

Informe final práctica profesional (Pasantía full time).

Determinación de repuestos críticos y delimitación de niveles de inventario con puntos de reorden en base a la confiabilidad.



Nombre: Franco Mangano Padilla.

Mail: fmangano@alumnos.uai.cl

Rut: 20636346-0.

Carrera: Ingeniería Civil Industrial.

Empresa: Rmes Analytics.

Fecha de inicio práctica: 01/08/2023

Fecha de término práctica: 12/12/2023

Resumen ejecutivo

Este informe presenta un proyecto de optimización en la gestión de inventarios de repuestos críticos en Rmes Analytics, una empresa especializada en soluciones para la industria minera. El proyecto surge de la necesidad de los clientes de mejorar la disponibilidad de repuestos esenciales y reducir quiebres de stock durante los mantenimientos planificados. La metodología Six Sigma guía el proyecto, proponiendo un modelo de clasificación ABC multicriterio que considera variables como costo unitario, lead time, porcentaje de indisponibilidad y número de compras históricas. Se emplean distribuciones de probabilidad para el pronóstico de demanda, y se implementa un modelo de punto de reorden basado en un nivel de servicio objetivo, junto con el modelo EOQ para determinar lotes óptimos de pedidos. La evaluación económica revela un Valor Actual Neto (VAN) de 27.5 millones de pesos y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 19%. La implementación se realiza en un módulo del software Rmes, promoviendo una gestión más eficiente y rentable de los repuestos críticos. Los resultados destacan la identificación de 24 repuestos críticos de un total de 312 para los 8 equipos mineros, mejorando significativamente el nivel de servicio del 62.6% al 95%, y generando beneficios económicos sustanciales.

Abstract

This report presents a project focused on optimizing the management of critical spare parts inventories at Rmes Analytics, a company specializing in solutions for the mining industry. The project arises from the clients' need to enhance the availability of essential spare parts and reduce stockouts during planned maintenance. The Six Sigma methodology guides the project, proposing a multicriteria ABC classification model considering variables such as unit cost, lead time, unavailability percentage, and historical purchase frequency. Probability distributions are employed for demand forecasting, and a reorder point model based on a target service level is implemented, along with the Economic Order Quantity (EOQ) model to determine optimal order quantities. The economic evaluation reveals a Net Present Value (NPV) of 27.5 million pesos and an Internal Rate of Return (IRR) of 19%. The implementation takes place within an Rmes software module, promoting more efficient and cost-effective management of critical spare parts. Results highlight the identification of 24 critical spare parts out of a total of 312 for the 8 mining equipment units, significantly improving the service level from 62.6% to 95%, and generating substantial economic benefits.

Índice

1. Introducción	4
1. Contexto de la empresa.....	4
2. Contexto del problema.....	4
3. Identificación de la oportunidad.....	6
2. Objetivos	7
1. Objetivo general (SMART):.....	7
2. Objetivos específicos:	7
3. Estado del arte	8
1. Clasificación.....	8
2. Demanda.....	9
3. Modelos	9
4. Soluciones propuestas	11
1. Clasificaciones propuestas.....	11
2. Demandas propuestas	11
3. Modelos propuestos	12
5. Evaluación económica.....	13
6. Metodologías	14
1. Metodologías específicas:.....	14
7. Medidas de desempeño.....	15
8. Planificación	17
9. Desarrollo del proyecto.....	19
10. Resultados del proyecto	21
11. Conclusiones y discusión.....	22
12. Referencias y bibliografía.....	24
13. Anexos.....	25

1. Introducción

1. Contexto de la empresa.

El presente informe presenta los detalles y objetivos de la práctica profesional realizada en Rmes Analytics, centrada en el área de la optimización y la gestión de repuestos críticos en la industria minera.

Rmes Analytics es una empresa de tecnología y consultoría que se dedica al desarrollo de software. Su objetivo principal es la mejora de la productividad de los activos, mediante la optimización de procesos de mantenimiento para equipos, determinando a su vez; modos de falla, modelos predictivos de falla y programas de mantenimientos óptimos, entregando a través del módulo del software Rmes, soluciones de análisis empresarial y monitoreo de la productividad principalmente en el área de la minería.

El proyecto se realiza desde el puesto de Product Owner abarcando distintas áreas de la ingeniería industrial. El área del problema a solucionar está relacionada a la elaboración de un modelo de optimización, la planificación y el análisis de datos.

2. Contexto del problema.

El cliente de Rmes Analytics, no gestiona de manera eficiente la planificación y gestión de repuestos, se identificó en la data histórica un total de 948 órdenes de trabajo de mantenimientos planificados, donde 219 no tuvieron disponibilidad de repuestos entre los años 2020 y 2023 en 8 equipos críticos (dos chancadores primarios, dos molinos semiautógenos y 4 molinos bolas). Al descomponer y evaluar los datos del 10% de las órdenes de trabajo de mantenimientos planificados más costosos, el índice de quiebres de stock de repuestos es del 55%, por lo tanto, hubo solo un 45% de ocasiones con disponibilidad de repuestos. El cliente no logra cumplir con sus planes de mantenimientos programados, los cuales buscan alcanzar un nivel de servicio objetivo de 95% para sus repuestos (críticos), o lo que es lo mismo, disminuir su índice de quiebres de stock de repuestos al 5%. Por lo tanto, se busca mantener los costos operacionales al mínimo posible, manteniendo el nivel de servicio esperado. De esta forma se evita tener retrasos en los mantenimientos planificados.

Tras evaluar con expertos de bodega los datos e identificar las causas raíz de los quiebres de stock de repuestos, se elaboró el siguiente diagrama de Ishikawa en base a criterio experto de bodega, los cuales determinaron los siguientes porcentajes:

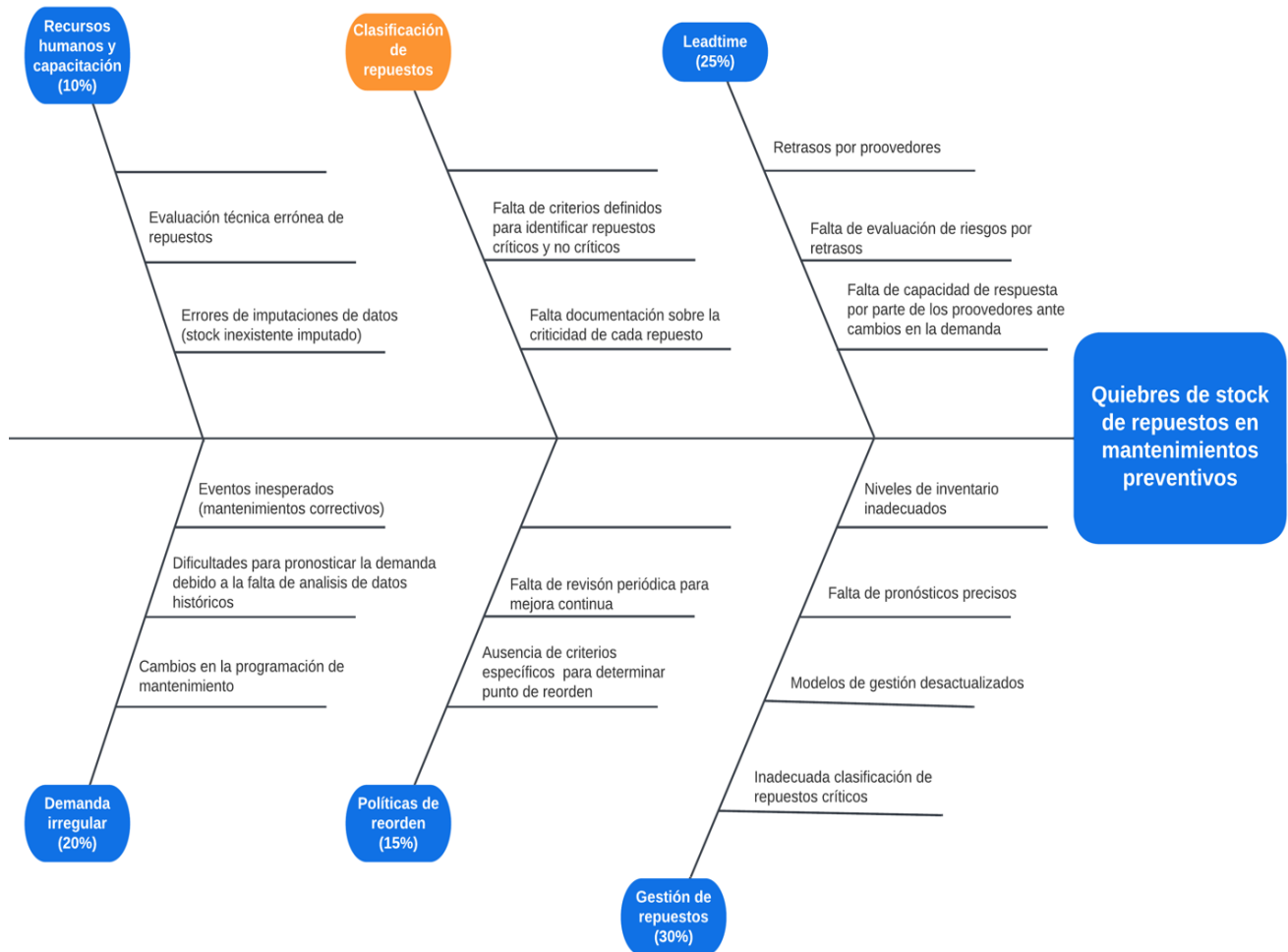


Ilustración 1: Diagrama de Ishikawa (Elaboración propia).

En la ilustración 1 se pudo identificar que los quiebres de stock se están generando principalmente por errores de evaluación e imputación de inventario en el software (Recursos humanos y capacitación), demanda irregular de repuestos debido a fallas imprevistas y cambios en la programación de mantenimientos, políticas de punto de reorden con ausencia de criterios específicos que no logran ajustarse al comportamiento real de demanda de repuestos, variaciones en los tiempos de envío debido a retrasos por parte de los proveedores y su falta de capacidad de reacción ante eventualidades. También ocurre una mala gestión de los repuestos, la cual no logra diferenciar de manera precisa repuestos críticos y determinar sus niveles de inventario de forma adecuada para lograr el nivel de servicio objetivo. Por último, un plan de mantenimiento deficiente puede derivar

adicionalmente en la reducción de la vida útil del activo y un aumento en los costos para mantenerlo operativo.

Rmes cuenta con los datos y las herramientas necesarias para diagnosticar y mejorar la gestión de repuestos, las políticas de reorden y la demanda de repuestos irregulares para sus clientes. Estas causas representan un 65% del origen de los quiebres de stock de repuestos en mantenimientos preventivos. El resto de las causas, escapan de los alcances de la empresa como consultora de software.

3. Identificación de la oportunidad.

El impacto que genera el repuesto está ligado al impacto en producción que generan los equipos en los cuales se utiliza el repuesto, por ende, el quiebre de stock de repuestos conlleva a aumentos en los tiempos de los mantenimientos y genera desfases en la programación, lo que implica altos costos operacionales. Camilo (2018) señala que según (Dhillon, 2008) “En la industria minera el mantenimiento y la gestión de activos, representa entre un 20% y 35% del del total de los costos operacionales”.

Es relevante abordar este problema, ya que a nivel nacional tenemos los siguientes datos del primer trimestre del 2023 (COCHILCO, 2023):

- El costo operacional por libra producida de cobre es de es de 202.9 CUS\$/lb (centavo de dólar por libra producida)
- La producción total de cobre es de aproximadamente 1249 ktmf (kilo toneladas métricas finas)

Con estos datos se puede estimar un total de 555 millones de dólares de costos operacionales en la producción de cobre en un trimestre en las mineras nacionales; al año esta cifra asciende a los 2.220 millones de dólares aproximadamente. Teniendo en cuenta el porcentaje del costo relacionado a la gestión de activos, se efectúan en torno a los 444 y los 777 millones de dólares anuales en costos operacionales de mantenimientos y repuestos en Chile. Se estipula que el cliente genera aproximadamente 400 ktmf (kilo toneladas métricas finas) de cobre al año (Consejo Minero de Chile, 2021).

Un factor determinante para el cliente es la gestión de repuestos, la determinación de componentes críticos, lotes y puntos de reorden necesarios para atender estos mantenimientos bajo un nivel de servicio objetivo. Para lograr una mayor eficiencia y continuidad operacional, ante

eventuales fallas en equipos, es necesaria la disponibilidad de los repuestos para realizar mantenimientos y como cada repuesto tiene características únicas, esto se traduce en distintas demandas e impactos para el mantenimiento, dependiendo de factores como el costo, tiempo de envío y la frecuencia de rotación de los repuestos.

De este modo, se busca reducir el presente índice de quiebres de stock para los 8 equipos, que actualmente alcanza el 23% para todos los repuestos, con 219 ocasiones de no disponibilidad de repuestos y un 55% de quiebres de stock para los mantenimientos más costosos, con un total de 53 quiebres de stock de un total de 97 mantenimientos planificados en 3 años.

En el proyecto se aborda la oportunidad de gestionar el inventario desde una perspectiva de la confiabilidad y la eficiencia operacional, para alcanzar un mayor nivel de servicio de los repuestos críticos (95%) y reducir los costos de operación de mantenimiento. Dado el alcance del proyecto y el tiempo disponible, el análisis y el modelo de optimización se ejecuta en base a los datos de un único cliente de Rmes Analytics, pero la solución puede ser extrapolada y potencialmente, puede beneficiar a varios clientes de la empresa que cuentan con la misma problemática o dolor.

2. Objetivos

1. Objetivo general (SMART):

- Reducir el índice de quiebres de stock de repuestos críticos para mantenimientos planificados de 8 equipos mineros de un 62.6% (actual para los repuestos críticos), a un 5% en un periodo de 4 meses y medio.

2. Objetivos específicos:

- Clasificar repuestos críticos asociados a los equipos analizados para el proyecto.
- Determinar un nivel de servicio de los repuestos, para aumentar y priorizar aquellos que sean críticos para mantenimientos.
- Establecer un modelo de optimización que determine el nivel de inventario y punto de reorden óptimo por repuesto crítico en base a un nivel de servicio.

3. Estado del arte

Los problemas de quiebres de stock afectan a gran parte de las industrias y tiene un gran impacto económico. El control e integridad de la cadena de suministro es una tarea primordial para la sostenibilidad de las actividades económicas. Su ruptura o pérdida de continuidad altera, no solamente al negocio mismo, sino a todo el sector dependiente, quiebra la cadena de pagos y altera, la dinámica de la producción, generando problemas como cuellos de botella, desabastecimiento, pérdida de los demás factores productivos paralizados, horas hombre pérdida, entre otros grandes impactos (Rojas et al., 2022).

El marco teórico determina una serie de tres pasos; primero la clasificación de repuestos para determinar aquellos más relevantes, que tienen un mayor impacto en los costos. Segundo, la determinación del comportamiento de la demanda. En tercer y último lugar, un modelo de optimización para determinar el nivel de inventario óptimo y punto de reordenación. De esta forma la industria logra determinar un plan de abastecimiento adecuado para los repuestos.

1. Clasificación.

Para la clasificación de repuestos, primero hay que diferenciar entre; repuestos para equipos reparables y no reparables. Los primeros no se consideran para el proyecto, ya que, para el caso del cliente, las órdenes de trabajo relacionadas con repuestos consideran únicamente repuestos reparables, dado que aquellos no reparables, asumen un tiempo de mantenimiento despreciable y por tanto, no se ve reflejado en un impacto a nivel productivo.

Para la clasificación de repuestos, se han utilizado diversos métodos, pero el más reconocido es la clasificación ABC, ampliamente reconocida y utilizada en el mundo. Esta clasificación se basa en la regla de Pareto. En la cual, los repuestos tipo A explican el 80% del impacto, los tipos B un 15% y por último los tipos C explican el 5% de las causas, determinado los repuestos según sus costos o ventas. Desde 1955 y hasta ahora, el sistema ABC ha sido utilizado como la principal técnica para la clasificación de inventarios (Arboleda & Castillo, 2016).

El método de clasificación ABC se ha subdividido en distintas ramas de decisión en base a un enfoque multicriterio (MCDA). El llamado proceso analítico jerárquico (AHP) de Saaty, permite tener en consideración no sólo datos de costos, sino también el conocimiento y la experiencia de expertos a través del ponderado de una matriz de criterios (Saaty, 2014).

2. Demanda.

Para el pronóstico de la demanda hay que tener en consideración dos clases de repuestos; aquellos de alta rotación y aquellos de baja rotación, ya que como indica López: muchos métodos trabajan sobre la base de la historia de las solicitudes de repuestos, lo cual se ajusta de buena manera para aquellos donde la rotación es alta y la demanda es un dato relativamente conocido. Cuando los repuestos son de baja rotación, el problema se vuelve más complejo, puesto que la data disponible no es suficiente y el valor de dichos repuestos generalmente es alto, sin embargo, no disponer de ellos tiene la potencialidad de dañar severamente la confiabilidad de un sistema (López, 2016).

Se han utilizado distintos métodos para determinar el pronóstico del comportamiento de demanda de los repuestos. Dentro de estos tenemos principalmente el uso de distribuciones de probabilidad para la demanda, donde la distribución de Poisson es la distribución de probabilidad más comúnmente aplicada para la cuantificación de las piezas de repuesto (Noriega & Gómez, 2021). A su vez Pascual sugiere una distribución Gaussiana ya que esta funciona mejor cuando las demandas promedio son más altas e indica que se recomienda usar la distribución de Poisson solo en los casos en que las demandas promedio son bajas (Pascual, 2005).

Por último, más allá del uso de distribuciones de probabilidad existen otros métodos que se utilizan para pronosticar la demanda, entre ellos se utilizan técnicas de pronóstico a través de medias móviles, suavizado exponencial simple, suavizado de Holt Winters, regresión en series temporales, modelos jerárquicos, modelos de vector autorregresivos (VAR), regresiones lineales simples y múltiples entre otros (Valencia-Cárdenas et al., 2015).

3. Modelos.

En tercer lugar, para la reducción de quiebres de stock de repuestos, y la gestión de inventario se han utilizado una alta variedad de modelos de optimización para realizar mejoras, tanto de revisión continua como de revisión periódica, estos se subdividen en modelos deterministas y estocásticos.

De acuerdo con la literatura, son cuatro los sistemas de control de inventario más comunes, en la teoría básica de cadena de suministro (López, 2016):

- Sistema (s, Q): Mediante revisión continua, cada vez que el inventario llega al punto de reorden s, se genera una orden de pedido por una cantidad Q.

- Sistema (s, S): Nuevamente, cuando el inventario cae al punto s o menor, se genera una orden que incremente el nivel de inventario hasta su capacidad máxima, S.
- Sistema (R, S): Mediante revisión periódica, cada R unidades de tiempo se revisará el inventario y se ordena la cantidad necesaria para llegar a S.
- Sistema (R, s, S): También por revisión periódica, cada R unidades de tiempo se revisa el inventario contra s, y se repone hasta llegar a S. En caso de que el nivel sea mayor a s, no se realiza el pedido.

Estos sistemas de control de inventario implementan varios tipos de modelos de optimización, los cuales los podemos subdividir en modelos deterministas y modelos estocásticos.

3.1 Modelos determinísticos.

Modelo Determinista de revisión continua EOQ para los repuestos que tienen una demanda conocida y constante, con sus respectivas variaciones. El cual permite determinar un lote de pedido óptimo en base a los costos asociados a la gestión de repuestos.

Algoritmo de Wagner-Whitin, basado en una programación dinámica que evalúa todas las maneras posibles para cubrir la demanda en cada periodo de la planificación.

3.2 Modelos estocásticos.

Por otro lado, tenemos los modelos estocásticos, donde existe una demanda aleatoria de repuestos asociada a una función de probabilidad. El modelo más utilizado en este ámbito es el (S-1, S) la cual básicamente consiste en el lanzamiento de una orden de reaprovisionamiento para alcanzar el nivel S cuando la posición de inventario alcanza el valor de S-1. (Gato et al., 2010). Generalmente se utiliza para activos de baja rotación, ya que utiliza distribución Poisson y asume tiempos de entrega constantes. En general, este modelo, al mantener un nivel de stock en un rango predefinido, puede llegar a aumentar los costos relacionados a almacenamientos, a costa de un mayor nivel de servicio.

Métodos Heurísticos, los cuales son procedimientos simples que ofrecen una buena solución, aunque no necesariamente la óptima. Por lo tanto, es posible que se logren adaptar de manera adecuada a las condiciones de la empresa, y se puedan resolver de modo eficiente agilizando el proceso de toma de decisiones referentes a los niveles de inventarios óptimos. También, se cree que

pueden permitir una menor necesidad de imponer restricciones, facilitando soluciones a modelos más representativos de la realidad (Silver, 2004).

Modelos de simulación, los cuales imitan iterativamente el funcionamiento del sistema de gestión de inventario con el objetivo de predecir su comportamiento a corto y largo plazo, bajo diversas condiciones, permitiendo desarrollar con gran precisión las distribuciones de demanda, los niveles de servicio proyectados y los quiebres de stock, pero al igual que las heurísticas ofrecen buenas soluciones, aunque no necesariamente óptimas, especialmente cuando las condiciones del sistema son demasiado variables.

4. Soluciones propuestas

1. Clasificaciones propuestas.

Para la clasificación de repuestos, como alternativa está el uso de la clasificación ABC, que es masivamente utilizado o alguna de sus variantes, pero esto conlleva riesgos ya que, el modelo de clasificación ABC tradicional, al tener en cuenta un criterio de volumen de ventas, hace que esta metodología tenga una visión sesgada y deje a un lado otros criterios que pueden ser importantes para la organización y que están ligados directamente a la naturaleza propia de los ítems (Rodríguez & Oliveros, 2018).

Por lo tanto, para mitigar estos riesgos, se utilizará una clasificación con enfoque multicriterio, de modo que se obtendrá la información y la consideración práctica de la criticidad de los repuestos según expertos. De esta forma se obtienen los parámetros más relevantes para la determinación de un grado de criticidad práctico, que se ve reflejado en la realidad del cliente.

2. Demandas propuestas.

Para la demanda del repuesto es adecuado utilizar distribuciones de probabilidad de tipo Poisson o Gaussiana para los repuestos de baja y alta rotación respectivamente. Existe el riesgo que la demanda de repuestos no se comporte de la forma esperada, por lo tanto para mitigar dudas, es necesario realizar un test de bondad de Kolmogorov - Smirnov, el cual permite medir el grado de concordancia existente entre la distribución de un conjunto de datos y una distribución teórica específica. Utilizar estas distribuciones permite agilizar los tiempos de procesamiento de los datos y obtener soluciones aproximadas a la realidad, a diferencia de técnicas basadas en series de tiempo

como suavizado exponencial que pueden llegar a presentar grandes sesgos cuando hay periodos con demandas cero, ya que si tenemos una demanda constante por varios periodos de tiempo y de repente se presentan demandas cero en dos o más periodos, el pronóstico de suavizado sigue generando una demanda de repuestos e incrementando su stock en los inventarios (Rivas, 2022).

3. Modelos propuestos.

Para las soluciones propuestas del modelo de optimización del proyecto, primero, se asume que existe un único lugar de almacenamiento de repuestos, ya que existen varios modelos de optimización llamados multi - escalón o multiniveles, los cuales consideran varias ubicaciones de almacenamiento.

Para la determinación del punto de reorden, se utilizará como criterio el nivel de servicio objetivo, el tiempo de envío y la demanda del repuesto. De esta manera, tenemos una alta seguridad de no quedarse sin inventarios, que es lo que nos interesa. Este proceso lleva a ciertos riesgos, como que el punto de reorden debe ser constantemente corregido para tomar en cuenta cambios en el consumo de los repuestos, al igual que el lead time y tiende a aumentar el número de órdenes a un proveedor (Pascual, 2005). El modelo por implementar en el software para la determinación de la cantidad de repuestos a pedir para mantenimientos planificados será EOQ, ya que es un modelo sencillo de integrar en base al tiempo y recursos disponibles. El modelo EOQ permite obtener una solución eficiente para evitar interrupciones en la producción, reduciendo los costos de escasez y exceso de inventario de repuestos, asumiendo demandas constantes, que en el caso de mantenimientos planificados es adecuado asumir. Además, es una herramienta que ha sido ampliamente utilizada y adicionalmente permite aplicar instrumentos de simulación para modelar una amplia gama de resultados posibles, para así evaluar la robustez del modelo, riesgos y otorgar análisis de sensibilidad, permitiendo una validación adicional del modelo en la práctica.

5. Evaluación económica

Para la evaluación económica se utilizará un factor de ponderado específico para no revelar datos confidenciales del cliente de Rmes Analytics, por lo tanto, los siguientes datos no reflejan la realidad en montos, pero sí en porcentajes y relaciones. Podemos ver a continuación la inversión inicial, los ingresos y los costos estipulados del proyecto. Para realizar la evaluación económica del proyecto se utiliza el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR) como indicadores de rentabilidad. A su vez se usa la tasa de descuento utilizada por la empresa de un 12% (WACC). Tras esto se obtiene un VAN de 27,5 millones de pesos y un TIR del 19%. Para más detalles revisar anexo 3. Los beneficios proyectados relacionados con la gestión de repuestos críticos se pueden visualizar en la tabla 1. Los costos por ineficiencia reducidos son variables de acuerdo con el equipo minero, el cual debería aumentar su continuidad operacional. Beneficios Proyectados (Para los 24 equipos críticos):

(Para repuestos críticos)	Situación sin proyecto	Situación con proyecto	Beneficios proyectados (Delta)
Quiebres de stock anuales	18	2	-16
Clasificación	Sin clasificación	Clasificados los repuestos asociados a 8 equipos mineros	Permite reducir stock de repuestos no críticos
Índice quiebres de stock	37.4%	5%	-32.4%
Nivel de servicio	62.6%	95%	+32.4%
Costos por ineficiencia	Total (Actual)	Reducción del 40%	-40%

Tabla 1: Beneficios proyectados (Elaboración propia).

6. Metodologías

El enfoque principal de esta práctica profesional se inspira en la metodología Six Sigma, ampliamente reconocida en la gestión de proyectos y la mejora de procesos. La metodología Six Sigma combina principios de calidad y eficiencia para abordar problemas complejos como los quiebres de stock de repuestos en mantenimientos planificados en la industria minera. Para el caso del proyecto se conforma en definir los criterios de éxito, medir y establecer KPI 's, analizar problemas y causas, mejorar a través de modelos matemáticos de optimización y por último controlar la implementación a través del monitoreo de los KPI 's.

1. Metodologías específicas:

- Establecer un marco teórico y sistemático para gestionar los inventarios de repuestos críticos. Esto implica desarrollar políticas y procedimientos que optimicen los niveles de inventario, los puntos de reorden y la disponibilidad de repuestos para evitar quiebres de stock e impactos negativos en la producción.
- Utilizar un enfoque teórico de análisis de criticidad para identificar los repuestos en función de su impacto en la disponibilidad de los equipos. Para determinar estos repuestos, se puede utilizar un enfoque basado en una matriz de criticidad por multicriterio, utilizando datos relacionados a la confiabilidad y mantenimiento.
- Se pueden realizar análisis de datos históricos y producir pronósticos de demanda más precisos. Esto implica revisar los datos históricos de mantenimientos e identificar distribuciones de probabilidad o patrones de consumo con análisis de series temporales. Con una mejor predicción de la demanda de repuestos, será posible planificar y mantener un nivel adecuado de inventario para reducir los quiebres de stock.
- Aplicar principios teóricos de optimización de inventarios para definir el nivel de inventario y el punto de reorden óptimo para cada repuesto crítico. Esto podría incluir conceptos de costos de inventario, modelos de revisión y teoría de colas. Métodos a través de los cuales se podrá optimizar el nivel de inventario y los puntos de reorden de repuestos críticos. Otra metodología, es utilizar simulaciones de Montecarlo que permite representar el comportamiento del inventario y su impacto en la disponibilidad de repuestos, maximizando la disponibilidad y minimizando los costos.

7. Medidas de desempeño

- **Tasa de quiebres de stock en mantenimientos planificados:** Mide la frecuencia con la que se producen quiebres de stock de repuestos durante los mantenimientos planificados. El objetivo de este indicador es reducir esta tasa a un nivel mínimo aceptable según el nivel de servicio deseado por repuesto. La tasa se expresa como un porcentaje.

$$Tasa\ de\ quiebres\ de\ stock_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{M_i}$$

N: Número total de repuestos (cantidad en unidades enteras).

Q: Número de quiebres de stock por repuesto *i* (cantidad en unidades enteras).

M: Número total de mantenimientos planificados para el repuesto *i* (cantidad en unidades enteras).

- **Índice de criticidad de repuestos:** Clasificación de los repuestos en función de su importancia para la disponibilidad de los equipos. (Teniendo en cuenta factores como el tiempo de envío de los repuestos y los costos asociados). Este indicador ayuda a medir la clasificación de la criticidad de los repuestos. El índice de criticidad se expresa como un valor relativo, ya que es un puntaje de relevancia del repuesto (mientras mayor sea el valor, más crítico es el repuesto).

$$Índice\ de\ criticidad_i = \sum_{k=1}^K P_k * V_k$$

K: Número total de factores, precio, lead time, índice de indisponibilidad o número de compras. (cantidad en unidades).

P: Peso del factor *k* para el repuesto *i* (porcentaje).

V: Valor del factor *k* para el repuesto *i* (dólares, días, porcentaje y unidades de compra normalizados).

- **Porcentaje de cumplimiento del nivel de servicio:** Este indicador mide la proporción de solicitudes de repuestos que se completaron dentro del tiempo objetivo. Este se expresa como un valor relativo porcentual.

$$\text{Porcentaje de cumplimiento} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{S_i}{T_i} * 100\%$$

N: Número total de solicitudes de repuestos (cantidad en unidades enteras).

S: Número de solicitudes de repuestos completadas a tiempo para la solicitud *i* (cantidad de unidades enteras).

T: Tiempo objetivo para completar la solicitud *i* (días).

- **Nivel de inventario promedio:** Determinar el nivel promedio de inventario de repuestos críticos antes y después de la optimización. El objetivo de este indicador es reducir el nivel de inventario sin comprometer la disponibilidad. Aunque este indicador pueda implicar mayores costos directos, puede aumentar el nivel de servicio requerido para los mantenimientos programados. Este indicador, por ende, nos permite medir los cambios en el nivel de stock necesarios para alcanzar el nivel de servicio deseado, en una unidad de medida. El nivel de inventario promedio se expresa como unidades físicas.

$$\text{Nivel de inventario promedio} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{I_{i,k} + I_{i,k-1}}{2}$$

K: Número total de periodos medidos (meses).

I: Cantidad de repuestos *i* en inventario en el momento *k* (unidades físicas/mes).

8. Planificación

Actividades e hitos relevantes	Áreas necesarias	Semana 11-12 (9-20 Octubre)	Semana 13-14 (23-3 Noviembre)	Semana 15-16 (6-17 Noviembre)	Semana 17-18 (20-1 Diciembre)	Semana 19-20 (4-12 Diciembre)
Primeros modelos de optimización terminados	Validación con área de proyecto					
Ajustes de modelo de optimización	Desarrolladores					
Prototipos dentro del módulo del software funcional	Validación QA					
Realizar documentación y capacitación del módulo	Product Owners					
Realizar simulaciones para mayor robustez	Desarrolladores + Validación QA					
Módulo en funcionamiento con los datos imputados de cliente	Desarrolladores + Validación QA					

Tabla 2: Diagrama de Gantt (Elaboración propia).

La carta Gantt (Tabla 2) indica que en octubre se validaron los modelos de optimización a utilizar con sus respectivos ajustes en base a datos de entrada y contextos operativos. Tras esto, en noviembre el prototipo se encuentra desarrollado y dentro del módulo del software de Rmes Analytics, con la capacidad de determinar el punto de reorden y el nivel de inventario en base a los datos históricos imputados, resultados validados por el área de proyecto. Tras esto se genera documentación para las áreas de producto y proyecto, los cuales, a su vez entregan esta información al cliente y realizan la capacitación necesaria para la utilización del módulo en base a sus datos (actualmente estandarizados por ERP como Maximo y SAP). Se efectuaron simulaciones que permitieron otorgar mayor validez a los modelos. Durante el proceso se realizaron varias versiones del módulo, donde se fueron solucionando, junto a desarrolladores, errores del módulo tanto a nivel backend como frontend. Por último, en diciembre el software deberá poder realizar simulaciones o generar soluciones prácticas para el cliente, entregando resultados e indicadores más precisos con alertas en casos de probabilidad de stockout. Todos estos pasos requieren de su respectiva validación con las áreas de proyecto y QA tester. Los riesgos y las mitigaciones de la planificación se pueden observar en la tabla 3.

Evento	Probabilidad	Consecuencia	Nivel de riesgo	Mitigación
<i>Problemas de Calidad de Datos</i>	Muy Alta	Mayor	Riesgo Extremo	Establecer un proceso de entrada de datos y verificación de calidad para el correcto funcionamiento de los modelos
<i>Falta de Aprobación de QA</i>	Alta	Mayor	Riesgo Extremo	Establecer un proceso de revisión y aprobación con producto antes de avanzar a la siguiente fase
<i>Retrasos en el Cronograma</i>	Media	Mayor	Riesgo Alto	Realizar un seguimiento continuo del progreso del proyecto y tomar medidas correctivas tempranas en caso de desviaciones
<i>Problemas de Integración del Módulo</i>	Baja	Mayor	Riesgo Alto	Protocolos de comunicación claros entre los equipos de desarrollo y los product owner (Azure DevOps)
<i>Dependencia de Proveedores Externos (SAP - Maximo)</i>	Alta	Moderada	Riesgo Alto	Establecer acuerdos de nivel de servicio sólidos con los proveedores externos (Maximo/SAP)
<i>Conflictos con Otros Proyectos Internos (Prioridad)</i>	Alta	Moderada	Riesgo Alto	Mantener una comunicación clara y abierta con otras áreas para coordinar y priorizar recursos
<i>Falla en la Comunicación Interna</i>	Media	Moderada	Riesgo Tolerable	Establecer una comunicación abierta y efectiva dentro del equipo mediante reuniones regulares (Teams) y herramientas de colaboración (Sprints)
<i>Errores en el Desarrollo</i>	Alta	Menor	Riesgo Tolerable	Revisiones de código y pruebas exhaustivas
<i>Recursos Insuficientes (Personal)</i>	Baja	Moderada	Riesgo Tolerable	Evaluar las necesidades de personal con anticipación y asignar recursos adecuados al proyecto
<i>Problemas de Escalabilidad de Datos</i>	Baja	Mayor	Riesgo Tolerable	Realizar pruebas de rendimiento y escalabilidad para identificar cuellos de botella y abordarlos de manera proactiva
<i>Cambios en los Requisitos del Módulo</i>	Muy Baja	Mayor	Riesgo Aceptable	Mantener una comunicación constante con los interesados para comprender y evaluar los cambios propuestos
<i>Escalada de Costos de Desarrollo</i>	Alta	Mínima	Riesgo Aceptable	Monitorear y controlar los costos a lo largo del proyecto
<i>Problemas con el Rendimiento y la Velocidad</i>	Baja	Menor	Riesgo Aceptable	Realizar pruebas de rendimiento durante el desarrollo y antes del lanzamiento

Tabla 3: Matriz de riesgos (Elaboración propia).

Para garantizar el éxito del proyecto, se realizaron capacitaciones a nivel interno del módulo con el modelo integrado y se desarrollaron de manera paralela avances en el software tanto en el backend como en el frontend para agilizar el proceso y evitar retrasos en el cronograma y validaciones de QA. También se realizaron reuniones semanales con desarrolladores de ambas áreas para evitar problemas de integración del módulo y resolver bugs de manera transversal.

9. Desarrollo del proyecto

En el proyecto se desarrolló, en primer lugar, la clasificación de los repuestos en base a criterios expertos utilizando como referencia una clasificación ABC multicriterio considerando el impacto práctico de los repuestos a través de parámetros que reflejan dentro de lo posible, la realidad, considerando los datos disponibles.

Los criterios más importantes para el control de inventario de repuestos son: el nivel de servicio y el costo, debido a que se debe establecer una política que permita disminuir al máximo el costo por almacenamiento, obsolescencia y pedido, a la vez que se responde efectivamente a la demanda del cliente, buscando evitar rupturas de inventarios de repuestos altamente críticos para el proceso (Rodríguez et al., 2019).

En base a la anterior cita se eligieron 4 criterios para la clasificación ABC:

- El costo unitario de los repuestos con un porcentaje del 50% de ponderación.
- El lead time (tiempo de envío) del repuesto con un 30% de ponderación.
- El porcentaje de indisponibilidad del repuesto con 10% de ponderación, el cual está inversamente relacionado al nivel de servicio del repuesto.
- Número de compras históricas en un 10% de ponderación, el cual permite diferenciar entre repuestos de baja y alta rotación.

En los datos entregados por el cliente, existen distintos precios unitarios y tiempo de entrega para los repuestos a lo largo del tiempo en las órdenes de trabajo, por lo tanto, se usó el promedio de estos valores en el tiempo. En el caso que la desviación estándar de los valores supere el umbral del 50%, se considera que el promedio no es un dato preciso, en cuyo caso se utiliza el último costo o lead time registrado para asignar un valor más representativo para los cálculos del modelo. También se estandarizó el costo en USD como unidad de medidas, ya que existen registros tanto en unidades CLP, USD o EUR. Se utilizaron las siguientes tasas de cambio: 892 CLP = 1 USD, 1.07 EUR = 1 US. Para el porcentaje de indisponibilidad, se calculó como la razón entre la cantidad de veces que ocurrieron desfases entre la orden de mantenimiento planificada y la llegada del repuesto, con el total de las órdenes de mantenimiento que requieren el respectivo repuesto.

Tras los cálculos, se realizó una normalización de los datos (Min-Max) para evitar dominancias de datos como el costo, que son mucho mayores a los demás parámetros, permitiendo a su vez

mantener la distribución de los datos. Tras realizar este análisis en los repuestos asociados a los 8 equipos mineros, se determinó trabajar con un total del 10% de los repuestos con el mayor puntaje ponderado de importancia según la clasificación multicriterio, para abarcar los repuestos más críticos. Con esto, se obtuvo un total de 24 repuestos críticos (listado en anexo 1).

En segundo lugar, para el pronóstico de la demanda de los repuestos críticos se determinó que la demanda de los repuestos críticos es uniforme con distribuciones de probabilidad Normal, Weibull o Poisson. Para determinar la distribución de la demanda de cada repuesto se utilizaron las librerías Scipy.stats & Reliability de Python en base a las órdenes de trabajo históricas de los 25 repuestos críticos en los desde el año 2006 hasta el año 2023, y para seleccionar la distribución que más representa cada demanda se realizó un test de Kolmogorov - Smirnov y pruebas de error cuadrático medio.

Para los modelos, se han utilizado funciones en Python que permiten modelar el punto de reorden de cada repuesto en base al nivel de servicio objetivo (95%) en base a bibliografía del Arte de Mantener (Pascual, 2005). Por último, se elaboró un modelo EOQ para determinar los lotes de pedidos de repuestos en base a sus tiempos de entrega, costos unitarios, costos de almacenamiento y costos de pedido. En el caso de los costos de almacenamiento, la empresa no tiene acceso a estos datos, sino únicamente a los costos individuales de los repuestos y sus órdenes de compra, por lo tanto, se asumirá un coste de almacenamiento porcentual respecto al valor del inventario en base a la siguiente cita: Normalmente, se acepta que los costes de almacenamiento por sí solos representan el 25 % del valor de inventario disponible (Rodríguez & Oliveros, 2018). Por tanto, se asume una tasa de descuento de 0.25 para efectos del modelo, a su vez, se estipulan los costos de pedido como el costo de la orden de mantenimientos menos los costos asociados a los repuestos involucrados. Se pueden visualizar los resultados de puntos de reorden y cantidad de lote para cada uno de los 24 repuestos críticos en el anexo 2.

10. Resultados del proyecto

Como resultado se logró determinar 24 repuestos críticos, de un total de 312 para 8 equipos mineros, los cuales no se encontraban clasificados en un inicio. Se tuvo que recurrir a varios criterios expertos e iteraciones para determinar los índices de criticidad de los repuestos, llegando a la conclusión de los cuatro factores más representativos utilizados en este proyecto. Permitiendo de esta forma al cliente poder focalizar sus recursos en aumentar la eficiencia operacional de sus equipos más críticos.

Al modelar el funcionamiento de la demanda en base a la data histórica, se observó un comportamiento principalmente constante al tratarse de mantenimientos programados. Por lo que se decidió utilizar distribuciones de probabilidad para una aproximación significativa a la realidad a través de ajustes. Se puede observar el comportamiento de los repuestos en el anexo 4. Gracias a esto, se pudo determinar en base al nivel de servicio objetivo un punto de reorden y un lote eficiente que, permite al cliente reducir sus quiebres stock reduciendo sus costos de oportunidad.

El porcentaje de cumplimiento del nivel de servicio se llevó de un promedio de 62.6% a un 95% para los 24 repuestos críticos, en un periodo de 1 año, al realizar las simulaciones, mejorando sustancialmente el nivel de servicio promedio de los 24 repuestos críticos, logrando reducir la tasa de quiebres de stock anuales de repuestos de 18 a 2 aproximadamente. Esto involucra un aumento en los costos de almacenamiento de 245 mil dólares mensuales a 305 mil, producto del aumento del nivel de inventario promedio de 126 a 188 unidades físicas mensuales para lograr el nivel de servicio objetivo (60 mil dólares adicionales), pero se disminuye el costo de oportunidad en un 32.4% ósea 97 mil dólares mensuales, por lo tanto, se genera un beneficio monetario de 444 mil dólares anuales en la producción de cobre. Se determinó el punto de reorden y un lote eficiente para cada uno de los repuestos críticos en base a su nivel de servicio objetivo. Esta solución se encuentra implementada en un módulo del software Rmes, de modo que el cliente puede obtener soluciones para todos los repuestos facilitando la gestión asociada a cada repuesto crítico, para así lograr una mayor eficacia en la planificación de los mantenimientos en base a la confiabilidad y la reducción de costos.

11. Conclusiones y discusión

El proyecto de optimización de la gestión de inventarios de repuestos críticos en Rmes Analytics presenta resultados significativos para mejorar la eficiencia operativa y el nivel de servicio. Tras una exhaustiva clasificación ABC multicriterio, a través del índice de criticidad, se identificaron 24 repuestos críticos, permitiendo focalizar esfuerzos en aquellos más relevantes para la operación de los equipos mineros. La aplicación de distribuciones de probabilidad en el pronóstico de demanda brinda mayor precisión en la planificación, reduciendo la frecuencia de quiebres de stock durante los mantenimientos planificados. Se realizaron test de Kolmogorov Smirnov y de error cuadrático medio para validar estos resultados, acorde a los resultados de varios estudios mencionados en el estado del arte donde las distribuciones representativas son la Gaussiana y la Poisson, para repuestos de alta y baja rotación.

La implementación del modelo EOQ para determinar lotes óptimos de pedidos asegura una gestión eficiente de inventarios, minimizando los costos asociados al almacenamiento y pedidos, la cual brinda adaptabilidad a las necesidades específicas del cliente, asegurando una gestión eficaz y a medida. Luego en base al nivel de servicio objetivo se determinó un punto de reorden que permite reducir los costos de oportunidad por quiebres de stock. A su vez este punto de reorden permite mantener un stock de seguridad eficiente para mantener la continuidad operacional de la planta.

La evaluación económica arrojó un VAN de 27.5 millones de pesos y una TIR del 19%, indicando una inversión rentable y sostenible en el tiempo. La capacidad de adaptación del modelo a distintos niveles de servicio objetivo brinda flexibilidad al cliente permitiéndole ajustar estrategias según sus necesidades específicas. La planificación detallada mediante un diagrama de Gantt se cumple de manera progresiva y bien estructurada, permitiendo la validación y ajuste constante en colaboración con las áreas de proyecto y QA tester. Sin embargo, la dependencia de desarrolladores trabajando en varios proyectos simultáneos provocó una demora en la implementación mayor a la estipulada, pero gracias a las medidas de mitigación se lograron avances simultáneos para evitar retrasos para la entrega final del proyecto.

En conclusión, el proyecto cumple con sus objetivos de manera parcial y eficiente, el proyecto no solo aborda la problemática de quiebres de stock, sino que también establece una base sólida para una gestión proactiva y eficiente de los repuestos críticos en el entorno minero. La combinación de metodologías, modelos y técnicas proporciona una solución integral que puede adaptarse

dinámicamente a las necesidades del cliente, el enfoque en la mejora de la disponibilidad de repuestos críticos, junto con la reducción de costos asociados, demuestra un impacto positivo en la confiabilidad y continuidad operativa de los equipos mineros con márgenes de beneficios rentables. Se reconoce la importancia de la validación constante durante la implementación y la necesidad de adaptarse a posibles cambios en el entorno operativo. La documentación detallada y la capacitación integral a los clientes son esenciales para garantizar una transición fluida y efectiva del nuevo sistema de gestión de inventarios.

El proyecto realizado en la empresa Rmes Analytics supuso desafíos y problemas complejos en el área de la ingeniería, donde se tuvieron que tomar una variedad de decisiones para lograr la solución planteada, gestionando avances con desarrolladores, proponiendo variedad de propuestas y modelos, implementando junto a desarrolladores y realizando validaciones con el área de producto y proyecto. A la hora de implementar un proyecto de ingeniería en una empresa de software se recomienda tener una comunicación continua con las distintas áreas e identificar los dolores que ocurren a nivel interno, ya que esto permite agilizar el proceso y poder entregar de manera alineada una solución más integral al cliente.

12. Referencias y bibliografía

Pascual, R. (2005). El Arte de Mantener. Santiago: Universidad de Chile.

Rojas Primo, P. P., & Taipe Tejeda, F. (2022). Impacto de una mejora de la gestión de inventario en los quiebres de stock de los repuestos.

Gato, M. P., Carboneras, M. C., Babiloni, E., & Tarradellas, E. G. (2010). Revisión de modelos de gestión de inventarios para repuestos reparables. En 4th International Conference On Industrial Engineering and Industrial Management, 1329-1335.

Arboleda, J., & Castillo, J. A. (2016). Modelo integrado de clasificación abc multicriterio, aplicado en el área de picking de un centro de distribución de repuestos. Revista de investigación en ciencias estratégicas.

Rodríguez, B. J. L., & Oliveros, G. I. G. (2018). Gestión de inventarios para reducir los costos del almacén de Manpower Perú EIRL. INGnosis, 4(1), 15-28.

Rodriguez, A. M. P., Pantoja, V. L. C., & Osorio, J. C. (2019). Sistema de control de inventarios multicriterio difuso para repuestos. Scientia et technica, 24(4), 595-603.

Saaty, T. L. (2014). Toma de decisiones para líderes. Rws Publications.

López Sánchez, G. P. (2016). Diseño e implementación de un módulo de gestión de repuestos críticos para una flota de equipos de transporte.

Noriega Flores, M. J., & Gómez Muñoz, J. F. (2021). Desarrollo de un modelo matemático para el cálculo de stock de repuestos de mantenimiento de distribución y alumbrado público en base a la Norma EN 62550 en la Empresa Eléctrica Riobamba SA.

Valencia-Cárdenas, M., Díaz-Serna, F. J., & Correa-Morales, J. C. (2015). Planeación de inventarios con demanda dinámica. Una revisión del estado del arte. Dyna, 82(190), 183-191.

Silver, E.A. (2004). An overview of heuristic solution methods, J. Oper. Res. Soc., 55(9), 936-956.

Rivas Alarcón, C. E. (2022). *Pronóstico de la demanda intermitente de repuestos aeronáuticos mediante métodos clásicos estadísticos y modelos lineales dinámicos* (Tesis doctoral, Universidad Santo Tomás).

COCHILCO. (2023). *Observatorio de costos COCHILCO (Presentación Julio 2023, Primer Trimestre 2023 vs 2022)*. Recuperado el 10 de septiembre de 2023, de <https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Bases%20de%20Datos/Precio-de-los-Metales.aspx>

Consejo Minero de Chile. (2021). Recuperado el 5 de septiembre de 2023, de <https://consejominero.cl/>

13. Anexos

Material	Texto breve	PuntuacionImportancia
1511261	REVESTIMIENTO CJTO METSO ZX11718052	0.648929463
1510099	BOTTOM SHELL CJTO METSO 17500211501	0.46610471
4177203	CONJ. PIÑÓN-CORONA P/MOL. FULLER 18"x28"	0.607183567
1481174	JUEGO PULPLIFTER METSO ZX11532128	0.212045167
1481175	CONO DESCARGA METSO ZX11536958	0.207599129
1366591	MANTO INF XXL 92,5" FULLER 1505426	0.206958791
1195355	MANTO INF XL 91" FULLER 720704201401	0.22917127
1195354	MANTO INF STD 89,5" FULLER 720449701202	0.243076131
1299858	SOPORTE RDMTO SPLIT SDFD280E11001	0.251423859
1273998	PIÑON FULLER 1505485	0.318540096
1185376	MANTO SECTOR INFERIOR PLNTR021113	0.226935138
1496363	COLLAR POLVO MK-I METSO 17403427501	0.298587207
1030751	MANTO INFERIOR PLNSEY108230REV1	0.211906593
1203681	CONCAVA INF 507kg FULLER 1505702	0.206587667
1203659	CONCAVA SUP 476kg FULLER 1505700	0.21387265
1480970	CORAZA MONOBLOCK METSO ZX11473091	0.203571218
1206705	ELEVADOR PULPA PLNDMV37515-6	0.201162401
1193280	SELLO RETENEDOR POLVO FULLER 3503318	0.206028914
1451345	BARRA ELEVADORA METSO ZX11435055	0.234777191
1203680	CONCAVA INTMED 422kg FULLER 1505701	0.23658709
1212193	SELLO RETENEDOR FULLER 3501418	0.270795262
4149766	SPIDER SEAL HS7 DURALIP CHICAGO RAWHIDE	0.21312713
1030659	SELLO ACEITE ALLIS CHALMERS 17103705001	0.227485544

Anexo 1: Repuestos críticos obtenidos en Python y exportados en formato Excel.

Material	Costo_Envío	Lambda_promedio	PrecioFinal	LeadTimeFinal	Sigma	EOQ	Tiempo de Ciclo	Punto de Reorden	Costo Global
1030659	532.4740625	0.326923077	532.4740625	1.631111111	2.266932242	1.61721508	4.946775539	4.262019584	296.3911608
1030751	12180.97501	0.274038462	12180.97501	4.675968992	0.843788923	1.48064435	5.403053068	2.66930462	5659.665645
1185376	16061.03203	0.139423077	16061.03203	5.475362319	0.360868054	1.056117709	7.574913224	1.356966989	4424.690822
1193280	4005.009903	0.278846154	8010.019806	6.779710145	0.563918841	1.056117709	3.787456612	2.818060049	3336.991521
1195354	20593.85919	0.096153846	41187.71839	8.333333333	0.295513334	0.620173673	6.449806199	1.287358231	7233.211592
1195355	17092.28947	0.129807692	34184.57894	6.794047619	0.350948971	0.720576692	5.551109332	1.459179331	7594.971554
1203659	1619.650152	2.293269231	4858.950456	4.163218391	5.921838147	2.47293037	1.078342803	19.28793759	12699.67075
1203680	660.9197455	1.788461538	1982.759237	4.502564103	5.046973699	2.183856856	1.221081253	16.35419572	4120.248033
1203681	1753.641882	2.149038462	5260.925647	3.883908046	5.689374709	2.393902511	1.113941213	17.7048564	12936.31126
1206705	16461.08501	0.783653846	16461.08501	6.183333333	2.701998208	2.5038432	3.195088255	9.289984501	18153.29814
1212193	350.8794843	0.014423077	701.7589686	3.775	0.119514533	0.240192231	16.653328	0.251031028	37.68263128
1273998	25906.03307	0.028846154	51812.06614	8.766666667	0.167777779	0.33968311	11.77568116	0.528854522	3760.871203
1299858	67002.74	0.019230769	67002.74	9.066666667	0.195641851	0.39223227	20.39607805	0.496161183	4654.650352
1299860	193.867922	0.076923077	193.867922	7.355555556	0.514378903	0.784464541	10.19803903	1.41188997	40.08931777
1366591	23977.82413	0.105769231	47955.64825	4.961403509	0.323575114	0.650443636	6.149648918	1.056997533	9059.594718
1451345	2850.480357	3.139423077	8551.441071	7.351190476	10.64739126	2.893405411	0.921636027	40.59189716	30018.08887
1480970	15758.474	1.740384615	15758.474	7.077777778	7.764026039	3.731363949	2.143988126	25.08874195	34897.12511
1481174	65193.16788	0.038461538	195579.5036	5.463636364	0.192771644	0.320256308	8.326663998	0.527220998	15476.87031
1481175	50034.6459	0.086538462	150103.9377	5.735897436	0.65364939	0.480384461	5.551109332	1.57153331	22137.47804
1496363	26723.36875	0.009615385	26723.36875	9.170833333	0.138675049	0.277350098	28.8444102	0.316281247	1226.467286
1510099	947854.36	0.004807692	947854.36	9.2	0.069337525	0.196116135	40.79215611	0.158280848	28008.75838
1511261	1613906.91	0.067307692	1613906.91	6.4	0.269708129	0.733799386	10.9021623	0.874399625	257207.9611
4149766	300.5228102	0.019230769	601.0456203	4.155555556	0.169156431	0.277350098	14.4222051	0.358152099	38.85169625
4177203	735354.5	0.004807692	735354.5	50.93333333	0.069337525	0.196116135	40.79215611	0.358921874	21752.09666

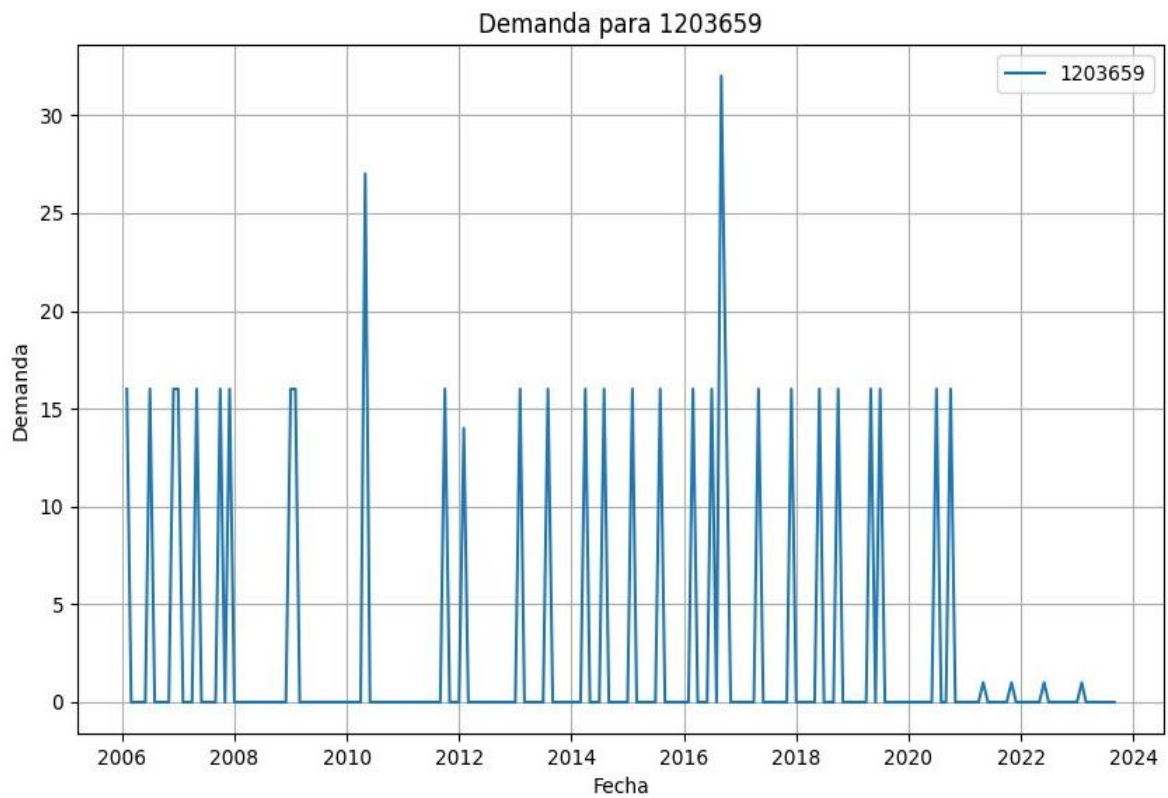
Anexo 2: EOQ y punto de reorden de los repuestos críticos obtenidos en Python y exportados en formato Excel.

	Año					
	0	1	2	3	4	5
Ingresos por ventas	\$ 56,502,600	\$ 72,050,295	\$ 87,187,330	\$100,152,505	\$109,244,240	\$113,187,361
Ingresos Adicionales por Incremento de Clientes (33%)	\$ 18,645,858	\$ 22,796,354	\$ 26,448,357	\$ 29,128,816	\$ 30,463,181	\$ 30,261,492
Costos fijos (Inversión en Mejoras de Software)	\$ -12,000,000	\$ -12,000,000	\$ -12,000,000	\$ -12,000,000	\$ -12,000,000	\$ -12,000,000
Costos Operacionales	\$ -11,300,520	\$ -13,815,972	\$ -16,029,307	\$ -17,653,828	\$ -18,462,534	\$ -18,340,298
Costos por Administración y Ventas	\$ -11,300,520	\$ -13,815,972	\$ -16,029,307	\$ -17,653,828	\$ -18,462,534	\$ -18,340,298
Resultado Operacional	\$ 40,547,418	\$ 55,214,705	\$ 69,577,072	\$ 81,973,665	\$ 90,782,353	\$ 94,768,256
Utilidad antes impuestos	\$ 40,547,418	\$ 55,214,705	\$ 69,577,072	\$ 81,973,665	\$ 90,782,353	\$ 94,768,256
Impuesto de Primera Categoría (27%)	\$ -10,947,803	\$ -14,907,970	\$ -18,785,809	\$ -22,132,890	\$ -24,511,235	\$ -25,587,429
Utilidad después impuestos	\$ 29,599,615	\$ 40,306,735	\$ 50,791,263	\$ 59,840,776	\$ 66,271,118	\$ 69,180,827
Flujo Operacional	\$ 29,599,615	\$ 40,306,735	\$ 50,791,263	\$ 59,840,776	\$ 66,271,118	\$ 69,180,827
Inversión fija	\$ -200,000,000					
Capital de trabajo	\$ -5,850,000					
Recuperación del capital de trabajo						\$ 5,850,000
Flujo Captales	\$ -205,850,000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 5,850,000
Flujo de Caja Privado	\$ -176,250,385	\$ 40,306,735	\$ 50,791,263	\$ 59,840,776	\$ 66,271,118	\$ 75,030,827

Tasa de inflación (Banco Central)	0.043
WACC (Tasa de descuento)	0.12

Valor Actual Neto (VAN)	\$ 27,512,737
Tasa Interna de Retorno (TIR)	17.5%

Anexo 3: Cálculo del VAN y TIR (Se asumen ingresos en año 0 ya que se vende el módulo dentro de un pack del software).



Anexo 4: Gráfico comportamiento de la demanda de mantenimientos para uno de los 24 repuestos críticos.