

**MODELO DE SISTEMA DE CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DE INVENTARIOS
BASADO EN METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN MULTI-CRITERIO PARA
EMPRESAS DE SUMINISTRO DE REPUESTOS AL SECTOR CONSTRUCCIÓN**

ORNELLA NARDUCCI MARÍN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA**

2020

**MODELO DE SISTEMA DE CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DE INVENTARIOS
BASADO EN METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN MULTI-CRITERIO PARA
EMPRESAS DE SUMINISTRO DE REPUESTOS AL SECTOR CONSTRUCCIÓN**

ORNELLA NARDUCCI MARÍN

**Trabajo de grado para optar el título de Especialista en Gerencia de
Mantenimiento**

Director:

MARGARITA SOFÍA NARDUCCI

Ph. D. Ingeniería Electrónica, Master en Investigación en Ingeniería

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA
2020**

DEDICATORIA

A mi madre, quien, con su dedicación y sacrificio, luchó por salir adelante y ofrecernos siempre la mejor educación.

A mi padre, que en paz descanse, quien me enseñó la disciplina y amor por lo que hago.

A mis hermanos, quienes siempre fueron y seguirán siendo mi modelo a seguir.

A mi esposo, por su amor, apoyo y comprensión en todo momento.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS	19
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	19
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2. MARCO TEORICO.....	20
2.1. GESTIÓN DE REPUESTOS PARA MANTENIMIENTO.....	20
2.1.1. RCM.	20
2.1.2. RCS.....	22
2.2. MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN.....	23
2.2.1. Método de clasificación ABC.....	23
2.2.2. Método de clasificación FSN.	25
2.2.3. Método de clasificación SDE.....	25
2.2.4. Método de clasificación VED.....	26
2.2.5. Método de clasificación multi-criterio AHP	26
2.2.6. Masta (multi-attribute spare tree analysis).....	27
2.3. MATRIZ DE CRITICIDAD.....	27
2.4. MÉTODOS PARA PREDICCIÓN DE LA DEMANDA	29
2.4.1. Método de media móvil simple (MM).....	30
2.4.2. Método de media móvil ponderada (MMP).....	30
2.4.3. Suavización exponencial simple (SES)	31
2.4.4. Regresión lineal.....	31
2.4.5. Método Croston (CR)	31
2.4.6. Modelo de Holt.	32
2.4.7. Cálculo del error en los pronósticos	32
2.5. PARÁMETROS DE INVENTARIOS	33

2.5.1. Cálculo del lote económico.....	33
2.5.2. Período de reabastecimiento.....	34
2.6. MANEJO DE BASES DE DATOS (BIG DATA)	34
2.7. LA EMPRESA.....	35
2.8. MARCO LEGAL.....	37
 3. RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS	38
3.1. EVALUACIÓN DEL CASO EMPRESARIAL.....	38
3.2. IDENTIFICACIÓN DE DATOS	39
3.2.1. Ciclos de vida de equipos y repuestos	47
 4. AGREGACIÓN Y REPRESENTACIÓN DE DATOS	51
 5. ANÁLISIS Y VISUALIZACIÓN DE DATOS	53
 6. RESULTADOS	56
 7. CONCLUSIONES.....	60
 8. RECOMENDACIONES	62
 BIBLIOGRAFIA	64
 ANEXOS	66

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación abc	24
Tabla 2. Clasificación fsn	25
Tabla 3. Clasificación sde	25
Tabla 4. Clasificación ved	26
Tabla 5. Categoría de inventarios según su frecuencia de pedidos anuales	29
Tabla 6. Criterios y sub-criterios	42
Tabla 7. Datos básicos necesarios para implementar a metodología multi-criterio	51
Tabla 8. Cantidad de referencias de excavadoras hidráulicas por categoría de inventario	53
Tabla 9. Comparación de resultados de la metodología multi-criterio	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Precio del carbón en dólares en los últimos 3 años.....	16
Figura 2. Cantidad de equipos por línea de producto	17
Figura 3. Matriz de criticidad.....	28
Figura 4. Pasos del ciclo de vida de big data.....	35
Figura 5. Árbol de decisión	39
Figura 6. Diagrama de bloque de criterios y sub-criterios.....	41
Figura 7. Matrices de criticidad de sub-criterios y criterios	43
Figura 8. Cantidad de etsi por grupo de repuestos	44
Figura 9. Precio en miles de pesos de repuesto y cantidad de repuestos en inventario	45
Figura 10. Cantidad de fallas registradas por grupo de repuestos.....	46
Figura 11. Ciclo de vida de equipos y repuestos	47
Figura 12. Ciclo de vida de un equipo y su demanda de repuestos.....	48
Figura 13. Cantidad de equipos por fase del ciclo de vida.....	49
Figura 14. Relaciones de diferentes bases de datos utilizando powerbi.....	52
Figura 15. Cantidad de referencias por fase de ciclo de vida y categoría abc.....	54
Figura 16. Cantidad de referencias por commodity code.....	54
Figura 17. Resultados de ponderación de criterios.....	55
Figura 18. Muestra de ponderaciones de criterios sugiriendo la política abc.....	56
Figura 19. Detalle de ponderación del sub-criterio "seguridad"	58
Figura 20. Detalle de ponderación del sub-criterio "obsolescencia"	58

LISTA DE ANEXOS

Anexo a. Criterios de evaluación de inventario	66
Anexo B. Etapas el big data.....	67
Anexo C. Resultados ponderaciones árbol de decisión.....	68

RESUMEN

TITULO: MODELO DE SISTEMA DE CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DE INVENTARIOS BASADO EN METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN MULTI-CRITERIO PARA EMPRESAS DE SUMINISTRO DE REPUESTOS AL SECTOR CONSTRUCCIÓN¹

AUTOR: Ornella Narducci Marín*

PALABRAS CLAVES: inventario, criticidad, riesgo, confiabilidad, ciclo de vida, probabilidad de falla.

DESCRIPCIÓN:

La demanda de repuestos es un tema muy difícil de predecir y controlar utilizando únicamente la información histórica de consumos o ventas de una empresa. El presente trabajo propone una metodología de clasificación multi-criterio que ayude a los analistas de inventarios de una empresa de suministro de repuestos y servicios al sector de maquinaria de construcción a tomar decisiones sobre qué repuestos son los más adecuados a mantener en stock de acuerdo a las capacidades de la empresa y a las necesidades particulares de las flotas de equipos de los clientes.

Para el planteamiento y demostración de la metodología multi-criterio se parte de la existencia de una base de datos conformada por: registros de falla de los últimos 10 años, estado y operación de equipos de los últimos 12 meses, demanda de consumos de inventarios anual y características propias de los repuestos. Para el manejo de esta información, se emplearán técnicas de Big Data con el fin de poder enlazar las diferentes bases de datos y lograr realizar el análisis planteado por la metodología multi-criterio.

Los criterios definidos para evaluar cada uno de los repuestos son: características del repuesto, demanda, suministro y población de equipos. Estos criterios serán ponderados de acuerdo a su impacto en la empresa. Cada repuesto de acuerdo a su ponderación, será localizado en la matriz de criticidad que indicará la política de inventario que más se ajuste a su necesidad para que el analista tramite su correcta gestión de compra. Como resultado del ejercicio, la empresa contará con una nueva clasificación de repuestos que podrá ser comparada con la que se maneja actualmente para tomar decisiones que afecten positivamente los estados financieros de la compañía.

¹ Trabajo de grado

* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Diseño Industrial. Director: Miguel Enrique Higuera Marín, Diseñador Industrial.

ABSTRACT

TITLE: INVENTORY CONTROL AND OPTIMIZATION SYSTEM MODEL BASED ON MULTI-CRITERIA CLASSIFICATION METHODOLOGY FOR COMPANIES SUPPLYING SPARE PARTS TO THE CONSTRUCTION SECTOR²

AUTHOR: Ornella Narducci Marín*

KEYWORDS: inventory, criticality, reliability, risk, spare parts forecast, failure probability.

DESCRIPTION:

The spare parts demand is a very difficult issue to predict and control using only the historical consumption or sales information of a company. This paper proposes a multi-criteria classification methodology to help inventory analysts of a supplying spare parts and services company to the construction machinery sector to make decisions on which spare parts are best to keep in stock according to the company's capabilities and the particular needs of the customers' equipment fleets.

The approach and demonstration of the multi-criteria methodology is based on the existence of a database made up of: failure records from the last 10 years, status and operation of equipment from the last 12 months, annual inventory consumption demand and characteristics of the spare parts. For the handling of this information, Big Data techniques will be used in order to link the different databases and achieve the analysis proposed by the multi-criteria methodology.

The criteria defined to evaluate each of the spare parts are: characteristics of the spare part, demand, supply and population of equipment. These criteria will be weighted according to their impact on the company. Each spare part, according to its weighting, will be located in the criticality matrix that will indicate the inventory policy that best fits its need so that the analyst can process its correct purchase management. As a result of the exercise, the company will have a new classification of spare parts that can be compared with the one currently handled to make decisions that positively affect the company's financial statements.

² Bachelor Thesis

* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Diseño Industrial. Director: Miguel Enrique Higuera Marín, Diseñador Industrial.

INTRODUCCIÓN

La gestión de inventarios es uno de los principales temas en empresas dedicadas al suministro de repuestos y servicios, pero su vez es una de las tareas más descuidadas, a pesar de ser de suprema importancia en el ciclo de vida de los equipos (Rosienkiewicz et al.). El no uso de una gestión de repuestos eficiente podría ocasionar consecuencias negativas para las empresas por paradas no planeadas, como aumento en los tiempos de respuesta y disminución en la disponibilidad. Para ello la literatura ha resaltado dos características particulares con respecto a este problema: la criticidad de un equipo en una operación y el riesgo de quedar sin inventario para su atención. La solución más fácil pudiera ser abastecerse en exceso tratando de suplir las necesidades de mantenimiento de una forma no controlada. Sin embargo, grandes inventarios de partes generan a la empresa grandes inversiones de capital que pudieran ser mejor invertidas en otras áreas más productivas. Como resultado, la administración efectiva del inventario de repuestos se ha convertido en un tema crítico para las empresas del sector de servicios y de mantenimiento (Ferreira et al.). La clasificación de los repuestos es crucial para poder controlar la gran variedad de referencias que existen para un mismo modelo de equipo. La correcta clasificación de los repuestos, se convierte entonces en un tema esencial para controlar los inventarios de repuestos, y evitar el desabastecimiento y los altos costos de mantenimiento (Zhu et al.).

Para una empresa dedicada al negocio de suministro de equipos, repuestos y servicios del sector de construcción y minero, sectores que muestran un crecimiento de 0,5% y 3,9% del PIB de Colombia respectivamente (PORTAFOLIO), esto se convierte en algo mucho más complejo debido al costo tangible e intangible por desabastecimiento (equipos de clientes fuera de servicio esperando repuestos afectando sus indicadores de mantenimiento y producción, pérdida de futuras

ventas por mala imagen corporativa, entre otros) y por la demanda intermitente, lo que agrega incertidumbre e imprevisibilidad. Como consecuencia, el resultado son pronósticos de repuestos inexactos con altos costos de pedidos en espera y exceso de inventarios de repuestos con baja rotación aumentando la obsolescencia (Ferreira et al.).

Hoy día existen varios métodos que ayudan a la estimación y cálculo de los inventarios (ABC, Just in Time, Stock cero, entre otros), sin embargo, por lo general se basan únicamente en dos criterios; la demanda anual y el costo de los repuestos, dejando a un lado los comportamientos reales y las situaciones impredecibles de la demanda de repuestos. El objetivo de un inventario debe ser tener el repuesto disponible cuando se requiera, para así no afectar la disponibilidad y confiabilidad de los activos productivos.

Para alcanzar altos niveles de producción se requiere minimizar los tiempos fuera de servicio de los activos (Braglia et al.). El presente trabajo tomará como ejemplo una de las empresas de venta de maquinaria para el sector construcción y minero con mayor presencia en Colombia (se omite su nombre por privacidad de la información por lo que de aquí en adelante se le nombrará como “La Empresa”). Esta empresa, más que ser proveedora de equipos, repuestos y servicios, busca ser un aliado estratégico de los clientes ayudando en su transformación positiva a través de soluciones integrales. Es por esta visión de negocio, que se ve la necesidad de lograr optimizar los inventarios, entendiendo que la disponibilidad de repuestos y su pronta entrega al cliente se convierte en uno de los principales factores para ayudarlos a reducir los tiempos de inactividad de sus equipos cuando se produce una falla.

En los últimos 6 años, “La Empresa” ha tenido un incremento de casi el 300% en sus ventas anuales, representadas en un 60% por post-ventas (repuestos), 22% por ventas en servicio (mano de obra) y 18% por venta de equipos de construcción y mineros (Cooper et al.). Este crecimiento acelerado, ha llevado a que sus inventarios hayan aumentado de manera no controlada, generando altos costos por importar casi el 80% de los pedidos en categoría de emergencia y creando al día de hoy grandes cantidades de inventario de obsoletos de gran valor. Se estima que un equipo está diseñado para que tenga una vida útil entre 10 y 30 años (dependiendo del uso y mantenimiento que reciba), y que anualmente consumirá en repuestos alrededor del 2.5% de su valor de venta (Hu et al.), esto último vuelve aún más interesante la necesidad de optimizar los inventarios para buscar tener los repuestos adecuados para los clientes.

A pesar que “La Empresa” registra un aumento importante en las ventas de los últimos 6 años, se debe tener en cuenta que el 82% de las ventas de repuestos están concentradas en el sector minero de carbón, sector que hoy está pasando por una etapa de crisis económica debido al bajo precio de la tonelada de carbón mostrado en la Figura 1(Markets Insider). Esta coyuntura actual se suma a la necesidad de plantear nuevas estrategias de negocio, y de enfocar los esfuerzos en conseguir tener unos inventarios acordes a las necesidades de los clientes, así como también, plantear la necesidad de apuntar al negocio de construcción.

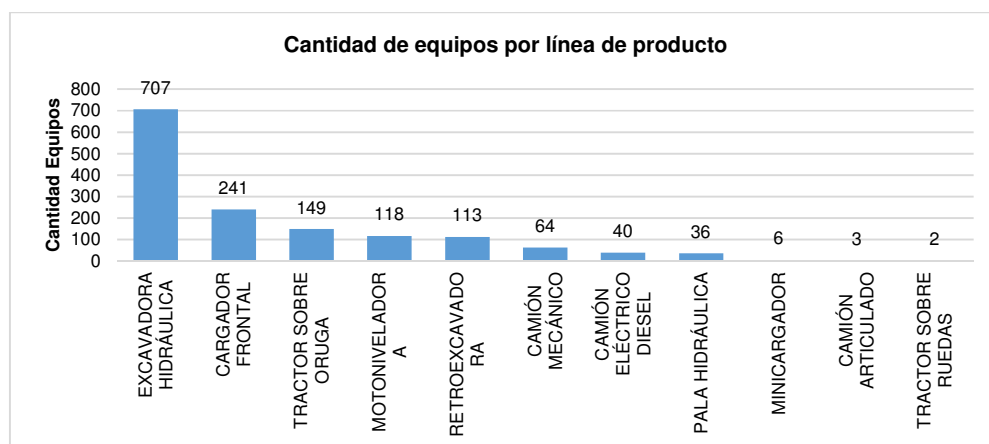
Figura 1. Precio del carbón en dólares en los últimos 3 años



Markets Insider, “Coal PRICE Today | Coal Spot Price Chart.” .

A corte del año 2019, “La Empresa” cuenta con una cuota de mercado colombiano de aproximadamente 10%, con más de 1500 equipos, clasificados en 11 líneas de productos y distribuidos en más de 600 clientes. La extensa línea de productos y la gran cantidad de referencias de repuestos para un mismo modelo de equipo es uno de los factores que más influye para establecer los parámetros de reposición de inventario, agregando un grado más de complejidad por la variedad de referencias que se deben manejar en stock (más de 3000 referencias para un solo modelo de equipo). Por esto, para el presente trabajo se tomará como ejemplo la línea de equipos “excavadora hidráulica”, que representa para “La Empresa”, el 47.8% del total de la población de equipos en Colombia (Figura 2). Este modelo genera el mayor ingreso por cantidad de unidades vendidas, convirtiéndolo en un modelo crítico ya que la falta de repuestos puede llegar a afectar a más de 200 clientes.

Figura 2. Cantidad de equipos por línea de producto



Fuente: Autor de la monografía

Para atender la demanda de repuestos, actualmente “La Empresa” cuenta con bodegas de repuestos ubicadas estratégicamente en las principales sucursales del país (Bogotá, Barranquilla, Medellín y Cali), y en los principales proyectos mineros (Drummond, Carbones del Cerrejón y EPSA). Sin embargo, una de las mayores no conformidades de los clientes son los largos tiempos de espera para entrega de repuestos. Estos se ven mayormente afectados por la falta de un sistema de control oportuno de los reabastecimientos; hoy día el personal de bodegas realiza los pedidos de manera manual de acuerdo a históricos de demanda o solicitudes de ventas, sin identificar los grupos de repuestos realmente críticos para las operaciones del sector construcción.

“La Empresa”, es consciente de la necesidad de formular políticas de gestión de repuestos que puedan ser cambiantes en el tiempo, de acuerdo al comportamiento de la industria, para atender de manera oportuna las necesidades de sus clientes. Por lo general estos clientes son de importancia clave para la economía nacional. Sin embargo, la previsión de la demanda de repuestos, aun conociendo la operación

de los clientes, es un tema de gran incertidumbre que se caracteriza por comportamientos difíciles de predecir que dependen de múltiples factores como, por ejemplo: entorno operativo, equipos complejos, horas de uso, mapas de carga, competencias humanas, entre otras.

Todo lo anterior motiva el desarrollo del presente trabajo que consiste en formular una metodología de clasificación de repuestos para cualquier empresa de suministro de repuestos para maquinaria de construcción. Estará fundamentada en un método de agrupación de repuestos a través de la clasificación multi-criterio para poder estimar con mayor exactitud la política de inventario a aplicar a cada grupo y por tanto poder abastecer a tiempo oportunos los inventarios para dar una mejor respuesta y precios a los clientes.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Formular un modelo de un sistema de control y optimización de inventarios para una empresa de suministro de repuestos, que tenga en cuenta múltiples variables de naturaleza estocástica que inciden en la estimación de la demanda de repuestos, en aras de maximizar disponibilidad de stock, reducir tiempos de espera y costos.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.2.1. Identificar las características con mayor influencia en la demanda de repuestos de acuerdo a la etapa del ciclo de vida de los equipos para establecer los criterios de clasificación.
- 1.2.2. Establecer una relación entre las fases del ciclo de vida de un equipo, su probabilidad de falla y la demanda de repuestos para apoyar la gestión de inventarios.
- 1.2.3. Comparar los resultados obtenidos luego de aplicar la metodología multi-criterio a una lista de repuestos, con la clasificación de criticidad actual asignada por la política de inventario de la empresa.

2. MARCO TEORICO

2.1. GESTIÓN DE REPUESTOS PARA MANTENIMIENTO

La gestión de repuestos es considerada como un caso especial de la gestión de inventarios por tener características especiales, lo que lo hace especialmente complejo. Se pueden mencionar cuatro de estas características:

- Patrones de demanda intermitente que vuelven muy difícil la predicción
- Extensa cantidad y variedad de repuestos, que vuelve complejo el seleccionar una estrategia de control para los repuestos
- Buscar tener la menor cantidad de repuestos posibles para disminuir el riesgo de obsolescencia
- Relación que tiene el consumo de repuestos con las necesidades de mantenimiento, teniendo disponibles repuestos críticos por su impacto en la operación (Hu et al.).

Estas características tan particulares para un tema tan importante en la operación y mantenimiento han impulsado a muchos investigadores a crear estrategias de optimización de inventarios. En el presente trabajo se tomarán las mejores prácticas de algunos autores para formular el modelo de control de inventarios para “La Empresa”.

2.1.1. RCM.

Reliability Centered Maintenance, por sus siglas en inglés o Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Se puede definir como una metodología que tiene en cuenta el contexto operacional de los activos, cuya finalidad es crear la lista de actividades de mantenimiento con sus respectivas frecuencias que se deben

realizar para garantizar que dicho activo cumpla con la función principal para lo cual fue adquirido bajo condiciones normales de operación. Su aplicación logra garantizar altos niveles de disponibilidad y confiabilidad de los equipos. Esta metodología tiene en cuenta múltiples aspectos como: seguridad, costos de mantenimiento, costos por pérdidas en producción, problemas de calidad, entre otros (Gutierrez).

El resultado del RCM será una lista de actividades con sus respectivas frecuencias para mantener las condiciones estándar de los activos. Para ello, cada actividad generará a su vez, una lista de repuestos y/o insumos que serán la base para armar el inventario. Esta lista de repuestos necesita ser evaluada para categorizar el riesgo y priorizar cada repuesto de acuerdo a su impacto en la operación por indisponibilidad, y guiar al analista de inventarios a tomar el mejor criterio de clasificación para cada tipo de repuesto (Braglia et al.).

Para la presente monografía, la cual toma como base de estudio el escenario para una empresa dedicada al suministro de repuestos y servicios a clientes, se entenderá que el resultado de un RCM es la principal base para iniciar la gestión de un inventario confiable para mantenimiento. De poco sirve que una empresa sepa qué actividades debe realizar y cuándo realizarlas, si tiene una alta probabilidad de no contar con los repuestos en el momento en que los necesite. RCM es un proceso largo, dispendioso y propio de cada cliente que dependerá de su propio contexto operacional, lo que se sale del alcance de este tipo de empresa. Esta primera entrada de información de parte de los clientes no es de fácil consecución, sin embargo, en el caso que los clientes estén abiertos a suministrarla, la metodología aquí propuesta podrá utilizarse sin ningún problema.

2.1.2. RCS

Reliability Centered Spare, por sus siglas en inglés o Confiabilidad Basada en Repuestos. El día a día del departamento de logística, creó la necesidad de desarrollar un método de priorización de repuestos asociados a la estrategia de mantenimiento que se generaba después de realizar un RCM. El nombre que le colocaron a ese método fue el de repuestos centrados en confiabilidad o RCS. Esta metodología se aplica después de haber hecho el análisis de modo de efecto de falla, de haber priorizado el riesgo de cada modo y de haber hecho toda la optimización con el árbol de decisión para definir los diferentes tipos de estrategias de mantenimiento y sus repuestos asociados. La lista de repuestos que surge del plan RCM se cruza con el modo de falla para priorizarla y definir cuáles son los repuestos críticos del plan de mantenimiento que almacén debe garantizar tener en inventario para poder ejecutar las actividades. De esta manera, todo el esfuerzo hecho para optimizar el plan de mantenimiento no se verá opacado por la sorpresa de no contar con los repuestos cuando se necesiten.

Así como en el RCM, el método RCS también cuenta con una serie de preguntas que deben ser contestadas en el siguiente orden:

1. ¿Cuáles son los requerimientos de mantenimiento y operación para el equipo? ¿Cuáles son las tareas resultantes del RCM? (este es un resultado propio de cada cliente).
2. ¿Qué pasa si no hay disponibilidad de repuestos? ¿Cuál es la matriz de riesgo?
3. ¿Se puede predecir la demanda de los repuestos que se necesitan?
4. ¿Cuál es el inventario de repuestos que se necesita?

RCS busca conocer las respuestas a estas tres preguntas: ¿Qué tener? ¿Cuánto tener? y ¿Cuándo tenerlo? Entendiendo que no contar con un repuesto cuando el cliente lo necesite cuesta dinero (pérdida de ventas). La metodología RCS ayuda a identificar los repuestos críticos y a predecir su demanda de acuerdo a su comportamiento durante la operación del equipo (que variará de acuerdo al cliente y a su operación), teniendo en cuenta los costos, el ciclo de vida, los tiempos medios entre falla (MTBF), y los tiempos de abastecimiento. RCS entiende que llegar a un nivel de disponibilidad de repuestos del 100% es una meta imposible, razón por la cual se deben priorizar (Brito).

2.2. MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN

Existen muchos métodos para la clasificación de repuestos, tanto cualitativos como cuantitativos. Los métodos cualitativos son más usados para capturar la opinión de los gerentes, mientras que los métodos cuantitativos están basados en información cuantificable de las características de los repuestos (por ejemplo: el costo unitario) (Ferreira et al.). La forma adecuada de clasificar los repuestos sería entonces lograr combinar estos dos. A continuación, se muestran los métodos más utilizados para la clasificación de repuestos:

2.2.1. Método de clasificación ABC. Es un método ampliamente utilizado por su sencillez de aplicación y entendimiento, que ayuda a clasificar los inventarios en 3 grupos, con el objetivo de tener un control más eficiente de cada uno. Se entiende que incluso para una empresa de tamaño mediano, las unidades de inventario pueden subir a miles convirtiendo su manejo en una tarea complicada. El separar los inventarios en 3 grupos ayuda a los analistas de repuestos a manejar cada grupo de acuerdo a sus comportamientos haciendo la tarea un poco más sencilla (Ng). El

análisis ABC utiliza las bases del principio de Pareto, dividiendo los 3 grupos como se detalla en la Tabla 1:

Tabla 1. Clasificación ABC

Grupo	Descripción
A	Ítems de inventario que representan el 70% de los ingresos de la empresa, pero sólo ocupan el 10% del inventario en unidades. Son repuestos críticos para la operación y funcionamiento de la empresa. Costo: alto.
B	Ítems de inventario que representan el 20% de los ingresos de la empresa, y ocupan el 20% del inventario en unidades. Costo: medio.
C	Ítems de inventario que solo representan el 10% de los ingresos de la empresa, pero ocupan el 70% del inventario en unidades. Costo: bajo.

Fuente: W. L. Ng, "A simple classifier for multiple criteria ABC analysis," vol. 177, pp. 344–353, 2007

El método ABC solo tiene en cuenta para su clasificación 2 características: valor unitario y cantidad de unidades, las cuales no alcanzan a dimensionar la variabilidad que se presenta en una gestión de inventario. Para el presente trabajo, entendiendo que el negocio de "La Empresa" es la venta de repuestos, se deben tener en cuenta las múltiples aplicaciones que tiene un mismo modelo de equipo dependiendo del cliente que lo utilice. Enfocando qué es lo que más le beneficia al cliente se pueden agregar las siguientes características al estudio para tener en cuenta: tiempo de espera (la mayor queja del cliente) y la criticidad del repuesto para sus operaciones. Hay otros factores que influyen en los movimientos de los inventarios que también deben ser tenidos en cuenta, como son: costos de inventario, obsolescencia, número de solicitudes por año (demanda, tamaño del pedido, entre otros).

Para ello, parecido al método ABC, también se encuentran otros métodos que clasifican los inventarios en 3 grandes grupos basados en Pareto. Se mencionan los siguientes métodos cuyos rangos de criterios pueden ser ajustados a cada tipo de operación:

2.2.2. Método de clasificación FSN. Clasificación basada en la frecuencia de la demanda o la rotación del inventario. Es particularmente útil para reducir el inventario obsoleto (Devarajan and Jayamohan).

Tabla 2. Clasificación FSN

Grupo	Descripción	Criterio
F	F (Rápido: Fast, en inglés). Ítems que tienen alta demanda	Más de 1 unidad al mes
S	S (Lento: Slow, en inglés). Ítems que tienen una demanda baja	Menos de 1 unidad al mes
N	N (Sin movimiento: Never, en inglés). Ítems sin demanda.	Menos de 1 unidad en 2 años

Fuente: D. Devarajan and M. S. Jayamohan, "Stock control in a chemical firm : combined FSN and XYZ analysis," *Procedia Technol.*, vol. 24, pp. 562–567, 2016

2.2.3. Método de clasificación SDE. Clasificación basada en el tiempo de espera o lead time.

Tabla 3. Clasificación SDE

Grupo	Descripción	Criterio
S	Escasos. Repuestos importados con largos tiempos de espera.	Más de 3 meses de espera.
D	Difíciles. Repuestos importados con tiempos de espera medianos.	Más de 15 días, pero menos de 3 meses.
E	Fácilmente disponibles. Repuestos con tiempos de espera cortos.	Menos de 15 días.

Fuente: D. Devarajan and M. S. Jayamohan, "Stock control in a chemical firm : combined FSN and XYZ analysis," *Procedia Technol.*, vol. 24, pp. 562–567, 2016

2.2.4. Método de clasificación VED. Clasificación basada en la criticidad para la operación (Molenaers et al.):

Tabla 4. Clasificación VED

Grupo	Descripción	Criterio
V	Vitales. Su no disponibilidad conlleva a un alto costo por tiempo de inactividad.	Superior a \$10.000 USD.
E	Esenciales. Su no disponibilidad conlleva a un costo moderado por tiempo de inactividad.	Alrededor de \$1.000USD y \$10.000USD.
D	Deseables. Su no disponibilidad conlleva a un costo insignificante por tiempo de inactividad.	Menor de \$1.000USD.

Fuente: A. Molenaers, H. Baets, L. Pintelon, and G. Waeyenbergh, "Criticality classification of spare parts: A case study," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 140, no. 2, pp. 570–578, 2012

En la aplicación de este método, es importante poder definir antes el término criticidad de un repuesto para la operación. Para ello, se consideran los siguientes criterios: 1) la criticidad del equipo; 2) la probabilidad de falla del repuesto; 3) el tiempo de reabastecimiento; 4) el número de proveedores; 5) la disponibilidad de especificaciones técnicas y; 6) el tipo de mantenimiento (Ferreira et al.).

2.2.5. Método de clasificación multi-criterio AHP (Proceso analítico jerarquizado, o Analytical Hierarchy Process por sus siglas en inglés): AHP es uno de los métodos de toma de decisiones multi-criterio más utilizado gracias a su simplicidad, versatilidad y alta precisión. Es un método que tiene en cuenta criterios tanto cualitativos como cuantitativos. El propósito de usar el método AHP es reducir la complejidad de problemas de toma de decisión convirtiéndolos en un proceso

sistemático y analítico que aborda todos los aspectos del problema, y por tanto ayuda a identificar la alternativa adecuada (Khaira and Dwivedi). En otras palabras, ayuda a organizar los aspectos importantes de un problema en una estructura jerarquizada similar a un árbol genealógico.

2.2.6. Masta (multi-attribute spare tree analysis). Para el control del inventario del presente proyecto se tendrán en cuenta los criterios que se muestran en el

2.2.7. ANEXOS

2.2.8.

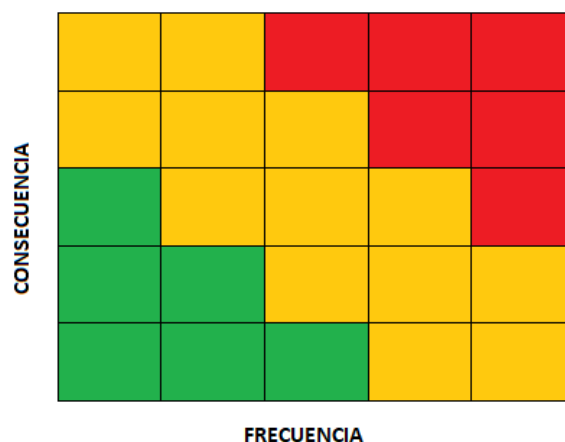
2.2.9. Anexo A. Criterios de evaluación *de inventario* , de acuerdo al método MASTA (Braglia et al.). El enfoque de MASTA se basa en dos pasos sucesivos. En el primero, se reconocen cuatro clases de criticidad y se utiliza un árbol lógico para filtrar los métodos de aprovisionamiento. En la segunda etapa, se cruzan las cuatro clases con posibles estrategias de gestión de inventario, a fin de obtener una matriz de "política de gestión de inventario" (PMI). Sobre la base de esta matriz, se puede derivar la estrategia más apropiada para cada artículo. Este enfoque en dos etapas garantiza la coherencia en la determinación de la forma de llevar a cabo la gestión de inventario en todos los tipos de equipo de las instalaciones.

Cabe resaltar que “La Empresa” en sus procedimientos de reabastecimiento, solo cuenta con un proveedor avalado por fábrica para suministros de repuestos, por lo que este criterio no se tendrá en cuenta para el análisis de criticidad. Los criterios serán evaluados por un grupo multidisciplinario conformado por especialistas en las áreas de mantenimiento, logística, finanzas, comercial y soporte al producto. Cada criterio será calificado de acuerdo a su grado de relación e importancia.

2.3. MATRIZ DE CRITICIDAD

Se utiliza para determinar la criticidad o importancia de un ítem de acuerdo a la ponderación que se les dé a dos categorías; frecuencia y consecuencia. Para el ejercicio del análisis de los inventarios, se evaluará el impacto que tendría la falta de un repuesto en la operación de los clientes. La matriz maneja un código de colores como se muestra en la Figura 3, para diferenciar las áreas de menor y mayor impacto por ausencia de repuestos. **Rojo:** impacto alto (A); **Naranja:** Impacto medio (B); **Verde:** Impacto bajo (C) (Gutiérrez et al.).

Figura 3. Matriz de criticidad



Fuente: E. Gutiérrez, M. Agüero, and I. Calixto, “Análisis De Criticidad Integral De Activos,” no. 58, pp. 1–14, 2007

La utilización de la matriz de criticidad será necesaria para la optimización de los inventarios. Se deben clasificar los repuestos de acuerdo a su criticidad para poder establecer las prioridades y así definir las políticas de inventarios según correspondan.

“La Empresa” maneja actualmente 6 tipos de categoría de repuestos con sus respectivas políticas de gestión de repuestos. Estas 6 categorías se resumirán de

acuerdo a su frecuencia de pedidos en 3 categorías (ABC) como se observa en la Tabla 5:

Tabla 5. Categoría de inventarios según su frecuencia de pedidos anuales

TIPOLOGÍA	REGISTROS DE VENTA	FRECUENCIA	CATEGORÍA
Tipología A	Frecuencia o llamadas de ventas registradas de 10 a 12 anual	Alta Frecuencia	A
Tipología B	Frecuencia o llamadas de ventas registradas de 9 a 7 anual	Alta Frecuencia	A
Tipología C	Frecuencia o llamadas de ventas registradas de 6 a 4 anual	Media Frecuencia	B
Tipología D	Frecuencia o llamadas de ventas registradas de 3 a 2 anual	Media Frecuencia	B
Tipología E	Solo ha tenido una llamada durante los últimos 12 meses	Baja Frecuencia	C
Tipología F	No ha tenido registro de ventas en los últimos 12 meses	Baja Frecuencia	C

Fuente: Autor de la monografía

2.4. MÉTODOS PARA PREDICCIÓN DE LA DEMANDA

La predicción de la demanda de repuestos es uno de los mayores retos para la gestión de los inventarios, mayormente por la necesidad de contar con gran cantidad de datos confiables y la definición correcta de los parámetros que influyen en la demanda. Desde la perspectiva del ciclo de vida de un activo, se pueden diferenciar claramente tres fases principales: período inicial o infancia; período de operación o adolescencia y; período de desgaste o vejez. Para cada etapa del ciclo de vida la demanda de repuestos es diferente, y por tanto también lo será su método de predicción.

2.4.1. **Método de media móvil simple (MM).** Este método es la media de los “n” datos anteriores. Este método es muy simple, pero solo es aplicable para casos de poca demanda o que cambia muy poco en el tiempo. La fórmula usada es el promedio:

Ecuación 1. Media móvil simple

$$F_t = \frac{X_{t-1} + X_{t-2} + \dots + X_{t-n}}{n}$$

Donde:

F_t es el pronóstico de la demanda en el instante t

X_t es el valor actual de la demanda para el instante de tiempo t

2.4.2. **Método de media móvil ponderada (MMP).** Este método otorga mayor peso a los datos más recientes y menor peso a los datos más antiguos. La fórmula utilizada es:

Ecuación 2. Media móvil ponderado

$$F_{t+1} = \frac{n * p_t + (n - 1) * p_{t-1} + \dots + 2 * p_{(t-n)+2} + p_{(t-n)+1}}{n + (n - 1) + \dots + 2 + 1}$$

Donde:

F_{t+1} es el pronóstico de la demanda en el instante t+1

p_t es la demanda para el período (t-n)

n es el peso asignado al período más lejano del tiempo t

2.4.3. Suavización exponencial simple (SES). Este método está basado en el análisis de series de tiempo, particularmente adaptado para períodos de predicción cortos. La fórmula utilizada es:

Ecuación 3. Exponencial simple

$$F_{t+1} = \alpha X_t + (1 - \alpha)F_t$$

Donde:

X_t es el valor actual de la demanda para el instante de tiempo t

F_{t+1} es el pronóstico de la demanda en el instante $t+1$

α es el parámetro de suavizado (entre 0,1 y 0,4) que dependerá de la inestabilidad de la demanda

2.4.4. Regresión lineal. Muestra una relación funcional entre dos o más variables correlacionadas. Es utilizada para pronosticar una variable con base en otra. Esta relación se puede representar con una línea recta ($Y=aX+b$) tan cerca a cada punto como sea posible minimizando el cuadrado de la suma de las diferencias de los datos. Este método es particularmente útil para pronósticos a largo plazo.

2.4.5. Método Croston (CR). Este método tiene en cuenta el tamaño de la demanda y tiempo entre pedidos. Hace estimaciones por separado del tiempo entre pedidos consecutivos (P_t) y el tamaño del pedido (Z_t). Las fórmulas utilizadas son:

Ecuación 4. Método croston

$$Z_t = X_t + (1 - \alpha)Z_{t+1}$$

$$P_t = G_t + (1 - \alpha)P_{t+1}$$

Donde:

X_t es el valor de la demanda en el instante t

G_t es el valor real del tiempo entre pedidos consecutivos en el instante t
 α es la constante de suavizado ($0 - 1$)

Entonces, la predicción de la demanda para un período de tiempo es:

Ecuación 5. Predicción de demanda - Croston

$$F_{t+1} = \frac{Z_t}{P_t}$$

F_t es el pronóstico de la demanda en el instante t

2.4.6. Modelo de Holt. Este modelo da más peso a los datos recientes y tiene en cuenta efectos estacionales que dependen del tiempo.

Ecuación 6. Modelo Holt

$$\begin{aligned} P_{t+1} &= S_t + b_t \\ S_t &= \alpha * X_t + (1 - \alpha) * (S_{t-1} + b_{t-1}) \\ b_t &= \beta * (S_t - S_{t-1}) + (1 - \beta) * b_{t-1} \end{aligned}$$

Donde:

P_t es el pronóstico para el tiempo t

S_t es el nivel

b_t es la tendencia

$$S_1 = X_1 ; \quad b_t = \frac{X_n - X_1}{n - 1} ; \quad \alpha > 0,1 ; \quad \beta < 0,35$$

2.4.7. Cálculo del error en los pronósticos. Posterior al cálculo del valor pronosticado se calcula su error con el valor real del período correspondiente.

Ecuación 7. Error de pronóstico

$$E_t = Y_t - F_t$$

Donde:

E_t es el error del pronóstico del tiempo t

Y_t es el valor real para el período t

F_t es el valor pronosticado

2.5. PARÁMETROS DE INVENTARIOS

Una vez que se conozcan cuáles son los repuestos que se necesitan para la operación de los clientes, y se hayan estimado sus pronósticos de demanda, es necesario conocer la cantidad que se debe tener en inventario y con cuánto tiempo de anticipación. Para ello se cuentan con las siguientes formulas:

2.5.1. Cálculo del lote económico

Ecuación 8. Cálculo de lote económico

$$q_e = \sqrt{\frac{2 * K * D}{b * P}}$$

Donde:

q_e es el lote económico a comprar

K es el costo total de una orden de compra

D es la demanda anual de cada repuesto

b es el precio unitario de cada repuesto

P es la tasa anual por almacenamiento

2.5.2. Período de reabastecimiento

Ecuación 9. Período de reabastecimiento

$$n = \frac{D}{q_e}$$

Donde:

D es la demanda

q_e es el lote económico

n es el período de reabastecimiento

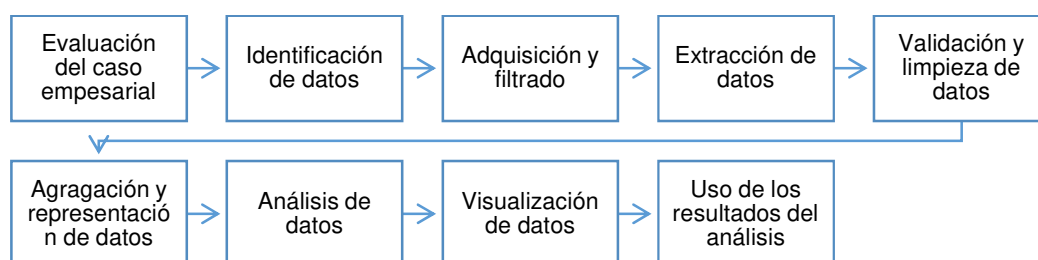
2.6. MANEJO DE BASES DE DATOS (BIG DATA)

Con el objetivo de poder analizar y correlacionar las múltiples bases de datos de “La Empresa”, será necesario aplicar los pasos definidos en un proceso del análisis de Big Data.

De acuerdo a la escuela Arcitura(Inc), Big Data es un campo orientado al análisis, procesamiento y almacenamiento de grandes colecciones de datos que, con frecuencia, provienen de distintas fuentes. Por lo general, se requieren soluciones y prácticas de Big Data cuando la tecnología tradicional de análisis, procesamiento y almacenamiento de datos no es suficiente. Particularmente, Big Data aborda distintos requisitos, como la combinación de múltiples Datasets no relacionados, el procesamiento de grandes cantidades de datos sin estructurar y la recopilación de información oculta con plazos de tiempos definidos. Por medio de las soluciones de Big Data se pueden realizar tareas complejas de análisis, con el fin de obtener resultados de análisis profundamente significativos e intuitivos para el beneficio de “La Empresa”. [7]

El análisis de Big Data se diferencia del análisis de datos tradicional principalmente por las características de volumen, velocidad y variedad de los datos procesados. A fin de abordar la gran variedad y grandes volúmenes de información, se aplican 9 pasos del ciclo de vida de Big Data que son explicados un poco más en detalle en el Anexo B.

Figura 4. Pasos del ciclo de vida de Big Data



Fuente: A. E. Inc, “Arcitura _ Big Data Science Certified Professional (BDSCP).” [Online]. Available: www.bigdatascienceshool.com

2.7. LA EMPRESA

“La Empresa” está orientada a la fabricación de equipos y suministro de repuestos para la industria minera y de construcción. Cuenta con respaldo internacional basado en la calidad y confianza de sus equipos, suministros, soporte al producto y una amplia presencia a nivel Mundial. “La Empresa” está presente en más de 250 países alrededor del mundo, y ha logrado posicionarse en Latinoamérica en 19 países a través de su red de distribuidores siendo líder en la venta de equipos, suministros, soporte al producto y servicio postventa, generando así una oferta integral y global para todos sus clientes.

“La Empresa” tiene una fuerte presencia en territorio nacional con más de 1400 equipos. Los clientes y sus equipos son atendidos por 5 sedes principales

localizadas estratégicamente para dar una mejor atención a los clientes de acuerdo a la cercanía de las flotas de equipos.

La misión de “La Empresa” en Colombia es asociarse directamente con los clientes para ayudarles a alcanzar la meta de cero daños, máximo nivel de producción y lograr el costo de ciclo de vida útil más bajo para sus operaciones. El propósito es ser protagonista de la transformación positiva de Colombia y su gente a través de la entrega de soluciones únicas y sin rivales a los clientes.

La metodología de trabajo está basada en 7 principios (optimizar los procesos de la cadena de valor): 1) Compromiso con la calidad y la confiabilidad; 2) Orientación al cliente; 3) Definición causa raíz; 4) Filosofía del lugar de trabajo (GEMBA); 5) Implementación de políticas; 6) Colaboración con los socios comerciales; 7) Desarrollo de los recursos humanos.

“La Empresa” brinda soluciones inspiradas en la innovación, marcando con sus productos y procesos la vanguardia a nivel mundial en tecnología. Se basa en una política de desarrollo sustentable que permite investigar y desarrollar tecnologías de primer nivel, dentro de las cuales vale la pena mencionar las siguientes:

MODULAR SYSTEMS: Modular IntelliMine Suite cumple con las necesidades de optimización, seguridad, monitoreo, análisis y estado de los activos de la mina. Este conjunto de productos es la solución de gestión de minas más completa disponible en la actualidad y se puede configurar para satisfacer las necesidades de cualquier operación. Los productos IntelliMine optimizan todo el ciclo, ahorrando a clientes de todo el mundo millones de dólares cada año y ayudándolos a superar los objetivos de producción.

MONITOREO SATELITAL EN TIEMPO REAL: Es el sistema de monitoreo para equipos de construcción y mineros que está a la vanguardia en tecnología

inalámbrica, es amigable y de fácil acceso por internet, atributos que le permiten entregar toda la información cuando y donde lo requiera el cliente. Permite acceder de manera remota a la información de la operación de los equipos y conocer la condición de los componentes mayores.

SYSTEM APPLICATION AND PRODUCTS IN DATA PROCESSING (SAP Business One): es un sistema formado por módulos que abarca casi todos los aspectos de la administración de una empresa. CRM (Customer Relationship Management), SRM (Supplier Relationship Management), PLM (Product Lifecycle Management), SCM (Supply Chain Management) y HCM (Human Capital Management).

SPARE PARTS MAP: Base de datos que facilita el diligenciamiento de reportes y búsqueda de fallas de producto, consultas técnicas, anuncios de mejoras de producto y mejoras en procedimientos de todas las líneas a nivel mundial. El objetivo principal de esta base de datos apunta a encontrar el origen de un posible problema de producto y evitar que ocurra nuevamente.

MICROSOFT POWER BI: es una aplicación de Business Intelligence que puede ser usada por cualquier usuario de la organización y que permite organizar y visualizar la información corporativa desde distintas fuentes de forma detallada y organizada para mejorar la toma de decisiones

2.8. MARCO LEGAL

Normas Internacionales de Información Financiera (NIIF): estándares internacionales de contabilidad decretados por el International Accounting Standards Board (IASB), para reportar los estados financieros de una empresa.

3. RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

3.1. EVALUACIÓN DEL CASO EMPRESARIAL

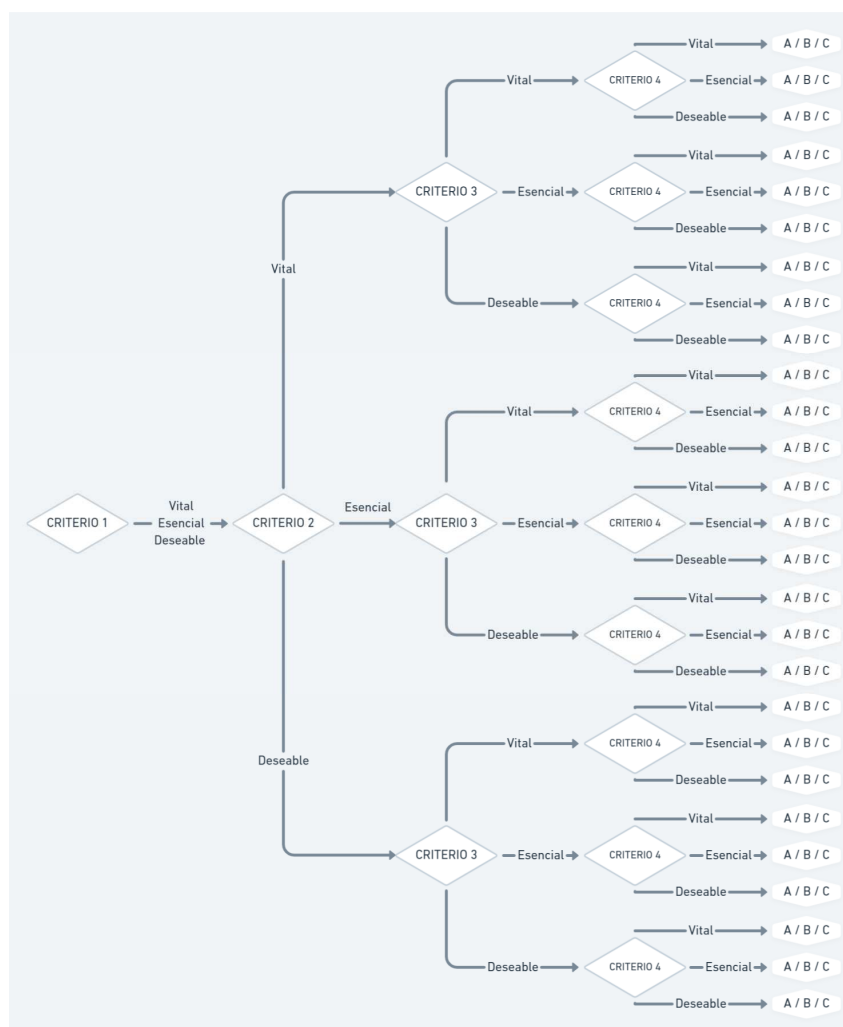
Es bien sabido que la administración de repuestos de inventarios es difícil debido a que los repuestos pueden ser costosos, su demanda es altamente errática e intermitente, y su escasez significa grandes pérdidas para una empresa. Además, algunos repuestos pueden llevar a aumentar la obsolescencia por su baja rotación y aplicaciones específicas(Dekker et al.). Estas son algunas de las razones por las cuales los departamentos de logística e inventarios de las empresas generalmente tienen problemas para lograr el equilibrio adecuado entre la tendencia de inventario, el desabastecimiento y los costos de obsolescencia, al tiempo que ofrecen precios competitivos a los clientes.

Para la empresa en estudio, este es el caso. Se tiene registro de un sobre abastecimiento de repuestos que ha incrementado los niveles de obsolescencia (inventario de lento movimiento) y llevado a tener una rotación anual menor a 1. El sobre abastecimiento es el resultado de varios años de pedidos de inventarios desmesurados por la premura de atender a clientes sin antes analizar sus verdaderas necesidades y compromisos. “La Empresa” podría ganar mucho si se pudiera pronosticar mejor la demanda de repuestos, por lo que uno de sus principales objetivos incluidos en el plan estratégico del año 2020 es la aplicación de la metodología multi-criterio expuesta en el presente trabajo que estará enfocada en identificar y disminuir el inventario de obsoletos, disminuir a 1/3 el inventario actual para contar con un stock acorde a las necesidades de los clientes y la población de equipos, aumentar la rotación anual, y optimizar los espacios de almacenamiento.

3.2. IDENTIFICACIÓN DE DATOS

El primer paso de la metodología multi-criterio es identificar cuáles son los criterios con mayor influencia en el manejo del inventario y dibujar el árbol de decisión que indicará la política de inventario a aplicar a cada repuesto. En la Figura 5 se observa el árbol de decisión que se plantea para este trabajo. Así mismo, en el ANEXO C se encontrará el resultado de cada camino del árbol de decisión.

Figura 5. Árbol de decisión



Fuente: Autor de la monografía.

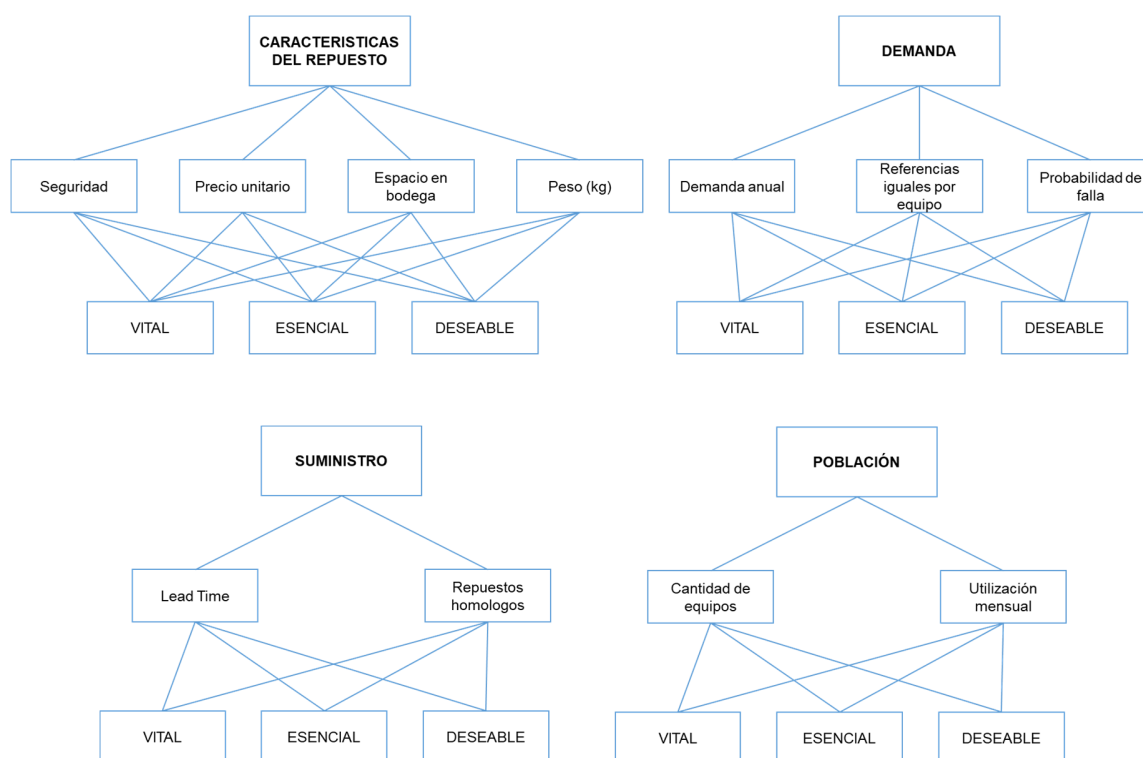
El camino es definido por las salidas de cada nodo (vital, esencial y deseable). La salida corresponde a la política de inventario que se sugiere aplicar a cada repuesto que cumpla con la ruta evaluada.

Los 4 criterios que fueron definidos para realizar la evaluación del inventario son:

- *Características del repuesto*: incluirá características físicas y de seguridad. Se considerarán los sub-criterios de seguridad (su ausencia puede afectar a la máquina o a la persona), precio (altos costos de adquisición), peso y volumen (espacio disponible en bodega y facilidad para manipularlo y almacenarlo).
- *Demanda*: Se tendrá en cuenta el histórico de demanda anual, si se cuenta con referencias iguales o redundantes por equipo y su probabilidad de falla (que puede aumentar la demanda de manera imprevista).
- *Suministro*: se tendrá en cuenta los tiempos promedios de entrega de repuestos al cliente y el impacto que su ausencia puede causar por tener equipos fuera de servicio, y si se cuenta por repuestos homólogos o intercambiables dentro del inventario que puedan suplir la necesidad de una referencia.
- *Población*: se tendrá en cuenta la cantidad real de equipos que se encuentran en territorio nacional y que estén reportando información de utilización. De esta manera se podrá evaluar de manera más precisa las necesidades reales del mercado y se podrá estimar de manera más acertada la demanda a corto y mediano plazo.

Para llegar a ponderar cada criterio, será necesario definir varios sub-criterios que incluyan las características variables que mayor influencia tengan en la toma de decisión del analista de repuesto. Los diagramas de bloques de los 4 criterios con sus respectivos sub-criterios son mostrados en la Figura 6 mostrando cómo será el proceso de ponderar a los sub-criterios:

Figura 6. Diagrama de bloque de criterios y sub-criterios



Fuente: Autor de la monografía. Basado en L. M. D. F. Ferreira, I. Maganha, V. S. M. Magalhães, and M. Almeida, "A Multicriteria Decision Framework for the Management of Maintenance Spares - A Case Study," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 531–537, 2018.

De acuerdo a la tabla de criterios propuesta por el método MASTA que se encuentra en el
ANEXOS

Anexo A, se han ajustado los criterios teniendo en cuenta los que más afectan al inventario de “La Empresa” y que más se ajustan a sus necesidades. Los criterios que se utilizarán para el análisis están enunciados en la Tabla 6. Estos criterios y sus niveles de criticidad fueron analizados con un grupo experto de colaboradores para el caso de estudio de “La Empresa”.

Tabla 6. Criterios y sub-criterios

CRITERIOS	SUB CRITERIOS	VITAL	ESENCIAL	DESEABLE
Características del repuesto	Seguridad	ETSI = 0	$1 \leq \text{ETSI} \leq 3$	ETSI > 3
	Precio unitario	Precio unitario $\geq 10.000\text{USD}$	$1.000\text{USD} < \text{Precio unitario} < 10.000 \text{ USD}$	Precio unitario $\leq 1.000\text{USD}$
	Espacio bodega	Volumen > 1m ³	$0,5\text{m}^3 \leq \text{Volumen} \leq 1\text{m}^3$	Volumen < 0,5m ³
	Peso en bodega	Peso > 500kg	$100\text{kg} \leq \text{Peso} \leq 500\text{kg}$	Peso < 50kg
Demanda	Demanda anual	Demanda < 1	$1 \leq \text{Demanda} < 4$	Demanda ≥ 4
	Probabilidad de falla	TSI ≤ 3 veces	$3\text{veces} < \text{TSI} < 10\text{veces}$	TSI ≥ 10 veces
Suministro	Inventario	Inventario ≥ 10	$1 \leq \text{Inventario} < 10$	Inventario < 1
	Obsoleto	Referencia ≥ 5 años	$2 \text{ años} < \text{Referencia} < 5 \text{ años}$	Referencia ≤ 2 años
	Sustitución / Homologación	Inventario de Homologo = 0	$0 < \text{Inventario de Homologo} < 10$	Homologo ≥ 10
Población	Cantidad de equipos por Modelo	Equipos $\geq 10\%$ población K	$10\% \text{ población K} < \text{Equipos} < 41\% \text{ población K}$	Equipos $\geq 41\%$ población K
	Utilización	Uso ≤ 125 horas/mes	$125 \text{ horas/mes} < \text{Uso} < 250 \text{ horas/mes}$	Uso ≥ 250 horas/mes

Fuente: Autor de la monografía.

La información se obtendrá de 4 fuentes de datos suministrados por “La Empresa”:

- Características del repuesto: registro de repuestos por modelos
- Demanda: Histórico de ventas (SAP)

- Suministro: Información de inventario (SAP)
- Datos de población: Sistema de monitoreo satelital

Después de analizar los sub-criterios y sus respectivos pesos de criticidad, se realiza una matriz con las diferentes combinaciones que asocian las criticidades con cada uno de los criterios de evaluación. Se ponderan tanto las criticidades como los sub-criterios con números del 1 al 3, siendo los números de menor valor los que representan menor influencia o importancia para las operaciones de los clientes y de “La Empresa”. Los resultados se muestran a continuación:

Figura 7. Matrices de criticidad de sub-criterios y criterios

		Peso	VITAL 3	ESENCIAL 2	DESEABLE 1
CRITERIOS	SUB CRITERIOS				
	Peso				
Características del repuesto	3	Seguridad	9	6	3
	2	Precio unitario	6	4	2
	1	Espacio bodega	3	2	1
	1	Peso en bodega	3	2	1
Demanda	3	Demanda anual	9	6	3
	2	Probabilidad de falla	6	4	2
Suministro	3	Inventario	9	6	3
	2	Obsoleto	6	4	2
	1	Sustitución / Homologación	3	2	1
Población	3	Cantidad de equipos por	9	6	3
	2	Utilización	6	4	2

		Peso	VITAL 3	ESENCIAL 2	DESEABLE 1
CRITERIOS	Peso				
Características del	1		3	2	1
Suministro	2		6	4	2
Demanda	3		9	6	3
Población	4		12	8	4

Vital

Esencial

Deseable

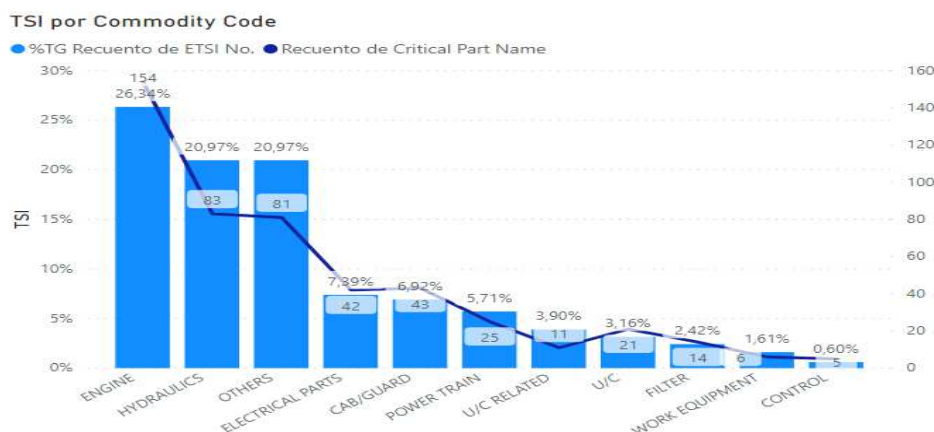
Fuente: Autor de la monografía

Los 3 niveles que se observan (Vital, Esencial, Deseable), indicarán los 3 grupos en que quedarán clasificados los repuestos para así poder definir el tipo de política a aplicar a cada uno. El grupo “deseable” indica que es un repuesto que es atractivo de tener en inventario y su falta afecta a la operación del cliente. El grupo “esencial” son los repuestos que aceptan un mayor tiempo de planeación y por tanto puede que no se requieran físicamente en el inventario. El grupo “vital”, señala aquellos repuestos que no son atractivos de tener en inventario y solo deberán pedirse bajo solicitudes del cliente. Para el caso de estudio “La Empresa” cuenta con todos los datos señalados en la Tabla 6, sin embargo, si este ejercicio quisiera replicarse a otra empresa, pudiera hacerse sin ningún inconveniente con mayor o menor cantidad de criterios. La metodología admite cambios en los procedimientos para adaptarse a las necesidades y/o solicitudes particulares de los negocios.

A continuación, se mencionan unos ejemplos de algunas consideraciones iniciales para evaluar los sub-criterios. Se nombran también los análisis de los sub-criterios de seguridad, precio unitario y probabilidad de falla.

- **SEGURIDAD – ETSI (Escalated Technical Service Information):**

Figura 8. Cantidad de ETSI por grupo de repuestos

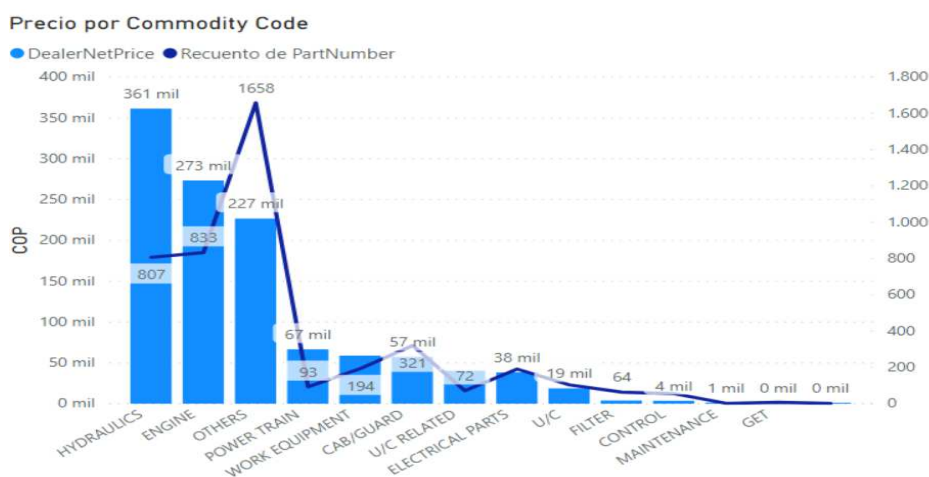


Fuente: Autor de la monografía.

En temas de seguridad el 82.45% de los reportes de falla están asociados a 360 referencias distribuidos en repuestos de motor, sistema hidráulico, otros, partes eléctricas y repuestos de la cabina. El código de producto (commodity code) “otros”, hace referencia a todas las referencias periféricas del equipo y componentes mayores. Por ejemplo: alternadores, tuberías, arandelas, tornillería, etc.

- **PRECIO UNITARIOS Y CANTIDAD DE REPUESTOS**

Figura 9. Precio en miles de pesos de repuesto y cantidad de repuestos en inventario

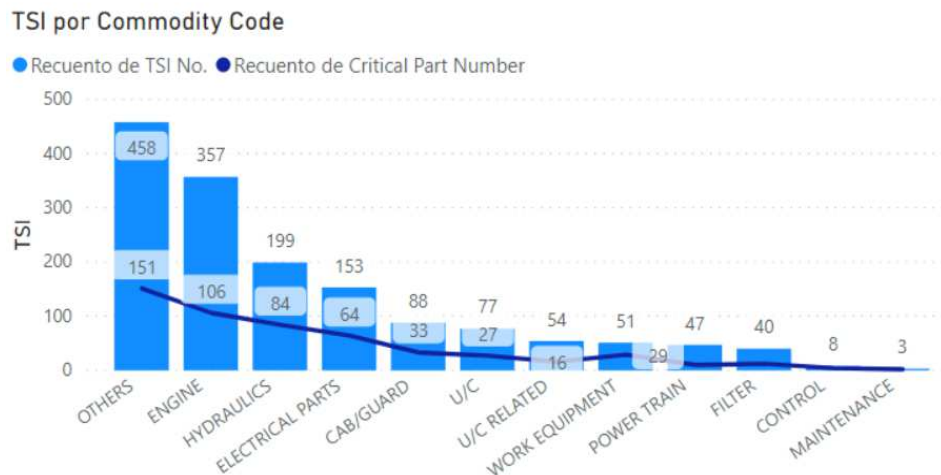


Fuente: Autor de la monografía.

Los repuestos con mayor costo y que representan el 80.64% de la inversión en inventario están distribuidos en un total de 3391 referencias y clasificados en repuestos hidráulicos, otros, de motor y de tren de potencia.

- **PROBABILIDAD DE FALLA**

Figura 10. Cantidad de fallas registradas por grupo de repuestos



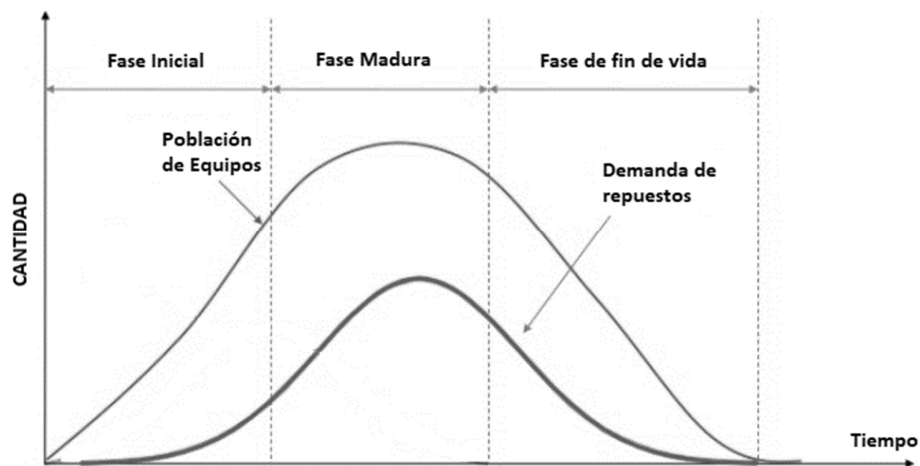
Fuente: Autor de la monografía.

Se observa que, del total de repuestos de excavadoras, 1535 referencias han tenido asociados reportes de falla en los últimos 10 años. El 81,73% de los repuestos están clasificado dentro de los grupos otros, motor, sistema hidráulico, componentes eléctricos y repuestos de cabina.

Las anteriores figuras dejan en evidencia la relación que tienen los repuestos a pesar de estar siendo evaluados por criterios distintos. Se observa que, los grupos de repuestos que más influencia presentan son otros (por su gran cantidad de unidades y variabilidad de referencias), motor, sistema hidráulico y componentes eléctricos.

3.2.1. Ciclos de vida de equipos y repuestos. Tanto los repuestos como los equipos exhiben un patrón de ciclo de vida dividido en tres grandes fases: crecimiento inicial, madurez y fin de vida, como se puede apreciar en la Figura 11(Dekker et al.). Ésta figura expone cómo a medida que aumenta la cantidad de equipos operando así aumentará la demanda de repuestos para su operación y mantenimiento. Así mismo, se aprecia cómo, a medida que los equipos salen del mercado o son reemplazados por un modelo nuevo, su demanda de repuestos disminuye hasta no necesitar más repuestos. Entonces, de acuerdo a la fase en que se encuentre la población de equipos, así será su demanda de repuestos para su mantenimiento.

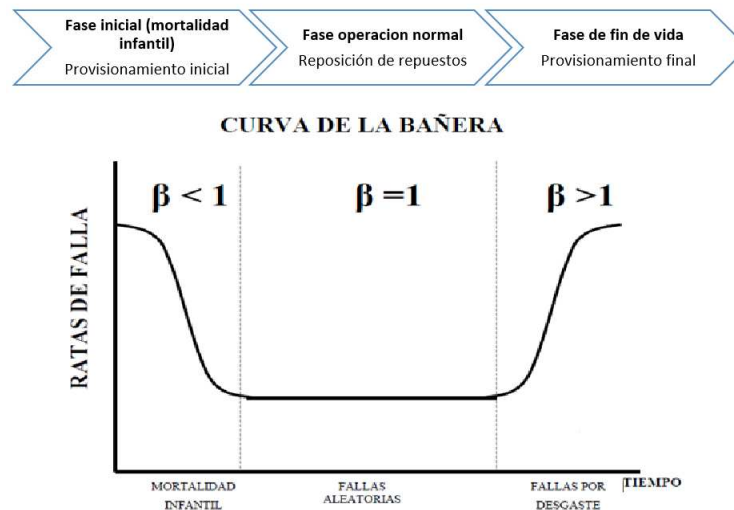
Figura 11. Ciclo de vida de Equipos y Repuestos



Fuente: R. Dekker, Ç. Pinçe, R. Zuidwijk, and M. N. Jalil, "On the use of installed base information for spare parts logistics: A review of ideas and industry practice," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 143, no. 2, pp. 536–545, 2013

También se deben mencionar las tres fases del ciclo de vida de un equipo con relación a su probabilidad de falla. Estas fases se pueden delimitar por sus horas de uso, de acuerdo a los tiempos establecidos por cada fabricante. La Figura 12 complementa la Figura 11, ya que en ésta se relaciona cada etapa con la probabilidad de falla de acuerdo a la curva de la bañera:

Figura 12. Ciclo de vida de un equipo y su demanda de repuestos



Fuente: Autor de la monografía

Fase inicial: incluye la compra inicial de repuestos de mantenimiento junto con la compra de un equipo nuevo. Esta es también la fase con mayor probabilidad de falla por problemas de producto o garantías.

Fase operación normal: se refiere al periodo operativo de los equipos. Se realizan mantenimientos preventivos para prevenir fallas. Es una etapa estable con fallas aleatorias que dependerán del tipo de operación y mantenimiento aplicado. La gestión de repuestos debe ser optimizada para poder suplir los requerimientos de los equipos de acuerdo a sus condiciones operacionales.

Fase de fin de vida: fase en donde la probabilidad de falla aumenta nuevamente por el grado de desgaste que tenga el equipo. En esta fase se define si los repuestos se reutilizarán, repararán o se darán de baja. Si la decisión es dar de baja, puede ser necesario establecer un pedido de repuestos final o última compra.

Las gráficas anteriores muestran cómo las prioridades de repuestos para una máquina cambian de acuerdo a la fase de su ciclo de vida, por tanto, la estimación

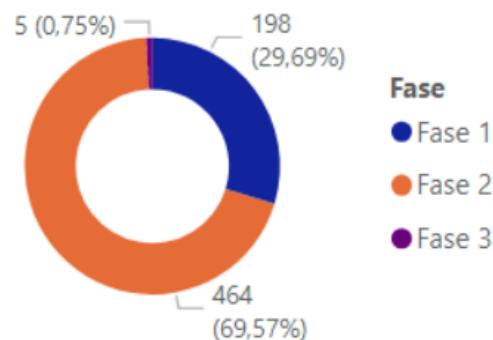
de la demanda de repuestos no puede tratarse por igual a lo largo de dichos ciclos de vida y deberán ser analizados por separado.

Para el caso de estudio las fases se definen de acuerdo a manuales del fabricante:

- Fase 1: de 0 a 6000 horas de operación.
- Fase 2: de 6001 a 35000 horas de operación.
- Fase 3: superior a 35001 horas de operación.

Se grafican todos los seriales de equipos de excavadoras hidráulicas en un gráfico de dispersión de acuerdo a su ubicación geográfica (eje vertical; latitud) y horas de trabajo (eje horizontal) diferenciando por horas las 3 fases del ciclo de vida (Figura 13). Se observa que el grupo de equipos, se encuentra mayormente en la Fase 2 (fase operativa) representados en un total 464 equipos que equivalen al 69,6% de la población

Figura 13. Cantidad de equipos por fase del ciclo de vida



Fuente: Autor de la monografía

En la figura anterior también se observa que hay 5 equipos en la Fase 3, a quienes es necesario definir cuál será su futuro (reparación mayor o disposición final) para

provisionar los repuestos para cada escenario. Otro factor que tiene alta influencia en la definición de la fase del ciclo de vida son las horas de operación mensuales o anuales de los equipos. En la gráfica se observa que hay un grupo de excavadoras que están a pocas horas de pasar de la Fase 2 a la Fase 3, por lo que resulta de mucha utilidad conocer el tiempo en que pasarán de una fase a otra para el control de inventarios. Este dato puede ser analizado individualmente, ya que cada equipo es independiente del otro.

4. AGREGACIÓN Y REPRESENTACIÓN DE DATOS

Para realizar la ponderación de criterios se necesitará información mínima suficiente para establecer las relaciones entre las diferentes bases de datos. En las siguientes tablas se indicarán los datos mínimos para realizar las ponderaciones y los datos que pueden ser opcionales o deseables para dar mayor peso a las ponderaciones. La siguiente información se obtiene de las diferentes plataformas tecnológicas con que cuenta “La Empresa” y será relacionada por medio de campos comunes entre ellas:

Tabla 7. Datos básicos necesarios para implementar a metodología multi-criterio

CRITERIOS	DATOS NECESARIOS	DATOS OPCIONALES
Características del repuesto	Boletines de seguridad asociados	
	Costo interno	
	Dimensión - Alto	
	Dimensión - Ancho	
	Dimensión - Longitud	
	Parte número	
	Peso	
	Precio de venta	
Demanda	Cantidad de repuestos por equipo	Clasificación ABC
	Demanda últimos 12 meses	Demanda últimos 24 meses
	Cantidad de reportes de falla asociados	Demanda últimos 36 meses
	Horometro al momento de falla	
	Parte número	
	Descripción de parte número	
	Nivel en equipo 1 (Macro sistema)	
Suministro	Nivel en equipo 2 (Sistema)	
	Tiempo de entrega	Cantidad en stock
	Código de intercambiabilidad	Medio de envío

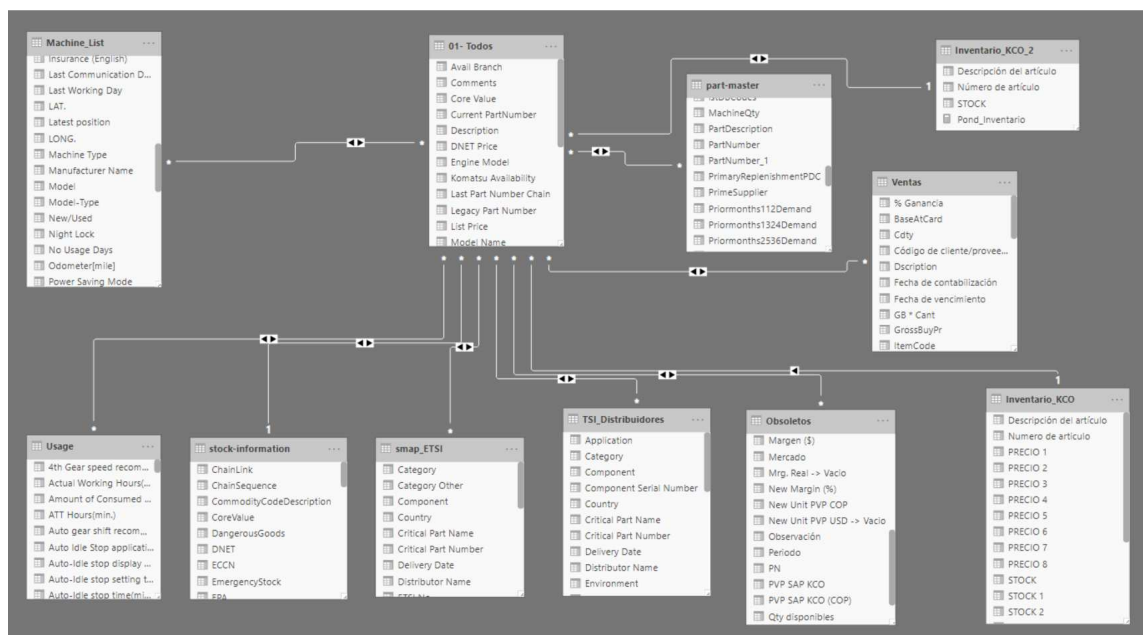
Población	Horas de trabajo mensual	Altitud
	Latitud	Contrato de servicio
	Lectura de horometro	Días sin utilización
	Longitud	Fecha de entrega inicial
	Modelo	Horas de desplazamiento
	Nombre del cliente	Número interno del cliente
	Serial del equipo	Tipo de aplicación
	Tipo de equipo	Última ubicación
	Última fecha de comunicación	Último día de trabajo

Fuente: Autor de la monografía

Las tablas de información se unen a través de campos comunes entre ellas utilizando Microsoft Power BI como herramienta de integración. Los campos utilizados para enlazar las tablas son: Modelo y Parte Número.

La unión de las diferentes tablas se puede apreciar en la Figura 14:

Figura 14. Relaciones de diferentes bases de datos utilizando PowerBI



Fuente: Autor de la monografía

5. ANÁLISIS Y VISUALIZACIÓN DE DATOS

“La Empresa” cuenta a corte de 2019 con un total de 17.313 ítems para inventario registrados en el sistema de información, los cuales se encuentran pre-clasificados en tres categorías (ABC) basados únicamente por su demanda anual y del criterio del analista de repuestos. Para reducir la dimensión del análisis, se tomará solo el listado de repuestos que aplica para el modelo de equipo Excavadora Hidráulica como se observa en la Tabla 8.

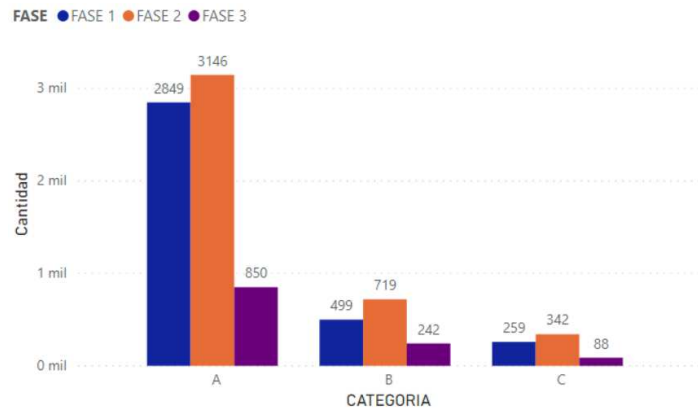
Tabla 8. Cantidad de referencias de Excavadoras Hidráulicas por categoría de inventario

CATEGORIA	TODOS LOS EQUIPOS	EXCAVADORAS HIDRÁULICAS	%
A	10563	3400	74,82%
B	3763	773	17,01%
C	2845	371	8,10%
Sin categoría	142	2	0,044%
TOTALES	17313	4544	100,00%

Fuente: Autor de la monografía

Este listado de 4544 ítems es analizado de acuerdo a la etapa del ciclo de vida. El ciclo de vida influirá en las políticas de control de inventarios que se deberán aplicar a cada grupo de repuestos. Se puede observar en la Tabla 8 la mayor cantidad de repuestos de las Fases 1 y 2 están clasificados en la categoría “A” de inventarios, llevando a tener un inventario con sobre abastecimiento.

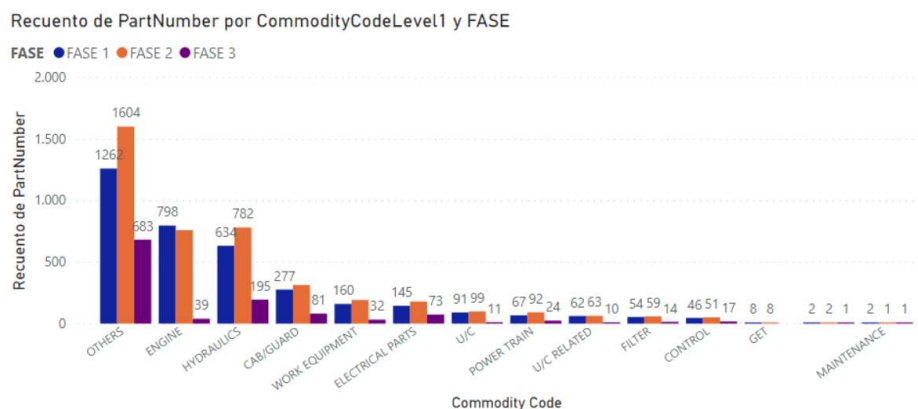
Figura 15. Cantidad de referencias por fase de ciclo de vida y categoría ABC



Fuente: Autor de la monografía

Los códigos de repuestos (commodity code) con mayor representación en los inventarios corresponden a repuestos otros, motor y sistema hidráulico para los equipos en Fase 1 y Fase 2. Mientras que para los equipos en Fase 3, se observa que hay una disminución esperada en los repuestos, ya que por su condición ya son máquinas que están por retirarse del mercado y su consumo de repuestos debe disminuir

Figura 16. Cantidad de referencias por commodity code



Fuente: Autor de la monografía

Con la ayuda de PowerBI, se realizan las ponderaciones de los sub-criterios y criterios teniendo en cuenta las 3 fases del ciclo de vida de los equipos. Cada grupo de resultados deberá ser analizado por separado, entendiendo que el comportamiento de cada fase es diferente. En las siguientes imágenes se observa una muestra de los resultados luego de las ponderaciones de cada sub-criterio:

Figura 17. Resultados de ponderación de criterios

PartDescription	Pond_ETSI	Pond_Precio	Pond_Volumen	Pond_Peso	Pond_Demanda	Pond_TSI	Pond_Inventario	Pond_Obsoleto	Pond_Homologo	Pond_Modelo	Pond_Usage
COTTER PIN	1	3	3	3	3	1	1	3	1	2	1
PIN	1	3	3	3	2	1	3	3	1	1	2
SWITCH	1	3	3	3	1	1	2	3	1	1	1
RELAY SWITCH	1	3	3	3	3	1	2	3	3	2	1
HORN (HIGH TONE	1	3	3	3	3	1	2	3	1	2	1
SWITCH	1	3	3	3	3	2	1	3	1	2	1
CONDENSER A.	1	3	3	3	3	2	3	3	1	1	2
CUSHION	1	3	3	3	3	1	3	3	1	1	1
COMPRESSOR A.	1	3	3	3	3	2	2	3	1	2	1
COMPRESSOR A.(P	1	3	3	3	3	2	1	3	1	1	1
CONDENSER A	1	3	3	3	2	2	3	3	1	1	1
AFTER COOLER AS	1	2	2	2	2	1	3	3	1	1	1
POTENTIOMETER A	1	3	3	3	2	1	2	3	1	1	1
SWITCH (HORN)	1	3	3	3	3	2	2	3	1	2	1
MIRROR	1	3	3	3	3	1	2	3	1	1	2
RELAY	1	3	3	3	3	1	1	3	1	2	1
ELEMENT ASS'Y	1	3	3	3	3	1	1	3	1	1	1
CARTRIDGE	1	3	3	3	3	1	1	3	3	1	2
SENSOR A_WIF	1	3	3	3	3	2	1	3	1	1	2
FAN (T6161-057-	1	3	3	3	3	1	2	3	1	1	1
FAN	1	2	3	3	1	2	2	3	1	1	1
STARTER	1	2	3	3	2	1	2	3	2	1	3
SWITCH, RELAY	1	3	3	3	2	1	2	3	1	1	1
SWITCH, HEATER	1	3	3	3	3	3	2	3	1	1	1
ALTERNATOR (REP	1	3	3	3	3	1	2	3	1	1	2
XALTERNATOR	1	3	3	3	3	2	2	3	1	1	1

Fuente: Autor de la monografía

Las ponderaciones de los sub-criterios señalados en azul corresponden al criterio de “Característica de repuesto”. Los señalados en rojo corresponden a “Demanda”. En amarillo se señalan los sub-criterios de “Suministro”. Por último, se señalan en gris las ponderaciones de los sub-criterios de la “Población”.

6. RESULTADOS

Los resultados obtenidos para el análisis del inventario de repuestos utilizando la metodología multi-criterio sugerida en el presente trabajo se presenta a continuación.

Figura 18. Muestra de ponderaciones de criterios sugiriendo la política ABC

PartDescription	P_Caract	P_Demanda	P_Poblacion	P_Suministro	POLITICA_ABC
BOLT KIT, SHOE	3	3	1	2	A
BUSHING	3	3	1	2	A
CAMSHAFT	2	3	1	3	A
CARTRIDGE(KLC P	3	3	2	2	A
COMPRESSOR A.	2	3	2	2	A
COMPRESSOR A.(P	2	3	1	2	B
CONDENSER A.	2	3	1	3	A
CORE ASS'Y	3	3	2	3	A
COVER	3	3	2	2	A
CUSHION	3	3	1	3	A
DUST SEAL	3	3	2	2	A
ELEMENT	3	3	2	2	A
ELEMENT	3	3	1	2	A
ELEMENT,FILTER	3	3	1	2	A
FITTING	3	3	2	2	A
FLOATING SEAL	2	3	1	3	A
FLOATING SEAL A	2	3	1	2	B
FLOATING SEAL A	2	3	1	3	A
GASKET	3	3	2	3	A
GASKET	3	3	2	2	A
GASKET,FLANGE	3	3	1	2	A
INJECTOR	3	3	1	2	A
KIT, TURBOCHARG	2	3	1	2	B
KIT,EXHAUST VAL	2	3	1	2	B
KIT,INTAKE VALV	2	3	1	2	B
LINER	3	3	2	3	A
LINK	3	3	1	2	A
LINK ASS'Y	2	3	1	2	B

Fuente: Autor de la monografía

Las cantidades de repuestos se clasificaron en una de las tres categorías ABC mostrando una diferencia significativa con respecto a la clasificación actual de “La Empresa”, como se observa en la Figura 18. Se muestra el resultado del análisis para la Fase 2 del ciclo de vida, ya que cuenta con mayor cantidad de equipos y por tanto es la fase que más influye en el abastecimiento del inventario.

Tabla 9. Comparación de resultados de la metodología multi-criterio

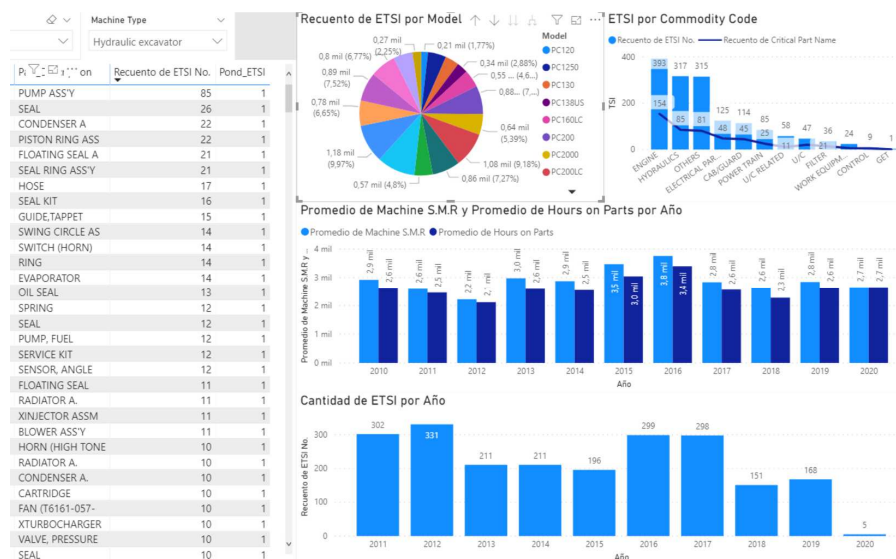
CATEGORIA	ANTES	%	FASE 2	%
A	3400	74,82%	2515	55,34%
B	773	17,01%	1250	27,50%
C	371	8,10%	777	17,09%
Sin categoría	2	0,044%	2	0,044%
TOTALES	4544	100,00%	4544	100%

Fuente: Autor de la monografía

La variación que se observa en las cantidades de repuestos de cada categoría y por cada ciclo de vida, luego de aplicar la metodología multi-criterio se ve reflejada en un ahorro monetario para la empresa hasta de un 19% solo para la línea de equipos Excavadora Hidráulica, lo que apunta al gran objetivo estratégico de reducción de costos y optimización de recursos. Este 19% de los repuestos equivale a más de ochocientos millones de pesos que pueden reducirse del inventario. Se han detectado 406 nuevas referencias para la categoría C que “La Empresa” no requerirá tener en su inventario de manera permanente. También se detectaron 885 unidades que pasan de categoría “A” a categoría “B”, por lo que su manejo de abastecimiento puede ser más flexible y económico.

Estos resultados son apoyados por medio de gráficos de tendencias e históricos de datos, que ayudan al analista de repuestos a entender la importancia o necesidad que tiene un repuesto para la operación de un cliente y, por tanto, también para el negocio de “La Empresa”. Algunas de las gráficas utilizadas se muestran a continuación:

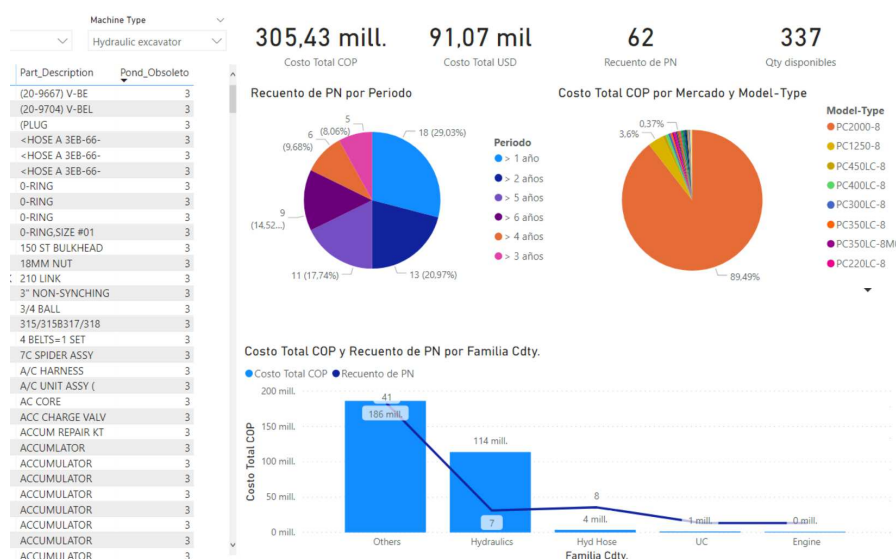
Figura 19. Detalle de ponderación del sub-criterio "Seguridad"



Fuente: Autor de la monografía

Se visualiza un comparativo de la cantidad de fallas reportadas por referencia por año, horas promedio de falla de cada repuesto, a qué grupo de commodity pertenece el repuesto y cuál es la población de equipos afectado por el repuesto.

Figura 20. Detalle de ponderación del sub-criterio "Obsolescencia"



Fuente: Autor de la monografía

Se aprecia el listado de repuestos obsoletos a qué porción de la población de equipos está afectando, así como en qué clasificación de commodity se encuentra cada referencia. El tener visualmente esta información, ayudará al analista de repuestos a entender el impacto que tiene la falta del repuesto en inventario. También ayudará al departamento comercial a crear planes de ventas con los clientes para aumentar la rotación de las referencias.

7. CONCLUSIONES

El objetivo principal del presente trabajo fue presentar una herramienta de clasificación multi-criterio para la administración de los repuestos de inventario. Luego de evaluar el listado de repuestos que aplican para las Excavadoras Hidráulicas, se concluyó que hay repuestos con características particulares que requerirán políticas de gestión diferentes a las utilizadas actualmente. Esto dio la oportunidad de mostrar que la metodología propuesta es una herramienta de ayuda para la gestión de los repuestos y que propone la sistematización del proceso.

Los resultados de la aplicación de la metodología multi-criterio muestran datos favorecedores para la empresa. También se demostró que es importante realizar el sesgo de la población y analizar los datos por grupos de equipos con características comunes; población de equipo y horas de uso o fase del ciclo de vida. Al identificar el grupo y analizar los datos, se pudieron identificar repuestos no necesarios para la operación (406 referencias), se reclasificaron repuestos a otras políticas (885 referencias) y se logró ajustar las referencias de repuestos a una clasificación más acorde a las verdaderas necesidades de los equipos. El resultado para “La Empresa” se traduce en menores tiempos de respuesta a los clientes, procesos de planificación de pedidos más eficaces, impacto positivo en los estados financieros (reducción del 19% de referencias en inventario equivalentes a más de ochocientos millones de pesos) y aumento en la credibilidad de la marca.

Después de analizar los resultados de una muestra de repuestos, y tomar los criterios que se consideraron que más influyen en la aleatoriedad de la demanda, se llega a la conclusión que utilizar un solo criterio para clasificar las piezas de repuesto no es apropiado, considerando que los repuestos cuentan con múltiples características y especificaciones, y que la demanda dependerá de factores externos que deben ser tenidos en cuenta. El presente trabajo muestra además los

beneficios de identificar en qué fase del ciclo de vida se encuentran los equipos, ya que el comportamiento de la demanda para cada grupo será totalmente diferente. El uso de demasiados criterios puede hacer muy complejo el modelo y difícil de aplicar a la realidad de las empresas, ya que es necesario disponer de un gran conjunto de información y que pueda ser actualizada fácilmente. Con todo, el modelo mantiene una validez general y es posible modificar los procedimientos sugeridos para un contexto diferente, sin alterar la "filosofía" básica del enfoque propuesto. Es decir, es una metodología que puede ser utilizada en cualquier sector industrial.

8. RECOMENDACIONES

- La gestión de los inventarios de repuesto para las empresas de suministro de repuestos y servicios es un problema complejo debido a las dificultades de obtención e integración de los datos de una manera rápida y actualizada, así como el gran número de factores que hay que tener en cuenta y la gran cantidad de referencias y modelos de equipos. También se puede convertir en algo complicado de ejecutar, ya que el éxito de la metodología parte de la correcta definición de la tabla de criterios y sus ponderaciones, las cuales se recomienda sean evaluadas por un grupo multidisciplinario de especialistas que apunte a objetivos comunes. Esta tarea resulta complicada de lograr debido a las múltiples responsabilidades y compromisos de cada uno de los colaboradores. Por lo que se resalta la importancia de contar con el apoyo de la alta gerencia y de las partes interesadas para así obtener los recursos de disponibilidad y tiempo.
- La aplicación de la metodología dio resultados satisfactorios para la población objetivo de excavadoras hidráulicas y la operación de la empresa, pero se recomienda realizar seguimiento a largo plazo para evaluar su efectividad en el tiempo.
- Se recomienda desarrollar una segunda etapa, cuyo objetivo sea enlazar automáticamente las descargas de datos con el software de repuestos actual de “La Empresa”, de esta manera no solo se contará con la información actualizada y a la mano de los analistas de repuestos y personal comercial, sino que también ahorrará tiempo de desarrollo y evitará errores humanos en la manipulación de datos.

- Se recomienda también, aprovechar el enlace de las diferentes bases de datos para aprovechar la ubicación geográfica de los equipos, y compararlos con los inventarios disponibles de cada sucursal. Se podría indicar si los repuestos para atender un equipo se encuentran disponibles en la sede o bodega más cercana. En caso de ser negativo, “La Empresa” podrá identificar la necesidad de reubicar los inventarios de acuerdo a la demanda geográfica.

BIBLIOGRAFIA

Braglia, Marcello, et al. "Multi-Attribute Classification Method for Spare Parts Inventory Management." *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 10, no. 1, 2004, pp. 55–65, doi:10.1108/13552510410526875.

Brito, José. "Optimización de Inventarios de Partes y Repuestos Para El Mantenimiento." *Predictiva* 21, vol. 1, 2013, pp. 6–9, <http://www.assetmanagementstandards.com/resources/ISO55000+introduction+v1.1.pdf>.

Cooper, Robin, et al. "Komatsu, Ltd." *Target Costing and Value Engineering*, 2018, pp. 269–79, doi:10.1201/9780203737378-15.

Dekker, Rommert, et al. "On the Use of Installed Base Information for Spare Parts Logistics: A Review of Ideas and Industry Practice." *International Journal of Production Economics*, vol. 143, no. 2, 2013, pp. 536–45, doi:10.1016/j.ijpe.2011.11.025.

Devarajan, Divya, and M. S. Jayamohan. "Stock Control in a Chemical Firm : Combined FSN and XYZ Analysis." *Procedia Technology*, vol. 24, The Author(s), 2016, pp. 562–67, doi:10.1016/j.protcy.2016.05.111.

Ferreira, Luís Miguel D. F., et al. "A Multicriteria Decision Framework for the Management of Maintenance Spares - A Case Study." *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, Elsevier B.V., 2018, pp. 531–37, doi:10.1016/j.ifacol.2018.08.373.

Gutierrez, Alberto Mora. *Mantenimiento Estratégico Para Empresas de Servicios o Industriales: Enfoque Sistémico Kantiano*. 1st ed., AMG, propia del autor, 2005.

Gutiérrez, Edwin, et al. "Análisis De Criticidad Integral De Activos." no. 58, 2007, pp. 1–14.

Hu, Qiwei, et al. "OR in Spare Parts Management: A Review." *European Journal of Operational Research*, vol. 266, no. 2, Elsevier B.V., 2018, pp. 395–414, doi:10.1016/j.ejor.2017.07.058.

Inc, Arcitura Education. *Arcitura _ Big Data Science Certified Professional (BDSCP)*. www.bigdatascienceschool.com.

Khaira, Ashish, and R. K. Dwivedi. "A State of the Art Review of Analytical Hierarchy Process." *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 2, Elsevier Ltd, 2018, pp. 4029–35, doi:10.1016/j.matpr.2017.11.663.

Markets Insider. *Coal PRICE Today | Coal Spot Price Chart*.

Molenaers, An, et al. "Criticality Classification of Spare Parts: A Case Study." *International Journal of Production Economics*, vol. 140, no. 2, Elsevier, 2012, pp. 570–78, doi:10.1016/j.ijpe.2011.08.013.

Ng, Wan Lung. *A Simple Classifier for Multiple Criteria ABC Analysis*. Vol. 177, 2007, pp. 344–53, doi:10.1016/j.ejor.2005.11.018.

PORTAFOLIO. "Crecimiento Económico de Colombia En El 2019 | Economía | Portafolio." *Julio 24 De 2019*, <https://www.portafolio.co/economia/proyecciones-crecimiento-colombia-531855>.

Rosienkiewicz, Maria, et al. "A Hybrid Spares Demand Forecasting Method Dedicated to Mining Industry." *Applied Mathematical Modelling*, vol. 49, Elsevier Inc., 2017, pp. 87–107, doi:10.1016/j.apm.2017.04.027.

Zhu, Sha, et al. "Spare Parts Inventory Control Based on Maintenance Planning." *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 193, no. August 2019, Elsevier Ltd, 2020, p. 106600, doi:10.1016/j.ress.2019.106600.

ANEXOS

Anexo A. Criterios de evaluación de inventario

		Crítico	Importante	Deseable
<i>Criticidad</i>	Problema de calidad	0 – 85%	85 – 95%	95 – 100%
	Pérdida en operación	0 – 90%	90 – 97%	97 – 100%
	Efecto dominó	Efecto amplio. Muchas partes del equipo se ven afectadas.	Efecto mediano. Pocas partes del equipo se ven afectadas.	No hay efecto dominó.
	Seguridad	Una o más fatalidades	Uno o más lesionados de gravedad	Una o más partes productivas dañadas
<i>Suministro</i>	Tiempo de espera	Más de 30 días	Entre 10 y 30 días	Menos de 10 días
	Referencia homologada	No tiene referencia homologa	Existe al menos una referencia homologa pero no es recomendable su uso	Si tiene referencia homologa
	Repuesto reparable	Costo de reparación > costo del repuesto nuevo	Costo de reparación entre 0.5 y 1.0 el valor del repuesto nuevo	Costo de reparación < 0.5 el valor del repuesto nuevo
<i>Problemas de inventario</i>	Precio unitario	Precio unitario > \$10.000 USD	Precio unitario entre \$1.000USD y \$10.000USD	Precio unitario < \$1.000USD
	Espacio en bodega	Espacio requerido > 10% del espacio disponible	Espacio requerido entre 1% y 10% del espacio disponible	Espacio requerido < 1% espacio del disponible
	Obsolescencia	MTBF < tiempo de reposición	MTBF > tiempo de reposición	Sin obsolescencia
<i>Demanda de repuestos</i>	Demanda anual	Menos de 1 unidad	Entre 1 y 4 unidades	Más de 4 unidades
	Referencias iguales por equipo	Más de 10	Entre 2 y 10	Solo uno
	Probabilidad de falla	Alta	Moderada	Baja

Fuente: M. Braglia, A. Grassi, and R. Montanari, "Multi-attribute classification method for spare parts inventory management," *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 55–65, 2004

Anexo B. Etapas el Big Data

Etapa 1: Evaluación del caso empresarial	• Análisis de la problemática y definición del alcance empresarial • Entendimiento claro de la justificación, motivación y metas de la ejecución del análisis • Definición de las necesidades del proyecto
Etapa 2: Identificación de datos	• Identificar conjunto de datos necesarios y sus respectivas fuentes de obtención
Etapa 3: Adquisición y filtrado	• Recopilación de datos de todas las fuentes identificadas • Filtrado de datos sin valor para el análisis
Etapa 4: Extracción de datos	• Transformar los datos para que puedan ser analizados (formatos compatibles)
Etapa 5: Validación y limpieza de datos	• Establecer normas de validación y eliminación de datos inválidos
Etapa 6: Agregación y representación de datos	• Integración de los diversos conjuntos de datos por medio de campos comunes entre ellos
Etapa 7: Análisis de datos	• Tarea de análisis de la información • Iteraciones • Ponderación de criterios • Listado de preguntas para configuración de presentación
Etapa 8: Visualización de datos	• Utilizar técnicas y herramientas de visualización adecuadas para comunicar gráficamente los resultados del análisis (pestañas con detalle de gráficos de criterios).
Etapa 9: Uso de los resultados del análisis	• Compartir resultados de análisis a los colaboradores finales

Anexo C. Resultados ponderaciones árbol de decisión

POBLACION	DEMANDA	SUMINISTRO	CARACTERISTICA DEL REPUESTO	POLITICA	POBLACION	DEMANDA	SUMINISTRO	CARACTERISTICA DEL REPUESTO	POLITICA
1	1	1	1	C	2	1	3	3	B
1	1	1	2	C	2	2	1	1	B
1	1	1	3	C	2	2	1	2	B
1	1	2	1	C	2	2	1	3	B
1	1	2	2	C	2	2	2	1	B
1	1	2	3	C	2	2	2	2	B
1	1	3	1	C	2	2	2	3	B
1	1	3	2	C	2	2	3	1	B
1	1	3	3	B	2	2	3	2	B
1	2	1	1	C	2	2	3	3	B
1	2	1	2	C	2	3	1	1	B
1	2	1	3	C	2	3	1	2	B
1	2	2	1	C	2	3	1	3	B
1	2	2	2	B	2	3	2	1	B
1	2	2	3	B	2	3	2	2	B
1	2	3	1	B	2	3	2	3	B
1	2	3	2	B	2	3	3	1	B
1	2	3	3	B	2	3	3	2	A
1	3	1	1	B	2	3	3	3	A
1	3	1	2	B	3	1	1	1	B
1	3	1	3	B	3	1	1	2	B
1	3	2	1	B	3	1	1	3	B
1	3	2	2	B	3	1	2	1	B
1	3	2	3	B	3	1	2	2	B
1	3	3	1	B	3	1	2	3	B
1	3	3	2	B	3	1	3	1	B
1	3	3	3	B	3	1	3	2	B
2	1	1	1	C	3	1	3	3	B
2	1	1	2	C	3	2	1	1	B
2	1	1	3	B	3	2	1	2	B
2	1	2	1	B	3	2	1	3	B
2	1	2	2	B	3	2	2	1	B
2	1	2	3	B	3	2	2	2	B
2	1	3	1	B	3	2	3	1	A
2	1	3	2	B	3	2	3	1	A
3	2	3	2	A	3	3	2	2	A
3	2	3	3	A	3	3	2	3	A
3	3	1	1	B	3	3	3	1	A
3	3	1	2	A	3	3	3	2	A
3	3	1	3	A	3	3	3	3	A
3	3	2	1	A					

Fuente: Autor de la monografía