempo de espera para ítems de categoría A con  $CV^2_D \leq 0.49$ , caso PER21.

Código de Material	Descripción del Material	$\mu_{LT}$	$\sigma_{LT}$	$N^{33}$
10000001115	FUEL OIL FILTER	1.25	0.38	4
97005900075	OIL FILTER	1.55	0.43	5
10000737100	OIL MULTIGRADO SAE 15W/40 API CF-4	1.51	0.51	6
10000739101	LEATHER GLOVES SIZE 9 REINFORCED IN	4.09	1.09	5
10000052597	PAILS DP DOPE	2.41	1.48	5
10000841468	18KG/CAN GADUS S2 V220 2 BAL ALVANIA EP2	1.47	0.52	6

**Tabla 3.14.** Media y varianza del tiempo de espera para ítems de categoría A con  $CV^2_D \leq 0.49$ , caso PER28.

Código de Material	Descripción del Material	$\mu_{LT}$	$\sigma_{LT}$	$N$
10000427060	FILTER A	2.22	0.60	3
10000052597	PAILS DP DOPE	3.47	1.73	2
10000415429	OIL FILTER	2.58	0.81	4
10000739101	LEATHER GLOVES SIZE 9 REINFORCED IN	2.69	0.29	6
10000511371	DIE	4.51	0.72	3
10000555691	PPE NYLON 5 FINGER DEXTERITY GLOVES SZ.9	2.93	0.66	4
10000737100	OIL MULTIGRADO SAE 15W/40 API CF-4	3.03	0.17	4
10000777139	FUEL WATER SEPARATOR	2.43	0.63	2

<sup>33</sup> N es el número de datos tomados para estimar los parámetros.

**Tabla 3.15.** Media y varianza del tiempo de espera para ítems de categoría A con  $CV^2_D \leq 0.49$ , caso PER21/28.

Código de Material	Descripción del Material	$\mu_{LT}$	$\sigma_{LT}$	N
10000737100	OIL MULTIGRADO SAE 15W/40 API CF-4	2.12	0.85	10
10000739101	LEATHER GLOVES SIZE 9 REINFORCED IN	3.33	1.03	11
10000001115	FUEL OIL FILTER	1.25	0.38	4
97005900075	OIL FILTER	1.55	0.43	5
10000052597	PAILS DP DOPE	2.71	1.63	7
10000427060	FILTER A	2.22	0.60	3
10000415429	OIL FILTER	2.58	0.81	4
10000841468	18KG/CAN GADUS S2 V220 2 BAL ALVANIA EP2	1.74	0.70	10
10000511371	DIE	4.51	0.72	3
10000787422	LUBRICANT OIL TELLUS 46	1.73	0.81	7
10000744809	SCR 1200A, 2000V	2.27	0.00	1
10000777139	FUEL WATER SEPARATOR	2.01	0.79	3

### 3.3.7 DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE PEDIDO Y STOCK DE SEGURIDAD

Una vez obtenidos los parámetros estadísticos de la demanda y el tiempo de entrega, además de las cantidades económicas de pedidos, ya es posible calcular los puntos de pedido y los stocks mínimos en base a las formulas **2.1**, **2.2**, **2.18** y **2.31**. Los parámetros estadísticos para estos cálculos los vemos en las tablas **3.16**, **3.17** y **3.18**.

Al igual que en el caso de la cantidad económica de pedido, en esta parte realizaremos un análisis de sensibilidad para ver la variación del punto de pedido y del stock de seguridad respecto a la variación de  $h$ , las figuras **3.36** y **3.37** muestran estas variaciones.

**Tabla 3.16.** Parámetros estadísticos de los ítems de la categoría A y  $CV_D^2 \leq 0.49$ , caso PER21

Código de Material	Descripción del Material	Numero de Parte	UM	Fabricante	Precio	$\mu_b$	$\sigma_b$	$\mu_{LT}$	$\sigma_{LT}$	$\mu_x$	$\sigma_x$
1000001115	FUEL OIL FILTER	1R0756	NR	CATERPILLAR	\$34.24	22.92	7.76	1.25	0.38	28.65	12.31
97005900075	OIL FILTER	1R0726	NR	CATERPILLAR	\$59.42	9.50	3.43	1.55	0.43	14.69	5.93
10000737100	OIL MULTIGRADO SAE 15W/40 API CF-4		GLL	SHELL	\$9.02	248.25	102.72	1.51	0.51	375.13	178.20
10000739101	LEATHER GLOVES SIZE 9 REINFORCED IN		NR	NOT DEFINED BRAND	\$2.98	207.83	89.82	4.09	1.09	849.35	290.34
10000052597	PAILS DP DOPE	ZN50	NR	BJ BYRON JACKSON	\$148.20	2.75	1.64	2.41	1.48	6.62	4.79
10000841468	18KG/CAN GADUS S2 V220 2 BAL ALVANIA EP2	537385	KAN	SHELL	\$81.87	1.50	0.96	1.47	0.52	2.20	1.40

**Tabla 3.17.** Parámetros estadísticos de los ítems de la categoría A y  $CV_D^2 \leq 0.49$ , caso PER28

Código de Material	Descripción del Material	Numero de Parte	UM	Fabricante	Precio	$\mu_D$	$\sigma_D$	$\mu_{LT}$	$\sigma_{LT}$	$\mu_x$	$\sigma_x$
10000427060	FILTER A	1R0715	NR	CATERPILLAR	\$80.23	6.17	2.64	2.22	0.60	13.70	5.39
10000052597	PAILS DP DOPE	ZN50	NR	BJ BYRON JACKSON	\$149.29	1.67	0.75	3.47	1.73	5.78	3.20
10000415429	OIL FILTER	1R1808	NR	CATERPILLAR	\$49.71	12.17	5.62	2.58	0.81	31.43	13.39
10000739101	LEATHER GLOVES SIZE 9 REINFORCED IN		NR	NOT DEFINED BRAND	\$3	189.83	89.41	2.69	0.29	511.50	156.72
10000511371	DIE	20194	NR	HAWK INDUSTRIES	\$62.36	7.83	3.91	4.51	0.72	35.34	10.03
10000555691	PPE NYLON 5 FINGER DEXTERITY GLOVES SZ.9		NR	NOT DEFINED BRAND	\$7.48	83.33	56.19	2.93	0.66	244.44	110.83
10000737100	OIL MULTIGRADO SAE 15W/40 API CF-4		GLL	SHELL	\$8.81	213.42	146.31	3.03	0.17	647.36	257.53
10000777139	FUEL WATER SEPARATOR	3261641	NR	CATERPILLAR	\$60.73	6.25	4.30	2.43	0.63	15.21	7.79

**Tabla 3.18.** Parámetros estadísticos de los ítems de la categoría A y  $CV_D^2 \leq 0.49$ , caso PER21/28

Código de Material	Descripción del Material	Numero de Parte	UM	Fabricante	Precio	$\mu_D$	$\sigma_D$	$\mu_{LT}$	$\sigma_{LT}$	$\mu_x$	$\sigma_x$
10000737100	OIL MULTIGRADO SAE 15W/40 API CF-4		GLL	SHELL	\$9.00	461.67	112.81	2.12	0.85	978.73	425.35
10000739101	LEATHER GLOVES SIZE 9 REINFORCED IN		NR	NOT DEFINED BRAND	\$3.00	397.67	101.32	3.33	1.03	1323.15	450.34
1000001115	FUEL OIL FILTER	1R0756	NR	CATERPILLAR	\$34.24	22.92	7.76	1.25	0.38	28.65	12.31
97005900075	OIL FILTER	1R0726	NR	CATERPILLAR	\$59.42	9.50	3.43	1.55	0.43	14.69	5.93
10000052597	PAILS DP DOPE	ZN50	NR	BJ BYRON JACKSON	\$149.00	4.50	1.66	2.71	1.63	12.19	7.81
10000427060	FILTER A	1R0715	NR	CATERPILLAR	\$80.23	6.17	2.64	2.22	0.60	13.70	5.39
10000415429	OIL FILTER	1R1808	NR	CATERPILLAR	\$49.71	12.17	5.62	2.58	0.81	31.43	13.39
10000841468	18KG/CAN GADUS S2 V220 2 BAL ALVANIA EP2	537385	KAN	SHELL	\$81.87	2.25	1.09	1.74	0.70	3.92	2.13
10000511371	DIE	20194	NR	HAWK INDUSTRIES	\$62.36	7.83	3.91	4.51	0.72	35.34	10.03
10000787422	LUBRICANT OIL TELLUS 46	TELLUS46	GLL	SHELL	\$8.00	62.33	35.53	1.73	0.81	108.04	69.03
10000744809	SCR 1200A, 2000V	N490CH2 0	NR	IEC SYTEM	\$219.00	4.92	3.09	2.27	0.00	11.14	4.66
1000077139	FUEL WATER SEPARATOR	3261641	NR	CATERPILLAR	\$60.73	6.42	4.27	2.01	0.79	12.90	7.90



**Tabla 3.19.** Punto de pedido para diferentes niveles de servicio y un  $h=25\%$ , caso PER21.

Código de Material	EOQ'	r @	r @	r @
		[SL=95% ][h=25%]	[SL=90%][h=25%]	[SL=85%][h=25%]
10000011115	8	46.6	42.5	39.9
97005900075	4	23.2	21.3	20.0
10000737100	51	695.7	644.3	611.7
10000739101	82	1373.2	1289.5	1236.6
10000052597	1	15.8	14.5	13.7
10000841468	1	4.2	3.7	3.4

**Tabla 3.20.** Punto de pedido para diferentes niveles de servicio y un  $h=25\%$ , caso PER28.

Código de Material	EOQ'	r @	r @	r @
		[SL=95% ][h=25%]	[SL=90%][h=25%]	[SL=85%][h=25%]
10000427060	3	21.9	20.2	19.1
10000052597	1	11.4	10.5	9.9
10000415429	5	54.1	50.1	47.5
10000739101	78	757.7	708.6	677.2
10000511371	4	52.0	49.0	47.1
10000555691	33	442.1	409.9	389.5
10000737100	48	1153.4	1083.2	1039.0
10000777139	3	28.3	25.9	24.5

**Tabla 3.21.** Punto de pedido para diferentes niveles de servicio y un  $h=25\%$ , caso PER21/28.

Código de Material	EOQ'	r @ [SL=95% ][h=25%]	r @ [SL=90%][h=25%]	r @ [SL=85%][h=25%]
10000737100	70	1834.4	1720.1	1648.4
10000739101	113	2156.7	2029.0	1948.3
10000001115	8	46.6	42.5	39.9
97005900075	4	23.2	21.3	20.0
10000052597	2	26.6	24.4	23.0
10000427060	3	21.9	20.2	19.1
10000415429	5	54.1	50.1	47.5
10000841468	2	6.6	5.9	5.4
10000511371	4	52.0	49.0	47.1
10000787422	27	223.5	202.7	189.4
10000744809	2	18.8	17.3	16.4
10000777139	3	26.2	23.8	22.3

**Tabla 3.22.** Stock de seguridad para diferentes niveles de servicio y un h=25%, caso PER21.

Código de Material	EOQ'	SS @ [SL=95% ][h=25%]	SS @ [SL=90%][h=25%]	SS @ [SL=85%][h=25%]
1000001115	8	17.9	13.9	11.3
97005900075	4	8.5	6.6	5.3
10000737100	51	320.6	269.1	236.6
10000739101	82	523.9	440.2	387.2
10000052597	1	9.2	7.9	7.0
10000841468	1	2.0	1.5	1.2

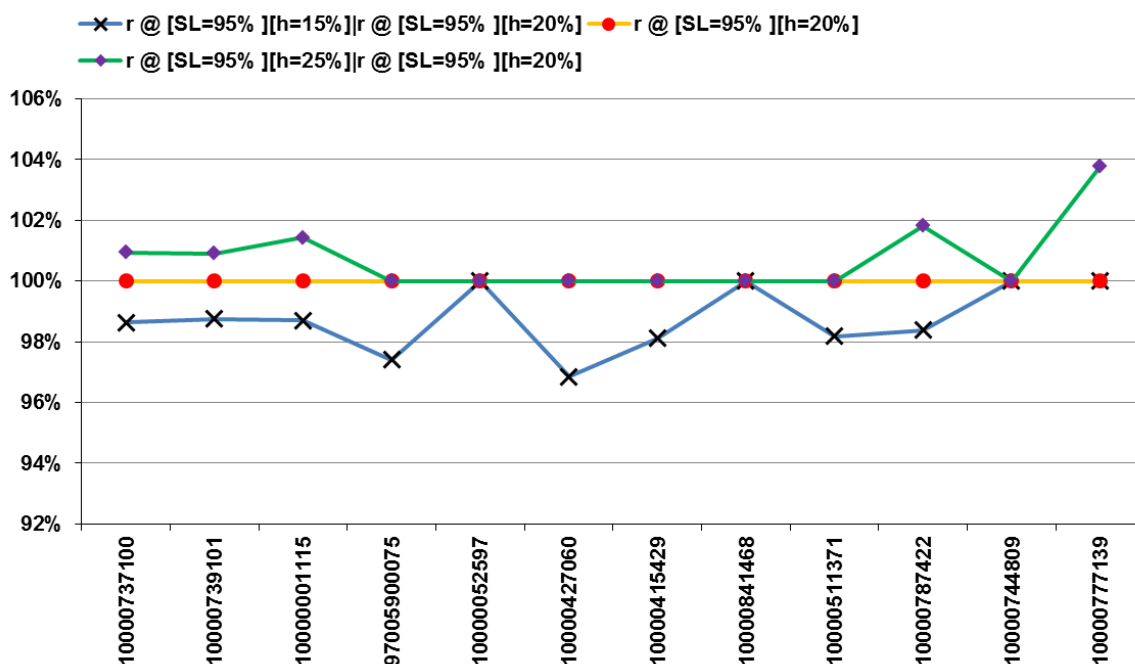
**Tabla 3.23.** Stock de seguridad para diferentes niveles de servicio y un h=25%, caso PER28.

Código de Material	EOQ'	SS @ [SL=95% ][h=25%]	SS @ [SL=90%][h=25%]	SS @ [SL=85%][h=25%]
10000427060	3	8.2	6.5	5.4
10000052597	1	5.7	4.7	4.1
10000415429	5	22.6	18.6	16.1
10000739101	78	246.2	197.1	165.7
10000511371	4	16.7	13.7	11.7
10000555691	33	197.6	165.5	145.1
10000737100	48	506.1	435.8	391.6
10000777139	3	13.1	10.7	9.2

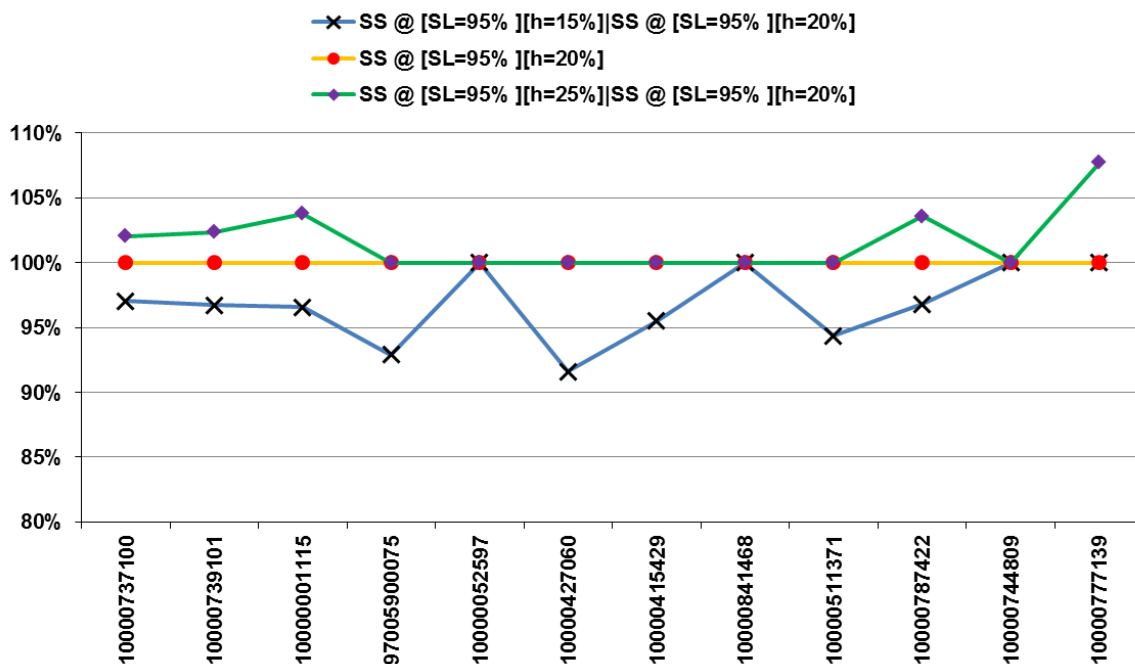
**Tabla 3.24.** Stock de seguridad para diferentes niveles de servicio y un  $h=25\%$ , caso PER21/28.

<b>Código de Material</b>	<b>EOQ'</b>	<b>SS @ [SL=95% ][h=25%]</b>	<b>SS @ [SL=90%][h=25%]</b>	<b>SS @ [SL=85%][h=25%]</b>
10000737100	70	855.7	741.4	669.6
10000739101	113	833.5	705.8	625.1
10000001115	8	17.9	13.9	11.3
97005900075	4	8.5	6.6	5.3
10000052597	2	14.4	12.2	10.8
10000427060	3	8.2	6.5	5.4
10000415429	5	22.6	18.6	16.1
10000841468	2	2.7	2.0	1.5
10000511371	4	16.7	13.7	11.7
10000787422	27	115.4	94.6	81.3
10000744809	2	7.6	6.2	5.3
10000777139	3	13.3	10.9	9.4

**Figura 3.36.** Análisis de sensibilidad del punto de pedido para varios valores de h y un nivel de servicio de 95%, caso PER21/28.



**Figura 3.37.** Análisis de sensibilidad del stock de seguridad para varios valores de h y un nivel de servicio de 95%, caso PER21/28.



### 3.3.8 DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS VARIABLES TEORICOS

Ya habiendo determinado todos los parámetros del modelo de control de inventario con demanda incierta y tiempo de espera estocástico podemos determinar el costo variable total teórico según la fórmula 2.21. Si bien esta fórmula considera 3 elementos del costo total, nosotros solo consideraremos el costo de tenencia (HC), y el costo de pedido (OC), ya que el coeficiente  $C_B$  del costo de desabastecimiento es difícil de estimar y requiere de análisis más exhaustivos con información de la que actualmente no se dispone; para los propósitos de esta tesis consideraremos  $C_B=0$ , los parámetros  $h$  y  $C_O$  se fijan en 25% y 12\$ respectivamente.

En las tablas 3.25, 3.26 y 3.27 se muestran los costos obtenidos evaluados a niveles de servicio de 95%, 90% y 85%.

**Tabla 3.25.** Costos de tenencia, pedido y total según el modelo de demanda incierta para varios niveles de servicio, caso PER21.

Código de Material	TC @ [SL=95% ][h=25%]		TC @ [SL=90%][h=25%]		TC @ [SL=85%][h=25%]	
	HC	OC	HC	OC	HC	OC
10000001115	\$187.53	\$34.38	\$153.07	\$34.38	\$130.82	\$34.38
97005900075	\$156.36	\$28.50	\$127.37	\$28.50	\$108.63	\$28.50
10000737100	\$780.43	\$58.41	\$664.43	\$58.41	\$590.94	\$58.41
10000739101	\$420.82	\$30.41	\$358.49	\$30.41	\$319.02	\$30.41
10000052597	\$359.42	\$33.00	\$310.32	\$33.00	\$279.38	\$33.00
10000841468	\$50.51	\$18.00	\$41.02	\$18.00	\$34.87	\$18.00
	\$1,955.07	\$202.70	\$1,654.70	\$202.70	\$1,463.66	\$202.70
	<b>\$2,157.77</b>		<b>\$1,857.40</b>		<b>\$1,666.36</b>	

**Tabla 3.26.** Costos de tenencia, pedido y total según el modelo de demanda incierta para varios niveles de servicio, caso PER28.

Código de Material	TC @ [SL=95% ][h=25%]		TC @ [SL=90%][h=25%]		TC @ [SL=85%][h=25%]	
	HC	OC	HC	OC	HC	OC
10000427060	\$194.70	\$24.67	\$160.24	\$24.67	\$138.08	\$24.67
10000052597	\$229.73	\$20.00	\$194.78	\$20.00	\$172.60	\$20.00
10000415429	\$312.48	\$29.20	\$262.60	\$29.20	\$230.83	\$29.20
10000739101	\$213.90	\$29.21	\$177.10	\$29.21	\$153.50	\$29.21
10000511371	\$291.57	\$23.50	\$244.23	\$23.50	\$214.02	\$23.50
10000555691	\$400.43	\$30.30	\$340.28	\$30.30	\$302.14	\$30.30
10000737100	\$1,167.47	\$53.35	\$1,012.70	\$53.35	\$915.37	\$53.35
10000777139	\$221.43	\$25.00	\$185.80	\$25.00	\$163.09	\$25.00
	\$3,031.70	\$235.23	\$2,577.72	\$235.23	\$2,289.64	\$235.23
	<b>\$3,266.93</b>		<b>\$2,812.95</b>		<b>\$2,524.87</b>	

**Tabla 3.27.** Costos de tenencia, pedido y total según el modelo de demanda incierta para varios niveles de servicio, caso PER21/28.

Código de Material	TC @ [SL=95% ][h=25%]		TC @ [SL=90%][h=25%]		TC @ [SL=85%][h=25%]	
	HC	OC	HC	OC	HC	OC
10000737100	\$2,004.01	\$79.14	\$1,746.85	\$79.14	\$1,585.45	\$79.14
10000739101	\$667.52	\$42.23	\$571.75	\$42.23	\$511.21	\$42.23
10000001115	\$187.53	\$34.38	\$153.07	\$34.38	\$130.82	\$34.38
97005900075	\$156.36	\$28.50	\$127.37	\$28.50	\$108.63	\$28.50
10000052597	\$573.14	\$27.00	\$490.45	\$27.00	\$438.17	\$27.00
10000427060	\$194.70	\$24.67	\$160.24	\$24.67	\$138.08	\$24.67
10000415429	\$312.48	\$29.20	\$262.60	\$29.20	\$230.83	\$29.20
10000841468	\$76.36	\$13.50	\$61.17	\$13.50	\$51.25	\$13.50
10000511371	\$291.57	\$23.50	\$244.23	\$23.50	\$214.02	\$23.50
10000787422	\$257.89	\$27.70	\$216.22	\$27.70	\$189.66	\$27.70
10000744809	\$471.44	\$29.50	\$393.38	\$29.50	\$343.50	\$29.50
10000777139	\$224.76	\$25.67	\$188.73	\$25.67	\$165.76	\$25.67
	\$5,417.77	\$384.98	\$4,616.05	\$384.98	\$4,107.38	\$384.98
	<b>\$5,802.75</b>		<b>\$5,001.04</b>		<b>\$4,492.36</b>	



### 3.3.9 DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS VARIABLES REALES

Para determinar los costos reales de tenencia debemos averiguar el nivel de inventario promedio durante el periodo de análisis, para esto debemos saber el nivel de inventario al inicio y al final del periodo. Dichos datos los tenemos en las tablas 3.28, 3.29 y 3.30, así como los costos de tenencia respectivos para una tasa  $h=25\%$ .

**Tabla 3.28.** Nivel de inventario promedio y costo de tenencia reales para los materiales del caso PER21/28.

Código de Material	Precio	Stock al 01.04.2015	Stock al 01.04.2014	Inventario Promedio	Costo de Tenencia real
10000737100	\$9.00	0	700	350	\$787.50
10000739101	\$3.00	1	80	40.5	\$30.38
10000001115	\$34.24	10	120	65	\$556.40
97005900075	\$59.42	18	32	25	\$371.38
10000052597	\$149.00	21	11	16	\$596.00
10000427060	\$80.23	67	35	51	\$1,022.93
10000415429	\$49.71	114	40	77	\$956.92
10000841468	\$81.87	20	6	13	\$266.08
10000511371	\$62.36	42	60	51	\$795.09
10000787422	\$8.00	550	113	331.5	\$663.00
10000744809	\$219.00	21	24	22.5	\$1,231.88
10000777139	\$60.73	90	19	54.5	\$827.45
					<b>\$8,104.99</b>

**Tabla 3.29.** Nivel de inventario promedio y costo de tenencia reales para los materiales del caso PER21.

<b>Código de Material</b>	<b>Precio</b>	<b>Stock al 01.04.2015</b>	<b>Stock al 01.04.2014</b>	<b>Inventario Promedio</b>	<b>Costo de Tenencia real</b>
10000001115	\$34.24	10	120	65	\$556.40
97005900075	\$59.42	18	32	25	\$371.38
10000737100	\$9.02	0	449	224.5	\$506.25
10000739101	\$2.98	1	80	40.5	\$30.17
10000052597	\$148.2	3	3	3	\$111.15
10000841468	\$81.87	4	4	4	\$81.87
					<b>\$1,657.22</b>

**Tabla 3.30.** Nivel de inventario promedio y costo de tenencia reales para los materiales del caso PER28.

<b>Código de Material</b>	<b>Precio</b>	<b>Stock al 01.04.2015</b>	<b>Stock al 01.04.2014</b>	<b>Inventario Promedio</b>	<b>Costo de Tenencia real</b>
10000427060	\$80.23	67	35	51	\$1,022.93
10000052597	\$149.29	18	8	13	\$485.19
10000415429	\$49.71	114	40	77	\$956.92
10000739101	\$3.00	0	0	0	\$0.00
10000511371	\$62.36	42	60	51	\$795.09
10000555691	\$7.48	32	0	16	\$29.92
10000737100	\$8.81	0	251	125.5	\$276.41
10000777139	\$60.73	72	0	36	\$546.57
					<b>\$4,113.04</b>

Para determinar los costos de pedido reales debemos saber cuántos pedidos fueron realizados durante el periodo de análisis por los materiales de cada listado. Dichos datos los tenemos en la tabla **3.31**, así como los costos de pedido respectivos.

**Tabla 3.31.** Cantidad de pedidos y costos de pedido real.

Caso	Cantidad de pedidos	Costo de pedido real
PER21	14	\$168.00
PER28	12	\$144.00
PER21/28	27	\$324.00

Con estos datos ya podemos obtener los costos reales en cada caso, como vemos en la tabla **3.32**.

**Tabla 3.32.** Costos de tenencia, pedido y total reales.

Caso	Costo de tenencia real	Costo de pedido real	TC real
PER21	\$1,657.22	\$168.00	\$1,825.22
PER28	\$4,113.04	\$144.00	\$4,257.04
PER21/28	\$8,104.99	\$324.00	\$8,428.99

# **CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN Y CONTRASTACIÓN DE LAS HIPÓTESIS**

## **4.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL NIVEL DE INVENTARIO Y VALORIZACIÓN DEL STOCK**

Como vemos en las figuras **3.5**, **3.7** y **3.11**, el mayor valor de material almacenado está en las ubicaciones offshore, asimismo el valor del material que se encuentra en el mar es similar al valor del material que se encuentra en tierra, esto por lo general contradice la idea de que uno debería mantener más valor de material en tierra para mantenerlo protegido y tenerlo disponible en caso se necesite; el material que está en mar tiene una mayor probabilidad de deterioro debido a las condiciones ambientales, además del riesgo de pérdida debido a naufragios, explosiones o similares es mayor. Los porcentajes del valor almacenado en cada zona son:

- **ONSHORE:**  $\$1,236,809.01 / \$2,535,823.31 = 48.8\%$
- **OFFSHORE:**  $\$1,299,014.30 / \$2,535,823.31 = 51.2\%$

Igualmente, las figuras **3.4**, **3.6** y **3.10**, nos indican que las ubicaciones offshore presentan mayor variedad de materiales y que los materiales con mayor valor unitario en promedio están en tierra, con un cálculo rápido tenemos:

- **CASO PER21:**
  - **ONSHORE:**  $\$655,878.95 / 682 \text{ ítems} = \$961.70/\text{ítem}$
  - **OFFSHORE:**  $\$671,655.74 / 1032 \text{ ítems} = \$650.83/\text{ítem}$
- **CASO PER28:**
  - **ONSHORE:**  $\$580,930.06 / 607 \text{ ítems} = \$957.05/\text{ítem}$
  - **OFFSHORE:**  $\$627,358.56 / 830 \text{ ítems} = \$755.85/\text{ítem}$

También, de la figura **3.8** y **3.9**, observamos que el taladro PER21 (1457 ítems) tiene una mayor variedad de materiales en almacén que el PER28 (1305 ítems), al igual que posee un mayor valor de material con una diferencia de \$119,246.07.

#### **4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS MOVIMIENTOS DE MATERIALES**

Los materiales del grupo 1 y 2 son los materiales que han tenido consumos históricos, pero los del grupo 2 actualmente no tienen stock, eso indica que los taladros están en estado de desabastecimiento con respecto a los materiales de dicho grupo. Los materiales del grupo 4 son materiales que no han tenido consumo histórico ni cuentan con stock a la fecha, eso indica que son materiales que ya no se necesitan. La cantidad de ítems correspondientes a cada grupo pueden verse claramente en las figuras **3.12** y **3.14**.

Sobre el grupo 3; de las figuras **3.13** y **3.15** podemos ver que una gran parte del valor del almacén no ha sido utilizado durante el periodo analizado. Los porcentajes del valor del material sin utilizar con respecto al total son:

- **PER21:**  $\$1,020,974.07 / \$1,327,534.69 = 76.9\%$
- **PER28:**  $\$884,931.35 / \$1,208,288.62 = 73.2\%$
- **PER21/28:**  $\$1,769,656.54 / \$2,535,823.31 = 69.8\%$

Asimismo, las figuras **3.16** y **3.17** nos muestran como está distribuido este material sin movimiento en las diversas zonas. Los porcentajes en valor son:

- **CASO PER21:**
  - **ONSHORE:**  $\$543,188.35 / \$1,020,974.07 = 53.2\%$
  - **OFFSHORE:**  $\$477,785.72 / \$1,020,974.07 = 46.8\%$
- **CASO PER28:**
  - **ONSHORE:**  $\$436,220.99 / \$884,931.35 = 49.3\%$
  - **OFFSHORE:**  $\$448,710.36 / \$884,931.35 = 50.7\%$

➤ **CASO PER21/28:**

- **ONSHORE:**  $\$935,307.89 / \$1,769,656.54 = 52.9\%$
- **OFFSHORE:**  $\$834,348.65 / \$1,769,656.54 = 47.1\%$

De este material sin uso, existe material que está presente en más de un almacén, en las figuras **3.18** y **3.19** se puede ver claramente la tendencia. Los porcentajes son:

➤ **CASO PER21:**

- **2 LOCACIONES:**  $\$269,134.50 / \$1,020,974.07 = 26.36\%$

➤ **CASO PER28:**

- **2 LOCACIONES:**  $\$52,137.45 / \$884,931.35 = 5.89\%$

➤ **CASO PER21/28:**

- **2 LOCACIONES:**  $\$492,173.22 / \$1,769,656.54 = 27.81\%$
- **3 LOCACIONES:**  $\$93,155.85 / \$1,769,656.54 = 5.26\%$
- **4 LOCACIONES:**  $\$6,000.98 / \$1,769,656.54 = 0.34\%$

Asimismo, del material que no ha tenido movimiento, los materiales de la marca VARCO son los que presentan mayor valor acumulado en todos los casos, le siguen los materiales de la marca SIEMENS y HAWK INDUSTRIES en el caso PER28 y DRILLMEC y LTI-LEWCO en el caso PER21 y el caso consolidado PER21/28. Las figuras **3.20**, **3.21** y **3.22** presentan el detalle de este tema.

Por último, existe material en cada taladro que no ha sido utilizado en el mismo, pero si ha tenido consumos en el otro taladro. El porcentaje en valor de dicho material, de acuerdo a los valores de la figura **3.23**, es:

- **Material del PER21 con movimiento en el PER28:**  $\$97,222.07 / \$1,020,974.07 = 9.52\%$
- **Material del PER28 con movimiento en el PER21:**  $\$38,218.01 / \$884,931.35 = 4.32\%$

El agrupamiento realizado inicialmente hace que la cantidad de ítems a analizar disminuya, ya que solo se trabaja con los materiales del grupo 1 y 2 debido a que solo ellos presentan historial de consumo. El nivel de reducción que obtenemos en la cantidad de ítems a procesar, de acuerdo a la figuras **3.12** o **3.14**, es:

➤ **PER21:**

- **Grupo 1 y 2:**  $(561+363)/(561+363+896+1285)= 29.76\%$

➤ **PER28:**

- **Grupo 1 y 2:**  $(418+328)/(418+328+887+768)= 31.07\%$

➤ **PER21/28:**

- **Grupo 1 y 2:**  $(868+455)/(868+455+1470+1501)= 30.81\%$

En otras palabras, el número de ítems a analizar se reduce en promedio en un 70%.

#### **4.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN ABC**

Los resultados de la clasificación ABC arrojan que, según la figura **3.25** y **3.26**:

➤ **Caso PER21:**

- El 11% de ítems es responsable del 80% del uso del dinero.
- El 20% de ítems es responsable del 15% del uso del dinero.
- El 69% de ítems es responsable del 5% del uso del dinero.

➤ **Caso PER28:**

- El 8% de ítems es responsable del 80% del uso del dinero.
- El 20% de ítems es responsable del 15% del uso del dinero.
- El 72% de ítems es responsable del 5% del uso del dinero.

➤ **Caso PER21/28:**

- El 10% de ítems es responsable del 80% del uso del dinero.

- El 20% de ítems es responsable del 15% del uso del dinero.
- El 70% de ítems es responsable del 5% del uso del dinero.

Igualmente, como indica la figura **3.27**, con respecto al valor del material en almacén:

➤ **Caso PER21:**

- El 67% del valor del almacén cae en la categoría A.
- El 20% del valor del almacén cae en la categoría B.
- El 14% del valor del almacén cae en la categoría C.

➤ **Caso PER28:**

- El 56% del valor del almacén cae en la categoría A.
- El 31% del valor del almacén cae en la categoría B.
- El 13% del valor del almacén cae en la categoría C.

➤ **Caso PER21/28:**

- El 63% del valor del almacén cae en la categoría A.
- El 24% del valor del almacén cae en la categoría B.
- El 13% del valor del almacén cae en la categoría C.

Al analizar todos los almacenes como una sola unidad (caso PER21/28), notamos que hay varios ítems cambian de categoría con respecto a los casos individuales, existiendo 109 ítems que suben de categoría y 66 ítems que bajan de categoría, de acuerdo a los datos de la figura **3.28**.

En esta sección también reducimos la cantidad de códigos a analizar ya que el esfuerzo necesario para los cálculos posteriores solo es justificable para los ítems categoría A, sin embargo, solo para el análisis de los patrones de demanda histórica, se tomarán en cuenta los ítems de la categoría B.



#### 4.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA DEMANDA HISTÓRICA

Los resultados plasmados en la tabla 3.8, nos muestran que para los siguientes casos:

- **PER21:**
  - **Categoría A:** solo 6 ítems de 100 cumplen las condiciones del EOQ.
  - **Categoría B:** solo 5 ítems de 184 cumplen las condiciones del EOQ.
  
- **PER28:**
  - **Categoría A:** solo 8 ítems de 60 cumplen las condiciones del EOQ.
  - **Categoría B:** solo 6 ítems de 149 cumplen las condiciones del EOQ.
  
- **PER21/28:**
  - **Categoría A:** solo 12 ítems de 134 cumplen las condiciones del EOQ.
  - **Categoría B:** solo 16 ítems de 166 cumplen las condiciones del EOQ.

Esta es una etapa que nos vuelve a reducir la cantidad de códigos a analizar, los análisis que siguen solo consideran a los ítems de la categoría A, ya que su alta criticidad justifica el esfuerzo.

#### 4.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD ECONÓMICA DE PEDIDO

Los análisis anteriores permiten seleccionar el **modelo de inventario probabilístico con demanda incierta y tiempo de espera estocástico** como el modelo a ser empleado.

El análisis de sensibilidad realizado debido a la incerteza del parámetro  $h$  nos muestra que la variación con respecto a valores mayores de  $h$  (Ver figura 3.35) es menor con respecto a la variación para valores inferiores de  $h$ , esto nos permite tener un fundamento para establecer el parámetro  $h$  en 25%.

Asimismo, en la tabla **3.12** podemos ver la comparación de la cantidad económica de pedido ajustada del caso consolidado contra la suma de los casos aislados para los 3 ítems que aparecen en los 3 casos, observándose que tenemos una disminución del EOQ ajustado del caso consolidado al respecto del EOQ obtenido de la suma de los casos aislados.

#### **4.6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL TIEMPO DE ESPERA**

En este caso se analizan los 3 casos habituales, sin embargo es necesario aclarar que el caso consolidado PER21/28 solo fue posible realizarlo debido a que los pedidos de material y la recepción de los mismos se hacen desde la misma ubicación física (almacén en Zorritos) para ambos taladros, en otro caso no hubiera sido posible mezclar su información histórica de tiempos de espera, esto da lugar a la información mostrada en las tablas **3.13, 3.14 y 3.15**.

#### **4.7 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS PUNTOS DE PEDIDO Y STOCK DE SEGURIDAD**

Habiendo ya determinado la media y varianza de la demanda y el tiempo de espera se puede obtener la media y la varianza de la demanda durante el tiempo de espera, todos estos parámetros son recogidos en las tablas **3.16, 3.17 y 3.18** para los diferentes casos de análisis.

Las figuras **3.36 y 3.37** muestran los análisis de sensibilidad realizados para ver la variación del punto de pedido y el stock de seguridad con respecto al valor de  $h$ , estos nos muestran que existe menor variación para un  $h$  de 25% que para un  $h$  de 15%, en base a esto y al resultado del análisis de sensibilidad de la cantidad económica de pedido podemos fijar el parámetro  $h$  en 25%.

Habiendo fijado el parámetro  $h$  en 25% podemos determinar los puntos de pedido y stock de seguridad para varios niveles de servicio, estos datos vienen mostrados en las tablas **3.19, 3.20, 3.21, 3.22, 3.23 y 3.24**.

#### 4.8 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS COSTOS VARIABLES TEÓRICOS Y REALES

Teniendo todos los parámetros determinados es posible calcular los costos variables totales teóricos, asimismo con la información histórica se puede calcular los costos variables totales reales, todos estos valores son mostrados en las tablas 3.25, 3.26, 3.27 y 3.32.

**Tabla 4.1.** Resumen de los costos teóricos obtenidos para varios niveles de servicio comparados contra los costos reales para los diferentes casos de análisis

Caso	TC Teórico			TC Real
	[SL=95%][h=25%]	[SL=90%][h=25%]	[SL=85%][h=25%]	
PER21	\$2,157.77	\$1,857.40	\$1,666.36	\$1,825.22
PER28	\$3,266.93	\$2,812.95	\$2,524.87	\$4,257.04
PER2128	\$5,802.75	\$5,001.04	\$4,492.36	\$8,428.99

Para el cálculo de estos costos se desprecia el componente debido al desabastecimiento ya que no se cuenta con información para cuantificar el coeficiente de desabastecimiento  $C_B$ , por lo cual estos costos representan solo los costos de tenencia más los costos de pedido. Asimismo, el mencionado costo de desabastecimiento ha podido ser despreciado debido a que en la lista final de los materiales que cumplen la condición de demanda estable (Tablas 3.16, 3.17 y 3.18) en los diferentes casos se puede observar que la mayoría de materiales corresponden a los motores diesel de los taladros los cuales son componentes criticidad B (Semicriticos) y presentan redundancia (Tabla 3.4 y 3.6), los demás materiales ni siquiera pertenecen a algún componente relevante para las operaciones, excepto el material 10000744809 (SCR 1200A, 2000V), el cual pertenece a un componente crítico (S.C.R.), sin embargo, este es monitoreado mensualmente para ver su estado de degradación, lo cual reduce la probabilidad de que ocurra una falla imprevista, por lo cual asumimos su costo de desabastecimiento mínimo.

También se puede observar en la tabla 4.1 que los costos teóricos para niveles de servicio de 95% y 90% han salido mayores que el costo real en el caso del PER21, esto podría indicar que en la realidad operativa del taladro se estuvo trabajando con mayores niveles de riesgo de desabastecimiento lo cual se tradujo en costos menores de inventario, sin embargo no se cuenta con datos históricos para poder cuantificar el nivel de riesgo real con el que se trabajó para poder validar esta suposición.

#### 4.9 CONTRASTACIÓN DE LAS HIPÓTESIS

En la presente investigación, la contratación de la hipótesis principal se sustenta en la verificación de las hipótesis específicas, en base a esto:

1. La **primera hipótesis** establece que: *“Aplicando como herramienta la evaluación de la tasa de consumo histórica se reducirán los costos de repuestos de mantenimiento de los taladros de perforación offshore de la provincia de Tumbes.”*, en ese sentido en la sección 3.3.4 se analiza la demanda histórica y se obtienen los parámetros estadísticos que la representan, anteriormente este parámetro no había sido evaluado por lo cual la previsión de la demanda era realizada a criterio de cada persona, esta evaluación influye directamente en el costo variable final ya que en la fórmula 2.21 podemos observar como este parámetro aparece en cada componente del costo final. Por lo tanto, la primera hipótesis queda **verificada**.
2. La **segunda hipótesis** específica establece que: *“Aplicando como herramienta la estimación el tamaño óptimo de pedido se reducirán los costos de repuestos de mantenimiento de los taladros de perforación offshore de la provincia de Tumbes.”*, en la sección 3.3.5 se obtienen los tamaños económicos de pedido y sus valores ajustados a cantidades discretas, la influencia de la determinación de este parámetro en el costo total es mostrada en la sección 2.6, asimismo en la fórmula 2.21 observamos su importancia e impacto en el costo variable final dado que aparece en cada subcomponente del costo anual total, al respecto, la segunda hipótesis específica queda **verificada**.

3. La **tercera hipótesis** específica establece que: *“Aplicando como herramienta la estimación del tiempo de entrega se reducirán los costos de repuestos de mantenimiento de los taladros de perforación offshore de la provincia de Tumbes.”*, en la sección **3.3.6.** se analizaron los datos históricos del tiempo de espera para la obtención de sus parámetros estadísticos, se sabe que la estimación correcta del tiempo de espera de un material permite una mejor planificación de los requerimientos de material permitiendo identificar que material amerita ser almacenado y cuál puede ser adquirido solo bajo necesidad inmediata sin que esto afecte a la operación. La influencia de este parámetro queda manifestada en la fórmula **2.21** y se observa que solo tiene influencia en el componente asociado a la tenencia de inventario, en tal sentido la tercera hipótesis específica queda **verificada**.
  
4. La **cuarta hipótesis** específica establece que: *“Aplicando como herramienta el establecimiento de los puntos de pedido para ítems críticos se reducirán los costos de repuestos de mantenimiento de los taladros de perforación offshore de la provincia de Tumbes.”*, los puntos de pedido fueron materia de estudio en la sección **3.3.7**, en esa sección fueron determinados los valores para diferentes niveles de servicio, este parámetro tiene influencia directa en el valor del inventario ya que puntos de pedido mayores requerirán stock de seguridad mayores, como lo muestran los resultados, así que seleccionando el punto de pedido para un nivel de servicio mínimo permisible estaremos influyendo en la misma medida el valor del inventario, por esta razón la cuarta y última hipótesis también queda verificada

Finalmente, habiéndose contrastado las hipótesis específicas derivadas de la hipótesis principal la cual establece que:

*“Aplicando como herramienta un modelo de control de inventarios se reducirán los costos de repuestos de mantenimiento de los taladros de perforación offshore de la provincia de Tumbes.”*

Se concluye que la hipótesis principal queda verificada, no obstante, los resultados muestran que la hipótesis solo queda verificada al 100% para niveles de servicio inferiores al 85%, de acuerdo a los valores de la tabla **4.1** para niveles de servicio mayores el caso PER21 presenta costos reales mayores que los teóricos.

## CONCLUSIONES

1. El mayor valor de material de los almacenes del PER21 y del PER28 está en mar y esta suma asciende a \$1,299,014.30 (51.2 % del valor de todos los almacenes), en el caso del taladro PER21, el valor de material en mar asciende a \$671,655,74 (50.6% del valor total de su almacén) y en el caso del taladro PER28 el material en mar esta valorizado en \$627,358.56 (51.9% del valor total de su almacén).
2. En los almacenes de los taladros PER21 y PER28, las ubicaciones en mar presentan una mayor variedad de material que las ubicaciones en tierra, en los almacenes en mar se tienen 1569 ítems con stock mientras que en los almacenes en tierra existen 1196 ítems con stock.
3. Solo el 30.8% (1323 ítems) de todos los ítems registrados en los almacenes de los taladros PER21 Y PER28 han tenido consumos en el periodo de análisis, en el caso del PER21 el porcentaje de ítems es 29.8% (924 ítems), mientras que en el PER28 es 31.1% (746 ítems).
4. De todo el material perteneciente a los taladros PER21 y PER28, \$1,769,656.54 no ha tenido consumo durante el periodo de análisis, este valor corresponde al 69.8% del valor de todo el material. En el caso del PER21 el valor del material sin consumo asciende a \$1,020,974.07 (76.9% del valor total de su almacén), y en el caso del PER28 el valor del material es \$884,931.35 (73.2% del valor total de sus almacén).
5. De todo el material presente en los taladros PER21 y PER28 que no ha tenido consumo, el mayor valor de material está en los almacenes en tierra, el valor de este material asciende a \$935,307.89 (52.9% del valor de todo el material sin consumo).
6. De todo el material perteneciente a los taladros PER21 y PER28 que no ha tenido consumo durante el periodo de análisis \$492,173.22 está en dos locaciones (27.81% del valor de material sin consumo), \$93,155.85 está en 3 locaciones (5.26% del valor de material sin consumo), y \$6,000.98 está en 4 locaciones (0.34% del valor de material sin consumo).

7. Del material sin consumo histórico, el mayor valor de material lo concentra el fabricante VARCO.
8. Del material sin consumo histórico perteneciente al taladro PER21, \$923,752 podría potencialmente haber sido utilizado en el taladro PER28, mientras que \$38,218.01 del material del taladro PER28 podría potencialmente haber sido utilizado en el taladro PER21.
9. La metodología de clasificación ABC permite establecer que el 10% de todos los ítems de los taladros PER21 y PER28 caen en la categoría A, 20% en la categoría B y 70% en la categoría C. Los porcentajes respectivos en el caso aislado del PER21 son 11%, 20% y 69%, y los porcentajes en el caso del PER28 son 8%, 20% y 72%.
10. Según los valores obtenidos del coeficiente de variación cuadrado de la demanda, se puede concluir que en la mayoría de los casos los materiales de almacén en las operaciones de perforación offshore no presentan un patrón de demanda estable. De todos los materiales analizados pertenecientes a los taladros PER21 y PER28, solo el 7% de los ítems cumplen la condición de demanda estable. En el caso aislado del PER21, solo el 3.9% cumplen la condición, y en el caso PER28, solo el 6.7% de los ítems cumplen la condición de demanda estable.
11. Si bien, debido a la poca cantidad de ítems que cumplen las condiciones para utilizar el EOQ, la reducción de costos obtenida no es contundente para la realidad analizada, sí se logra obtener costos teóricos menores a los reales para las condiciones descritas, especialmente para niveles de servicio menores al 85%.



## RECOMENDACIONES

1. Es recomendable que todo el material en las plataformas en mar que no ha tenido consumo durante el periodo de análisis (\$834,348.65) sea enviado a tierra, a menos que exista alguna razón subyacente para que permanezca en las ubicaciones operativas.
2. Para los materiales del grupo 3, material sin movimiento y con stock, dado que no poseen un historial de consumo no es posible realizar su clasificación con la metodología ABC tradicional basada en el valor-uso, para estos materiales se propone realizar una clasificación ABC multi criterio o clasificación según el proceso analítico jerárquico (AHP).
3. Futuros análisis sobre el grupo 3 deben ser realizados para determinar los niveles de obsolescencia de dichos materiales, ya que la falta de consumos podría indicar que el componente en el que se utilizan alguno de estos materiales ya no está operativo.
4. Al respecto de los materiales del grupo 3 que están presentes en más de una locación, estos deben ser revisados y se deben evaluar los motivos por los cuales se encuentran diseminados en distintos almacenes en vez de estar consolidados en el almacén en tierra.
5. En el desarrollo de este trabajo se ha asumido que los pedidos ocurren independientemente por cada material, es decir un pedido por material, como investigación futura sería recomendable analizar el caso de pedidos con múltiples materiales.
6. En esta tesis se ha considerado el parámetro  $h$  igual a 25%, esta es una buena estimación, sin embargo, análisis más detallados deberían ser realizados para hallar el valor exacto.
7. El costo de pedido se ha estimado en \$12, no obstante, esta se ha hecho en base a varios supuestos, en investigaciones futuras se podría analizar más a fondo este valor y obtener el valor exacto del parámetro.

8. En todos los análisis se ha considerado que la falta de material puede ser satisfecha solo con la compra de los mismos, sin embargo , debido a las varios operaciones de la empresa en Sudamérica la falta de material también puede ser satisfecha con transferencias desde otros almacenes fuera de lo zona analizada.
9. Si bien en el análisis de esta tesis se ha despreciado el coeficiente de costo de desabastecimiento, en el futuro, cuando se disponga de mayor información, se debería realizar un análisis más profundo para estimar o determinar su valor, la información necesaria para estimar este parámetro debería incluir: historial de fallas de componentes, valores contractuales del tiempo no productivo y análisis de modos efectos de falla (AMEF).

## BIBLIOGRAFÍA

1. **Anderson, D., Sweeney, D., Williams, T., Camm, J., Cochran, J., Fry M., & Ohlmann, J.** (2012). Quantitative methods for business. 12va Edición. USA. Cengage South-Western. PP 911.
2. **Aronis, K. P., Magou, I., Dekker, R., & Tagaras, G.** (2004). Inventory control of spare parts using a Bayesian approach: A case study. European Journal of Operational Research [En línea]. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221702008378>
3. **Callegaro, A.** (2010). Forecasting Methods for Spare Parts Demand [en línea]. Tesis de grado. UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA, Italia. [Fecha de acceso 11 de marzo del 2015]. URL Disponible en: <http://tesi.cab.unipd.it/25014/1/TesiCallegaro580457.pdf>
4. **Campbell, J.** (2006). Uptime. Strategies in excellence in maintenance management. 2da edición. Portland, USA. Productivity Press. PP 384.
5. **Dekker, R., Pinçe, Ç., Zuidwijk, R., & Jalil, M. N.** (2013). On the use of installed base information for spare parts logistics: A review of ideas and industry practice. International Journal of Production Economics [en línea]. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527311004889>
6. **Dhillon, B.** (2002). Engineering maintenance: A modern approach. Florida USA. CRC Press LLC. PP 223
7. **Flores, B. E., Olson, D. L., & Dorai, V. K.** (1992). Management of multicriteria inventory classification. Mathematical and Computer Modelling [en línea]. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/089571779290021C>

8. **Godoy, D. R., Pascual, R., & Knights, P.** (2013). Critical spare parts ordering decisions using conditional reliability and stochastic lead time. *Reliability Engineering & System Safety* [en línea]. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832013001579>
9. <http://www.larepublica.pe/infografias/ubicacion-del-lote-z-1-26-02-2013> [Fecha de acceso 11 de marzo del 2015]
10. [http://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1023734/000110465911000526/a11-1722\\_1ex99d2.htm](http://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1023734/000110465911000526/a11-1722_1ex99d2.htm) [Fecha de acceso 11 de marzo del 2015]
11. **Kennedy, W. J., Patterson, J. W., & Fredendall, L. D.** (2002). An overview of recent literature on spare parts inventories. *International Journal of production economics* [en línea]. [Fecha de acceso 11 de marzo del 2015]. URL disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527301001748>
12. **Kocer, U. U., & Tamer, S.** (2011). Determining the Inventory Policy for Slow-Moving Items: A Case Study. In *Proceedings of the World Congress on Engineering* [en línea]. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: [http://www.iaeng.org/publication/WCE2011/WCE2011\\_pp139-143.pdf](http://www.iaeng.org/publication/WCE2011/WCE2011_pp139-143.pdf)
13. **KPMG GLOBAL ENERGY INSTITUTE.** (2014). "KPMG Mining Operational Excellence Framework", 2011. URL disponible en: <https://www.kpmg.com/Global/en/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/mining-operational-excellence.pdf>
14. **Liao, H., & Rausch, M.** (2010). Spare part inventory control driven by condition based maintenance. In *Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2010 Proceedings-Annual, IEEE.* [en línea]. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://dx.doi.org/10.1109/RAMS.2010.5448059>

15. **Liu, Z.** (2013). Inventory management of slow moving spare parts in National Electricity Power Plant of China. [en línea]. Tesis de maestría. Molde University College, Noruega. [Fecha de acceso 11 de marzo del 2015]. URL disponible en :  
<http://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/153668>
16. **Louit, D., Pascual, R., Banjevic, D., & Jardine, A. K.** (2011). Condition-based spares ordering for critical components. Mechanical Systems and Signal Processing [en línea]. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327011000148>
17. **Manzini, R., Regattieri, A., Pham, H., & Ferrari, E.** (2009). Maintenance for industrial systems. Londres UK. Springer-Verlag London Media. PP 479
18. **Márquez, A. C.** (2007). The maintenance management framework: models and methods for complex systems maintenance. Sevilla España. Editorial Springer Science & Business Media. PP 333
19. **Molenaers, A., Baets, H., Pintelon, L., & Waeyenbergh, G.** (2012). Criticality classification of spare parts: A case study. International Journal of Production Economics [en línea]. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527311003549>
20. **Rego, J. R. D., & Mesquita, M. A. D.** (2011). Controle de estoque de peças de reposição: uma revisão da literatura [en línea]. [Fecha de acceso 11 de marzo del 2015]. URL disponible en:  
<http://www.prod.org.br/doi/10.1590/S0103-65132011005000002>
21. **Rezaei, J., & Dowlatshahi, S.** (2010). A rule-based multi-criteria approach to inventory classification. International Journal of Production Research [en línea]. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en:  
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207540903348361>

22. **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* [en línea]. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221712000392>
23. **Samland, R.** (2011). Drilling spare parts: Identifying and evaluating critical parameters [en línea]. Tesis de maestría. Universidad de Stavanger, Noruega. [Fecha de acceso 11 de marzo del 2015]. URL disponible en: <http://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/182744>
24. **Van Jaarsveld, W., & Dekker, R.** (2011). Spare parts stock control for redundant systems using reliability centered maintenance data. *Reliability Engineering & System Safety* [en línea]. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832011001347>
25. **Wang, W., & Syntetos, A. A.** (2011). Spare parts demand: Linking forecasting to equipment maintenance. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* [en línea]. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554511000585>
26. **Waters, D.** (2003). *Inventory Control and Management*. 2da Edición. England, UK. Editorial John Wiley & Sons. PP 408
27. **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* [en línea]. [Fecha de acceso 11 de marzo 2015]. URL disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016920700300013X>
28. **Winston, W. L., & Goldberg, J. B.** (2004). *Operations research: Applications and algorithms*. USA. Thomson/Brooks/Cole. PP 1418
29. **Wireman, T.** (2005). *Developing performance indicators for managing maintenance*. 2da edicion. New York USA. Industrial Press Inc. PP 288

30. **Zhigao, S.** (2013). Spare parts management in Bohai bay [en línea]. Tesis de maestría. Universidad de Stavanger. [Fecha de acceso 11 de enero del 2015]. URL disponible en: <http://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/183117>

## ANEXO: ESTIMACIÓN DE COSTO POR PEDIDO ( $C_o$ ) Y TASA ANUAL DEL COSTO DE TENENCIA ( $h$ )

Para estimar el costo por pedido seguiremos la siguiente metodología:

- Identificamos las actividades involucrada en el proceso.
- Identificamos el conductor de costo, en este caso el minuto-hombre.
- Identificamos el responsable de la actividad y su salario.
- Calculamos el costo de la actividad.

En el proceso de compra de material se tienen identificadas las siguientes actividades:

1. **Crear MR**<sup>34</sup>: El almacenero en campo crea un pedido de material en el sistema informático de la organización. Para esta actividad consideramos una duración de 20 minutos, el sueldo del almacenero como 3500 S/. trabajando 30 días por mes y 10 horas por día.

$$Costo_{crear MR} = 20 \min \left( \frac{3500 \text{ S/./mes}}{30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} \times 10 \frac{\text{horas}}{\text{día}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hora}}} \right) = 3.89 \text{ S/}.$$

2. **Aprobar MR**: Luego que el almacenero ha creado su pedido de material (MR) este tiene que ser aprobado por el responsable del taladro (Superintendente) para que pase a la siguiente etapa. Para esta actividad consideramos una duración de 2 minutos, el sueldo del superintendente como 9000 S/. trabajando 20 días por mes y 8 horas por día.

$$Costo_{Aprobar MR} = 2 \min \left( \frac{9000 \text{ S/./mes}}{20 \frac{\text{días}}{\text{mes}} \times 8 \frac{\text{horas}}{\text{día}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hora}}} \right) = 1.88 \text{ S/}.$$

<sup>34</sup> **MR**: Material Request o Pedido de Material.



- 3. Asignar MR:** Luego que la MR ha sido aprobada esta tiene que ser asignada a un analista de pedidos para que sea procesada. Para esta actividad consideramos una duración de 3 minutos, el sueldo del analista que asigna como 3500 S/. trabajando 20 días por mes y 8 horas por día.

$$Costo_{Asignar MR} = 3 \text{ min} \left( \frac{3500 \text{ S/./mes}}{20 \frac{\text{días}}{\text{mes}} \times 8 \frac{\text{horas}}{\text{día}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hora}}} \right) = 1.09 \text{ S/}.$$

- 4. Crear PR<sup>35</sup>:** Luego que el pedido ha sido asignado a un analista este debe procesarlo, analizarlo y crear un pedido de compra (PR). Para esta actividad consideramos una duración de 15 minutos, el sueldo del analista que asigna como 3500 S/. trabajando 20 días por mes y 8 horas por día.

$$Costo_{Crear PR} = 15 \text{ min} \left( \frac{3500 \text{ S/./mes}}{20 \frac{\text{días}}{\text{mes}} \times 8 \frac{\text{horas}}{\text{día}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hora}}} \right) = 5.47 \text{ S/}.$$

- 5. Aprobar PR:** Una vez finalizado el procesamiento del pedido por el analista este es enviado al responsable de aprobar el pedido de compra. Para esta actividad consideramos una duración de 4 minutos, el sueldo del aprobador como 3500 S/. trabajando 20 días por mes y 8 horas por día.

$$Costo_{Aprobar PR} = 4 \text{ min} \left( \frac{3500 \text{ S/./mes}}{20 \frac{\text{días}}{\text{mes}} \times 8 \frac{\text{horas}}{\text{día}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hora}}} \right) = 1.46 \text{ S/}.$$

- 6. Asignar PR:** Después que el pedido de compra ha sido aprobado este pasa al área de adquisiciones para que sea asignada a un comprador. Para esta actividad consideramos una duración de 5 minutos, el sueldo del que asigna como 3700 S/. trabajando 20 días por mes y 8 horas por día.

<sup>35</sup> PR: Purchase Request o Pedido de Compra.

$$\text{Costo}_{\text{Asignar PR}} = 5 \text{ min} \left( \frac{3700 \text{ S/./mes}}{20 \frac{\text{días}}{\text{mes}} \times 8 \frac{\text{horas}}{\text{día}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hora}}} \right) = 1.93 \text{ S/}.$$

- 7. Cotizar:** Cuando la PR ha sido asignada a un comprador este debe cotizar el pedido con diversos proveedores y seleccionar al que ofrezca la mejor opción calidad/precio. Para esta actividad consideramos una duración de 15 minutos, el sueldo del comprador como 3700 S/. trabajando 20 días por mes y 8 horas por día.

$$\text{Costo}_{\text{Cotizar}} = 15 \text{ min} \left( \frac{3700 \text{ S/./mes}}{20 \frac{\text{días}}{\text{mes}} \times 8 \frac{\text{horas}}{\text{día}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hora}}} \right) = 5.78 \text{ S/}.$$

- 8. Crear PO<sup>36</sup>:** Cuando se ha elegido al proveedor ganador se procede a crear una orden de compra. Para esta actividad consideramos una duración de 20 minutos, el sueldo del comprador como 3700 S/. trabajando 20 días por mes y 8 horas por día.

$$\text{Costo}_{\text{Crear PO}} = 20 \text{ min} \left( \frac{3700 \text{ S/./mes}}{20 \frac{\text{días}}{\text{mes}} \times 8 \frac{\text{horas}}{\text{día}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hora}}} \right) = 7.71 \text{ S/}.$$

- 9. Enviar PO a firmas y a proveedor:** Cuando la orden de compra esta lista esta debe pasar a firmas a la gerencia de compras y una vez devuelta es enviada al proveedor para que despache el material requerido. Para esta actividad consideramos una duración de 15 minutos, el sueldo del comprador como 3700 S/. trabajando 20 días por mes y 8 horas por día.

$$\text{Costo}_{\text{Enviar PO}} = 15 \text{ min} \left( \frac{3700 \text{ S/./mes}}{20 \frac{\text{días}}{\text{mes}} \times 8 \frac{\text{horas}}{\text{día}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hora}}} \right) = 5.78 \text{ S/}.$$

---

<sup>36</sup> **PO:** Purchase Order u Orden de Compra.

**10.Recepcionar material en el sistema:** Una vez que el material llega al almacén solicitante este debe ser ingresado al sistema informático para que figure en el stock y pueda ser despachado para atender la necesidad operativa. Para esta actividad consideramos una duración de 10 minutos, el sueldo del almacenero como 3500 S/. trabajando 30 días por mes y 10 horas por día.

$$Costo_{Recepcionar} = 10 \text{ min} \left( \frac{3500 \text{ S/./mes}}{30 \frac{\text{dias}}{\text{mes}} \times 10 \frac{\text{horas}}{\text{dia}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hora}}} \right) = 1.94 \text{ S/}.$$

El costo por pedido sería la suma de los costos mostrados anteriormente:

$$C_o = 3.89 + 1.88 + 1.09 + 5.47 + 1.46 + 1.93 + 5.78 + 7.71 + 5.78 + 1.94$$

$$C_o = 36.93 \text{ S/}.$$

Considerando una tasa de cambio de 1 \$=3.10 S/., tenemos:

$$C_o=12\$$$

Para la estimación del parámetro h (Tasa anual del costo de tenencia), utilizaremos como referencia los rangos dados en la tabla 2.1. Estimaremos las tasas de tenencia específicas por cada zona y luego lo promediaremos mediante:

$$h = \frac{h_{ONSHORE} Q_{ONSHORE} + h_{OFFSHORE} Q_{OFFSHORE}}{Q_{ONSHORE} + Q_{OFFSHORE}}$$

Dónde:

$h_{ONSHORE/OFFSHORE}$  = es la tasa anual del costo de tenencia en el almacén en tierra o en mar respectivamente.

$Q_{ONSHORE/OFFSHORE}$  = es el valor del stock en el almacén en tierra o en mar respectivamente.

**Tabla A.1:** Estimaciones de las tasas de costo de tenencia por zona.

Elemento	Onshore	Offshore	Observación
Costo Vivienda	10%	0%	En offshore es 0% ya que el espacio en mar es dado por el cliente.
Costo Inversión	14%	14%	Se estima en 14%.
Costo Laboral	3%	5%	En offshore es mayor ya que se tienen 2 almaceneros, en tierra solo se tiene 1.
Costo manipulación	1.5%	1.5%	Se estima en 1.5%.
Costo misc.	0.5%	0.5%	Se estima en 0.5%.
	29%	21%	

Entonces, tenemos:

$$h_{ONSHORE} = 29\% \text{ y } h_{OFFSHORE} = 21\%$$

$$Q_{ONSHORE} = \$1,236,809.01 \text{ y } Q_{OFFSHORE} = \$1,299,014.30$$

Lo cual nos da un:

$$\mathbf{h=25\%}$$