

UAI

FACULTAD DE
INGENIERÍA Y
CIENCIAS

ANÁLISIS EN LA PRODUCCIÓN DE COBRE DEL MOLINO DE BOLAS DE CARMEN DE ANDACOLLO A PARTIR DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA ESCOBILLA SCHUNK

Proyecto para optar al título de Ingeniero Civil en Minería e Ingeniero Civil Industrial

Kevin Guzmán Zamudio

Profesor: Alberto Inostroza

Universidad Adolfo Ibáñez

13/12/2023

ÍNDICE

1. RESUMEN EJECUTIVO	3
2. INTRODUCCIÓN	5
2.1 Contexto.....	5
2.1.1 Wila SPA	5
2.1.1.1 Escobillas de carbón.....	5
2.1.2 Carmen de Andacollo - Teck	6
2.2 Problema.....	7
3. OBJETIVOS	9
3.1 Objetivo general	9
3.2 Objetivos específicos.....	9
4. ESTADO DEL ARTE	10
5. SOLUCIONES	12
6. EVALUACIÓN ECONÓMICA	16
7. METODOLOGÍA	18
8. MEDIDAS DE DESEMPEÑO	20
9. DESARROLLO DEL PROYECTO	21
10. RESULTADOS	34
11. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN	35
12. BIBLIOGRAFÍA	35
13. ANEXOS.....	36

1. RESUMEN EJECUTIVO

El siguiente proyecto fue realizado para la empresa Wila con información brindada por Teck para la realización de un estudio de impacto en la productividad del molino de bolas y gestión de inventario de la planta de Carmen de Andacollo producto de la implementación de una nueva escobilla de carbón, con la finalidad de reducir la cantidad de mantenciones programadas y no programadas y, en consecuencia, aumentar la disponibilidad física del equipo.

El objetivo general del proyecto consistió en aumentar un 0,5% la producción trimestral de cobre mediante la creación de un modelo de planificación y gestión de inventario. Para esto, se realizó como solución una planificación minera operacional de mediano plazo, junto con un modelo de gestión de inventario en R Studio enfocado en el método (s,S), los cuales cumplieron con éxito el objetivo general al obtener un resultado de un aumento de producción de cobre trimestral de 0,71%.

Según los resultados, se pudo reducir de 12 a 4 mantenciones programadas anuales, implicando un ahorro de 45,7 horas anuales de operación, lo que se vio reflejado en el aumento de un 0,64% en la disponibilidad física del molino y un aumento de 113.795 toneladas más de procesamiento al año. El impacto económico que se ve reflejado según estos parámetros, es la reducción de costos en \$605.742 USD sólo en el recambio de escobillas.

Con respecto al inventario, se realizó el modelo de gestión según el método (s,S), logrando proyectar un aumento del 64,35% en el stock de seguridad, superando el límite crítico y llegando a un stock de seguridad constante de 162 unidades, siendo un poco menos de 2 juegos de 96 unidades, reduciendo el riesgo constante de quiebre de stock.

Finalmente, debido al proyecto, Wila logró aumentar en un 23,69% los ingresos anuales en el sector de molino de bolas, pasando de tener 68 motores a 72, implicando aumentar el importe anual de \$180.246.286 a \$222.915.214, debido a la rotación anual de escobillas y su precio por unidad.

Abstract

The following project was carried out for Wila, with information provided by Teck for an impact study on the productivity of the ball mill and inventory management of the Carmen de Andacollo plant as a result of the implementation of a new carbon brush, in order to reduce the amount of scheduled and unscheduled maintenance and, consequently, increase the physical availability of the equipment.

The overall objective of the project was to increase quarterly copper production by 0.5% through the creation of a planning and inventory management model. For this, a medium-term operational mine planning solution was developed, together with an inventory management model on R Studio focused on the (s,S) method, which successfully met the overall objective by resulting in an increase in quarterly copper production of 0.71%.

According to the results, it was possible to reduce from 12 to 4 programmed annual maintenances, implying a saving of 45.7 hours of operation per year, which was reflected in an increase of 0.64% in the physical availability of the mill and an increase of 113,795 tons of processing per year. The economic impact reflected by these parameters is the cost reduction of \$605,742 USD only in the replacement of brushes.

For the inventory, the management model was carried out according to the (s,S) method, which has variables such as delivery time, product duration and quantity of brushes to be used. After finalizing the model, an increase of 64.35% in safety stock was projected, surpassing the critical limit and reaching a constant safety stock of 162 units, being a little less than 2 sets of 96 units, considerably reducing the constant risk of stock breakage.

Finally, due to the project, Wila was able to increase its annual income in the ball mill sector by 23.69%, from 68 to 72 motors, increasing the annual amount from \$180,246,286 to \$222,915,214, due to the annual rotation of brushes and their price per unit.

2. INTRODUCCIÓN

2.1 Contexto

2.1.1 Wila SPA

Wila SPA es una empresa de ingeniería que se dedica a aumentar la confiabilidad y productividad de equipos críticos mediante la excelencia en escobillas de carbón. Además, es partner exclusivo de Schunk, empresa alemana líder en tecnología de transmisión de corriente quien es proveedor de las escobillas de carbón Schunk.

La empresa cuenta con tres miembros fundadores y un socio, los cuales componen el directorio. Posteriormente, se encuentra el gerente general quien es el encargado de velar por el desarrollo de las dos áreas de la empresa, el área de operaciones y el área comercial. El área de operaciones está compuesta por 6 personas, mientras que el área comercial está compuesta por 7 personas. Dentro del área comercial se encuentra el gerente comercial, 5 Key Account Manager y una Back Office. Actualmente, estoy cubriendo el puesto de Key Account Manager.

El elemento fundamental de la empresa, son las escobillas de carbón, representando el 76% de la facturación anual en 2022. Esta es una pieza primordial en los motores de equipos críticos fijos y móviles, además, necesita de un producto complementario para su operación, que es el portaescobilla, otro elemento importante para Wila.

En Wila, el 90% de la venta anual está enfocada a la industria minera, mientras que el otro 10% se compone de ventas al área de Otras Industrias, área compuesta por parques eólicos, cementeras, ferrocarriles urbanos, etc.

Por otro lado, dentro de la industria minera, Wila está presente en la mayoría de las faenas grandes en Chile, como son Escondida, Teniente, Los Bronces, Pelambres, Chuquicamata, Collahuasi, etc. Además, está presente en múltiples equipos críticos de rajo, mina y planta, como por ejemplo: correas transportadoras, chancadores, molinos, palas, camiones Caex, puentes grúa y ferrocarriles.

2.1.1.1 Escobillas de carbón

Como se mencionó anteriormente, las escobillas de carbón son el elemento fundamental para Wila, siendo su mayor fuente de ingresos. Las escobillas son los elementos que convierten la energía eléctrica en energía mecánica, siendo vital para motores de corriente alterna.



Figura 1. Escobillas de carbón.

Al ser un elemento crítico en el motor de un equipo, es un componente que debe ser muy bien cuidado, ya que las escobillas son las encargadas de transmitir la corriente desde un punto fijo hacia uno móvil, en este caso anillos del motor, sufriendo un desgaste milimétrico constante debido a su trabajo. Así, para que un equipo no sufra consecuencias como la detención completa o un flashover, se necesita un recambio programado según la duración y longitud de la escobilla.

2.1.2 Carmen de Andacollo - Teck

Carmen de Andacollo (CDA), de la compañía Teck, es una operación minera a rajo abierto que se encarga de producir concentrado de cobre y oro. Está ubicada a unos 1.000 msnm en el poblado de Andacollo, a unos 60 km de la ciudad de La Serena, región de Coquimbo.

En la actualidad, cuentan con un depósito de cobre con reservas de 397 millones de toneladas, con leyes de un 0,42% de cobre y 0,13 g/t de oro. La planta de concentración de Carmen de Andacollo, procesa alrededor de 55 ktpd de mineral, y está compuesta por tres líneas de procesamiento antes de depositarlo en el stockpile. La primera, con una capacidad de procesamiento de 20 ktpd de mineral, está compuesta solo por un chancador giratorio. La segunda línea, con una capacidad de procesamiento de 20 ktpd de mineral, está compuesta por un chancador de mandíbula y dos chancadores de cono. Por último, la tercera línea, con una capacidad de procesamiento de 10 ktpd de mineral, está compuesta por un chancador de mandíbula y dos chancadores de cono (secundario y terciario).

Después de almacenar el mineral en el stockpile, pasa al área de molienda. El área de molienda está compuesta por dos chancadores de cono, un molino SAG y dos molinos de bolas convencionales.

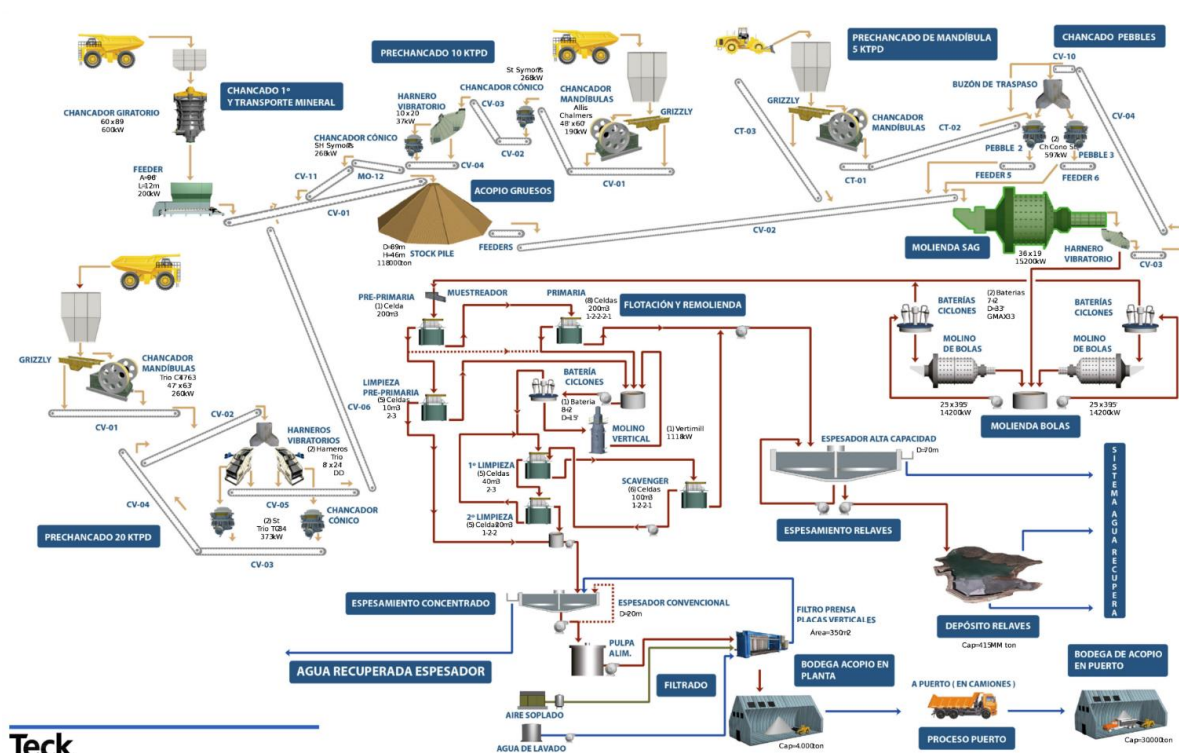


Figura 2. Proceso de concentración del cobre en planta de Carmen de Andacollo.

En el año 2022, se produjeron en total 38.600 toneladas de concentrado de cobre y 900 toneladas de cátodos de cobre, mientras que por el lado del oro, se produjeron 25.900 oz. Por otro lado, en términos económicos, el año pasado se registraron ingresos por casi US \$400M.

2.2 Problema

Durante un par de años, Wila ha sido proveedor de escobillas para el molino SAG de la planta de concentración de Carmen de Andacollo. Sin embargo, a principios de año se dio a conocer a la empresa una situación respecto a fallas operacionales producto del precario desempeño de las escobillas originales (OEM) en los molinos de bolas.

En primer lugar, para entender el funcionamiento del área de molienda, esta está compuesta principalmente por una línea SAG que funciona en conjunto, integrada por un molino SAG de 36' x 19' y dos molinos de bolas convencionales con dimensiones de 25' x 39,5'. Cada molino de bolas cuenta con dos motores, los que ocupan 24 escobillas cada uno. La operación de los molinos es mediante molienda húmeda, con un procesamiento de mineral de 8.718 tpd cada uno.

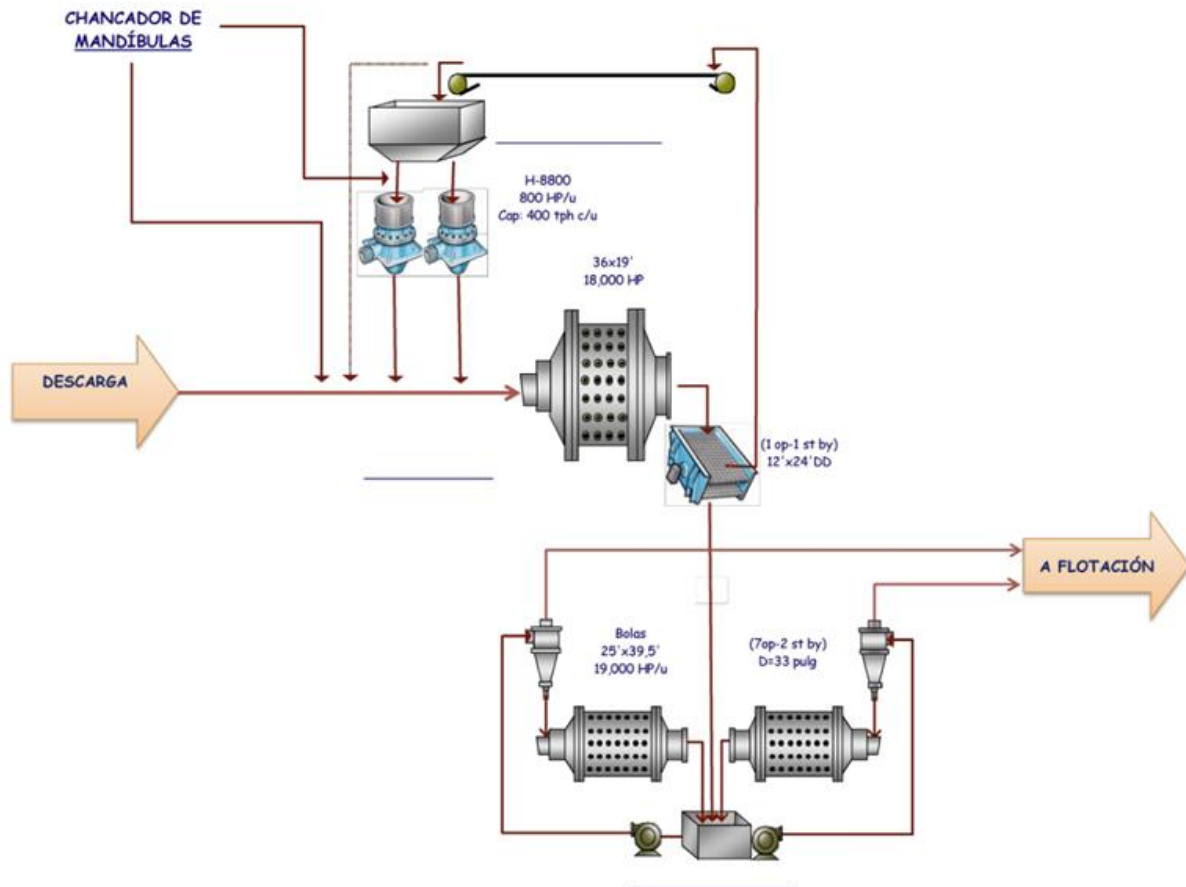


Figura 3. Diagrama del área de molienda en planta de concentración de Carmen de Andacollo.

Después de la manifestación de inquietud por parte de Teck, se hizo una recopilación de información sobre el estado del equipo y sus mantenciones. Dentro de la información recabada por parte de Wila, junto a la entregada por Teck, se encontró lo siguiente.

En primer lugar, se identificó una baja disponibilidad del molino con respecto a otros molinos similares en la industria. Las escobillas OEM del molino de bolas de Carmen de Andacollo duran aprox. 1 mes, requiriendo 12 mantenciones programadas anuales solo para el recambio de escobillas, sin embargo, al comparar con otros molinos en los que Wila está presente (Anexo 1), se registra una duración de escobillas de entre 3 a 9 meses, siendo equivalente de 3 a 4 veces más de mantenciones programadas anuales, afectando la disponibilidad física del equipo así como también su productividad y la productividad de la planta.

Cabe destacar que en Carmen de Andacollo se ocupan 5 horas para el recambio de escobillas, siendo a lo menos un 25% más de lo que ocupan otras plantas mineras, ya que se demoran entre 3 a 4 horas por mantención para recambio de escobillas.

En segundo lugar, se registró que el porcentaje de área de contacto escobilla-motor era menos de un 70%, inferior al 80% que es lo recomendado.

Al tener menos área de contacto, existe una separación entre la escobilla y el motor, provocando chispas visibles que pueden provocar un desgaste acelerado de la escobilla. A

causa de lo anterior, se comentó que se tuvieron dos mantenciones no programadas debido al desgaste acelerado de las escobillas, con una duración de 7 y 12 horas respectivamente. La primera mantención ocurrió por el mal posicionamiento de la escobilla, y, en vez de tener una duración de 1 mes tuvo una duración real de 6 días. Se sufrieron pérdidas por aproximadamente US\$60.000 según información de Teck. La segunda mantención no programada, fue por la misma causa de la primera, sin embargo, esta causó daños en el motor, provocando la detención del molino por 11 horas para el chequeo del motor y un nuevo recambio de escobillas. Debido a esto, según Teck, sufrieron pérdidas por US\$185.000.

En tercer lugar, Teck contaba con un stock de 128 escobillas OEM, sin embargo, al momento del recambio de las escobillas antes del problema mencionado anteriormente, se usaron 48 escobillas, pero, debido al desgaste acelerado, tuvieron que usar 48 escobillas más. Como consecuencia, la planta tuvo sólo 32 escobillas en el inventario por unos días, bordeando el 10% de las 300 escobillas como inventario ideal que estableció Teck. Cabe destacar que el 36,6% del inventario ideal es el límite crítico del stock de seguridad. Lo anterior podría traer como consecuencia la detención total de la planta debido a la parada del molino.

En resumen, las principales problemáticas del proyecto son:

- Baja disponibilidad del molino con respecto a otros molinos similares en la industria. Se realizan de 3 a 4 veces más mantenciones programadas en el molino de CDA.
- Existió desgaste acelerado de la escobilla OEM, lo que provocó problemas en la gestión del inventario, superando el límite crítico de stock establecido por Teck.
- Ocurrieron 2 mantenciones no programadas durante julio de 2022 y julio de 2023 a causa de la problemática anterior, con una duración de 19 horas en total, generando pérdidas por alrededor de US\$245.000.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Diseñar un modelo de planificación y gestión de inventario con el fin de aumentar un 0,5% la producción trimestral de cobre, mediante la implementación de la escobilla Schunk, en un periodo de 4 meses.

3.2 Objetivos específicos

- Objetivo específico 1: Calcular los parámetros antiguos y nuevos del molino de bolas debido a la implementación de la nueva escobilla.
- Objetivo específico 2: Realizar un método de planificación para determinar la nueva disponibilidad física del equipo, y, en consecuencia, su producción, además del beneficio económico para Teck.

- Objetivo específico 3: Medir el impacto económico y operacional para Teck mediante el procesamiento anual de mineral.
- Objetivo específico 4: Crear un modelo que permita asegurar un stock de seguridad y planificar un punto de reorden.
- Objetivo específico 5: Calcular el impacto económico que tendrá en Wila el proyecto junto al potencial posicionamiento que tendrá en el área de molienda, planta y otras faenas de Teck.

4. ESTADO DEL ARTE

Los principales temas a tratar en este proyecto son: baja disponibilidad física del molino de bolas, que conlleva a planificar una menor producción de toneladas de cobre por día con respecto a otros molinos similares; y el constante riesgo de quiebre de stock debido al sobrepaso del límite crítico del stock de seguridad en su inventario.

Para esto, se analizaron soluciones implementadas y no implementadas tanto para la industria minera como para otras industrias, permitiendo analizar cómo se han resuelto los problemas.

En primer lugar, el mantenimiento es una serie de acciones que se realizan para preservar o mejorar el estado de un equipo, dentro del cual existen distintos tipos de mantenimiento, los cuales son: preventivo, correctivo y reactivo.

El mantenimiento reactivo corresponde a cuando se produce una falla en el equipo que conlleva a actuar rápidamente en una mantención no programada, ya que se necesita solucionar el problema urgentemente. El mantenimiento correctivo se realiza cuando se necesita corregir un elemento o variable del equipo después de la última mantención. Por último, el mantenimiento preventivo consta de una serie de mantenciones programadas para evitar las fallas en el equipo, evaluando y cambiando constantemente los elementos críticos del equipo que pudiese provocar una falla en un corto o mediano plazo. (Keith Mobley, s. f.).

Este proyecto está enfocado en las mantenciones preventivas y programadas, donde se contempla el recambio de la escobillas según la tasa de desgaste, el cual puede afectar al molino de bolas si no se llega a realizar el cambio en el momento adecuado.

Dentro de las distintas soluciones para esta problemática, se encuentran:

1. Plan de mantenimiento: Esta solución consta del diseño de un plan de mantenimiento a un molino de bolas para la Compañía Minera Cerro Negro (Zamora, 2018).

El proyecto consistió en definir los componentes críticos del equipo y aplicar el modelo de Weibull para establecer la tasa de fallas, la confiabilidad del equipo con su respectiva curva, etc.

Luego, según los resultados, se recomendó el cambio a un tipo de mantenimiento preventivo junto a un reporte de fallas y chequeo trimestral.

2. Análisis de parámetros de operación: Este proyecto se basó en el análisis de los parámetros operaciones de un molino de bolas y su influencia en la producción (Gonzalo Astuhuaman, 2019).

El objetivo de esta investigación fue estudiar variables operacionales como la velocidad crítica del molino y relacionarla con variables mecánicas que pudiesen influenciar la producción, como lo son el tamaño de las bolas, potencia del molino, tipo de molienda y volumen de la carga.

Finalmente, con los resultados obtenidos, se hicieron recomendaciones acerca del aumento de hasta un 78% de la velocidad crítica del molino, además de mantener un volumen constante de carga de un 42,8%, con la finalidad de aumentar la productividad del equipo.

3. Modelo de optimización para planificación: El siguiente proyecto de tesis consistió en la creación de un modelo de optimización para la evaluación de diferentes escenarios que permitan la toma de decisiones en la planificación de corto y mediano plazo.

El modelo de optimización tiene como función objetivo maximizar la producción de cobre fino, con restricciones geo metalúrgicas y operacionales.

En este proyecto, se establece el criterio de “unidades de reservas mineras (MRU)” (Vargas Vergara, 2011), las cuales son capaces de reducir los tiempos de cálculo e integrar áreas que influyen en la operación de equipos críticos en minería, posibilitando la recuperación extra de cobre fino de aproximadamente un 37%, junto con el aumento de un 20% en el porcentaje de recuperación de toneladas métricas de cobre fino.

Por otro lado, respecto a la segunda problemática se encuentra la gestión de inventario, lo que implica el manejo óptimo y constante de los bienes de la empresa en existencias, siendo importante para el almacenamiento o venta de distintos productos. Dentro de la gestión de inventario se plantean tres situaciones, cuándo debe revisarse el stock, cuándo se debe hacer el pedido y cuál es ese momento adecuado para realizarlo. (Silver, 2008).

La gestión de inventario está enfocada en eliminar los quiebres de stock, minimizar los costos de almacenaje en existencias y minimizar los costos totales del pedido.

Para la segunda problemática se identificaron distintas propuestas de solución, siendo una de ellas para la industria minera y la otra para la industria automotriz. Las soluciones son las siguientes:

1. Sistema de gestión de inventario: Este proyecto estuvo dedicado a la administración y el control de los activos del área de mantenimiento, con la finalidad de crear un sistema de gestión de inventario para satisfacer la demanda de elementos críticos utilizados en las mantenciones de la minera Antucoya (Cataldo Alfaro, 2022).

Además de enfocar el proyecto a la gestión del stock del área de mantenimiento de la planta de Antucoya, se tuvo como objetivo la mitigación de impactos por falta de control de planificación de demanda y de presupuesto.

Como resultado, se hizo una proyección de demanda comparándola con la vida útil de cada activo, logrando determinar la demanda mínima y máxima por periodo y calcular el stock de seguridad, logrando prevenir el desabastecimiento o quiebre de stock.

2. Propuesta de mejora de la gestión de inventario: Debido al rápido crecimiento de la empresa Repuestos España, se registró un notorio aumento en los niveles de oferta, lo que trajo consigo problemas de gestión de inventario tanto físico como administrativos (Nail Gallardo, 2016).

Este proyecto consistió en la priorización de productos con más impacto en las ventas. Después de un análisis de ciertos escenarios, se determinaron los productos que generan la mayor parte de las ganancias, siendo ubicados en el primer nivel, luego, se hizo una reubicación de estos en el almacén, logrando reducir un 15,4% del total de metros cúbicos utilizados en la bodega, además de reducir los costos totales en un 0,53%.

5. SOLUCIONES

Luego de investigar las soluciones en el estado del arte, se escogieron cinco variables con sus respectivas ponderaciones para poder determinar la solución más acorde al proyecto, donde dos de ellas corresponden una para cada problemática. Estas se medirán con notas de 1 a 10 según su importancia para el desarrollo de la solución y el contexto del problema, donde 1 es la nota mínima y 10 la nota máxima. Las variables a analizar son:

- Alcance: Corresponde a si la solución del proyecto a realizar puede implementarse dentro del plazo establecido.
- Costo de implementación: El costo de implementación del proyecto es accesible para Wila.
- Conocimientos acordes: Se determina si corresponden las herramientas otorgadas por las carreras cursadas.
- Impacto en la producción (problemática 1): Qué tan importante es el impacto en la producción en la faena y cómo influye en términos económicos.
- Mitigación de riesgo (problemática 2): Qué tanto se disminuye el riesgo al aumentar el porcentaje de stock en el almacén.

A estas variables, se les asignaron ponderaciones para poder elegir la solución de manera más adecuada al contexto del problema. Las ponderaciones son las siguientes:

Problemática 1	
Variables	Ponderación
Alcance	20%
Impacto en la producción	35%
Costo de implementación	25%
Conocimientos acordes	20%

Problemática 2	
Variables	Ponderación
Alcance	20%
Mitigación de riesgo	35%
Costo de implementación	25%
Conocimientos acordes	20%

Tabla 1 y 2.

Ponderación para variables en la elección de la solución.

		Alcance	Costo de implementación	Conocimientos acordes	Impacto en producción	Mitigación de riesgo	Promedio
Problemática 1							
1. Estado del arte	1.1 Plan de mantenimiento a un molino de bolas	8	6	3	8	-	6,5
	1.2 Análisis parámetros de operación	9	8	6	6	-	7,1
	1.3 Modelo de optimización para planificación	6	7	5	8	-	6,8
2. Propuestas de solución	2.1 Planificación minera producto del cambio de escobilla	9	9	8	5	-	7,4
	2.2 Plan de monitoreo en tiempo real	5	3	6	9	-	6,1
Problemática 2							
1. Estado del arte	1.1 Sistema de gestión de inventario	8	5	7	-	8	7,1
	1.2 Propuesta de mejora de la gestión de inventario	9	7	5	-	9	7,7
2. Propuesta de solución	2.1 Modelo de gestión de inventario con método (s,S)	9	7	8	-	8	8,0

Tabla 3. Primera parte de Carta Gantt del plan de implementación.

Como se puede apreciar en la Tabla 3, se generó un promedio para cada solución, permitiendo tomar la decisión más adecuada para la solución del proyecto.

En primer lugar, para la problemática de baja disponibilidad física del molino con respecto a la industria, se llegó a la decisión de realizar una planificación minera, que tuvo una puntuación de 7,4.

Esta solución está enfocada en el aumento de la producción anual de toneladas de cobre mediante la implementación de la escobilla Schunk, sin embargo, se realizará a nivel trimestral debido al plazo que debe tener el proyecto y su implementación. Consiste en establecer una planificación minera que permita medir el beneficio económico del proyecto en base a la nueva producción, donde se puedan tomar decisiones estratégicas en base a este cambio, además, abarca un horizonte de tiempo óptimo para el proyecto. Tiene como objetivo el aumento de la disponibilidad física del molino para establecer una planificación anual de mantenciones programadas para el equipo y su línea de producción.

En la segunda etapa del proyecto, para la problemática referente al constante riesgo de quiebre de stock, se analizaron dos soluciones de diferentes industrias, sin embargo, de cada una de ellas se consideraron herramientas como referencias para agregarlas y desarrollar una propuesta de solución de un modelo de gestión de inventario, la cual tuvo un 8 como puntuación.

Este modelo de gestión de inventario, se realizará en R Studio, mediante el método (s,S). El modelo está constituido de tres sub-etapas, las cuales son:

- Recopilación de información de parámetros de operación: Información brindada por Teck.
- Cálculo de demanda, stock de seguridad y punto de reorden: Cálculos a partir de las ecuaciones del método indicadas en la metodología.
- Creación de gráfico para detallar puntos anteriores y concluir el modelo: Resultados a partir de la subetapa anterior para presentar la propuesta del modelo.

Este modelo permitirá tener un mayor control sobre el inventario, disminuyendo la incertidumbre respecto a los quiebres de stock, además, se podrán realizar proyecciones para estimar el presupuesto anual y de inventario, permitiendo la creación de contrato con clientes para asegurar el stock de seguridad.

Para el plan de implementación se dividió el proyecto en cuatro etapas. La primera etapa fue desarrollada en el mes de junio y consistió en el levantamiento de la información, ya sea del equipo donde se desarrolla el proyecto y el motor, además de variables internas y externas que puedan afectar la implementación de la escobilla.

En segundo lugar, se presentó el proyecto al agente clave, confirmando la implementación de la escobilla.

La tercera etapa, realizada a finales de junio, consistió en la implementación de la escobilla en el molino de bolas, donde se realizó una capacitación para los operadores de mantenimiento junto al jefe de turno de mantención eléctrica, en el cual se explicó cómo funcionan las escobillas y se mostró el correcto recambio de estas en el molino. Con respecto a la cuarta y quinta etapa, se desarrollaron las soluciones para el proyecto, en un plazo de 3 meses.

La última etapa consistió en la recopilación de resultados de la escobilla Schunk para el desarrollo del proyecto. En septiembre se recolectaron datos del estado final de la escobilla en el motor 1 y 2 del molino de bolas, mientras que en diciembre se recopilaban los últimos resultados.

PLAN DE IMPLEMENTACIÓN												
MES	JUNIO				JULIO				AGOSTO			
ETAPAS	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
Levantamiento de información												
Propuesta de proyecto												
Implementación												
Planificación minera												
Modelo de gestión de inventario												
Recopilación de resultados												

Tabla 4. Primera parte de Carta Gantt del plan de implementación.

[illegible]

Tabla 5. Segunda parte de Carta Gantt del plan de implementación.

A continuación, se mostrará la creación de la matriz de riesgo según dos variables, la probabilidad de que ocurra un suceso y la gravedad de la consecuencia de este. Se usó una clasificación del 1 al 5 para las dos variables, siendo 1 el mínimo y 5 el máximo, dando como resultado la siguiente matriz de riesgo:

		Probabilidad				
		Remota	Inusual	Posible	Alta	Casi seguro
Consecuencia		1	2	3	4	5
Despreciable	1	1	2	3	4	5
Menor	2	2	4	6	8	10
Significativa	3	3	6	9	12	15
Mayor	4	4	8	12	16	20
Severa	5	5	10	15	20	25

Tabla 6. Valores de la matriz de riesgo.

Sucesos	Probabilidad	Consecuencia	Puntaje
Levantamiento de información			
Mal análisis de escobilla OEM	1	5	5
Falta de información	1	2	2
No elegir calidad correcta de escobilla Schunk	1	4	4
Propuesta de proyecto			
Error de cálculo en parámetros	2	1	2
Creación de mala relación con agente clave	2	5	10
Implementación			
Baja asistencia a capacitación técnica	3	1	3
Mal posicionamiento de la escobilla en motor	2	5	10
Demora en el proceso de recambio de escobillas	3	2	6
Desarrollo			
Desgaste acelerado	3	5	15
Flash over	3	5	15
Bajo porcentaje de área de contacto escobilla-motor	3	5	15
Detención no programada del equipo	3	5	15
Detención no programada de la línea	2	5	10
Acanalamiento en anillos del motor	3	5	15
Recopilación de resultados			
Falta de comunicación para coordinación de visitas	3	1	3

Tabla 7. Sucesos y sus respectivos riesgos que pueden afectar la implementación del proyecto.

Como se puede apreciar en la Tabla 7, existen ciertos sucesos que pueden afectar el desarrollo del proyecto, pudiendo provocar incluso la detención del motor y del equipo, teniendo, como consecuencia, una mantención no programada.

Suceso	Puntaje	Mitigación
Creación de mala relación con agente clave	10	Etapas de fidelización durante la creación de relación con el agente clave
Mal posicionamiento de la escobilla en motor	10	Realizar capacitación técnica y de mantenimiento a los operadores acerca de las escobillas
Desgaste acelerado	15	Realizar el recambio por parte de nuestros expertos con la finalidad de que los operadores aprendan a realizar el cambio de escobillas
Flash over	15	Recomendar a planta tener las medidas necesarias para evitar un flash over de un motor
Detenciones no programadas del equipo y la línea	15	Recomendar al agente clave la posesión de stock de seguridad en almacén
Acanalamiento en anillos del motor	15	Realizar capacitación técnica de como mantener los anillos del motor

Tabla 8. Mitigaciones para prevenir los sucesos con más riesgo del proyecto.

Finalmente, se crearon mitigaciones para evitar los sucesos más riesgosos, reflejados en la Tabla 8. En resumen, se tomó como prioridad explicar detalladamente a operadores el modo óptimo para el recambio de escobillas. También, se priorizó la fidelización al cliente, en este caso, al jefe de turno, para crear una buena relación proveedor-cliente, ya que en este rubro es esencial tener cierta cercanía para permitir el desarrollo del proyecto por un largo plazo.

6. EVALUACIÓN ECONÓMICA

La evaluación económica del proyecto permite determinar si finalmente será viable o no. En este caso, se realizó la evaluación económica para la implementación del proyecto, la cual posee los siguientes parámetros:

Costo	\$44.193 sin IVA
Precio	\$178.388 sin IVA
Unidades	24 /motor
Pasajes	
Ida	\$102.624
Vuelta	\$106.724
Transporte	
Rent a car	\$59.507
Hotel	
X	\$0
Alimentación	
Restaurant	\$43.260
Desayuno	\$10.140
Aeropuerto	\$17.980
Otros gastos	
Bencina	\$25.000
Peajes	\$13.976
Provisión	
64,7 kg pallet	\$5.664.093
15,8 kg escobilla CDA	\$1.383.194

Figura 4. Parámetros del flujo de caja del proyecto.

Según estos parámetros, se realizó el flujo de caja del proyecto para determinar la viabilidad de la implementación del proyecto. En este flujo se considera la inversión del proyecto, el cual consta de la prueba de escobillas para el molino de bolas, donde las escobillas fueron provistas por Wila. Luego, se establecen los ingresos proyectados por venta junto al costo fijo y variable de la escobilla. El flujo de caja es el siguiente:

Meses	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	TOTAL
	0	1	2	3	4	5	6	
INGRESOS								
Ingreso por venta				\$ 31.842.258			\$ 31.842.258	\$ 63.684.516
COSTOS								
Costo unitario			\$ 7.888.451			\$ 7.888.451		\$ 15.776.901
UAI	\$ -	\$ -	\$ -7.888.451	\$ 31.842.258	\$ -	\$ -7.888.451	\$ 31.842.258	\$ 47.907.615
IVA (19%)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 6.050.029	\$ -	\$ -	\$ 6.050.029	\$ 9.102.447
FCO	\$ -	\$ -	\$ -7.888.451	\$ 25.792.229	\$ -	\$ -7.888.451	\$ 25.792.229	\$ 38.805.168
INVERSIÓN								
Escobillas	\$ 2.524.304							\$ 2.524.304
Agencia transportista			\$ 650.000			\$ 650.000		\$ 1.300.000
Aduana			\$ 120.000			\$ 120.000		\$ 240.000
Provisión			\$ 1.383.194			\$ 1.383.194		\$ 2.766.389
Pasajes	\$ 209.348							\$ 209.348
Alojamiento	\$ -							\$ -
Alimentación	\$ 71.380							\$ 71.380
Transporte	\$ 59.507							\$ 59.507
Otros gastos	\$ 38.976							\$ 38.976
FCC	\$ -2.903.515	\$ -	\$ -2.153.194	\$ -	\$ -	\$ -2.153.194	\$ -	\$ -7.209.904
FCN	\$ -2.903.515	\$ -	\$ -10.041.645	\$ 25.792.229	\$ -	\$ -10.041.645	\$ 25.792.229	\$ 31.595.264

Tabla 9. Flujo de caja del proyecto.

VAN	\$ 17.413.650
TIR	61%
Tasa de descuento	9%

Tabla 10. Resultados de flujo de caja.

Para concluir el flujo de caja, se calculó el VAN y la TIR según la tasa de descuento asignada para este proyecto. La tasa de descuento del 9% fue establecida luego de investigar diversos proyectos similares dentro de la industria.

El resultado del VAN es de \$17.413.650, estableciendo el proyecto como exitoso al ser mayor a 0, además, la TIR calculada es mayor a la tasa de descuento, aprobando también la implementación del proyecto.

TASA DE DESCUENTO	VAN	PRECIO	VAN	COSTO	VAN
5%	\$ 21.647.381	0%	\$ 17.413.650	0%	\$ 17.413.650
7%	\$ 19.406.762	1,5%	\$ 17.943.081	1,5%	\$ 17.199.288
9%	\$ 17.413.650	3,0%	\$ 18.472.512	3,0%	\$ 16.984.926
11%	\$ 15.635.868	4,5%	\$ 19.001.943	4,5%	\$ 16.770.563
13%	\$ 14.045.995	6,0%	\$ 19.531.374	6,0%	\$ 16.556.201

Tabla 11, 12 y 13. Análisis de sensibilidad del proyecto, según tasa de descuento, precio y costo.

Finalmente, se realizó un análisis de sensibilidad el cual permite determinar qué tan sensible es el proyecto a cambios en el tiempo de ciertas variables, como lo son el precio de venta y el costo de fabricación de la escobilla, además del cambio en la tasa de descuento del proyecto.

Según el análisis hecho, el proyecto es más sensible a un cambio en la tasa de descuento del proyecto. Por otro lado, convenientemente, es más sensible a un aumento en los precios de venta que al costo de fabricación del producto.

7. METODOLOGÍA

En la metodología, se define el cómo se realizaron las tareas necesarias para cumplir con los objetivos específicos, los que a su vez completarán el objetivo SMART.

Para cumplir el primer objetivo específico, se realizó en Excel el cálculo del promedio de la tasa de desgaste de la escobilla en las 20 mantenciones programadas pasadas del molino de bolas con información brindada presencialmente de Teck, realizando una comparación del desgaste real de la escobilla Schunk con la escobilla OEM.

Después, para completar el segundo objetivo específico, los datos calculados anteriormente permitieron desarrollar una planificación minera enfocada en la gestión de activos y recursos, en este caso, enfocada en las horas efectivas de procesamiento del molino de bolas y la diferencia de toneladas de cobre no producidas por la cantidad de mantenciones programadas con la escobilla OEM y nueva. Para esto, se obtuvo la disponibilidad física antigua y nueva del equipo mediante la ecuación (1), producto de las horas del equipo detenido calculado con la ecuación (2). Con lo anterior, se calcularon las horas de operación efectivas del molino lo que dio paso a poder calcular la producción antigua y nueva (3) de la planta, además del impacto operacional de la nueva disponibilidad física y su beneficio económico (4).

$$\text{Disponibilidad física (\%)} = \left(\frac{\text{Horas efectivas de operación} - \text{Horas equipo detenido}}{\text{Horas efectivas de operación}} \right) * 100$$

Ecuación (1). Ecuación en porcentaje de disponibilidad física del equipo.

$$\text{Horas equipo detenido (hr)} = \text{Cantidad MP} * \text{Horas MP} + \text{Cantidad MNP} * \text{Horas MNP}$$

Ecuación (2). Ecuación de tiempo total de horas de equipo detenido.

$$\text{Producción de Cu (ton)} = \text{Ley} * \text{Conversión lb/ton} * \text{Recuperación} * \text{Tonelaje},$$

Ecuación (3). Ecuación de producción de toneladas de cobre.

$$\text{Beneficio económico (USD)} = \text{Producción de cobre} * \text{Valor cobre USD / ton},$$

Ecuación (4). Ecuación del beneficio económico según toneladas de cobre.

Para cumplir el tercer objetivo específico, se crearon proyecciones de recambio de escobillas en R Studio para 2 años más, calculando una tasa de desgaste promedio que permitieron simular 24 mantenciones futuras. Luego, se realizó un análisis operacional del molino con la escobilla OEM y con la escobilla nueva, arrojando las diferencias entre los nuevos parámetros que permitieron calcular el impacto económico del proyecto luego de la implementación de la nueva escobilla.

Con respecto al cuarto objetivo específico, se creó un modelo de gestión de inventario según el método (s,S), que permitió asegurar un stock de seguridad y planificar un punto de reorden. Este modelo funciona bajo ciertos parámetros, como lo son el stock inicial en unidades; el inventario ideal en unidades, es decir, el 100%; el tiempo de entrega establecido y máximo en días por parte del proveedor (Wila); la cantidad de escobillas a utilizar por cada recambio; el duración en días de las escobillas; y, por último, el límite crítico y el límite superior del stock de seguridad. Este modelo permite estimar el recambio de escobillas a futuro y evitar los quiebres de stock o el traspaso del límite crítico, con la finalidad de disminuir la incertidumbre y los riesgos de detener el proceso de producción por causa de falta de stock.

Para lograr lo anterior, se realizó el cálculo de la demanda trimestral (DT) y anual (DA) a partir de la ecuación (5), para luego determinar la demanda diaria promedio (\underline{DD}) (6). Con esos datos, es posible calcular el stock de seguridad (SS) según la ecuación (7) con respecto a la diferencia de días de entrega promedio (\underline{LT}) y días de entrega máximo (LTm).

$$DA = DT * 4 ,$$

Ecuación (5). Cálculo de la demanda anual.

$$\underline{DD} = \frac{DA}{365},$$

Ecuación (6). Cálculo de la demanda diaria promedio.

$$SS = (LTm - \underline{LT}) * \underline{DD} ,$$

Ecuación (7). Cálculo del stock de seguridad.

Luego, se calculó el stock necesario a tener en inventario para asegurar la operación (SN) durante el tiempo de entrega promedio según la demanda diaria promedio, según la ecuación (8). Con lo calculado anteriormente, se estableció el punto de reorden (PR).

$$SN = \underline{DD} * \underline{LT},$$

Ecuación (8). Cálculo del stock necesario para operar durante el tiempo de entrega promedio.

$$PR = SS + SN,$$

Ecuación (9). Cálculo del punto de reorden.

Por último, se calculó la diferencia de ingresos en el área de molino de bolas mediante la actualización de la base de datos del importe anual de Wila.

8. MEDIDAS DE DESEMPEÑO

- Objetivo específico 1: Disminuir un 50% la tasa de desgaste.

Dif. tasa de desgaste (%)

$$= \left(\frac{\text{Tasa desgaste/hora OEM} - \text{Tasa desgaste/hora Schunk}}{\text{Tasa desgaste/hora OEM}} \right) * 100,$$

Ecuación (11). Ecuación de diferencia de tasa de desgaste por hora de la escobilla.

- Objetivo específico 2: Aumentar un 0,5% la disponibilidad física del molino de bolas.

Dif. disponibilidad física (%)

$$= \left(\frac{\text{Disp. física nueva} - \text{Disp. física original}}{\text{Disp. física nueva}} \right) * 100,$$

Ecuación (12). Ecuación de diferencia de disponibilidad física del equipo.

- Objetivo específico 3: Aumentar el procesamiento anual de mineral en un 0,5%.

Dif. procesamiento anual (%)

$$= \left(\frac{\text{Proc. con escobilla Schunk} - \text{Proc. con escobilla OEM}}{\text{Proc. con escobilla Schunk}} \right) * 100,$$

Ecuación (13). Ecuación de diferencia de tasa de desgaste por hora de la escobilla.

- Objetivo específico 4: Aumentar en un 15% el stock de seguridad en inventario.

$$\text{Dif. porcentaje stock de seguridad (\%)} = \left(\frac{SS_1 - SS_0}{SS_1} \right) * 100,$$

Ecuación (14). Ecuación de diferencia del stock de seguridad en inventario.

SS_1 = Stock de seguridad después del proyecto.

SS_0 = Stock de seguridad antes del proyecto.

- Objetivo específico 5: Aumentar en un 10% los ingresos por órdenes de compra de Wila en el sector de molino de bolas.

Dif. ingresos por molino de bolas (%)

$$= \left(\frac{\text{Ingresos D.P.} - \text{Ingresos A.P.}}{\text{Ingresos D.P.}} \right) * 100,$$

Ecuación (15). Ecuación de diferencia de ingresos en sección molino de bolas.

Ingresos D.P. = Ingresos después del proyecto.
Ingresos A.P. = Ingresos antes del proyecto.

9. DESARROLLO DEL PROYECTO

La base del proyecto consta de cómo la implementación de una nueva escobilla puede generar un ahorro de costos de producción, planificación, inventario, etc. Es aquí donde se desarrolló el proyecto teniendo en cuenta diversos factores que pueden afectar el funcionamiento del molino de bolas en la planta Carmen de Andacollo de Teck.

Para empezar, los datos brindados por Teck sobre las 20 mantenciones anteriores con la escobilla OEM, fueron traspasados a la siguiente planilla Excel:

ESCOBILLA OEM						
N° Mantención	Tipo	Fecha	Largo final M1	Largo final M2	Dif. horas	Dif. días
M7/2022	Programada	7/7/2022	41,4	41,5	-	-
M8/2022	Programada	1/8/2022	42,4	42,3	600	25
M8.1/2022	No programada	7/8/2022	21,1	53,1	144	6
M9/2022	Programada	30/8/2022	42,3	42,7	552	23
M10/2022	Programada	26/9/2022	41,7	41,5	648	27
M11/2022	Programada	18/10/2022	42,9	42,9	528	22
M12/2022	Programada	9/11/2022	43	42,5	528	22
M13/2022	Programada	30/11/2022	43,1	42,9	504	21
M1/2023	Programada	26/12/2022	42	42,2	624	26
M2/2023	Programada	19/1/2023	42,4	42,6	576	24
M2.1/2023	No programada	27/1/2023	25,2	50,7	192	8
M3/2023	Programada	21/2/2023	42,4	42,1	600	25
M4/2023	Programada	16/3/2023	42,7	42,8	552	23
M5/2023	Programada	11/4/2023	42,1	42,1	624	26
M6/2023	Programada	3/5/2023	42,7	42,8	528	22
M7/2023	Programada	31/5/2023	41,5	41,6	672	28
M8/2023	Programada	22/6/2023	43	42,8	528	22
M9/2023	Programada	20/7/2023	41,5	41,7	672	28
M10/2023	Programada	15/8/2023	42,1	42,0	624	26
M11/2023	Programada	11/9/2023	41,8	41,7	648	27

Tabla 14. Resultados de largo final de escobilla OEM durante 20 mantenciones anteriores.

Por otro lado, luego de la implementación del proyecto, sólo se pudieron realizar dos mediciones de la escobilla Schunk, ya que estas tienen una duración de 3 meses. Los datos son los siguientes:

ESCOBILLA SCHUNK						
Nº Mantención	Tipo	Fecha	Largo final M1	Largo final M2	Dif. horas	Dif. días
M9/2023	Programada	-	-	-	-	-
M10/2023	Programada	-	-	-	-	-
M11.2/2023	Programada	16/9/2023	41,4	41,7	2064	86
M12/2023	Programada	-	-	-	-	-
M13/2023	Programada	-	-	-	-	-
M14/2023	Programada	10/12/2023	41,6	41,4	2040	85

Tabla 15. Resultados de largo final de escobilla Schunk.

Según los datos obtenidos en las Tablas 14 y 15, se llevó a cabo el cálculo del desgaste por hora de la escobilla, cálculos influidos por variables como el largo inicial de la escobilla, horas de operación en el equipo, y largo final. El resumen se ve a continuación:

ESCOBILLA OEM

Duración promedio

589 horas

ESCOBILLA SCHUNK

Duración promedio

2064 horas

Largo inicial

64 mm

Largo inicial

64 mm

Largo final promedio

41,728 mm

Largo final promedio

41,563 mm

Figura 5. Parámetros para calcular la tasa de desgaste de la escobilla OEM y Schunk.

Tasa de desgaste (mm/h)	
OEM	WILA
0,0378	0,0109

Tabla 16. Resultados de la tasa de desgaste de la escobilla OEM y Schunk.

A partir de lo anterior, se empezó a desarrollar la planificación minera, desde lo micro hacia lo macro. Primero, se analizó detalladamente el funcionamiento de una mantención programada y cómo la nueva escobilla puede producir un impacto. El desglose de las mantenciones programadas son de la siguiente forma:

Evento	Duración (hr)
Detención y desenergización (DDES)	0,083
Inspección y medición escobillas (IME)	2,000
Caambio de escobilla (CESC)	1,000
Energización (ENERG)	0,083
Ajuste de asentamiento (AASEN)	1,000
Detención y desenergización (DDES)	0,083
Inspección escobillas (IE)	0,500
Energización (ENERG)	0,083
Prueba de operación (PO)	0,250
Vuelta a operación (VO)	-

Tabla 17. Desglose mantención programada.

Es aquí donde se pueden apreciar los primeros impactos significativos de la implementación de la nueva escobilla, ya que una de sus principales ventajas es que son ordenadas a

fabricarse con el asentamiento integrado, lo cual implica un ahorro de 1 hora por mantención, además, debido a la confiabilidad gracias a distintos casos de éxito, se elimina la prueba de operación, llevando a otro ahorro por 0,25 horas. Finalmente, el desglose de mantenciones programadas antes y después del proyecto queda de la siguiente manera.

	OEM	WILA
DDES	0,083	0,083
IME	2	2
CESC	1	1
ENERG	0,083	0,083
AASEN	1	0
DDES	0,083	0,083
IE	0,5	0,5
ENERG	0,083	0,083
PO	0,25	0
VO	-	-
TOTAL	5,1	3,8

Tabla 18. Desglose mantención programada.

Luego, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la Tabla 18, se realizó una proyección anual sobre cuántas horas se utilizarían para las mantenciones programadas, obteniendo los siguientes resultados.

#	Mes	OEM	WILA
1	JULIO	5,1	
2	AGOSTO	5,1	
3	SEPTIEMBRE	5,1	3,8
4	OCTUBRE	5,1	
5	NOVIEMBRE	5,1	
6	DICIEMBRE	5,1	3,8
7	ENERO	5,1	
8	FEBRERO	5,1	
9	MARZO	5,1	3,8
10	ABRIL	5,1	
11	MAYO	5,1	
12	JUNIO	5,1	3,8
TOTAL		61,0	15,3
		Diferencia	45,7

Tabla 19. Horas utilizadas en mantenciones programadas según la escobilla en operación.

Como se evidencia en la Tabla 19, se observa una diferencia de 45,7 horas que el área de molienda podrá ahorrar en los mantenimientos programados destinados únicamente al reemplazo de escobillas producto de la implementación del proyecto. Además, en conjunto con la información proporcionada por Teck, que señala que el molino estuvo detenido durante 933 horas el año pasado, se llevó a cabo el cálculo de la disponibilidad física antigua y nueva, mediante las ecuaciones que se detallan a continuación.

Días hábiles al año	360 días
Horas por turno	8 horas
Turnos al día	3 turnos
Horas hábiles al año	8.640 horas
Horas molino detenido	933 horas
Horas de operación	7.707 horas

Figura 6. Parámetros utilizados que influyen en el cálculo de la disponibilidad física original del equipo.

Por otro lado, las horas de operación final calculadas para el molino después del proyecto, fueron respecto a los siguientes parámetros.

Horas de operación al año (antes)	7.707 horas
Diferencia de horas de MP	45,7 horas
Horas de detención por MNP (antes)	19 horas
Horas de detención por MNP (después)	8 horas
Horas de capacitación al año en MP	7 horas
Horas de operación al año (después)	7.757 horas

Figura 7. Parámetros utilizados que influyen en el cálculo de la disponibilidad física nueva del equipo.

$$\text{Disponibilidad física (\%)} = \left(\frac{\text{Horas hábiles al año} - \text{Horas de detención}}{\text{Horas hábiles al año}} \right) * 100,$$

Ecuación (16). Ecuación para calcular la disponibilidad física del equipo.

	OEM	WILA	
Horas de MNP	19	8	horas
Capacitación Wila en molino	0	7	horas
Horas operativas al año	7.707	7.757	horas
Disponibilidad física	89,20	89,78	%

Tabla 20. Cálculo de la disponibilidad física y nueva del equipo.

Después de calcular la disponibilidad original y nueva del equipo, es necesario reflejar el impacto en términos de tratamiento de mineral para ver cómo afectará a la planta la implementación de la nueva escobilla.

Tratamiento diario planta	55.000 tpd
Tratamiento por hora	2.291,7 tph
Tratamiento diario molienda	8.718 tpd
Tratamiento diario molino	4.359 tpd
Tratamiento molino por hora	181,63 tph

Figura 8. Parámetros para el cálculo de tratamiento de mineral.

Tratamiento de mineral (ton)

$$= \text{Disp. física} * \text{Tratamiento planta/hora} * \text{Horas hábiles/año},$$

Ecuación (17). Ecuación para calcular el tratamiento de mineral.

	Antes	Después
Planta (ton)	17.661.875	17.775.670

Tabla 21. Tratamiento de mineral antes y después del proyecto.

Como se puede apreciar en la Tabla 21, el tratamiento de mineral después del proyecto aumentó en 113.795 toneladas. Posteriormente, es necesario cuantificar este aumento de tonelaje a procesar en términos de toneladas de cátodos de cobre no producidas por la excesiva cantidad de mantenciones programadas, desarrollando el cálculo de la siguiente forma.

	OEM	WILA
Horas molino detenido por MP	61,0	15,3
Horas molinos detenidos por MP	122,0	30,7
Horas molinos detenidos por MNP	19	8

Tabla 22. Horas totales de detención del molino y área de molienda, antes y después del proyecto.

Toneladas no procesadas (ton)

$$= \text{Horas detención MP/MNP} * \text{Tratamiento mineral/hora},$$

Ecuación (18). Ecuación para calcular toneladas no procesadas de mineral.

	OEM	WILA
Toneladas no procesadas por MP	22.152,4	5.567,9
Toneladas no procesadas por MNP	3.450,9	1.453,0
Total	25.603,3	7.020,9

Tabla 23. Toneladas no procesadas del área de molienda producto de mantenciones programadas y no programadas, antes y después del proyecto.

Luego, con las toneladas no procesadas calculadas, se procedió a calcular la producción de cobre mediante la ecuación (3).

$$\text{Producción de Cu (ton)} = \text{Ley} * \text{Conversión lb/ton} * \text{Recuperación} * \text{Tonelaje},$$

Ecuación (3). Ecuación de producción de toneladas de cobre.

	OEM	WILA
Toneladas de Cu no producidas por MP	82,9	20,8
Toneladas de Cu no producidas por MNP	12,9	5,4
Total	95,8	26,3

Tabla 24. Toneladas de cátodos de Cu no producidos producto de mantenciones programadas y no programadas, antes y después del proyecto.

$$\text{Beneficio económico (USD)} = \text{Producción de cobre} * \text{Valor cobre USD / ton},$$

Ecuación (4). Ecuación del beneficio económico según toneladas de cobre.

	OEM	WILA
Costos por mantenciones anuales (USD)	\$834.606,26	\$228.864,28

Tabla 25. Costos anuales por mantenciones según la marca de la escobilla.

Continuando con el desarrollo del proyecto, según los datos del largo final de la escobilla OEM y escobilla Schunk reflejados en la Tabla 14 y 15, para cada caso se realizó una regresión lineal en R Studio obteniendo una tasa de desgaste promedio que permitirá simular 24 mantenciones futuras, proyectando un panorama de mantenciones programadas y producción para el año 2024 y 2025, analizando el caso con y sin proyecto.

Para el caso de la escobilla OEM, se trabajó con el código del Anexo 12.2.1, donde los datos del largo final de la escobilla según las horas de operación se ven evidenciados en el siguiente gráfico.

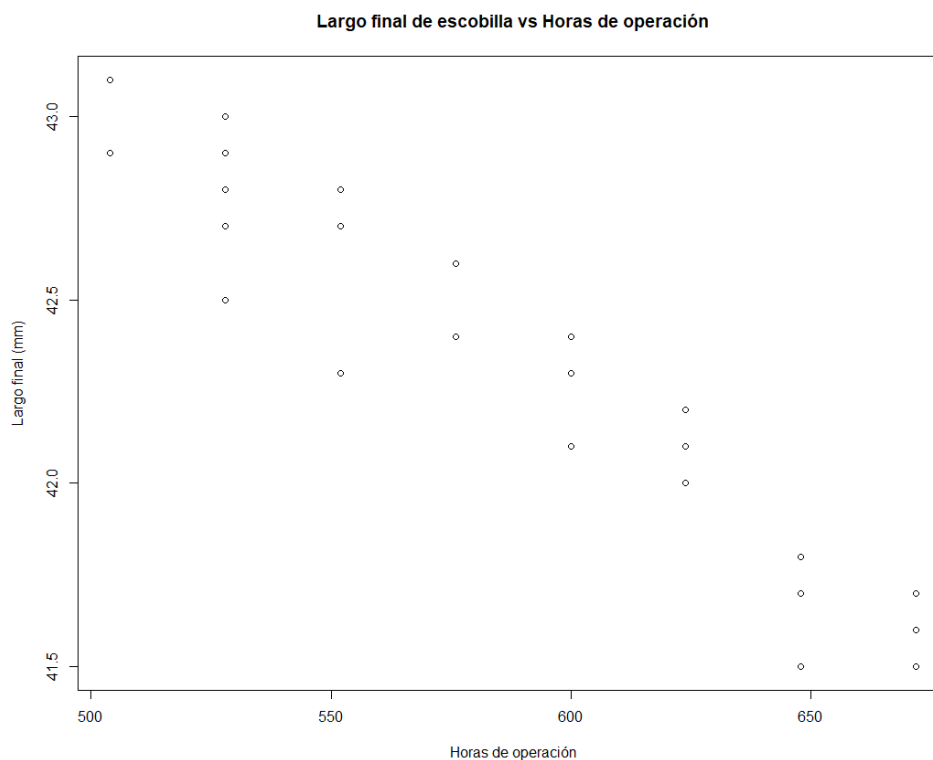


Gráfico 1. Largo final de la escobilla OEM vs horas de operación.

```

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  47.4259891  0.2753099  172.26  <2e-16 ***
Horas.operación -0.0086772  0.0004657  -18.63  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1468 on 32 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9156,    Adjusted R-squared:  0.913
F-statistic: 347.2 on 1 and 32 DF,  p-value: < 2.2e-16
  
```

Figura 9. Regresión lineal para los datos de la escobilla OEM.

Luego de realizar la regresión lineal, se obtuvo la siguiente ecuación a partir de la ecuación estándar.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n$$

Ecuación estándar de una regresión lineal.

$$Y = -0,0086772x + 47,4259891,$$

Ecuación (20). Ecuación lineal resultado de la regresión lineal para la escobilla OEM.

A partir de la ecuación 20, se creó una proyección del largo final de la escobilla producto de los días de operación, realizando un estimado de ± 3 días del promedio de días que dura la escobilla OEM. Los resultados son los siguientes:

Horas.operación	Días_de_operación	Proyección.largo.final
504	21.00000	43.05266
512	21.33333	42.98324
520	21.66667	42.91382
528	22.00000	42.84441
536	22.33333	42.77499
544	22.66667	42.70557
552	23.00000	42.63615
560	23.33333	42.56673
568	23.66667	42.49732
576	24.00000	42.42790
584	24.33333	42.35848
592	24.66667	42.28906
600	25.00000	42.21965
608	25.33333	42.15023
616	25.66667	42.08081
624	26.00000	42.01139
632	26.33333	41.94197
640	26.66667	41.87256
648	27.00000	41.80314
656	27.33333	41.73372
664	27.66667	41.66430
672	28.00000	41.59488

Figura 10. Proyección largo final escobilla OEM según horas de operación.

Con los resultados obtenidos de la Figura 10, se pudo proyectar cuánto es el desgaste que ocurre por turno o por día, información valiosa que sirvió para realizar una proyección de producción para el 2024 y 2025. Esta proyección fue realizada mediante una selección aleatoria de un número entre el 21 y 28, que corresponden a los posibles días entre mantenciones. Luego de obtener 24 números aleatorios, que significan 12 mantenciones

anuales para 2 años, se determinó el largo final proyectado para cada mantención, junto con el desgaste en mm/hora. El resultado se puede apreciar en la siguiente figura.

Días.entre.recambio	Horas.operación	Largo.final	Desgaste.mm.hora	Porcentaje.final.escobilla
23	552	35.53121	0.05157390	55.52%
26	624	34.90645	0.04662428	54.54%
25	600	35.11470	0.04814217	54.87%
21	504	35.94772	0.05565930	56.17%
21	504	35.94772	0.05565930	56.17%
26	624	34.90645	0.04662428	54.54%
27	648	34.69819	0.04521884	54.22%
21	504	35.94772	0.05565930	56.17%
21	504	35.94772	0.05565930	56.17%
28	672	34.48994	0.04391378	53.89%
27	648	34.69819	0.04521884	54.22%
24	576	35.32295	0.04978654	55.19%
28	672	34.48994	0.04391378	53.89%
24	576	35.32295	0.04978654	55.19%
23	552	35.53121	0.05157390	55.52%
21	504	35.94772	0.05565930	56.17%
25	600	35.11470	0.04814217	54.87%
22	528	35.73946	0.05352375	55.84%
23	552	35.53121	0.05157390	55.52%
21	504	35.94772	0.05565930	56.17%
21	504	35.94772	0.05565930	56.17%
27	648	34.69819	0.04521884	54.22%
28	672	34.48994	0.04391378	53.89%
22	528	35.73946	0.05352375	55.84%

Figura 11. Proyección 24 mantenciones futuras.

Según los resultados de la Figura 11 y sus mantenciones para recambio cada 24 días en promedio, se necesitan aproximadamente 15 mantenciones programadas anuales para el 2024 y 14 para el 2025, significando un impacto negativo para la faena respecto de la situación actual, este impacto se puede evidenciar con los siguientes cálculos.

Mantenciones programadas para 2024	15
Mantenciones programadas para 2025	14
Horas por mantención programadas	5,1 horas
Horas por mantenciones no programadas	8 horas
Horas hábiles al año	8.640 horas
Horas molino detenido 2022-2023	933 horas
Horas de operación 2022-2023	7.707 horas
Tratamiento de mineral por hora	2.292 tph
Tratamiento de mineral del molino por hora	181,6 tph
Ley	0,41 %
Recuperación	91,3 %
Valor Cu USD/ton	\$8.664,16 USD/ton

Figura 12. Parámetros para la producción de 2024 y 2025.

	2024	2025
Horas molino detenido (horas)	956,25	951,16
Horas de operación (horas)	7.683,75	7.688,84
Disponibilidad física (%)	88,93%	88,99%
Tratamiento de mineral anual (ton)	17.608.859,04	17.620.505,46
Toneladas de mineral no procesadas (ton)	29.144,35	27.298,26
Toneladas de Cu no producidas (ton)	109,10	102,19

Tabla 26. Resultados proyección de producción de 2024 y 2025.

	2024	2025
Costos anuales (USD)	\$945.225,21	\$885.351,92

Tabla 27. Costos anuales proyectados por mantenciones para recambio de escobillas en 2024 y 2025.

Ahora, se analizará el desarrollo del mismo procedimiento anterior pero para la escobilla Schunk y su impacto luego de la implementación del proyecto junto con la proyección de producción para 2024 y 2025.

Coefficients: (1 not defined because of singularities)				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	41.55	0.15	277	0.0023 **
Horas.operación	-0.0004532057	2.900517e-05	0.652	0.0023 **

Figura 13. Regresión lineal para los datos de la escobilla Schunk.

$$Y = -0,0004532057x + 41,55 ,$$

Ecuación (21). Ecuación lineal resultado de la regresión lineal para la escobilla Schunk.

Horas.operación	Días_de_operación	Predicción.largo.final
2016	84.00000	42.07209
2024	84.33333	41.98508
2032	84.66667	41.89806
2040	85.00000	41.81105
2048	85.33333	41.72403
2056	85.66667	41.63702
2064	86.00000	41.55000
2072	86.33333	41.46298
2080	86.66667	41.37597
2088	87.00000	41.28895
2096	87.33333	41.20194
2104	87.66667	41.11492
2112	88.00000	41.02791
2120	88.33333	40.94089
2128	88.66667	40.85388
2136	89.00000	40.76686
2144	89.33333	40.67984
2152	89.66667	40.59283
2160	90.00000	40.50581
2168	90.33333	40.41880
2176	90.66667	40.33178
2184	91.00000	40.24477

Figura 14. Proyección largo final escobilla Schunk según horas de operación.

Días.entre.recambio	Horas.operación	Largo.final	Desgaste.mm.hora	Porcentaje.final.escobilla
87	2088	41.28895	0.01087694	64.51%
90	2160	40.50581	0.01087694	63.29%
90	2160	40.50581	0.01087694	63.29%
90	2160	40.50581	0.01087694	63.29%
84	2016	42.07209	0.01087694	65.74%
88	2112	41.02791	0.01087694	64.11%
90	2160	40.50581	0.01087694	63.29%
84	2016	42.07209	0.01087694	65.74%
88	2112	41.02791	0.01087694	64.11%
90	2160	40.50581	0.01087694	63.29%
91	2184	40.24477	0.01087694	62.88%
84	2016	42.07209	0.01087694	65.74%
85	2040	41.81105	0.01087694	65.33%
90	2160	40.50581	0.01087694	63.29%
86	2064	41.55000	0.01087694	64.92%
91	2184	40.24477	0.01087694	62.88%
88	2112	41.02791	0.01087694	64.11%
90	2160	40.50581	0.01087694	63.29%
86	2064	41.55000	0.01087694	64.92%
89	2136	40.76686	0.01087694	63.70%
88	2112	41.02791	0.01087694	64.11%
90	2160	40.50581	0.01087694	63.29%
84	2016	42.07209	0.01087694	65.74%
85	2040	41.81105	0.01087694	65.33%

Figura 15. Proyección 24 mantenciones futuras.

Según los resultados de la Figura 15 y sus mantenciones para recambio cada 87,8 días en promedio, se necesitan aproximadamente 4 mantenciones programadas anuales para el 2024 y 2025, significando un impacto negativo para la faena respecto de la situación actual, este impacto se puede evidenciar con los siguientes cálculos.

Mantenciones programadas para 2024	4
Mantenciones programadas para 2025	4
Horas por mantención programadas	3,8 horas
Horas por mantenciones no programadas	8 horas
Horas hábiles al año	8.640 horas
Horas molino detenido 2022-2023	933 horas
Horas de operación 2022-2023	7.707 horas
Tratamiento de mineral por hora	2.292 tph
Tratamiento de mineral del molino por hora	181,6 tph
Ley	0,41 %
Recuperación	91,3 %
Valor Cu USD/ton	\$8.664,16 USD/ton

Figura 16. Parámetros para la producción de 2024 y 2025.

	2024	2025
Horas molino detenido (horas)	876	876
Horas de operación (horas)	7.764	7.764
Disponibilidad física (%)	89,86%	89,86%
Tratamiento de mineral anual (ton)	17.792.071,29	17.792.071,29
Toneladas de mineral no procesadas (ton)	6.974,59	6.974,59
Toneladas de Cu no producidas (ton)	26,11	26,11

Tabla 28. Resultados proyección de producción de 2024 y 2025.

	2024	2025
Costos anuales (USD)	\$226.203,72	\$226.203,72

Tabla 29. Costos anuales proyectados por mantenciones para recambio de escobillas en 2024 y 2025.

Luego de tener los resultados de la planificación minera, se recopilaban los cálculos de la tasa de desgaste para ver la duración real de la escobilla OEM y Schunk. Así, se realizó un modelo de gestión de inventario en R Studio según el método (s,S), con la finalidad de mitigar los constantes riesgos de quiebre de stock que existía en Teck.

```

inventario.ideal <- 300
stock <- 128

limite.superior <- 192
limite.critico <- 110
limite.sugerido <- 151

duración.entrega <- 35
duración.máx.entrega <- 45

duración.proceso.Teck <- 10
duración.máx.proceso.Teck <- 14

duración.Schunk <- 90
duración.Teck <- 25
cant.escobillas <- 96

días_simulación <- 730

```

Figura 17. Parámetros del modelo de gestión de inventario.

Antes de partir con el modelo, es necesario explicar cada parámetro para entender la solución para el proyecto. En primer lugar, Teck contaba con un stock inicial de 128 juegos antes de realizar la última mantención, por lo que al momento de realizar la mantención, se gastaron 48 escobillas más para el molino 2, ya que en el molino 1 se implementaron las escobillas Schunk, esto dejó como resultado un stock final de 80 escobillas, representando 0,86 juegos, lo que significa que si existiese un desgaste acelerado de la escobilla, quedarían sin stock. Como inventario ideal, se determinó un número de 300 unidades de escobillas, algo más de 4 juegos.

Por otro lado, también nos entregaron información de cuáles eran los límites de inventario entre los que ellos se guiaban, siendo el superior de 192 unidades (2 juegos) y el crítico de 110 unidades (1,15 juegos).

También, un factor fundamental para este modelo son las duraciones de los procesos de pedido y entrega, donde para hacer el pedido correspondiente de stock se demoran entre 10 a 14 días en Teck y, luego, cuando el requerimiento llega a Wila, se demora de 35 a 45 días en entregar el producto en faena.

Finalmente, con la tasa de desgaste real en mm/hora calculada para las escobillas OEM y Schunk, se fijó una duración promedio de 25 y 90 días respectivamente, suponiendo que se ocuparían 96 escobillas por mantención (24 por motor). Cabe destacar que este modelo fue creado para 730 días, lo que corresponde a 2 años.

Según las mantenciones anteriores con y sin desgaste acelerado, se graficó cómo era la situación antes del proyecto.

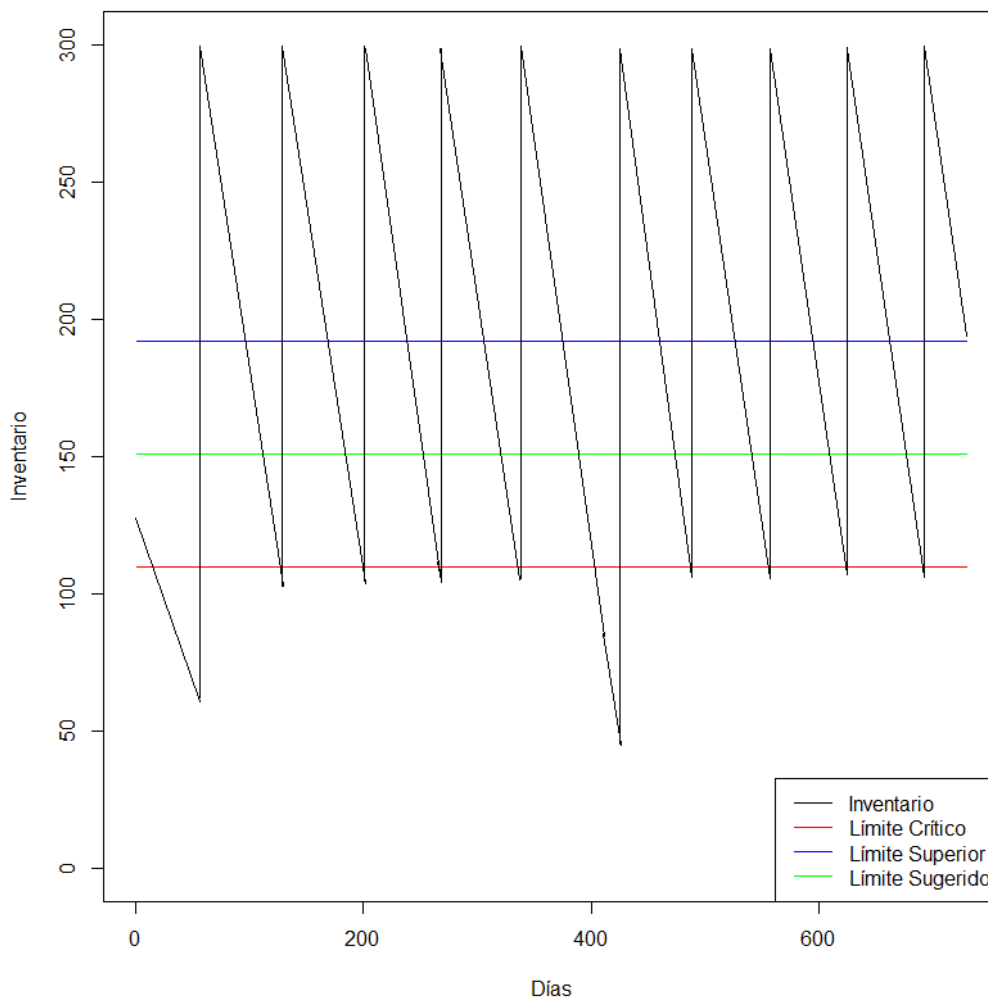


Gráfico 2. Situación del inventario antes del proyecto.

stock_mínimo	stock_necesario	stock_seguridad
73.28982	25.25025	98.54006

Figura 18. Resultados originales del stock mínimo calculado y stock de seguridad.

Para el método (s,S) en gestión de inventarios, se necesita determinar la demanda anual, diaria, además de stock de seguridad según factores como el tiempo de entrega promedio y máximo, cantidad del producto a utilizar y su rotación. Para esto, se hicieron los cálculos de las ecuaciones (5), (6), (7), (8) y (9), a partir de la creación de vectores que puedan almacenar diariamente la demanda de un producto con el fin de graficar y calcular el punto de reorden junto a su stock de seguridad.

Demanda_anual	Demanda_diaria
384	1.052055

Figura 19. Resultados demanda anual y demanda diaria.

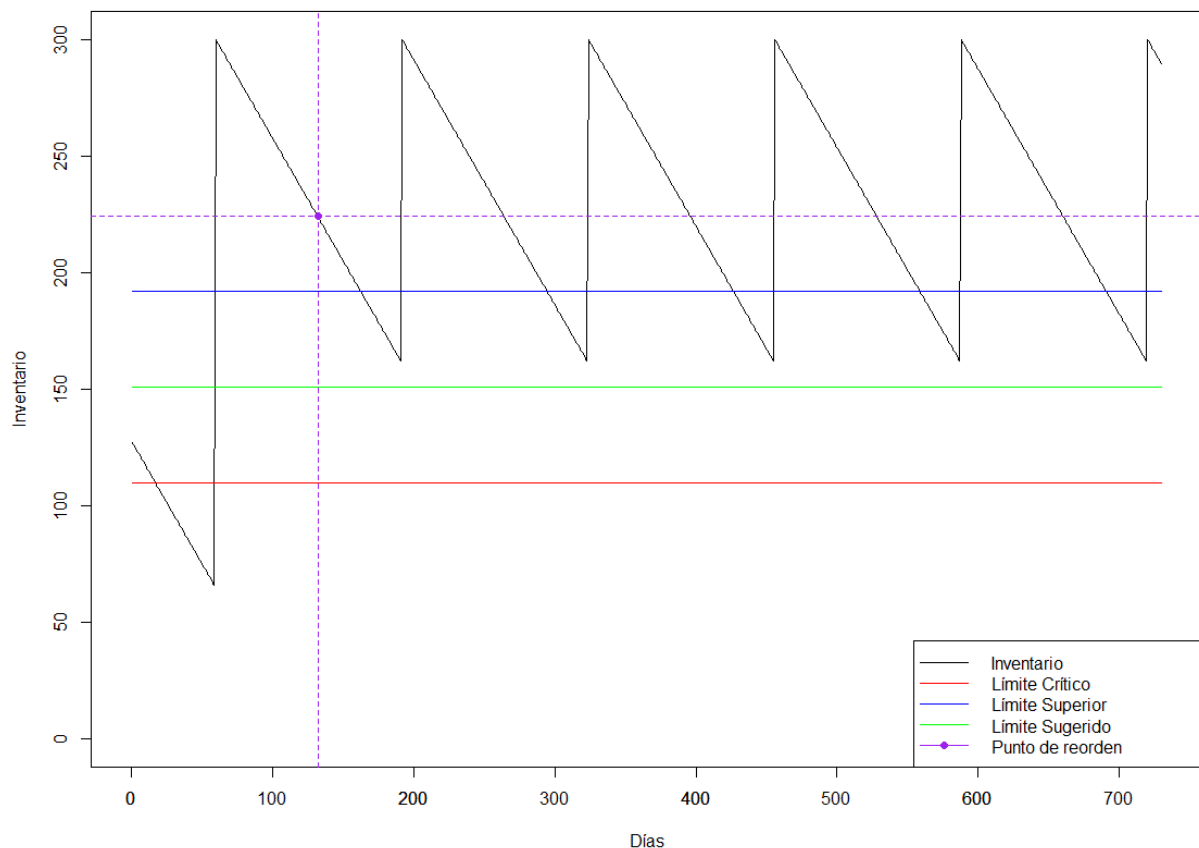


Gráfico 3. Resultado del modelo de gestión de inventario.

stock_mínimo	stock_necesario	stock_seguridad	Punto_de_reorden
147.2219	14.72877	161.9507	224.0219

Figura 20. Resultados de stock mínimo calculado, stock de seguridad y punto de reorden.

Con el desarrollo del proyecto concluido, se puede pasar a la recopilación completa de los resultados, para determinar el éxito o no del proyecto, resultados que serán mostrados a continuación.

10. RESULTADOS

Luego de concluir el desarrollo del proyecto, se da paso a los resultados del mismo, analizando los KPI de los objetivos específicos junto al objetivo general establecido. En resumen, se compilaron los siguientes resultados:

N°	Medida de desempeño	Antes	Después	
1	Disminuir tasa de desgaste en un 50%	0,0378	0,0109	mm/h
2	Aumentar disp. física del molino en un 0,5%	89,20	89,78	%
3	Aumentar proces. anual de mineral en un 0,5%	17.661.875	17.775.670	ton
4	Aumentar en un 15% el stock de seguridad en inventario	98,54	161,95	unidades
5	Aumentar en un 10% el importe anual de molinos de bolas	\$180.246.286	\$222.915.214	CLP

Tabla 30. Resultados para cada objetivo específico.

N°	Objetivo	Logrado
1	50%	71,16%
2	0,5%	0,64%
3	0,5%	0,66%
4	15%	64,37%
5	10%	23,69%

Tabla 31. Resultados para cada objetivo específico según meta.

Como se puede apreciar en la Tabla 30 y 31, se cumplen los KPI de los 5 objetivos específicos establecidos.

	OEM	Schunk	
Producción de cobre anual	66.113,7	66.585,5	ton
Producción de cobre trimestral	16.528,4	16.646,4	ton
Ingresos en USD	\$143.204.855	\$144.226.818	USD

Tabla 32. Resultados del objetivo general.

Diferencia de producción	0,71%	%
Aumento en ingresos	\$1.021.962,77	USD

Tabla 33. Resultados del objetivo general según meta.

Finalmente, se refleja en la Tabla 33 un 0,71% en el aumento en la producción trimestral de cobre, un 0,21% más de lo establecido para el proyecto completo, implicando un aumento de \$1.021.963 USD para el trimestre, lo que se traduce en \$4.087.851 USD anuales.

Por otro lado, el impacto para Wila también fue positivo, ya que como se evidencia en la Tabla 34 y 35, se produjo un aumento en los ingresos en la sección de molino de bolas.

	Antes	Después
Número de motores	68	72
Importe anual	\$180.246.286	\$222.915.214

Tabla 34. Importe anual para Wila antes y después del proyecto.

Aumento de ingresos	23,67%
---------------------	--------

Tabla 35. Diferencia de ingresos según importe anual.

11. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

En resumen, se puede evidenciar el impacto que tuvo el proyecto para Teck y para Wila. Por el lado de Teck, se logra reducir de 12 mantenciones programadas al año a 4, donde se reducen \$605.742 USD en costos, logrando también aumentar los ingresos por producción de concentrado de cobre en \$4.087.851 USD al año.

Luego, se mitiga el constante riesgo de stock evidenciado inicialmente, aumentando en casi un 60% el stock de seguridad para mantener el inventario casi a la par del límite superior de inventario, asegurando al menos 1,5 juegos de escobillas en inventario. También, se planificó un punto de reorden según la nueva tasa de desgaste, pudiendo realizar pedidos con antelación para asegurar el stock, lo que puede abrir las puertas a un posible contrato entre Teck y Wila para asegurar un importe anual por un lado y por el otro un stock constante para el recambio de escobillas.

Para concluir, debido al proyecto, en Wila se aumentó en \$42.668.928 los ingresos anuales en la sección de molino de bolas, siendo un 23,67% más de lo que se generaba en un inicio, impactando significativamente en la facturación anual en el área de molienda.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Cataldo Alfaro, A. M. (2022). *DESARROLLO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE INVENTARIOS PARA HERRAMIENTAS PAÑOLES MINERA ANTUCOYA “ÁREA MANTENCIÓN MECÁNICA”* [Tesis]. Universidad Andrés Bello.
- Gonzalo Astuhuaman, J. P. (2019). *Análisis de los parámetros del molino de bolas en la producción de la planta concentradora en Milpo* [Tesis]. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Nail Gallardo, A. A. (2016). *PROPUESTA DE MEJORA PARA LA GESTIÓN DE INVENTARIOS DE SOCIEDAD REPUESTOS ESPAÑA LIMITADA* [Tesis]. Universidad Austral de Chile.
- R. Keith Mobley. (s. f.). *Maintenance Engineering Handbook* (7.^a ed.).
- Silver, E. A. (2008). *Inventory management: An overview of Canadian publications, practical applications and suggestions for future research*.
- Vargas Vergara, M. A. (2011). *MODELO DE PLANIFICACIÓN MINERA DE CORTO Y MEDIANO PLAZO INCORPORANDO RESTRICCIONES OPERACIONALES Y DE MEZCLA* [Tesis]. Universidad de Chile.

- Zamora, I. (2018). *DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PARA UN MOLINO DE BOLAS DE LA EMPRESA COMPAÑÍA MINERA CERRO NEGRO S.A.* [Proyecto]. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

13. ANEXOS

12.1. IMÁGENES:

Compañía minera	IMPORTE ANUAL POR MOLINO DE BOLAS					
	Faena	Duración (meses)	Valor unidad	Escobillas / equipo	Importe anual	MP anuales
CODELCO	ANDINA	3	\$45.715	4	\$731.440	4
CODELCO	ANDINA	3	\$45.715	4	\$731.440	4
CODELCO	ANDINA	3	\$45.715	4	\$731.440	4
CODELCO	EL TENIENTE	3	\$143.409	6	\$3.441.811	4
CODELCO	EL TENIENTE	3	\$143.409	6	\$3.441.811	4
CODELCO	EL TENIENTE	3	\$42.651	16	\$3.070.872	4
CODELCO	EL TENIENTE	7	\$75.816	8	\$1.039.762	1
CODELCO	EL TENIENTE	7	\$75.816	8	\$1.039.762	1
CODELCO	EL TENIENTE	7	\$75.816	8	\$1.039.762	1
CODELCO	EL TENIENTE	7	\$75.816	8	\$1.039.762	1
CODELCO	EL TENIENTE	7	\$75.816	8	\$1.039.762	1
CODELCO	EL TENIENTE	5	\$57.435	8	\$1.102.759	2
CODELCO	EL TENIENTE	5	\$57.435	8	\$1.102.759	2
CODELCO	EL TENIENTE	5	\$57.435	8	\$1.102.759	2
CODELCO	EL TENIENTE	5	\$57.435	8	\$1.102.759	2
BHP	ESCONDIDA	6	\$235.402	18	\$8.474.472	2
BHP	ESCONDIDA	6	\$235.402	18	\$8.474.472	2
BHP	ESCONDIDA	6	\$235.402	18	\$8.474.472	2
BHP	ESCONDIDA	6	\$235.402	18	\$8.474.472	2
ANGLOAMERICAN	LOS BRONCES	9	\$101.600	36	\$4.876.800	1
ANGLOAMERICAN	LOS BRONCES	9	\$101.600	36	\$4.876.800	1
ANGLOAMERICAN	LOS BRONCES	9	\$101.600	36	\$4.876.800	1
TECK	CARMEN DE ANDACOLLO	1	-	24	\$0	12
TECK	CARMEN DE ANDACOLLO	1	-	24	\$0	12
TECK	CARMEN DE ANDACOLLO	3	\$178.388	24	\$17.125.248	4
TECK	CARMEN DE ANDACOLLO	3	\$178.388	24	\$17.125.248	4

Fuente: Base de datos técnica Wila.

12.2. CÓDIGO:

12.2.1 Código regresión lineal proyección 2024 - 2025 escobilla OEM

```
library(readr)
library(ggplot2)
```

```
datos <- read.csv(file.choose(),sep=";",dec=".",header=T)
plot(datos$Horas.operación, datos$Largo.final, xlab = "Horas de operación", ylab = "Largo
final (mm)", main = "Largo final de escobilla vs Horas de operación") ##Gráfico
```

```
RLWila <- lm(Largo.final ~ Horas.operación, data = datos) ##Regresión lineal
summary(RLWila) ##Resultados
```

```
##Predicción para X días de operación futuros
```

```
Horas_de_operación <- seq(504, 672, by = 8) ##Vector de días en un rango de 21
días (504 horas) hasta 28 días (696 horas)
```

```
Días_de_operación = Horas_de_operación/24
Horas_proyectadas <- data.frame(Horas.operación = Horas_de_operación)      ##Datos
con los días proyectados

predicción <- predict(RLWila, Horas_proyectadas)      ##Hacer predicciones para el
rango de días
resultadosRL <- data.frame(Horas.operación = Horas_de_operación, Días_de_operación,
Predicción.largo.final = predicción)      ##Datos con los días y las predicciones
print(resultadosRL)      ##Predicción por desgaste: Cuál será el largo final de la escobilla
según horas de operación

##
##Pronóstico para las mantenciones de los próximos 2 años
##

número_aleatorio <- sample(21:28, 24, replace = TRUE)      ##Da 24 números aleatorios
(24 mantenciones (2 años) por recambio de escobillas)
print(número_aleatorio)
horas_operación <- número_aleatorio*24      ##Se multiplica el número aleatorio de día
por 24 horas, para dar las horas de operación
print(horas_operación)

tasa_desgaste <- coef(RLWila)["Horas.operación"]      ##Se llama a la tasa de desgaste
del modelo de regresión lineal
desgaste <- horas_operación*tasa_desgaste      ##Calcular el desgaste para cada
escobilla en horas

resultados_mantenciones <- data.frame(Días.entre.recambio = horas_operación/24,
##Datos con resultados
      Horas.operación = horas_operación,
      Largo.final = 40.321044 + desgaste,
      Desgaste.mm.hora = ( 64 - ( 40.321044 + desgaste ) ) /
horas_operación,
      Porcentaje.final.escobilla = sprintf("%.2f%%",100*((40.321044 +
desgaste)/64)))

print(resultados_mantenciones)      ##Resultados

##
##Horas de operación necesarias para llegar al % mínimo de operación recomendado
(50%)
##

promedio_desgaste <- mean(resultados_mantenciones$Desgaste.mm.hora)      ##Cálculo
del promedio de desgaste por hora en la escobilla
print(promedio_desgaste)

Horas.necesarias <- (64*0.5) / promedio_desgaste
```

```
redondeo <- round(Horas.necesarias)
redondeo.días <- round(redondeo / 24)
resultado.HN <- paste("Se alcanzará el mínimo recomendado de 50% de desgaste en
aproximadamente", redondeo, "horas de operación, es decir, en aproximadamente",
redondeo.días, "días")
print(resultado.HN)
```

12.2.2 Código regresión lineal proyección 2024 - 2025 escobilla Schunk

```
library(readr)
library(ggplot2)

datos <- read.csv(file.choose(),sep=";",dec=".",header=T)
plot(datos$Horas.operación, datos$Largo.final, xlab = "Horas de operación", ylab = "Largo
final (mm)", main = "Largo final de escobilla vs Horas de operación") ##Gráfico

RLWila <- lm(Largo.final ~ Horas.operación, data = datos)##Regresión lineal
summary(RLWila) ##Resultados

##Predicción para X días de operación futuros
Horas_de_operación <- seq(2016, 2184, by = 8) ##Vector de días en un rango de 84 días
(2016 horas) hasta 91 días (2184 horas)
Días_de_operación = Horas_de_operación/24
Horas_proyectadas <- data.frame(Horas.operación = Horas_de_operación) ##Datos con los
días proyectados

Tasa_desgaste_Schunk <- ( 64 - 41.55 ) / 2064   ##Hacer predicciones para el rango de
días
print(Tasa_desgaste_Schunk)*60

predicción <- (64 - Tasa_desgaste_Schunk * Horas_de_operación)
resultadosRL <- data.frame(Horas.operación = Horas_de_operación, Días_de_operación,
Predicción.largo.final = predicción)##Datos con los días y las predicciones
print(resultadosRL)##Predicción por desgaste: Cuál será el largo final de la escobilla según
horas de operación

##
##Pronóstico para las mantenciones de los próximos 2 años
##

número_aleatorio <- sample(84:91, 24, replace = TRUE)##Da 24 números aleatorios (24
mantenciones (2 años) por recambio de escobillas)
print(número_aleatorio)
horas_operación <- número_aleatorio*24##Se multiplica el número aleatorio de día por 24
horas, para dar las horas de operación
print(horas_operación)
```

```

tasa_desgaste <- coef(RLWila)["Horas.operación"]##Se llama a la tasa de desgaste del
modelo de regresión lineal
desgaste <- horas_operación*tasa_desgaste##Calcular el desgaste para cada escobilla en
horas

resultados_mantenciones <- data.frame(Días.entre.recambio = horas_operación/24,##Datos
con resultados
                                     Horas.operación = horas_operación,
                                     Largo.final = (64 - Tasa_desgaste_Schunk * horas_operación),
                                     Desgaste.mm.hora = Tasa_desgaste_Schunk,
                                     Porcentaje.final.escobilla = sprintf("%.2f%%",100*((64 -
Tasa_desgaste_Schunk * horas_operación )/64)))

print(resultados_mantenciones)##Resultados

##
##Horas de operación necesarias para llegar al % mínimo de operación recomendado
(35%)
##

promedio_desgaste <- mean(resultados_mantenciones$Desgaste.mm.hora)##Cálculo del
promedio de desgaste por hora en la escobilla
print(promedio_desgaste)

Horas.necesarias <- (64*0.35) / promedio_desgaste
redondeo <- round(Horas.necesarias)
redondeo.días <- round(redondeo / 24)
resultado.HN <- paste("Se alcanzará el mínimo recomendado de 35% de desgaste en
aproximadamente", redondeo, "horas de operación, es decir, en aproximadamente",
redondeo.días, "días")
print(resultado.HN)

```

12.2.3 Código modelo de gestión de inventario Teck

```

library(readr)
library(ggplot2)

inventario.ideal <- 300
stock <- 128

limite.superior <- 192      ## 2 del juego completo por motores (96)
limite.critico <- 110      ## 1,15 del juego completo por motores (96)
limite.sugerido <- 151     ## 50% entre límite superior y límite crítico

duración.entrega <- 35     ## Wila se demora 35 días en hacer llegar el producto
duración.máx.entrega <- 45 ## Duración máxima de entrega

```

```
duración.proceso.Teck <- 10      ## Duración en días que demora Teck para hacer el
pedido a Wila
duración.máx.proceso.Teck <- 14

duración.Schunk <- 90           ## Escobilla Schunk dura 90 días
duración.Teck <- 25
cant.escobillas <- 96           ## 2 molinos de bolas con 2 motores c/u, cada motor ocupa
24 escobillas

días_simulación <- 730         ## Simulación a 730 días, es decir, a dos años

## 1. Crear vectores para almacenar resultados

tiempo <- numeric()            ## Vector para guardar y mostrar los días que pasan
inventario.f <- numeric()      ## Vector para guardar el inventario por ciclo

## 2. Parámetros para realizar el ciclo for

día <- 0
inventario <- stock
días.últ.pedido <- 0

## 3. Ciclo for para la simulación

for (día in seq(1, días_simulación, by = 1)) { ## Simulación desde el día 1

  tiempo <- c(tiempo, día)

  ## Cálculo de inventario según método (s,S)

  demanda.anual <- cant.escobillas * 4
  demanda.diaria <- demanda.anual / 365

  stock.necesario <- ((duración.máx.entrega + duración.máx.proceso.Teck) -
(duración.entrega + duración.proceso.Teck)) * demanda.diaria
  stock.seguridad <- (demanda.diaria * duración.entrega) + (1.15 * cant.escobillas)

  punto.reorden <- stock.seguridad + stock.necesario

  inventario <- inventario - demanda.diaria  ## Reducción de inventario por demanda
diaria solo para términos del gráfico y cálculos

  ## Rellenar stock

  if (inventario <= punto.reorden && días.últ.pedido >= (duración.máx.entrega +
duración.máx.proceso.Teck)) {

    inventario.critico <- inventario
```



```

realizar.pedido <- inventario.ideal - inventario.critico
inventario <- inventario.critico + realizar.pedido
días.últ.pedido <- 0

print(paste("Nuevo pedido realizado el día", día - 59, ", inventario rellenado a", inventario,
".")) }

else {
  días.últ.pedido <- días.últ.pedido + 1
}

inventario.f <- c(inventario.f, inventario)
}

limite_critico <- rep(limite.critico, length(tiempo)) ## Repetir límite crítico cada día para
poder graficarlo como constante
limite_superior <- rep(limite.superior, length(tiempo))
limite_sugerido <- rep(limite.sugerido, length(tiempo))

limite_inferior_y <- min(0, min(inventario.f, limite_critico, limite_superior))

plot(tiempo, inventario.f, type = "l", xlab = "Días", ylab = "Inventario", col = "black", ylim =
c(limite_inferior_y, inventario.ideal))
lines(tiempo, limite_critico, col = "red") # Línea roja para el límite crítico
lines(tiempo, limite_superior, col = "blue") # Línea verde para el límite superior
lines(tiempo, limite_sugerido, col = "green") # Línea azul para el límite sugerido
legend("bottomright", legend = c("Inventario", "Límite Crítico", "Límite Superior", "Límite
Sugerido"),
      col = c("black", "red", "blue", "green"), lty = 1)
axis(1, at = seq(0, días_simulación, by = 100), labels = seq(0, días_simulación, by = 100))

abline(h = 224.021918, col = "purple", lty = 2)
abline(v = 132.7, col = "purple", lty = 2)
points(132.7, 224.021918, col = "purple", pch = 16)
legend("bottomright", legend = c("Inventario", "Límite Crítico", "Límite Superior", "Límite
Sugerido", "Punto de reorden"),
      col = c("black", "red", "blue", "green", "purple"), lty = 1, pch = c(NA, NA, NA, NA, 16))

print(paste("Stock mínimo:", stock.seguridad, "unidades"))
print(paste("Stock necesario:", stock.necesario, "unidades"))
print(paste("Stock de seguridad:", stock.seguridad + stock.necesario, "unidades"))
print(paste("Punto de reorden:", punto.reorden + (demanda.diaria * 59), "unidades"))
print(paste("Demanda diaria:", demanda.diaria, "unidades"))

resultadosSGI <- data.frame(Stock_mínimo = stock.seguridad,
                           Stock_necesario = stock.necesario,
                           Stock_seguridad = stock.seguridad + stock.necesario,
                           Punto_de_reorden = punto.reorden + (demanda.diaria * 59))

```

```
print(resultadosSGI)
```