

Escuela de Ingeniería Industrial

Propuesta para la gestión y planificación de inventarios de suministros como apoyo a la mantención de equipos críticos en la minería.

por

Valentina Teresa Paz Hernández Klenner

Memoria para optar al título de
Ingeniero Civil Industrial

Prof. Guía: Pablo Miranda González

Octubre, 2014

Cada paso que doy va narrando un cuento

Este cuento termina hoy, y es por eso que quiero agradecer infinitamente a mi familia, por acompañarme en todo este proceso con amor y paciencia. A mi papá Sergio por sus conversaciones y desafíos ingenieriles, por ayudarme y aconsejarme en cada idea que se me ocurre. A mi mamá Carolina por ser mi inspiración como mujer, por enseñarme que nada es imposible y que con esfuerzo y perseverancia se consiguen las cosas. Y a mis hermanos Javiera y Joaquín por ser los mejores hermanos, compañeros y amigos incondicionales, esto es para ustedes.

Además quiero agradecer a los que me acompañan desde la distancia, a toda mi familia: tíos y primos y en especial a mis amados abuelos Tato y Queta.

Por último quiero agradecer a las personitas que se han puesto en mi camino, que me apoyan y me guían a su manera, a mis amigos de la vida, los que he encontrado por el mundo y en mi querida EII.

Gracias a todos, el camino continúa y este cuento seguirá creciendo con más historias y aventuras.

Valentina Hernández Klenner

Índice

Glosario	6
Lista de abreviaturas y siglas.....	7
Lista de tablas	8
Listas de figuras.....	9
Resumen	10
1 Introducción.....	11
2 Presentación del proyecto	13
2.1 Objetivos.....	13
2.1.1 Objetivo general	13
2.1.2 Objetivos específicos.....	13
2.2 Contexto	14
2.3 Alcances.....	15
2.4 Metodología.....	15
2.5 Hipótesis	16
3 Caso Minera Esperanza	18
3.1 Muelle Minera Esperanza.....	18
3.2 Proceso de filtrado	20
3.2.2 Fallas en el proceso de filtrado	21
3.3 Política de mantenimiento	23
3.4 Política de inventario	24
4 Revisión Bibliográfica	26
4.1 Mantenimiento.....	26
4.1.1 Mantención preventiva	26
4.1.2 Mantenimiento predictivo	26
4.1.3 Mantenimiento correctivo, reactivo o por falla	27

4.1.4	Mantenición y cadena de suministros.....	27
4.1.5	Indicadores de mantenimiento.....	28
4.2	Inventario.....	29
4.3	Inventario de repuestos.....	30
5	Enfoque y diseño del simulador	32
5.1	Enfoque del problema.....	32
5.2	Modelo conceptual	33
5.3	Enfoque respecto a las políticas de inventario	35
5.4	Enfoque respecto a las políticas de mantenimiento.....	35
5.5	Elección de fallas.....	36
5.6	Comportamiento general del simulador	37
5.7	Fundamento para la generación de fallas	38
5.8	Funcionamiento del simulador	41
5.9	Otros prototipos	44
6	Implementación computacional y análisis de resultados	45
6.1	Parámetros y variables principales	45
6.1.1	Parámetros	45
6.1.2	Variables	45
6.2	Cálculo de parámetros	45
6.3	Medidas de desempeño.....	47
6.4	Planes a evaluar	47
6.5	Modo de implementación	48
6.6	Análisis global preliminar de la combinación de políticas.....	49
6.7	Análisis de política de mantenimiento correctivo	57
6.8	Análisis de política de mantenimiento preventivo	59
6.9	Análisis de planes con políticas de inventario con revisión periódica	61
6.9.1	Planes con políticas de inventario con revisión periódica (S, R)	61
6.9.2	Planes con políticas de inventario con revisión periódica (s, S, R).....	61

6.10 Análisis de planes con políticas de inventario con revisión continua	62
6.11 Análisis de sensibilidad	63
6.12 Análisis de costos	65
6.13 Análisis de rejuvenecimiento del repuesto	67
6.14 Análisis final.....	68
7 Conclusiones.....	73
Bibliografía.....	75
Anexos.....	78
Anexo 1- Detalle de planes evaluados.....	79
Anexo 2- Parámetros de la simulación y su modo de obtención.....	81
Anexo 3- Tabla de resultados	82
Anexo 4- Diagrama de flujo Mantenimiento correctivo	85
Anexo 5- Diagrama de flujo Mantenimiento preventivo	86
Anexo 6- Diagrama de flujo de Políticas de inventario.....	87

Glosario

Commodities: materias primas a producidas por el hombre o por la naturaleza cuyo valor viene dado por el derecho del propietario a comerciarlos, no por el derecho a usarlos

Concentraducto: vía por donde se transporta algún tipo de material concentrado.

Filtro Larox: filtro de concentrado de cobre utilizado en la Minería.

Lead time: El Tiempo de espera de una orden.

Módulo: Unidad básica del simulador que representa una acción en él.

Shiploader: mecanismo que permite el carguío de los barcos con concentrado.

Stockpile: lugar donde se acopia el concentrado, una vez que ha sido filtrado.

Lista de abreviaturas y siglas

EDT: Estación Disipadora Terminal.

HH: horas hombre.

MC: Mantenimiento correctivo.

MONCON: Monitoreo de condiciones.

MP: Mantenimiento preventivo.

MTBF: *mean time between failures*.

Mtto: Mantenimiento.

MTTR: *Mean time to repair*.

PAN: *Process Analyzer*

PMO: Plan de mantenimiento operacional.

SIAM: Sistema de Impulsión de Agua de Mar.

TK: Estanque.

Lista de tablas

Tabla 2.1- Planes a evaluar en el simulador	16
Tabla 3.1- Cuadro de fallas Filtro Larox.	22
Tabla 4.4- Indicadores de mantenimiento.	28
Tabla 5.2- Funciones para calcular las tasas de fallas no estacionarias.....	40
Tabla 6.1- Parámetros	46
Tabla 6.2- Variables	46
Tabla 6.3- Esquema representativo de los tipos de planes a evaluar.....	48
Tabla 6.4- Tabla de indicadores promedios para planes con mantenimiento correctivo y política de inventario con revisión periódica (s,S,R).....	49
Tabla 6.5- Tabla de indicadores promedios para planes con mantenimiento correctivo y política de inventario con revisión periódica (S, R)	50
Tabla 6.6- Tabla de indicadores promedios para planes con mantenimiento correctivo y política de inventario con revisión continua (Q, r).....	51
Tabla 6.7- Tabla de indicadores promedios para planes con mantenimiento preventivo y política de inventario con revisión periódica (s,S,R).....	51
Tabla 6.8- Tabla de indicadores promedios para planes con mantenimiento preventivo y política de inventario con revisión periódica (S, R)	52
Tabla 6.9- Tabla de indicadores promedios para planes con mantenimiento preventivo y política de inventario con revisión continua (Q,r).....	53
Tabla 6.10- Tabla resumen de indicadores promedios de cada prototipo	54
Tabla 6.11- Diferencia porcentual de cada indicador al sensibilizar los planes	65
Tabla 6.12- Resumen de costos de planes básicos.	66
Tabla 6.13- Incorporación de rejuvenecimiento en los planes.	68

Listas de figuras

Figura 2.1.-Gráfico de soluciones factibles de los planes evaluados.	16
Figura 3.1-Proceso productivo Minera Esperanza.	19
Figura 3.2- Visión global de muelle.	19
Figura 3.3- Detalle de equipos en el proceso de filtrado.	21
Figura 5.1- Esquema de la generación de fallas	39
Figura 5.2- Bosquejo del simulador.	34
Figura 6.1- Process Analyzer.....	49
Figura 6.2- Comparación de políticas con respecto a la disponibilidad.....	55
Figura 6.3- Comparación de políticas con respecto a la utilización.	56
Figura 6.4-Comportamiento de planes con mantenimiento correctivos respecto la disponibilidad.	58
Figura 6.5-Comportamiento de planes con mantenimiento correctivos respecto la utilización.	58
Figura 6.6-Comportamiento de planes con mantenimiento preventivo respecto a la disponibilidad	60
Figura 6.7-Comportamiento de planes con mantenimiento preventivo respecto a la utilización	60
Figura 6.8- Gráfico del panorama final de los 70 planes evaluados respecto a la disponibilidad.	69
Figura 6.9- Gráfico del panorama final de los 70 planes evaluados respecto a la utilización.	70
Figura 6.10- Gráfico del panorama final de los planes originales respecto a la disponibilidad.	71
Figura 6.11- Gráfico del panorama final de los planes originales respecto a la utilización. .	71
Figura 6.12- Gráfico de elección de plan con indicadores limitados.	72

Resumen

Dentro del ámbito de la minería la detención de equipos a causa de fallas implica un costo. Esto se traduce en que el costo de inventario en que se incurre es muy alto, debido a que los repuestos necesarios son generalmente de gran tamaño, costosos y se necesitan de manera irregular, además influye un costo de oportunidad asociado a lo no producido durante el tiempo en que el equipo está detenido. Por ende reducir los costos asociados a las fallas es una meta constante de las mineras y la solución implica poner en práctica políticas de mantenimiento adecuadas para cada equipo.

Para poder abarcar esta problemática se realiza una evaluación de políticas de inventario en conjunto a políticas de mantenimiento generando combinaciones distintas para poder compararlas y sacar conclusiones de ellas. La herramienta de comparación utilizada para la evaluación es un simulador discreto orientado a eventos que representa un filtro del proceso de filtrado de cobre aplicado a un caso realista de una minera chilena.

Las conclusiones obtenidas gracias a la evaluación difieren a lo que se esperaba, mostrando como mejores opciones a los planes correctivos, que entregaron un nivel de disponibilidad mayor y el menor costo en cada comparación realizada. Finalmente el plan óptimo es el plan que utiliza mantenimiento correctivo y una política de inventario de revisión continua del tipo (s, S, R) con revisiones por turno y un nivel de servicio del 90%.

1 Introducción

Actualmente el éxito de las empresas dependen de las decisiones que toman en cada etapa de su cadena logística, o sea conjunto de acciones y partes involucradas de manera directa o indirectamente en la satisfacción del cliente, donde la minimización de costos y el aumento de productividad se convierten en los objetivos principales.

El ámbito minero no es una excepción a esto, ya que el impacto de su capacidad productiva influye directamente con el éxito que puede alcanzar, donde también el nivel de seguridad que debe tener, tanto con sus trabajadores como con el medio ambiente, son factores fundamentales que hace que el área de mantenimiento tome un rol fundamental.

Las empresas mineras tienen distintas opciones para poder implementar su cadena logística respecto a la mantención de sus activos físicos, tanto en la forma en que los mantienen y el modo en que se manejan los stock de repuestos necesarios, ya que la necesidad de prevenir accidentes y detenciones como los costos de los repuestos de los equipos son los elementos decisivos al momento de determinar dicha cadena.

El proyecto que se desarrollará se denominó “Propuesta para la gestión y planificación de inventarios de suministros como apoyo a la mantención de equipos críticos en la minería” el cual está inserto en un proyecto mayor solicitado por la Minera Esperanza a la Escuela de Ingeniería Industrial de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Este proyecto plantea que hoy en día las opciones de mantención de cualquier equipo consisten en aplicar mantenimiento correctivo, preventivo o predictivo dependiendo de las características del equipo, en este caso se dio énfasis a un equipo crítico dentro de un proceso crucial en la minera, el proceso de filtrado, donde se trabajó con un filtro Larox el cual detenía el funcionamiento total del proceso en caso de fallar.

Pero la efectividad del mantenimiento depende no tan solo de elegir la mejor modalidad para un equipo, sino de cómo se manejan los elementos de apoyo para poder hacer eficiente su ejecución.

Para llevar a cabo de manera eficiente y efectiva el mantenimiento de activos físicos es preciso tener una política de inventario acorde a las necesidades tanto de reparaciones por fallas como de inspecciones preventivas o predictivas. Y es así como se desarrolló este proyecto, entrecruzando distintas opciones de políticas de inventario, con revisión periódica o continua, con un modelo de mantenimiento preventivo y otro que solo incorpora las reparaciones reactivas de las fallas que se denominará mantenimiento correctivo.

Durante el proyecto se diseñó una herramienta que permite evaluar los entrecruces de políticas generando diversos escenarios en base a tres indicadores: disponibilidad, utilización y

costo total, que permitirán tomar una decisión en cuanto a qué política de inventario y de mantenimiento utilizar de acuerdo al equipo en cuestión.

2 Presentación del proyecto

A continuación se presenta la contextualización del proyecto, detallando los objetivos, el marco teórico, el alcance y la metodología que engloba la propuesta de gestión y planificación de inventarios de suministros para la mantención de equipos en minería.

2.1 Objetivos

Los objetivos que rodean a este trabajo están al alero del proyecto solicitado por la Minera Esperanza a la Escuela de Ingeniería Industrial que se denomina: Proyecto Integración de la Gestión de Materiales a la estrategia de mantenimiento de equipos críticos, a cargo del profesor Pablo Miranda.

El objetivo clave de este proyecto persigue es alinear la gestión de materiales, respecto al manejo de inventarios de repuestos, con la estrategia de mantención de equipos críticos para la operación de la faena minera en el muelle, con el propósito de asegurar materiales y repuestos de equipos que son de alto impacto en la operación, y mejorar la disponibilidad de éstos con un mínimo costo posible.

A continuación se describen el objetivo general y los objetivos específicos de la propuesta a realizar.

2.1.1 Objetivo general

El objetivo principal que guía este proyecto es el desarrollo de una herramienta para evaluar políticas de planificación y gestión de inventario de materiales y repuestos, incorporando distintas políticas de mantención de equipos críticos, para poder proponer una combinación de éstas que asegure los niveles de confiabilidad establecidos para dichos equipos, y a su vez optimizar o controlar las medidas de desempeño de la cadena de suministro respectiva.

Para lograr el objetivo general del proyecto se definen los siguientes objetivos específicos.

2.1.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos son una referencia del trabajo realizado por la memorista y definen las metas que se fueron alcanzando durante el periodo de trabajo. Los objetivos específicos fueron los que guiaron el trabajo de la alumna, los cuales se fueron modificando a medida que el objetivo principal se alineaba y pulía en post de la herramienta mencionada en el punto anterior.

Dentro de los objetivos específicos se pueden encontrar el siguiente listado:

- Revisión bibliográfica en Confiabilidad y mantenimiento de equipos.
- Revisión bibliográfica de gestión y planificación de inventarios.
- Propuestas de indicadores o medidas de desempeño para evaluar las combinaciones de políticas en la herramienta propuesta.
- Analizar el funcionamiento de la Minera Esperanza, específicamente el área del muelle, con respecto a sus políticas de inventario y de mantenimiento.
- Diseñar una herramienta que permita evaluar distintos comportamientos de un equipo crítico bajo distintos escenarios de políticas de inventario y de mantenimiento.
- Evaluar dichos escenarios en la herramienta desarrollada.
- Comparar y concluir resultados de los escenarios evaluados del equipo crítico de la Minera Esperanza y la validez del instrumento diseñado.

2.2 Contexto

Actualmente en el país el 75% de las exportaciones corresponden a productos denominados *commodities*, dentro de los cuales se encuentra el cobre y oro que se extraen de distintas mineras a lo largo del país y son enviadas al resto del mundo.

Minera Esperanza es un yacimiento de oro y cobre que exporta anualmente 700.000 toneladas de cobre y 230.000 onzas de oro, provenientes de procesos altamente eficientes controlados por las leyes de recursos mineros donde hay una alta inversión en activos físicos.

La etapa final del ciclo de procesamiento del cobre es el embarque, que se realiza en la zona de Michilla en la segunda región de nuestro país. Desde el yacimiento minero se prolonga un concentrado de 143 km. de largo por donde fluye la pulpa de cobre, mezcla de sólidos y líquidos, que finalmente se filtran al llegar al muelle o embarque. Allí espera en un centro de acopio para la exportación final.

El muelle descrito cuenta con aproximadamente 200 equipos que ayudan en el proceso de filtrado y posteriormente al embarque del mineral. El diseño, la construcción, las operaciones y los mantenimientos de los equipos son parte fundamental para la optimización de todos los procesos asociados a la extracción del cobre.

Hoy en día se exige más eficiencia en los costos del ciclo de vida útil de las máquinas o equipos, con el objetivo final de lograr la máxima calidad en los procesos con un menor costo posible. Y es allí donde se engloba el proyecto descrito aquí, donde la meta final es la elaboración de una propuesta para la gestión y planificación de los inventarios de repuestos o materiales necesarios para el apoyo a la mantención de equipos críticos en la minería,

específicamente en la Minera Esperanza, donde se buscarán alternativas alineada a las políticas actuales de mantenimiento que permitan una integración hacia la cadena de suministros, para facilitar y optimizar la gestión de la mantención.

2.3 Alcances

La idea de crear una herramienta, como la propuesta en este proyecto, nace de la necesidad de tener un apoyo para la toma de decisiones en la gestión de materiales para equipos críticos en todo ámbito, más allá del instrumento aquí presentado que es desarrollado para una empresa minera.

Con el tiempo se busca perfeccionar el simulador para que se pueda adaptar fácilmente a cualquier equipo crítico, aumentando o disminuyendo el número de fallas y generando escenarios y resultados útiles en la toma de decisiones con respecto a la gestión de materiales.

De este modo se busca desarrollar una herramienta, que en el futuro, sea implementada en las empresas que cumplan con identificar equipos críticos y que puedan utilizarla de manera eficiente para decidir qué política de inventario gestionar dependiendo de la política de mantenimiento actual.

2.4 Metodología

La metodología para desarrollar este proyecto comienza con un estudio general de cuáles son las políticas de mantenimiento e inventario y cómo se aplican hoy en día en distintos ámbitos, tanto en la minería como en otros rubros, para así imaginar cómo diseñar la herramienta que se buscaba.

A pesar que el proyecto de Minera Esperanza está pensado para apoyar todo el proceso del muelle, la memoria se centra solo en uno de los dos filtros Larox, debido a la complejidad que implica representar la generación de fallas de ambos equipos, que funcionan paralelamente, pero de manera desfasada, o de todo el proceso de filtrado, por lo tanto el filtro pasó a ser representado como un sistema generador de fallas, correspondientes a las fallas críticas del filtro.

Con el prototipo básico de la interacción de las fallas con los mantenimientos preventivos y correctivos, se estudian los distintos escenarios posibles y la manera de incluirlos en el simulador. Y es así como se diferencian cuatro sub modelos básicos, que combinan las políticas de inventario con revisión continua y periódica, con las políticas de mantenimiento preventivo y correctivo.

Ya con el modelo del sistema listo se inicia el cálculo de parámetros necesarios para cada plan, correspondiente a tamaños de lotes, puntos de re orden, *lead time*, entre otros, para

finalmente generar los resultados de la evaluación de cada proyecto y obtener las respectivas conclusiones.

2.5 Hipótesis

Para poder llevar a cabo el objetivo de esta tesis se desarrollará una herramienta que busque representar el comportamiento de un equipo crítico que falla, y en este caso, un filtro Larox del sector del muelle de la Minera Esperanza.

El objetivo del simulador es poder obtener información respecto a la disponibilidad, costo y utilización del filtro, aplicando distintas políticas de inventario entrecruzándolas con las estrategias de mantenimiento, generando distintos planes posiblemente aplicables como se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1-Planes a evaluar en el simulador

Política de inventario/ Política de mantenimiento	Mantenimiento correctivo	Mantenimiento preventivo
Inventario con revisión continua	Plan 1	Plan 2
Inventario con revisión periódica de 1 día	Plan 3	Plan 4
...	Plan 5

Una vez obtenidos los resultados de los indicadores mencionados se buscará comparar, a través de un gráfico, el comportamiento de cada opción de política de inventario con una respectiva estrategia de mantenimiento. Para esto se utilizará un gráfico disponibilidad versus costo como se indica en la figura siguiente:

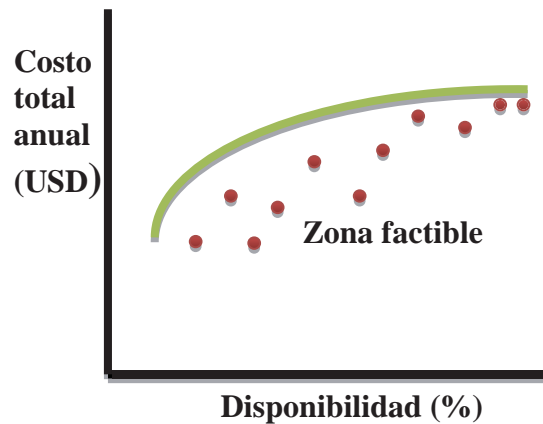


Figura 2.1.-Gráfico de soluciones factibles de los planes evaluados.

La curva que se presenta en el gráfico divide la zona factible (bajo de la curva) de la zona infactible (sobre la curva), en donde se pueden encontrar las posibles estrategias que la organización puede elegir para aplicar a su filtro. Luego se pueden fijar niveles de disponibilidad y costos requeridos o máximos y así encontrar la estrategia que más se acerca a esos márgenes.

3 Caso Minera Esperanza

Para poder realizar este proyecto se necesitó investigar paralelamente cómo funciona el muelle de la Minera Esperanza con respecto a sus políticas de inventario y de mantenimiento.

Para esto se levantó un estudio que permitió obtener información de los equipos del muelle, su frecuencia de falla y otros datos útiles para este proyecto, y posteriormente se averiguó respecto a la política de mantenimiento utilizada actualmente.

Respecto a la política de inventario que maneja el muelle no se encontró información, por lo cual se analizó la política llevada con los repuestos de la mina, que se espera que en un futuro se pueda extender al muelle.

3.1 Muelle Minera Esperanza

El Muelle Minera Esperanza es una unidad operativa ubicada a 52 Km. al norte de la ciudad de Mejillones (II región, Chile), que depende directamente de la Gerencia de Operaciones de la mina y se subdivide en dos unidades de negocio: Muelle y SIAM (Sistema de Impulsión de Agua de Mar).

El Muelle es la unidad que tiene como objetivo el filtrado, almacenamiento y embarcación del concentrado de cobre que es producido en la planta de Minera Esperanza, y desde allí es distribuido a sus clientes. Por otra parte, el SIAM es la unidad encargada de abastecer con agua de mar a la planta Minera Esperanza, agua que es utilizada para la totalidad de los procesos que la requieran. En la figura 3.1 se presenta un esquema global de la mina, donde se destaca el área correspondiente al Muelle.

Una vez llegado el concentrado de cobre al Muelle proveniente de un concentrado deriva a la Estación disipadora terminal, más conocida como EDT, luego se dirige al espesador, posteriormente al filtro y finaliza en la etapa de almacenamiento y embarcado, como se muestra en la figura 3.2. Además se puede ver el sistema paralelo de captación de agua de mar.

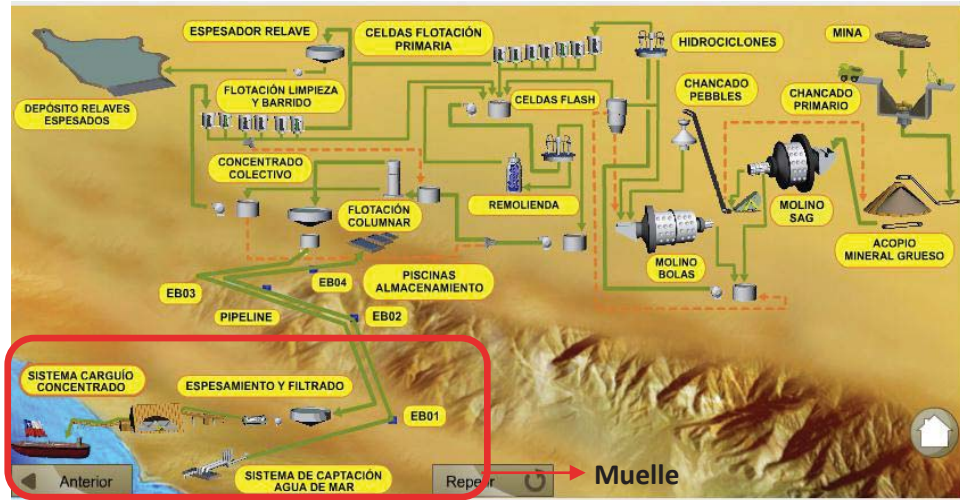


Figura3.1-Proceso productivo Minera Esperanza. Fuente: Fuente: (Proyecto Gestión Integrada de materiales Muelle Minera Esperanza. 2012)

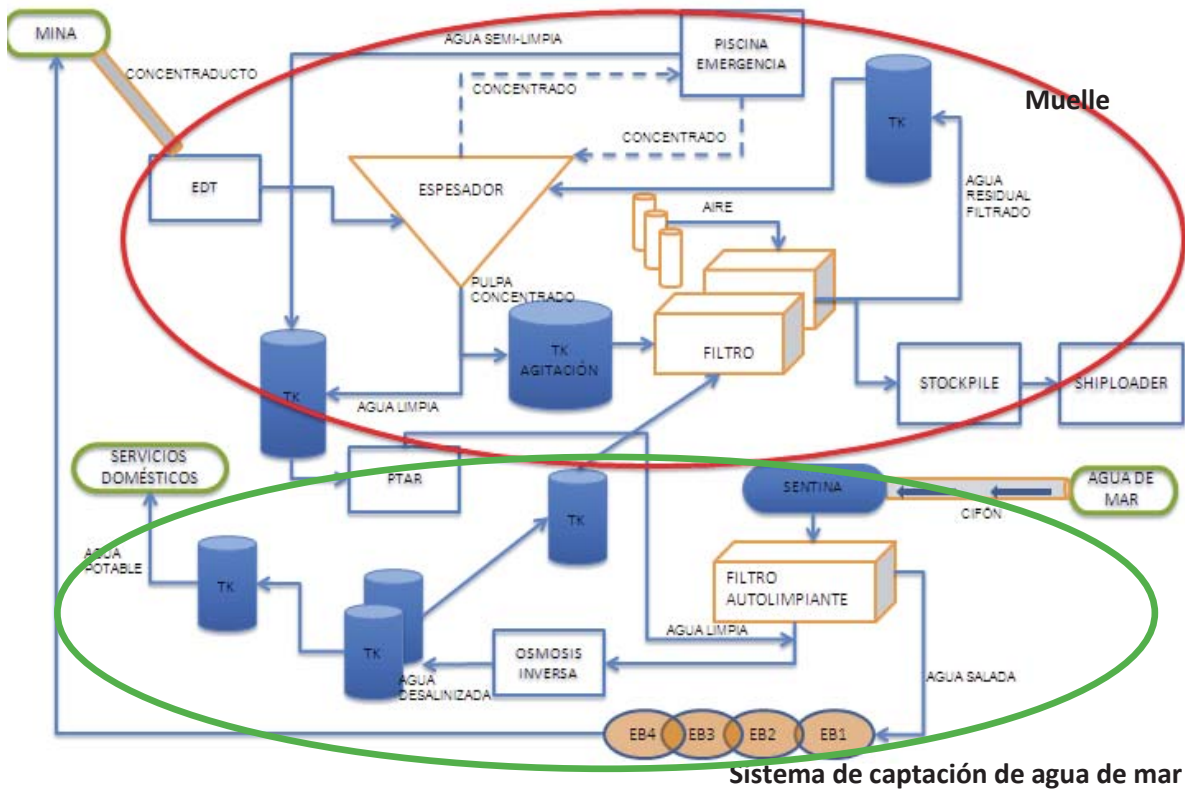


Figura3.2- Visión global de muelle. Fuente: (Proyecto Gestión Integrada de materiales Muelle Minera Esperanza.2012)

El EDT es un disipador de energía que busca eliminar el exceso de energía hidráulica que posee el concentrado de cobre que proviene directamente desde la planta por vía del concentrado. Al salir el concentrado de cobre por esta etapa se espera que contenga entre un 60% y un 65% de sólidos en su mezcla.

El siguiente proceso es el espesamiento del concentrado cuyo objetivo es separar, mediante el mecanismo de sedimentación, parte del agua contenida en la pulpa de concentrado, agregando reactivos que faciliten la decantación. Dentro de este proceso se realiza una recirculación de material para aumentar el espesamiento, ya que se espera conseguir concentrado de cobre con un 80% de solidez.

El proceso que continúa al espesamiento es el filtrado, que es la etapa donde centraremos este proyecto, por lo cual se le dará un ítem especial a continuación.

Una vez obtenido el concentrado de cobre en las condiciones necesarias se procede a almacenar el material en la bodega de almacenamiento, en esta etapa el concentrado contiene solo entre un 7% y un 9% de humedad. La bodega de almacenamiento tiene una capacidad máxima de 70.000 toneladas.

Finalmente se inicia el sub proceso de embarque que tiene por objetivo embarcar el concentrado de cobre por vía de correas transportados hasta los buques de los clientes finales.

3.2 Proceso de filtrado

El proceso de filtrado es el tercer intento para disminuir el porcentaje de agua del concentrado de cobre proveniente de la etapa de espesamiento, el cual entrega la pulpa que contiene entre un 65% a un 80% de sólidos. La mezcla es forzada a pasar a través de un medio filtrante semi-permeable que permite dejar pasar el líquido y retener los sólidos. Esto se hace gracias a dos filtros Larox que permiten realizar el filtrado.

Durante esta etapa participan cerca de 90 piezas que logran el producto final. Entre estas partes se pueden encontrar: filtros, estanques, válvulas, correas, bombas, etc.

La operación del filtrado cuenta con dos piezas fundamentales que son los dos filtros Larox que realizan la acción de filtrado. Estos funcionan de manera independiente, ambos al 100%, pero de manera desfasada. En caso de que uno falle y deba detenerse, el otro filtro continúa su trabajo a la misma capacidad de siempre, por lo tanto se disminuye la producción a la mitad.

El trabajo del filtrado se inicia cuando se recibe pulpa de concentrado proveniente del proceso de espesamiento y llega al estanque de almacenamiento de pulpa 611-TK-003 (Ver figura 3.3). Desde aquí se alimenta a los filtros a través de dos bombas, 611-PP-003 y 611-PP-004, que dirigen la pulpa a los filtros de forma paralela a ambos.

Una vez que la pulpa de cobre llega a los filtros, 621-FL-001 y 621-FL-002, estos operan en paralelo, pero de manera desfasada. Existen dos factores que no permiten que el trabajo se haga simultáneamente y esto se debe a que en la etapa de secado la alimentación de aire desde compresores permite abastecer sólo a un filtro a la vez, y además en el proceso de descarga hacia la bodega de alimentación, la correa transportadora 631-CV-001 soporta el tonelaje de descarga de sólo un filtro.

Desde los filtros sale el concentrado a través de dos correas, 621-CV-001 y 621-CV-002, que se dirigen a la correa transportadora 631-CV-001 que finalmente es la que lleva el material a la bodega de almacenamiento.

El agua filtrada se envía al estanque 621-TK-005, que posteriormente se impulsa a través de las bombas 621-PP-06 y 621-PP-07 al proceso de espesamiento. La limpieza de la tela filtrante, que utiliza el equipo para filtrar, se realiza con el agua que impulsan las bombas 621-PP-022 y 621-PP-023 (Ver figura 3.3).

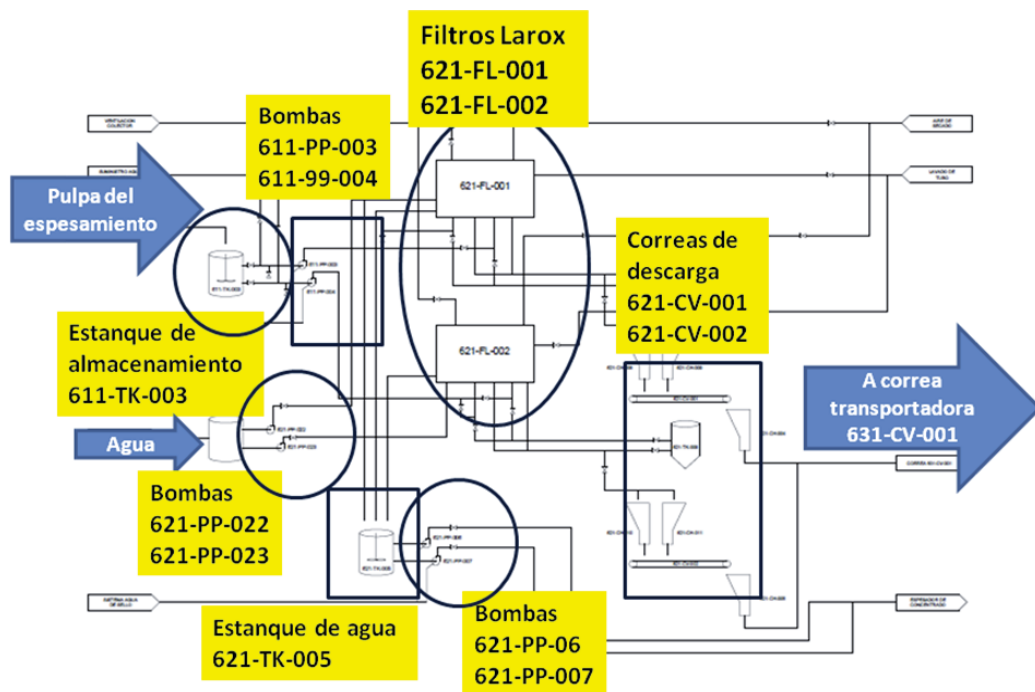


Figura 3.3- Detalle de equipos en el proceso de filtrado. Fuente: (Proyecto Gestión Integrada de materiales Muelle Minera Esperanza. 2012)

3.2.2 Fallas en el proceso de filtrado

En los registros de la Minera Esperanza se puede encontrar una particular clasificación de las detenciones divididas en detenciones operacionales y por mantenimiento. Cuando se habla de detenciones operacionales estas se refieren a detenciones en el filtro de

responsabilidad del área de operaciones, donde además este ítem se divide en dos: fallas operacionales (bajo nivel tk-03, filtro stand-by, limpieza correa y tripper) y detenciones necesarias para la operación (lavado de parrilla, cascada y placa). Estas detenciones no son consideradas fallas ni mantenimiento preventivo, sino más bien, son detenciones o monitoreo necesarios para que el filtrado se realice como corresponde, son acciones de preparación del filtro que se deben hacer previamente a comenzar su funcionamiento.

Por otra parte se tienen las detenciones por mantenimiento, nominación entregada por la Minera Esperanza a las fallas, que corresponden a detenciones imprevistas del filtro debido a imperfecciones en sus repuestos: roturas, cortes, desgaste, etc, donde las reparaciones de éstas son de responsabilidad del área de mantenimiento. Dentro de este registro se incluyen los mantenimientos preventivos, ya que están bajo responsabilidad del área de mantenimiento y detienen los equipos, pero se entiende que no corresponden a fallas como tal.

Las fallas descritas anteriormente son las que afectan directamente el funcionamiento de cada uno de los filtros, aunque algunas fallas no se producen en el filtro mismo. A continuación se presenta una tabla resumen de todas las fallas indicando a qué equipo influyen y su grado de criticidad.

Tabla 3.1- Cuadro de fallas Filtro Larox.

Falla	Equipo involucrado	Código del equipo	Criticidad
Falla sensor	Filtro Larox	621-FL-001/621-FL-002	Crítico
Falla manguera	Filtro Larox	621-FL-001/621-FL-002	Crítico
Falla correa	Correa transportadora	621-CV-001/621-CV-002	Crítico
Falla placa	Filtro Larox	621-FL-001/621-FL-002	Crítico
Falla tela	Filtro Larox	621-FL-001/621-FL-002	Crítico
Falla bomba	Bomba hidráulica	611-PP-003/611-PP-004	Crítico
Falla polines	Correa transportadora	621-CV-001/621-CV-002	Crítico
Falla colector	Filtro Larox	621-FL-001/621-FL-002	Crítico
Falla grampa	Filtro Larox	621-FL-001/621-FL-002	Crítico
Falla válvula	Filtro Larox	621-FL-001/621-FL-002	Crítico
Línea de alimentación	Filtro Larox	621-FL-001/621-FL-002	Crítico
Falla pasador	Filtro Larox	621-FL-001/621-FL-002	Semi-crítico
Falla UMC	Bomba hidráulica	611-PP-003/611-PP-004	Semi-crítico
Agua de sello	Filtro Larox	621-FL-001/621-FL-002	No crítico
Falla chute traspaso	Filtro Larox	621-FL-001/621-FL-002	Semi-crítico
Falla línea de aire	Bomba hidráulica	611-PP-003/611-PP-004	No crítico
Falla motor eléctrico	Bomba hidráulica	611-PP-003/611-PP-004	No crítico

Fuente: Proyecto Gestión Integrada de materiales Muelle Minera Esperanza 2012.
Minera Esperanza.

La criticidad viene de la catalogación de un factor dado por el riesgo del equipo en un periodo de 8 meses, calculado con la frecuencia de falla (fallas/mes), multiplicado con la cuantificación de la consecuencia de la falla. Si este factor es sobre 20 el equipo es crítico, si

varía entre 10 y 20 el equipo es semi-crítico, y si es bajo 10 el equipo es no crítico, criterio específico de la Minera Esperanza.

3.3 Política de mantenimiento

Luego del estudio realizado en el Muelle de la Minera Esperanza se concluyó que no se cuenta con una política de mantención clara, existe un plan de mantenimiento preventivo, existe monitoreo condicionado, pero en la mayoría del tiempo se mantiene una vez ocurrida una falla, por lo tanto se puede decir que la minera funciona solamente con mantenimiento del tipo correctivo.

Dentro de lo que se define como mantención preventiva en el muelle se tiene un plan conocido como “Plan de 52 semanas” que consiste en una planificación de mantenimiento semanal para aplicar durante todo el año. El problema respecto a este plan es que se cumple en un 50%, debido a que se privilegia mantener y arreglar imprevistos y fallas que surgen en el camino, desatendiendo las mantenciones ya planificadas.

Además dentro del plan de mantenimiento preventivo se encuentran una o dos detenciones totales de las operaciones del Muelle, que se tiene planificado que duren 10 días, para poder revisar y mantener gran parte de los equipos del Muelle. No obstante, la última mantención total realizada en el muelle fue el pasado abril del año 2013, donde la paralización duró más de lo planeado (2 semanas) debido a que el abastecimiento de repuestos e insumos para la mantención no se encontraba en condiciones adecuadas, lo cual atrasó considerablemente la ejecución del mantenimiento.

Cuando se habla de mantenimiento predictivo en el Muelle de la Minera Esperanza se refieren a un sistema de monitoreo que operado por el área “MONCON” (monitoreo de condiciones) el cual vigila de manera constante la condición técnica de algunos de los equipos mientras estos realizan sus tareas normales.

Para realizar el monitoreo se hace uso de un programa sistemático de mediciones de los parámetros más importantes de los equipos, donde obtienen datos que son utilizados posteriormente para fijar los límites de los parámetros a controlar. Con estos datos además se hace una planificación a corto plazo de las tareas y repuestos necesarios para mantener el equipo en funcionamiento el mayor tiempo posible.

A pesar de los planes descritos, se concluyó que en el Muelle de la Minera Esperanza no existe una política de mantenimiento desarrollada al 100%, ya que los sistemas ideados para esto no funcionan como debiesen, por lo cual se considera que mayoritariamente el mantenimiento es correctivo, independiente de los planes de mantención que se llevan a cabo, por lo cual se podría plantear la teoría de insuficiencia en los recursos asignados a las

operaciones de mantenimiento y que la planificación y eficiencia de los programas preventivo y predictivo no cumplen los objetivos esperados.

3.4 Política de inventario

Desde los estudios hechos al manejo de los inventarios en el Muelle de la Minera Esperanza se concluyó que no existe una política de inventario establecida como tal, pero sí existe una catalogación de repuestos, en donde se aplican ciertas políticas, y el resto de repuestos se gestionan con una revisión continua del stock de estos.

La gestión de inventarios aplicada depende de la clasificación de los repuestos del Muelle, pero cabe destacar que no todos los repuestos se encuentran catalogados en el sistema, por lo cual la información no es suficiente para confirmar que existe una política como tal.

La catalogación de los repuestos del Muelle consiste en dividirlos en dos tipos. Los repuestos “Normal” cuentan con parámetros de stock y reposición definidos, que se utilizan para la solicitud de compra que se hace manualmente por el personal de abastecimiento, lo que genera que en ciertos casos quiebres de stock. Y los repuestos “A pedido” son los que no se encuentran en bodega, ya que su rotación es baja y se solicitan dependiendo de la necesidad particular del usuario. Los repuestos no catalogados no cuentan con información para realizar pedidos anticipadamente, por lo cual se gestionan dependiendo de la necesidad directa de estos.

La gestión de inventario aplicada en la Mina es mucho más completa y efectiva que en el Muelle de la misma, ya que existe una catalogación detallada que permite una mayor confiabilidad de los equipos y minimiza los quiebres de stock.

Dentro de la Mina hay que considerar dos tipos de inventarios y de acuerdo a ello son las acciones a tomar para su gestión:

- Repuestos con política de stock: Son todos los repuestos que, debido a su comportamiento de consumo y/o criticidad, tienen definidos parámetros de reposición dentro del registro de la minera. Dentro de este tipo de repuestos se encuentran los repuestos estándares que están considerados dentro del inventario por su comportamiento de consumo y estrategia de reposición y los repuestos críticos, que también se almacenan, pero a causa de su naturaleza crítica en la operación.
- Repuestos con reposición contra pedido: Son repuestos que no se encuentran con política de stock y son solicitados a medida que se necesitan directamente por parte de los usuarios en la operación de la empresa. Dentro de estos repuestos se encuentran los de tipo normal que son todos aquellos utilizados en necesidades particulares del proceso normal de operación o por fallas que se mantienen de manera correctiva. Y

también se tienen los repuestos de tipo PMO, que son aquellos que son usados por parte del programa de mantención del área de operación.

Estas clasificaciones, tanto la del muelle como a la de la mina, ayudan a hacer una idea respecto a cómo es la gestión de inventarios utilizada en los repuestos críticos, pero no dan una respuesta total a las necesidades del proyecto, principalmente por la falta de información y registros de estas. Por lo mismo esta información se utilizará como base a lo que será la evaluación de política de inventario a realizarse en el simulador.

4 Revisión Bibliográfica

En los siguientes puntos se comenta brevemente en que consiste la mantención, sus tipos y como se desarrolla ésta en la minera, y también el papel que juegan los inventarios en una empresa, enfatizándose la gestión de inventarios de repuestos.

4.1 Mantenimiento

El mantenimiento es considerado una fuente de ingresos en una empresa, por lo que debe ser encarado con las estrategias correctas (Klimasauskas, 2007).

La función del mantenimiento es asegurar que los activos físicos continúen desempeñando las funciones deseadas, a lo largo de todo su ciclo de vida, seleccionando y aplicando mejoras técnicas para enfrentar fallos y consecuencias (Halperin, 2010).

En los siguientes puntos se explicarán tres estrategias diferentes de mantenimiento, pero para el proyecto solo se aplicarán dos de éstas: mantenimiento preventivo y correctivo.

4.1.1 Mantención preventiva

Mantención preventiva se define como el conjunto de inspecciones periódicas, sujetas a parámetros, que buscan detectar condiciones que pudieran causar roturas o fallas. Este tipo de mantenimiento permite controlar, eliminar o evitar tales condiciones que provocan que el equipo falle (Klimasauskas, 2007).

Dicha mantención se puede clasificar en tres tipos: programada, predictiva y de oportunidad. La primera es la descrita en esta sección, la segunda es un derivado del mantenimiento programado que se describirá en el punto 4.1.2 y la tercera es un tipo de mantención poco habitual, ya que espera la oportunidad de que la máquina se encuentre sin uso para realizarse el mantenimiento.

4.1.2 Mantenimiento predictivo

Se define al mantenimiento predictivo o según condición como el conjunto de tareas destinadas a determinar la condición operativa de los equipos, midiendo variables físicas o químicas, con el objetivo de predecir comportamientos anormales y corregirlos, usando para tal fin instrumentos y sistemas de diagnóstico (Klimasauskas, 2007).

Este tipo de mantenimiento busca la detección temprana para verificar y detectar cambios de condiciones en los equipos, lo que permite intervenciones oportunas y precisas, a diferencia del mantenimiento preventivo programado que se mantiene independiente de las condiciones del equipo.

4.1.3 Mantenimiento correctivo, reactivo o por falla

El mantenimiento de equipos más intuitivo es el por falla, debido a que corrige la avería una vez que ésta se produce. Su definición establece que es el conjunto de tareas destinada a colocar el activo averiado en condiciones operativas luego que haya ocurrido una rotura, ocasionando paradas no programadas de la producción (Klimasauskas, 2007).

Lo que prioriza este tipo de mantención es poder utilizar el equipo nuevamente lo antes posibles, sin profundizar en lo que ocasionó la falla, lo que se traduce posiblemente en una serie de fallas repetitivas.

4.1.4 Mantención y cadena de suministros

Este proyecto está inserto en el contexto del mejoramiento continuo de la gestión de la cadena de suministros de una empresa, donde las estrategias de mantención y de la gestión de inventario influyen directamente en ella.

La gestión de la cadena de suministros es un conjunto de enfoques usados eficientemente en la integración de suministros, productos, bodegas y tiendas, de modo que los bienes son producidos y distribuidos en las cantidades correctas, en los lugares correctos y en el instante correcto, minimizando el sistema de costos mientras se satisface el nivel de servicio requerido (Simchi-Levi; Kaminsky; Simchi-Levi, 2004).

A lo largo de este proyecto se han señalado que los factores fundamentales para elegir la estrategia de mantenimiento son los costos de mantención y la criticidad del equipo, pero se ha llegado a la conclusión que la disponibilidad de los repuestos también influye al momento de decidir que estrategia aplicar, ya que si un equipo es crítico automáticamente sus piezas y repuestos son críticos, por ende el manejo de ellos en cuanto a mantenimiento y gestión de inventarios son parte de la estrategia final.

La estrategia de mantenimiento tiene efectos directo en la cadena de suministros definiendo niveles de inventarios, estabilidad o variabilidad de demanda de repuestos y materiales para la reparación, y otros flujos físicos necesarios para llevar a cabo la mantención, por lo tanto es necesario que las empresas vinculen las políticas de mantención y las políticas de inventarios, debido a que una buena gestión de la cadena de suministros logra garantizar una óptima utilización de equipos críticos, ayudando a mantener un nivel de servicio esperado.

El escenario ideal sería que cada equipo, tanto crítico como no crítico, sea mantenido de la manera óptima según su criticidad y costo de mantenimiento, de la mano con la disponibilidad que este requiera, y una vez definido todo aquello, se debería considerar el comportamiento que tienen los repuestos o consumibles necesarios en cada operación de

mantención, buscando relaciones de proveedores o considerando el cambiar proveedor si ello minimiza costos. Lo importante es enfatizar que el buen manejo de la cadena de suministros de los inventarios para la mantención también puede ser una fuente de ventaja competitiva si se realizan los estudios correspondientes y si cada equipo es catalogado de manera correcta dependiendo de la criticidad que indique en el proceso productivo.

4.1.5 Indicadores de mantenimiento

Los indicadores de mantención son datos que entregan periódicamente información respecto al comportamiento de los equipos con respecto a la ocurrencia de fallas o a su funcionamiento en general. Estos indicadores son útiles en las tomas de decisión dentro de la empresa, por lo tanto la información entregada debe estar bien seleccionada para que los indicadores logren adaptarse a las necesidades de la organización.

Más importante que el valor de un indicador, es conocer la evolución que ha tenido este, para así concluir la tendencia de su comportamiento. Además es vital fijar un objetivo para cada indicador, cuál es su ideal y sus límites de control, valores que son establecidos por cada empresa (García, 2013).

Dentro de la literatura existen muchos indicadores relacionados al mantenimiento y en esta sección se describirán alguno de estos que servirán para evaluar la estrategia de mantención de un equipo crítico de Minera Esperanza.

A continuación, en la tabla 4.4, se presentan indicadores de disponibilidad, confiabilidad, utilización y costo de mantención.

Tabla 4.4-Indicadores de mantenimiento. Fuente: García (2013)

Indicadores	
Disponibilidad total	$\frac{\text{tiempo total} - \text{tiempo de detención}}{\text{horas totales}}$
MTBF: tiempo medio entre falla	$\frac{\text{tiempo total}}{\text{número de fallas}}$
MTTR: tiempo medio de reparación	$\frac{\text{tiempo total de detención}}{\text{número de fallas}}$
Confiabilidad	$\frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}$
Utilización	$\frac{\text{tiempo total} - \text{tiempo de espera por repuesto}}{\text{tiempo total}}$
Costo indirecto de mantención	Tasa producción * tiempo de detención
Costo directo de mantención	Costo de materiales + mano de obra + otros

Cabe destacar que para el desarrollo del proyecto se consideran los siguientes indicadores: disponibilidad, utilización y costos, directo e indirecto, de mantención. La

diferencia principal que recae en la disponibilidad y la utilización es que la denominación de equipo disponible implica que se está produciendo, en cambio si se dice que el equipo está siendo utilizado se puede considerar mientras se está produciendo y cuando está en mantenimiento, pero no incluye el tiempo ocioso que espera por la llegada del repuesto que se necesita para el reemplazo.

4.2 Inventario

Las razones por las cuales es necesario inventariar son bastantes, pero las principales radican en: la predictibilidad de material que se necesitará en ciertos periodos, las fluctuaciones de las demandas, la falta de confianza en el suministro, la escasez de material y la disminución de costos de orden por compras masivas. (Muller, 2003)

Los principales tipos de inventario son: de materias primas, productos terminados, productos en proceso, consumibles y repuestos, estos dos últimos son a los que se le dará más importancia en este proyecto.

Al hablar de inventarios se deben considerar ciertos factores claves respecto a los sistemas de localización como los son: el uso del espacio, ubicación de equipos, orden de trabajos o tareas, accesibilidad a bodegas y equipos, disponibilidad de materiales, flexibilidad, y costos de administración, donde se encuentran costo de órdenes, de transporte, entre otros.

Los inventarios debiesen tener una directa relación con la demanda de los productos o repuestos, esto quiere decir que stock dependerá del tamaño de la demanda y de la frecuencia de consumo del repuesto.

Un modelo de inventario está compuesto por dos parámetros fundamentales: la condición bajo la cual una nueva orden es realizada y un punto de referencia para la cantidad a ordenar. Bajo estas condiciones se tienen distintas políticas de inventario:

- Revisión continua (Q,r): consiste en un monitoreo constante que indique cuando se pasa el punto de reorden r para ordenar Q unidades.
- Revisión continua (S,r): es una modificación del sistema anterior, ya que se monitorea el punto de reorden r, pero se ordena la cantidad faltante para llegar a un punto S.
- Revisión periódica (S,R): consiste en ordenar a cada R unidades de tiempo la cantidad faltante para alcanzar el nivel S de material o repuestos.
- Revisión periódica (s,S,R): consiste en una revisión por intervalos de tiempo R, donde se pregunta si el nivel de inventario ha pasado el punto de re orden s, y de ser así, se solicita la cantidad faltante para alcanzar el nivel S.

La revisión periódica es generalmente preferida en el manejo de repuestos por la conveniencia de los días regulares de orden para el distribuidor y proveedor, ya que ambos pueden actuar más eficientemente y así disminuyen la probabilidad de déficit.

4.3 Inventario de repuestos

El inventario de repuestos asisten a las funciones de mantención de acuerdo a las condiciones operativas del equipo y de los mantenimientos programados que éste tiene, por lo tanto el nivel de stock necesario de cada tipo de repuestos dependerán del comportamiento y uso del equipo.

La razón por la cual es necesario inventariar repuestos, especialmente los que son parte de equipos críticos, es debido a que los procesos en los cuales participan no pueden estar fuera de funcionamiento mucho tiempo, ya que las pérdidas de producción o las consecuencias de un posible fallo son considerables y deben ser evitadas, por lo tanto es necesario tener un stock de repuestos; especialmente para los repuestos que son difíciles de obtener o que su escasez genera grandes pérdidas.

Los costos asociados a los inventarios de repuestos son los siguientes: costo de compra, costo de orden o pedido, y costo por la escasez del repuesto, los cuales representan el costo de capital por repuestos (Webin, 2011) y son los que se deben minimizar al máximo, principalmente el costo por escasez que se debe evitar con una predicción de la demanda de los repuestos, que se puede obtener con un sistema de mantenimiento predictivo.

El comportamiento de los inventarios de repuestos es diferente a los otros tipos de inventarios, materias primas, productos intermedios y productos terminados, por las siguientes razones (Kennedy 2001):

- Políticas de mantenimiento intervienen, ya que la decisión de reparar o reemplazar tiene profunda implicancia en los niveles de inventario.
- La información de confiabilidad se utiliza para predecir el tiempo de falla, específicamente en caso de equipos nuevos, por ende para predecir la demanda de repuestos.
- Partes falladas pueden ser dependientes de más de un repuesto, por lo cual se debe mantener un stock ordenado de todos los tipos de repuestos.
- El costo asociado con el riesgo de falla es difícil de calcular, pero es necesario evitarlo.
- La especialización de los repuestos genera un problema en cuanto a la obsolescencia, ya que las partes obsoletas generan un costo y debido a su criticidad deben reemplazarse y mantenerse en stock, generando un costo mayor.

Respecto al tema que abarca esta memoria, el plan de mantenimiento que se escoja tiene directa relación con el comportamiento que tendrá la demanda de repuestos y sus llegadas, y por ende tienen un impacto en las políticas de inventario. La demanda derivada de mantenimiento preventivo es programada y estocástica con respecto al tamaño de la demanda, depende del plan de mantención, pero es determinística en cuanto a la llegada de la demanda o pedido, ya que al ser programado se conoce su arribo. En cambio la demanda derivada del mantenimiento correctivo, una vez ocurrida la falla, es estocástica de acuerdo al tiempo de llegada, dependerá del *lead time* del proveedor y los atrasos en reconocer la falla, pero es determinística en cuanto a la cantidad a pedir, debido a que solo se solicita lo necesario para arreglar la falla (Webin, 2011)

Los repuestos tienen una clasificación especial dependiendo para lo que son utilizados, ellos pueden ser: consumibles, repuestos genéricos, repuestos específicos y repuestos estratégicos, los cuales se describen a continuación (Cavalieri, 2008):

- Consumible y materiales auxiliares: son materiales de consumo estable y continuo, como los lubricantes. Implican las mismas políticas de inventario que los artículos de producción. Por su alta tasa de consumo, disponibilidad, su carácter de intercambiables, y su bajo costo se puede aplicar una política tradicional de re orden a través de contratos con proveedores o políticas de consignación de existencias.
- Repuestos genéricos: son repuestos que pueden ser montados en cualquier tipo de equipo, por ejemplo tornillos y tuercas, y sus inventarios se comportan de la misma manera que los consumibles.
- Repuestos específicos: son repuestos que no se pueden reemplazar y que necesitan un proveedor específico, su desgaste es previsible y se puede utilizar mantenimiento preventivo para alargar su vida útil. Se puede planificar plazos y volúmenes de piezas para el mantenimiento, pero también se deben tener stock en caso de paradas inesperadas.
- Repuestos estratégicos: son repuestos de demandas esporádicas, cuya salida es imprevisible, con costos relevantes y alto tiempo de entrega. Se debe evaluar si tenerlos o no en stock por su alto costo y baja tasa de consumo.

5 Enfoque y diseño del simulador

La estructura del problema actual se enfrentó de manera que el simulador, herramienta elegida para evaluar los distintos escenarios, represente de la manera más similar al funcionamiento global del filtro y como se enfrentan las mantenciones a dichas fallas.

Para esto se debió definir cuáles eran los enfoques del modelo, tanto en mantenimiento como en gestión de inventario, ya que existen infinitas opciones de ver el sistema y de políticas a aplicar, por lo cual debieron asumirse solo algunas y asumir ciertos supuestos para desarrollar el proyecto.

5.1 Enfoque del problema

Al momento de desarrollar una herramienta como la planteada en este proyecto es necesario definir los límites del sistema observado, debido a que al desear diseñar un modelo se debe comenzar con una estructura de base para luego ir añadiendo más piezas o elementos al sistema.

Para este proyecto se eligió el proceso de filtrado como la etapa más importante realizada en el muelle de la Minera Esperanza, que a su vez cuenta con dos filtros Larox que hacen la función del filtrado del concentrado de cobre proveniente del yacimiento minero.

Es por esta razón que se modela solo un filtro (filtro n° 1) observándolo como un generador de fallas de sus piezas críticas al estilo caja negra. Se denomina caja negra a aquel elemento que es estudiado desde el punto de vista de las entradas que recibe y las salidas o respuestas que produce, sin tener en cuenta su funcionamiento interno. En otras palabras, de una caja negra interesará su forma de interactuar con el medio que le rodea (en ocasiones, otros elementos que también podrían ser cajas negras) entendiéndose qué es lo que hace, pero sin dar importancia a cómo lo hace.

La caja negra consiste en un generador de fallas críticas del filtro, lo que implica que una vez que esto sucede se detiene el sistema en espera de una mantención correctiva para dicha parte del equipo, y luego se retoma su funcionamiento normal. Es importante destacar que no se está evaluando el envejecimiento global del equipo, para eso se debería considerar otras piezas y subsistemas que en este trabajo no son analizadas, es por esto que el enfoque que se da en este proyecto es del envejecimiento y posterior reemplazo solamente de las piezas críticas del filtro.

Por ende se puede decir que el problema que se aborda en este proyecto se enfoca en un modo de fallo crítico detectado y su repuesto asociado, lo que implica que si el equipo es crítico entonces existen fallas críticas en él, donde cada una se relaciona con alguna de sus piezas o subsistema. De este modo se ataca el problema desde el punto de vista de los

repuestos, que envejecen y fallan generando la detención del equipo, y una vez que éstas son reparadas el equipo vuelve a retomar su funcionamiento normal.

5.2 Modelo conceptual

Para describir la operación del sistema, se construye un simulador discreto orientado a eventos, respecto del cual se detalla aquí su modelo conceptual.

El simulador es el modelo de un sistema compuesto por un equipo importante que falla con cierta frecuencia, y el hacerlo conlleva detener su funcionamiento hasta que sea reparado. Para monitorear su disponibilidad, su utilización y los costos asociados a su mantención, el simulador representa, además, tanto la gestión de inventario de 3 de los repuestos críticos del equipo como las mantenciones preventivas programadas en éste.

Los principales eventos que se caracterizan en el modelo de simulación son los asociados a la falla del equipo (i.e., el filtro Larox), el inicio de una mantención preventiva, y la revisión periódica del inventario, entre otros.

Las medidas de desempeño a las que se alude en la tabla 4.4 requieren de la definición de las siguientes variables de estado: estado del filtro (en funcionamiento, detenido en reparación, detenido en espera de repuesto) y niveles de inventario (físico y en tránsito) para cada tipo de repuesto. El objetivo de minimización de costos se mide con acumuladores estadísticos que se actualizan cada vez que se adquiere un repuesto, se hace mantención al equipo y se guarda inventario.

Las variables aleatorias de entrada del modelo son el tiempo entre fallas de cada uno de los tipos de falla considerados. Éstos están condicionados por la edad del repuesto, que a su vez se deriva de una función característica que representa la tasa de falla en función del tiempo (ver figura 5.1). Las funciones de tasas, generadas a partir de datos históricos provistos por Minera Esperanza, se muestran en la tabla 5.2. Otras variables de entrada habituales para sistemas con fallas incluyen el tiempo de reparación, el lead time para repuestos, la vida útil del repuesto y tiempo de reemplazo. En este simulador dichas variables son consideradas determinísticas, pero se definen a partir de conocimiento de la operación histórica del sistema representado.

El modelo lógico que permite transformar las variables de entrada para cuantificar las medidas de desempeño deseadas en la salida se describe a continuación a través de tres procesos paralelos.

Las entidades que representan las fallas del equipo fluyen por el primer, y principal, proceso. La generación de una falla (que implica la creación de una entidad para recorrer este proceso) conlleva detener el equipo (cambio de estado), reemplazar el repuesto si es que (o cuando) éste está disponible (actualizar de nivel de inventario y realizar actividad de

reparación), esperar por el repuesto si es que no está, y programar la siguiente falla del mismo tipo. Se asume que no pueden ocurrir dos fallas simultáneamente, en particular porque en la industria minera las fallas se gatillan cuando el equipo está en funcionamiento, no cuando éste está detenido. Ello implica que una falla reprograma todas las demás fallas que pudieran estar agendadas para ocurrir en el futuro (para una descripción más detallada de cómo opera un simulador discreto orientado a eventos, revisar Law, 2014, capítulo 1).

El segundo flujo corresponde a la mantención preventiva que es representada por una entidad que se activa a cada 6 meses deteniendo el funcionamiento del filtro y de eso modo realizar las mantenciones correspondientes. Durante el proceso se verifica si es necesario reemplazar un repuesto (actualizar nivel de inventario y reprogramar nueva falla) o si solo requiere las mantenciones. Finalmente se reprograman las fallas que no fueron reemplazadas para considerar el tiempo que el equipo estuvo detenido.

Finalmente se tiene el proceso del inventario donde mantiene un conjunto de entidades que representan los repuestos que se disponen para las mantenciones. Periódicamente (puede ser por turnos, cada día o a cada una semana) se revisa el nivel de inventario, y en caso de ser estar por debajo de la cantidad necesaria se realiza una compra (se acumulan los costos y se toma el tiempo necesario del *lead time* para contabilizar los repuestos en stock), si no se finaliza el proceso.

El bosquejo del modelo se muestra en la figura 5.1. Para revisión más detallada del simulador dirigirse al anexo digital.

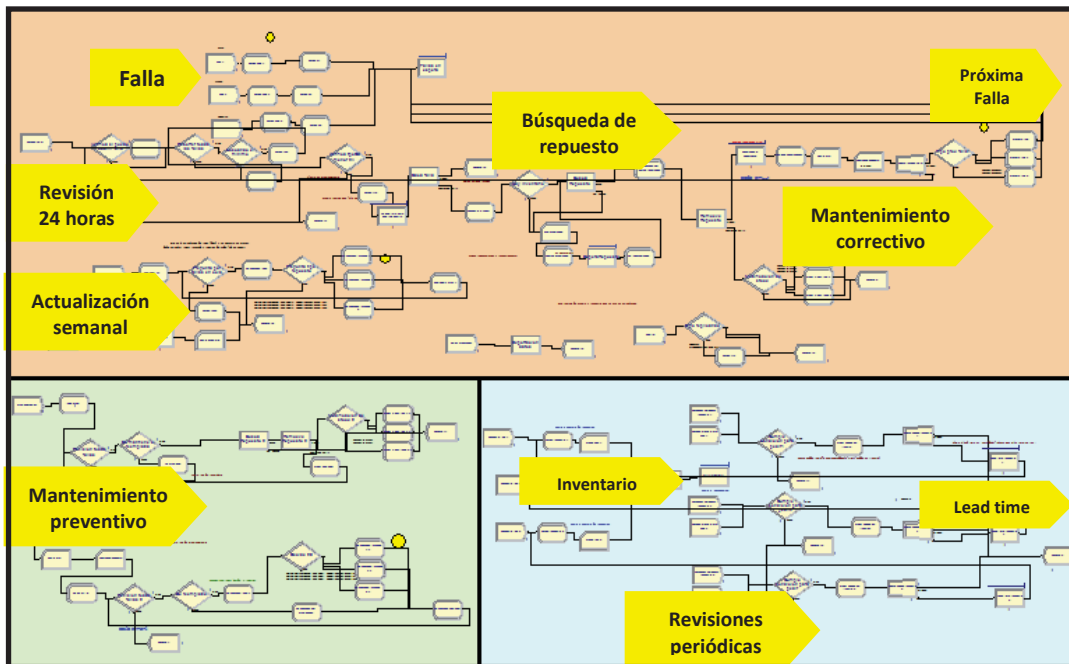


Figura 5.1- Bosquejo del simulador.

5.3 Enfoque respecto a las políticas de inventario

Dentro del enfoque de caja negra propuesto para la generación de fallas existe una interacción entre la falla y el inventario de repuestos que es la relación clave que se desea evaluar con este proyecto, donde se entrecruzan las políticas de inventario con las de mantenimiento en un mismo sistema.

Una vez que sucede la falla, ésta queda en espera de que se produzca la mantención correctiva y para que esto pase se necesita un repuesto que está almacenado en una bodega que lleva el stock de cada repuesto, por lo que cuando se inicia el reemplazo de la pieza, se disminuye el stock actual del repuesto.

Lo clave en la interacción falla-repuesto es asegurar que los mantenimientos, tanto correctivos como preventivos, se puedan realizar con éxito en el simulador, para esto se agregan dos supuestos al modelo que implican que: el inventario está completo desde el primer instante y que días antes de que se inicie un mantenimiento preventivo se genere automáticamente una revisión del stock actual de cada repuesto para verificar si satisface las necesidades de dicha mantención, y de no ser así se realiza un pedido bajo las mismas condiciones de una revisión periódica. La revisión extraordinaria para la mantención preventiva se hace de forma separada la cantidad de días antes que dura el *lead time* necesario para cada repuesto, asegurando así que el sistema no quede detenido en plena mantención.

Finalmente se escogieron tres políticas de inventario que integraran los escenarios posibles: la política de revisión continua (Q,r) y las políticas de revisión periódica (s,S,R) y (S,R), donde cada una será sensibilizada en sus parámetros Q-S y puntos de re orden respectivos, aumentándolos y disminuyéndolos en un 20%.

5.4 Enfoque respecto a las políticas de mantenimiento

El rol que se da al mantenimiento puede presentar confusiones en cuanto a las acciones realizadas en el sistema, por lo cual es necesario diferenciar a que se le llamará mantenimiento correctivo o preventivo.

Mantenimiento correctivo hace referencia a la instancia de reemplazo de la pieza una vez sucedida la falla, por lo cual está incorporado en el carril de la generación de fallas, en cambio el mantenimiento preventivo se refiere a una interrupción en el funcionamiento normal de la generación de fallas, donde se detiene el equipo y se realiza una mantención de 8 horas a todo el proceso, evaluando si es necesario o no reemplazar cada repuesto en acción.

Por lo tanto, cuando se indica que un plan cuenta con una política de mantención correctiva quiere decir que no existe la detención del equipo por la inspección preventiva, si no que solo se mantiene una vez sucedida la falla. Y cuando se señale que un plan cuenta con

una política de mantención preventiva también se realizará el mantenimiento correctivo una vez que suceda una falla, pero además se le incorpora la interrupción en el sistema para la inspección del estado y posibles reemplazos de las piezas.

Cabe señalar que en el actual proyecto no se considera el mantenimiento predictivo como opción a evaluar, ya que no se cuenta con datos específicos necesarios para plantear como se realizan las mantenciones de este tipo en la Minera Esperanza, por ende se decidió ignorar esta opción como política de mantenimiento, pero esto no significa que más adelante no se pueda agregar al simulador.

La política de mantención preventiva que se aplica en este proyecto es una mantención semestral que consiste en detener el funcionamiento normal del proceso para evaluar pieza por pieza de equipo y verificar su estado. En caso de que la pieza esté en buen estado y la vida útil restante al instante de la inspección es suficiente para llegar en buenas condiciones para la próxima revisión (6 meses más) se considera que la pieza se mantiene, o sea se le realizan las acciones necesarias para que siga el comportamiento normal dependiente del momento de la vida en que se encuentra, esto significa que no hay un aumento en la vida útil del repuesto, sino que su degradación continua comportándose como la curva de la tasa de falla lo indica. En cambio si al momento de detener el equipo preventivamente la pieza ya está fallada y está en espera de ser mantenida o el tiempo de vida que le queda con respecto a su vida útil es menor al tiempo de la próxima mantención, por ende que puede fallar antes de los próximos 6 meses, se considera que la pieza debe reemplazarse con un repuesto nuevo.

Por último cuando se realiza una mantención correctiva, aplicándose en cualquiera de los dos casos de políticas de mantenimiento, se considera que la pieza se reemplaza por un nuevo repuesto. En este caso no existirá la opción de reparación de la pieza.

5.5 Elección de fallas

Los criterios de elección de las fallas fueron tres. El primero corresponde a elegir fallas críticas que pertenezcan al filtro, y no a partes de apoyo al funcionamiento del filtro como lo son la bomba hidráulica y la correa transportadora, de este modo el universo de fallas posible pasó de 17 fallas en total a sólo 8 que corresponden a fallas críticas del filtro.

Luego se decidió que las fallas a simular debían variar en su rango de precio de compra, para que de este modo existiese un impacto considerable en el tema de costos. Así se definieron 3 rangos: bajo (menor a 1000 USD), medio (entre 1000 USD y 4000 USD) y alto (sobre 4000 USD), eligiendo finalmente a las fallas de Grampa, falla de Placa y Falla de Tela, en orden de menor a mayor costo, como las fallas en la simulación.

5.6 Comportamiento general del simulador

El simulador planteado en este proyecto se puede adaptar a las distintas políticas de inventario y mantenimiento agregándole o quitándole módulos, generando cuatro tipos de estrategias o planes principales.

Se llamará prototipo a los modelos básicos del entrecruce de cada política de inventario con las respectivas políticas de mantenimiento, por lo tanto se tendrán 4 prototipos básicos que se diferenciarán al momento de ser programados con sus respectivos datos. Los prototipos son: el prototipo con mantención preventiva y revisión periódica, el prototipo con mantención preventiva y revisión continua, el prototipo con mantención correctiva y revisión periódica y el prototipo con mantención correctiva y revisión continua.

Para este punto se explicará el prototipo con política de inventario con revisión periódica y con una política de mantenimiento preventivo, que además es la base para los otros tres prototipos por ser el más completo.

El prototipo planteado se divide en tres secciones principalmente. La primera corresponde a la generación de fallas y a todo el proceso de búsqueda de repuestos en el inventario y el reemplazo del correspondiente. Además se agrega la actualización semanal que se realiza a los atributos de las fallas comentadas en el punto 5.7.

La segunda sección influyente en la simulación es la mantención preventiva, proceso que interviene en el funcionamiento del generador de fallas, deteniéndolo y aplazando los instantes programados de ocurrencia de fallas por 8 horas, tiempo que representa los trabajos correspondientes de mantenimiento y reemplazo de repuestos.

Y por último está la sección de los inventarios, donde se representa la bodega con los repuestos necesarios, los movimientos de compra de repuestos y las revisiones periódicas en caso de que la política de inventario así lo requiera.

La interacción de estas tres secciones sucede de la siguiente manera: se agendan las fallas de manera que esperan en una cola, ordenadas de menor a mayor tiempo, al instante para fallar, sólo se crea una entidad de cada tipo de repuesto (1, 2 y 3) y se les asignan los atributos específicos de cada falla (se explican en el punto 5.8), diferenciando sus valores en cada caso. Una vez que llega el instante de ocurrencia de la primera falla se gatilla el proceso de fallo y se busca en la cola que representa el inventario si es que hay repuestos o no del tipo requerido, en caso de ser así se saca y comienza la reparación, en caso contrario la falla esperará en un cola el momento en que el inventario reciba el repuesto que necesita y se retoma la reparación. Paralelamente se va realizando la actualización semanal de los parámetros de las fallas y las revisiones periódicas del inventario de cada repuesto, que puede ser por turno, por día o semanalmente. Por último, a cada 6 meses se genera una mantención preventiva que

interrumpe el funcionamiento normal de la generación de fallas para realizar las inspecciones respectivas.

Para robustecer el análisis se incluyó para algunos casos básicos (sin sensibilización) el rejuvenecimiento de sus piezas al hacer la mantención preventiva. Esta acción es una lógica que en un comienzo se obvió y se asumió que estaba incluida en la mantención preventiva, pero luego se incorporó como opción para analizar que sucede con la disponibilidad si sus piezas “rejuvenecen”.

El rejuvenecimiento consiste en disminuir la edad de la pieza en un 50% en caso de que ésta no se reemplace y solo se mantenga, disminución que busca tener una repercusión en la disponibilidad y en la programación de fallas.

5.7 Fundamento para la generación de fallas

En los estudios revisados sobre la temática de las fallas de los equipos y de la confiabilidad se concluye que para desarrollar el simulador se debe plantear un modelo matemático que permita estimar el momento en que la pieza falla y es desde allí donde nace el fundamento que se explica en este punto.

La propuesta realizada en este proyecto parte de la base que es la pieza la que envejece y por ende envejece el equipo completo a consecuencia de sus piezas, por lo tanto, se representará el envejecimiento a través del comportamiento de las piezas.

Dentro de los datos que se extrajeron gracias al estudio paralelo que se hizo desde el muelle de la Minera Esperanza, se encontraron valores útiles para el simulador, pero no los suficientemente detallados como se requerían para obtener resultados representativos. Esto se ve reflejado en los datos utilizado en este proyecto, que se generaron a partir del comportamiento del equipo respecto a cada una de las fallas, y no al comportamiento propiamente tal del repuesto, independiente del funcionamiento del equipo, que es precisamente el enfoque que se requería en el proyecto. Por ende se debieron adaptar las curvas que representaban el comportamiento del equipo cuando fallaba un repuesto a las curvas de la vida del repuesto respectivo, las que finalmente se utilizaron en el simulador y los planes.

La base del simulador recae en la generación de fallas que dependen del envejecimiento de una pieza, esto quiere decir, en el instante de la vida del repuesto. A su vez existe la tasa de falla del repuesto que entrega la relación entre el número de fallas por unidad de tiempo, que depende directamente con el instante de vida del repuesto. La definición tasa de falla tiene relación con el comportamiento del equipo: cuantas fallas puede generar en una unidad de tiempo, pero debido a la imprecisión de los datos orientados al equipo cuando ocurre cada falla, y no cuando el repuesto asociado falla, como es el enfoque que se aplica, se

tuvo que adaptar el concepto a los repuestos. Por último, la tasa de falla tiene una distribución de probabilidad exponencial una vez que ésta se encuentra constante, en el contexto de la curva de la bañera, esta distribución representa la zona central o etapa de vida útil del dispositivo, durante la cual la tasa de fallo permanece aproximadamente constante (Serrat,2006) y como la tasa de falla se mantendrá constante por una semana antes que se actualice, durante ese periodo el próximo instante en que el repuesto fallará tiene una distribución exponencial sujeto a cada valor de la tasa de falla.

En la siguiente imagen se ilustra la relación entre cada elemento explicado con relación a la generación de fallas.

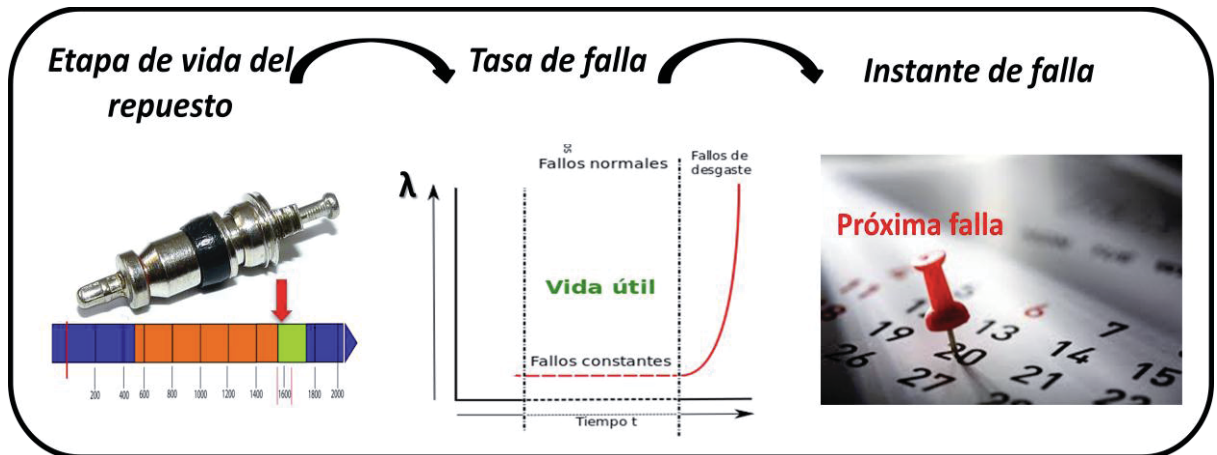


Figura 5.2- Esquema de la generación de fallas

Cada uno de estos elementos es representado en el simulador como un atributo de la entidad falla, que es diferente entre los tres tipos de fallas.

La etapa de vida o edad del repuesto (atributo "tpoE" en el simulador) representa como la pieza va envejeciendo a medida que pasa el tiempo y el equipo se encuentra activo (no detenido por reparaciones inesperadas ni mantenencias preventivas). Se representa como un atributo que avanza continuamente, es medido en días y que no depende de otros atributos. Todas las fallas inician la simulación con este valor en cero, representando que el repuesto está nuevo, y lo mismo sucede una vez que es reemplazado algún repuesto.

La tasa de falla (atributo "tasaFalla" en el simulador) se calcula a través de una fórmula aplicada a la edad del repuesto, por lo tanto, la tasa de falla está medida en cantidad de fallas por días.

Finalmente el instante de falla (atributo "tpoProximoAFallar" en el simulador) indica el segundo mismo cuando la pieza fallará en horas. Un vez calculado este valor se le debe sumar el tiempo actual en horas que tiene el simulador, esto porque la fórmula entregará el

número de horas más en que sucederá la falla, pero si se le suma la variable del sistema “TNOW” que representa el tiempo actual del simulador, el atributo indicará el instante preciso en que sucederá la falla.

Para representar que la pieza realmente envejece se realizan una serie de actualizaciones que varían o restituyen dichos atributos. Dependiendo de qué actualización sea se varía uno o todos los valores, la idea es que el simulador represente realmente el comportamiento de una falla, que a medida que pasa el tiempo la tasa de falla aumenta y el tiempo próximo a fallar es más cercano.

En la siguiente tabla del anexo 7 se explicarán las actualizaciones del simulador.

Finalmente es importante explicar cómo se va de un valor a otro en la estructura planteada. Como se menciona anteriormente en este estudio no se pudieron obtener datos precisos con respecto al comportamiento de las piezas del filtro, si no del filtro en particular con relación a cada pieza, por lo que las fórmulas utilizadas no llevarán a representar el funcionamiento real del filtro, pero si un acercamiento a éste.

El primer paso de este enfoque es calcular la tasa de falla de acuerdo al momento de la vida del repuesto y para esto se elaboró una ecuación que proveniente de los datos entregados en el estudio del filtro de la Minera Esperanza.

El procedimiento consiste en contar el número de fallas mensuales por cada pieza a evaluar y luego calcular la función de densidad de la falla ($f(t)$, probabilidad de que el repuesto falle en el tiempo), para poder obtener así la función de densidad acumulada ($F(t)$) que representa la probabilidad de que falle en el instante t .

Una vez obtenida la función de densidad acumulada se puede obtener la función de la confiabilidad $R(t)$ que es la probabilidad de éxito, o sea que sobrevivan sin falla, transcurrido el mismo tiempo t , y se calcula como $1-F(t)$.

Finalmente, con todo el trabajo descrito anteriormente se pueden obtener los datos para calcular la curva que representa la tasa de falla $\lambda(t)$, calculada como el cociente entre $f(t)$ y $R(t-1)$. De este modo se obtienen las tres fórmulas se muestran en la siguiente tabla y que fueron incorporadas en la simulación.

Tabla 5.2- Funciones para calcular las tasas de fallas no estacionarias.

Falla	$\lambda(t)$
Falla Tela	$\lambda(t) = 0,0278t^2 - 0,1544t + 0,3021$
Falla Placa	$\lambda(t) = 0,024t^2 - 0,1203t + 0,3058$
Falla Grampa	$\lambda(t) = 0,0163t^2 - 0,0778t + 0,2843$

Ya realizado el primer paso, obtener a través de fórmula la tasa de fallos $\lambda(t)$, se procede a calcular el instante donde se gatillará la falla. Como se ha dicho durante el proyecto el tiempo entre fallas tiene un comportamiento exponencial, por ende para poder saber en qué instante ocurrirá la falla se debe despejar la función de distribución acumulada de dicha distribución, que indica la probabilidad de que la falla ocurra en el instante t :

$$F(t)=1-e^{-\lambda t}, t \geq 0$$

Como $F(t)$ representa un valor en 0 y 1, se reemplazará por un valor uniforme en dicha función y se despejará t , el instante de ocurrencia de la falla. Por lo tanto, la formula queda de la siguiente manera:

$$t = -\frac{1}{\lambda} \ln(u)$$

Ésta fórmula es la utilizada en el simulador para generar el instante para gatillar una falla, siendo λ el atributo obtenido con la formula $\lambda(t)$ de cada falla, que se mantiene constante durante una semana, por lo cual, durante dicho periodo el tiempo entre fallos se comporta de manera exponencial. (Dichas formular se puede revisar en el enlace denominado “Distribuciones habituales de fiabilidad” de Juan, A; Serrat, C, 2006)

5.8 Funcionamiento del simulador

El simulador fue elaborado en el software de simulación Arena que permite simular entidades, por lo cual se generaron dos tipos de entidades distintas, fallas y repuestos, que se relacionan uno a uno, esto quiere decir que si ocurre una falla se necesita un repuesto específico que es asignado de acuerdo a la probabilidad de la falla, y los repuestos se generan por pedidos independientes que se hacen a los proveedores. En el actual simulador se trabajó con tres tipos de fallas con distintas probabilidades de ocurrencia y tres tipos de repuestos, debido a la dificultad que genera incorporar el total de fallas distintas identificadas en un prototipo, pero se espera que en un futuro el simulador se pueda adaptar a agregar todos los tipos de fallas necesarias.

El proceso general del simulador se explicará en orden según las banderas amarillas de la figura 5.1 que muestra el bosquejo del simulador, resaltando las partes más importantes de este.

Al iniciar el simulador se crean tres entidades de fallas, cada una de un tipo diferente, y se le instancias todos sus atributos correspondientes, incluido el agendamiento de los próximos momentos a fallar. Estas entidades esperan en un módulo *Hold*, llamado “Fallas en espera”, al instante en que serán gatilladas y se genera la falla como tal. Este proceso es el que da pie a las mantenciones correctivas, ya que las fallas programadas en el simulador representan las fallas

inesperadas del equipo y por ende las mantenciones correctivas necesarias para retomar el funcionamiento de este.

Paralelamente existe un flujo de entidades denominado como “Revisión 24 horas”. La función de dicho módulo es crear una entidad que revise diariamente si en las próximas 24 horas sucederá una falla. En caso de que así sea se procede a gatillar la falla, sacando la primera entidad del módulo “Fallas en espera” y proceder a la búsqueda de repuesto y posterior reparación, proceso correspondiente al mantenimiento correctivo de la falla.

Cuando la falla ocurre comienza la búsqueda del repuesto en la bodega, representada con un módulo *Hold* en la sección del inventario. Si hay el repuesto específico comienza el mantenimiento correctivo, pero en el caso de que no queden repuestos del tipo la falla espera en el módulo *Hold* “Espera por repuesto” hasta que reciba la señal de que llegó un nuevo repuesto.

El mantenimiento correctivo corresponde a la acción de reemplazar el repuesto que ya fue sacado de la bodega y que toma un tiempo fijo en reemplazar y recuperar el funcionamiento del filtro. Una vez terminada la reparación se agenda nuevamente una próxima falla del tipo que había fallado, y retorna a la cola “Fallas en espera”.

Constantemente, cada 7 días, se realiza la actualización semanal que fue explicada en la sección anterior, que actualiza los valores del parámetro “*tpoProximoAFallar*”. Además en este mismo flujo se realiza la cuantificación del costo de inventario diario, sumatoria del costo diario de inventario de cada repuesto por el stock al final del día.

El mantenimiento preventivo se encuentra en un flujo de módulos separado de la generación de fallas, debido a que se comporta de manera independiente, y una vez que comienza la mantención detiene el funcionamiento del equipo. La mantención comienza preguntando que piezas necesitan mantención (reemplazo) y cuáles no, y retira el stock necesario para iniciar el proceso. Luego se toma el tiempo indicado para la mantención, en este caso es un valor fijo: 8 horas, pero también puede ser la suma de tiempos estimados por repuestos a reemplazar. Finalmente actualiza los atributos “*tpoE*”, “*tasaFalla*” y “*tpoProximoAFallar*” de las piezas que fueron reemplazadas retornándolas a un estado como nuevo y las piezas que solo recibieron mantención continúan su funcionamiento normal desplazando su instante próximo a fallar en las 8 horas que demoró la mantención.

Cabe destacar que la diferencia en el mantenimiento correctivo y el preventivo es que en el primer caso se reemplaza si o si la pieza, actualizando los atributos de la entidad falla en sus valores iniciales, en cambio en el caso preventivo se pregunta si la vida útil restante del repuesto alcanza a durar hasta la próxima mantención, en el caso de que no alcance se reemplaza la pieza como si fuese una mantención correctiva, si no se asume que se hacen las acciones de mantención necesarias y estipuladas por el proveedor y se continua la

programación hecha. Pero con el objetivo de robustecer el análisis se modificó dichas acciones para evaluar que sucedía en ciertos casos donde la mantención preventiva, cuando no se necesita reemplazo, consiste en rejuvenecer la edad de la pieza (el atributo “tpoE”) y así actualizar el instante programado para fallar. Dicho cambio se efectuó y ejecutó en una instancia de cada prototipo de mantenimiento preventivo y las conclusiones se pueden observar en el punto 6.13.

El inventario es otro flujo importante en el simulador, ya que representa la bodega de repuestos y sus respectivas variables que llevan el stock de repuestos. Este está compuesto por módulos que crean inicialmente el valor de “S” o “Q” entidades del tipo respectivo para iniciar la simulación con la bodega llena. Luego asigna los atributos respectivos, “repuestoInv”, y posteriormente esperan en la cola tipo *Hold* llamada “Inventario” hasta recibir la orden que libera los repuestos.

Las revisiones periódicas, como su nombre lo dice, son inspecciones que se hacen con una frecuencia determinada por la política de inventario que se emplea, y permite preguntar si se necesita un repuesto, ya sea porque se superó el punto de re orden del stock o por si existe una pieza fallada esperando dicho repuesto, si cualquiera de estas dos condiciones es positiva se realiza el pedido de tamaño “S” menos la cantidad actual de stock menos el tamaño del pedido en tránsito si es que hay uno en camino y luego clona las entidades generando los repuestos deseados.

Finalmente los repuestos clonados esperan en el módulo *Process* el tiempo determinado por el *lead time* respectivo de cada repuesto para posteriormente dirigirse al módulo “Inventario”.

Además se encuentran anexados los diagramas de flujo del mantenimiento correctivo (Anexo 4), del mantenimiento preventivo (Anexo 5) y de las políticas de inventario, tanto con revisión continua como las de revisión periódica (Anexo 6).

En términos de simulación, la ejecución del simulador con su respectiva instancia se le llama réplica. Dicha réplica tiene un largo en unidades de tiempo, que significa el periodo por el cual el modelo fue simulado, pero los resultados de una sola réplica puede no exacto o cercano al valor verdades, por lo cual se deben hacer más de una réplica para encontrar la estadística que se necesita.

El largo de cada réplica del simulador elaborado fue determinado respecto al periodo que se tenía de datos y un valor estimado de cuánto tiempo se requería investigar, por lo que se determinó que 5 años era un largo de réplica acorde a un periodo que se quiere para evaluar. En cuanto a la cantidad de réplicas se incorporó un código que permite replicar hasta el punto en que cierto indicador, en este caso es costo total, se mantenga estable bajo un rango

aceptable, esto significa que la simulación se detendrá en el número de réplicas en que el costo total de una réplica con el costo de la réplica anterior solo varíe en 2000 USD.

5.9 Otros prototipos

El prototipo presentado en el punto anterior corresponde un modelo base más robusto que permite llegar a los otros modelos eliminando o agregando ciertos puntos. Los prototipos necesarios para evaluar todos los planes son seis en total, considerando la base. En la siguiente tabla se presentan los otros prototipos y los cambios que se debieron hacer para llegar a ellos.

Tabla 5.3- Otros prototipos a evaluar.

Prototipo	Cambios realizados respecto al modelo base
Modelo con mantenimiento preventivo y política de inventario con revisión periódica del tipo (S,R)	Los cambios realizados en este modelo corresponden a eliminar el módulo <i>Decide</i> que evalúa las condiciones para hacer un pedido, por lo tanto, al hacer la revisión periódica pasa automáticamente a hacer el pedido del tamaño “S” menos el stock menos el pedido en tránsito.
Modelo con mantenimiento preventivo y política de inventario con revisión continua del tipo (Q,r)	Para este modelo se necesita eliminar los módulos correspondientes a la revisión periódica y hacer que luego que se repara una falla y se da paso a eliminar el repuesto utilizado en el stock correspondiente ésta entidad pase automáticamente a preguntar por la condición de pedido (si es stock es menor al punto de re orden) y si es así solicitar el pedido tamaño “Q”.
Modelo con mantenimiento correctivo y política de inventario con revisión periódica del tipo (s,S,R)	Para este modelo se elimina toda la sección del mantenimiento preventivo y se corrigen los indicadores que tienen variables correspondientes a dicha sección, con respecto a la política de inventario no hay variaciones.
Modelo con mantenimiento correctivo y política de inventario con revisión periódica del tipo (S,R)	En este modelo se realizan los mismos cambios que el modelo anterior respecto al mantenimiento preventivo, pero además se elimina el módulo <i>Decide</i> que condiciona el realizar pedido, igual que el caso de mantenimiento preventivo.
Modelo con mantenimiento correctivo y política de inventario con revisión continua del tipo (Q,r)	Para este modelo se elimina todo respecto al mantenimiento preventivo y a la revisión periódica, y se realiza el mismo cambio que el caso de revisión continua con mantenimiento preventivo.

6 Implementación computacional y análisis de resultados

Para ejecutar el simulador se necesitó preparar la implementación computacional declarando una serie de parámetros y variables para dicha herramienta, como también medidas de desempeño como resultados de la simulación. Además se debieron definir qué planes o escenarios se ejecutarían para evaluar en el proyecto. Por último se determinó que todos los simularán 5 años de funcionamiento, largo representativo para los datos reales que se tienen del filtro.

Lo dicho recientemente se explica con mayor detalle en las siguientes secciones.

6.1 Parámetros y variables principales

El simulador en el software Arena permite representar el sistema en torno a entidades, que se mueven dentro de los módulos y realizan la simulación requerida.

Las entidades tienen atributos propios que permiten llevar registro de acciones y de parámetros, tanto fijos como variables, que los definen como tal, funcionando como características de cada falla o repuesto. Pero también existen variables del sistema y de la simulación que registran valores globales de cada réplica que sirven para monitorear el comportamiento y calcular los indicadores.

A continuación se detallarán los parámetros y variables principales desarrollados en el prototipo diseñado.

6.1.1 Parámetros

En la tabla 6.1 se detallarán los parámetros principales del simulador, que pertenecen tanto a las entidades que representan una falla o a entidades que representan un repuesto. Cabe destacar que el mantenimiento preventivo también es representado por una entidad y posee un atributo.

6.1.2 Variables

Dentro del simulador existen muchas variables que son utilizadas para monitorear el funcionamiento del sistema, aparte de las que sirven específicamente para que pueda funcionar. En la tabla 6.2 se explicarán las variables más importantes del simulador.

6.2 Cálculo de parámetros

Para el simulador diseñado se necesitó calcular ciertos parámetros de las fallas, pero también se debió decidir que valores utilizar en algunos parámetros que no se conocía el valor real, por lo que hay parámetros con datos reales, con valores calculados y con datos estimados.

En el anexo 2 se encuentra una tabla que define los parámetros utilizados en la simulación y como fueron obtenidos.

Tabla 6.1- Parámetros

Parámetro	Entidad	Utilidad
RepuestoFalla	Falla	Señala el tipo de falla de la entidad, puede tomar el valor 1, 2 o 3.
RepuestoInv	Repuesto	Indica el tipo de repuesto de la entidad relacionada a cada una de las fallas, por ende, puede tomar el valor 1, 2 o 3.
tpoE	Falla	Representa la “edad” del repuesto medido en días.
tasaFalla	Falla	Registra la tasa de falla de la pieza, medido en cantidad de fallas por días.
tpoProximoAFallar	Falla	Indica el instante en que dicha pieza fallará, valor medido en horas.
tpoReemplazo	Falla	Tiempo total que demora reemplaza cada pieza fallada.
vida Útil	Falla	Tiempo estimado de vida útil que tiene cada pieza, es un valor fijo entregado por el fabricante.
comienzaMantP	Mantenimiento preventivo	Guarda el instante preciso en que se inicia un mantenimiento preventivo. Sirve para registrar el tiempo total de cada mantención.
comienzaMantC	Falla	Registra el instante preciso que una pieza falla. Sirve para guarda el tiempo total que se demora en reparación una pieza, tiempo en espera por repuesto más tiempo de reemplazo.

Tabla 6.2- Variables

Variabes	Utilidad
cantReparaciones	Lleva el registro del número de reparaciones realizadas, utilizado para calcular el tiempo total ocupado en mantenciones correctivas.
cantMTTO	Lleva el conteo de la cantidad de mantenciones preventivas, utilizado para el cálculo del tiempo total ocupado en mantenciones preventivas.
cantRepuestos _i	Esta variable registra el stock de cada repuesto en el inventario, se actualiza al llegar un pedido y al sacar un repuesto de inventario.
PT _i	Representa la cantidad de repuestos en tránsito para cada caso.
TamañoPedido _i	Define el tamaño del pedido de cada repuesto, se calcula como el valor de S menos el stock y el pedido en tránsito.
Tminimo	Registra cuanto tiempo falta para que ocurra una falla, así poder esperar ese tiempo y gatillar la ocurrencia de la falla.
EquipoDetenido	Indica el estado del equipo, 0 si está funcionando y 1 en caso de que se esté en mantención preventiva o correctiva.

6.3 Medidas de desempeño

Las medidas de desempeño a evaluar en el simulador son las disponibilidad del equipo y el costo total en mantenimiento, tanto preventivo como correctivo, pero a su vez se incorporó la medida de desempeño de la utilización del equipo, que calcula el tiempo efectivo de operación de un activo durante el largo de la réplica, por lo cual se considera tiempo perdido al tiempo de espera por repuesto faltante en el inventario.

Estos valores son entregados por el módulo *Statistic* que calculan estadísticas una vez terminada la simulación. Cada uno de estos cálculos proviene de resultados de variables y módulos *Record* que también registran estadísticas de tiempo discreto o contadores durante la simulación. Estas estadísticas también se entregan en forma separada por lo que finalmente se puede revisar todos los resultados que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6.3- Medidas de desempeño y otros datos entregados

Estadística	Módulo/Variable
Disponibilidad	<i>Statistic</i>
Utilización	<i>Statistic</i>
Tiempo detenido por mantención correctiva	<i>Record</i>
Tiempo detenido por mantención preventiva	<i>Record</i>
Cantidad de mantenciones correctivas	Variable
Cantidad de mantenciones preventivas	Variable
Costo total	<i>Statistic</i>
Costo por repuesto	<i>Record</i>
Costo inventario	<i>Record</i>
Costo por mantenimiento correctivo	<i>Record</i>
Costo por mantenimiento preventivo	<i>Record</i>

Es importante destacar que de los datos obtenidos de los estudios de la Minera Esperanza se extrajo que el costo de mantención lo calculan con el costo unitario de producción 4.4 USD por la cantidad que pudo haber producido el equipo durante el periodo que éste estuvo detenido, por lo tanto el costo de mantenimiento, tanto correctivo como preventivo, se calcularán de ese modo considerando el tiempo de detención como el tiempo que se toma en reparar una pieza o el tiempo total de la mantención preventiva.

6.4 Planes a evaluar

Para poder comenzar la evaluación es necesario validar el simulador utilizado para confirmar su funcionamiento. En este caso no se puede realizar una validación comparando el comportamiento del simulador con el comportamiento real del filtro Larox de la Minera Esperanza, ya que no se está simulando el caso real, sino un acercamiento realista de éste.

De todos se verificaron ciertos elementos que comprobaron la coherencia del simulador con respecto a los procesos que lo componen como también la congruencia de la generación de fallas con las fallas que produce el filtro. Luego de generada ésta validación se procede a realizar la evaluación de los planes a través del simulador.

Los planes a evaluar se definen por cuatro características que diferencian un plan de otro, además cada plan se sensibiliza varían su nivel de S o Q en +20% y -20%, de ese modo se obtienen 70 planes a evaluar.

Los 70 planes se desarrollaron en base a datos ficticios adaptados para el proyecto, por lo cual la factibilidad real de los planes no se puede afirmar, pero dentro del contexto del simulador los 70 planes sí se pueden aplicar, generando ventajas y desventajas entre uno y otro.

En la siguiente imagen se muestra un esquema de las opciones que se barajan en los planes a evaluar.

Tabla 6.3- Esquema representativo de los tipos de planes a evaluar

Políticas de mantención	Políticas de inventario	Periodos de revisión	Nivel de servicio
Preventiva	De revisión continua		90%
Correctiva	De revisión periódica	Por turnos Diaria Semanal	99%

En el anexo 1 se puede encontrar el detalle de cada uno de los planes.

6.5 Modo de implementación

Para poder llevar a cabo la evaluación de los 70 planes se utilizó la herramienta *Process Analyzer* (PAN) del software Arena, que permite evaluar distintos escenarios de manera automática.

Para poder hacer correr el PAN se deben cargar los distintos simuladores a un nuevo proyecto, y luego se van seleccionando las variables que toman valores diferentes en cada uno para que posteriormente se les asigne los valores que deben tomar, en el caso del proyecto planteado lo que cambia de cada plan son las variables que representan el periodo a revisar el inventario, el valor de “S” o “Q” y los puntos de re orden “s” y “r” respectivamente por cada falla. Por lo tanto, PAN permite generar una tabla de datos y luego replica cada plan y entrega los resultados deseados.

Para el tema de los resultados se deben seleccionar las variables y estadísticas que se necesita que cada simulación entregue, de este modo se genera una tabla de resultados, como se muestra en la siguiente figura.

The screenshot shows the 'Process Analyzer' interface with a table of simulation results. The table has columns for Scenario Properties (S, Name, Program File, Reps) and Controls (Period, SQ1, sr1, SQ2, sr2, SQ3, sr3, Num Reps, TiempoDetenidoMC, cantReparaciones, Tiemp nic). The data rows represent different plans (Plan11 to Plan19) with their respective parameters and results.

Scenario Properties				Controls										
S	Name	Program File	Reps	Period	SQ1	sr1	SQ2	sr2	SQ3	sr3	Num Reps	TiempoDetenidoMC	cantReparaciones	Tiemp nic
11	Plan11	1 : CorrectivaPeriodicaVersiónFI	1664	24.0000	8.000	6.00	8.00	4.00	4.00	2.00	1000	3.343	45.897	
12	Plan12	1 : CorrectivaPeriodicaVersiónFI	1385	24.0000	14.00	10.0	12.0	8.00	6.00	4.00	1000	---	---	
13	Plan13	1 : CorrectivaPeriodicaVersiónFI	0	168.0000	10.00	7.00	10.0	6.00	5.00	3.00	1000	---	---	
14	Plan14	1 : CorrectivaPeriodicaVersiónFI	0	168.0000	8.000	5.00	8.00	4.00	4.00	2.00	1000	---	---	
15	Plan15	1 : CorrectivaPeriodicaVersiónFI	0	168.0000	12.00	9.00	12.0	8.00	6.00	4.00	1000	---	---	
16	Plan16	1 : CorrectivaPeriodicaVersiónFI	0	168.0000	12.00	9.00	11.0	7.00	6.00	4.00	1000	---	---	
17	Plan17	1 : CorrectivaPeriodicaVersiónFI	0	168.0000	9.000	7.00	8.00	5.00	4.00	3.00	1000	---	---	
18	Plan18	1 : CorrectivaPeriodicaVersiónFI	0	168.0000	15.00	11.0	14.0	9.00	8.00	5.00	1000	---	---	
19	Plan19	1 : CorrectivaPeriodicaVersiónFI	0	8.0000	3.000	3.00	4.00	3.00	2.00	3.00	1000	---	---	

Figura 6.1- Process Analyzer

6.6 Análisis global preliminar de la combinación de políticas

Para comenzar el análisis de los resultados se procedió a realizar un análisis global de los resultados utilizando los promedios de los indicadores para generar un panorama preliminar de los resultados de cada prototipo evaluado.

En la tabla 6.4 se encuentra el resumen de los indicadores para los planes con mantenimiento correctivo y política de inventario del tipo (s,S,R) donde se aprecia un escenario favorable en cuanto a la disponibilidad, gracias a que no hubo quiebres de stock, pero obteniendo uno de los costos más elevados dentro de las 6 opciones de entrecruces.

Tabla 6.4- Tabla de indicadores promedios para planes con mantenimiento correctivo y política de inventario con revisión periódica (s,S,R).

Indicador	Promedio
Tiempo de detención por mantenimiento correctivo	3,346
Cantidad de fallas	45,904
Cantidad que espera repuesto por quiebre de stock	0
Disponibilidad	99,650
Utilización	100
Costo de compra de repuesto 1	330853,778
Cantidad comprada del repuesto 1	23
Costo de compra de repuesto 2	49817,278
Cantidad comprada del repuesto 2	24
Costo de compra de repuesto 3	20199
Cantidad comprada del repuesto 3	21
Costo de inventario	153454,556
Costo por mantención correctiva	37111,611
Costo por mantención preventiva	No aplica
Costo total	591436,272

En cuanto a los planes con mantenimiento correctivo y política de inventario del tipo (S,R) que se presentan en la tabla 6.5 disminuye la disponibilidad respecto a la revisión (s,S,R), lo cual es negativo, pero disminuye el costo total, estando entre los planes con menor costo total.

Tabla 6.5- Tabla de indicadores promedios para planes con mantenimiento correctivo y política de inventario con revisión periódica (S, R)

Indicador	Promedio
Tiempo de detención por mantenimiento correctivo	4,658
Cantidad de fallas	45,825
Cantidad que espera repuesto por quiebre de stock	0,444
Disponibilidad	99,511
Utilización	99,867
Costo de compra de repuesto 1	256763,222
Cantidad comprada del repuesto 1	18
Costo de compra de repuesto 2	43759,333
Cantidad comprada del repuesto 2	21
Costo de compra de repuesto 3	18230
Cantidad comprada del repuesto 3	19
Costo de inventario	62240,556
Costo por mantención correctiva	51820,889
Costo por mantención preventiva	No aplica
Costo total	432813,9

Con respecto a los planes con mantenimiento correctivo y política de inventario continua se puede concluir, a través de la tabla 6.6, que tienen el costo total más bajo en comparación a los 5 otros tipos y su disponibilidad está sobre la media, aunque no es la óptima.

Al momento de incluir la mantención preventiva disminuye considerablemente la disponibilidad, ya que el equipo se detiene para realizar dichas inspecciones y eso perjudica al tiempo disponible para producir. Esto ocurre porque no hay una buena calibración o adaptación de los datos, por lo cual la estrategia diseñada para evaluar no representa realmente lo que sucederá en el filtro y se produce dicha incongruencia, donde la disponibilidad disminuye al aplicar mantención preventiva. Cabe recordar que en este análisis aún no se utiliza el prototipo que rejuvenece la edad del repuesto, que fue una solución agregada en los últimos análisis para reparar dicha incongruencia.

En particular en el caso presentado en la tabla 6.7, planes de mantenimiento preventivo con política de inventario(s, S, R), se presenta la utilización más alta de los 6 planes, no así la disponibilidad que disminuye, pero estando siempre sobre la media. En cuanto a los costos totales se elevan considerablemente debido a la compra del repuesto 1 (el de mayor costo) para mantener el stock y los niveles de servicios esperados, esto no significa que solo se

compra repuesto 1, si no que su impacto es mayor debido a que su costo es considerablemente superior a los otros repuestos.

Tabla 6.6- Tabla de indicadores promedios para planes con mantenimiento correctivo y política de inventario con revisión continua (Q, r)

Indicador	Promedio
Tiempo de detención por mantenimiento correctivo	4,557
Cantidad de fallas	45,845
Cantidad que espera repuesto por quiebre de stock	0,46
Disponibilidad	99,520
Utilización	99,873
Costo de compra de repuesto 1	238897,16
Cantidad comprada del repuesto 1	16
Costo de compra de repuesto 2	41793,9
Cantidad comprada del repuesto 2	20
Costo de compra de repuesto 3	17910,8
Cantidad comprada del repuesto 3	18
Costo de inventario	50043,73
Costo por mantención correctiva	50834,32
Costo por mantención preventiva	No aplica
Costo total	369832,15

Tabla 6.7- Tabla de indicadores promedios para planes con mantenimiento preventivo y política de inventario con revisión periódica (s,S,R)

Indicador	Promedio
Tiempo de detención por mantenimiento correctivo	3,300
Cantidad de fallas	38,698
Cantidad que espera repuesto por quiebre de stock	0
Disponibilidad	99,526
Utilización	100
Costo de compra de repuesto 1	415225,661
Cantidad comprada del repuesto 1	28
Costo de compra de repuesto 2	65607,556
Cantidad comprada del repuesto 2	31
Costo de compra de repuesto 3	27630,611
Cantidad comprada del repuesto 3	28
Costo de inventario	151811,167
Costo por mantención correctiva	30895,833
Costo por mantención preventiva	19359,389
Costo total	710530,240

Para los planes que se presentan en la tabla 6.8 que corresponden a las alternativas con mantenimiento preventivo y política de inventario (S, R) se puede decir que la disponibilidad baja considerablemente a causa de los quiebres de stock que suceden durante el

funcionamiento normal del equipo, y a eso se suma los repuestos utilizados durante las mantenciones, por lo tanto es un escenario poco favorable en cuanto a disponibilidad. Respecto a los costos se encuentran entre los más altos, siendo así un escenario poco favorable para esta evaluación

Para terminar, los planes que se presentan en la tabla 6.9 consisten en opciones con mantenimiento preventivo y políticas de inventario (Q, r) donde se puede apreciar una disponibilidad y utilización aceptable consideración a los otros planes con mantenimiento preventivo, siendo la segunda opción más favorable respecto a la disponibilidad y la mejor en cuanto a costo.

Tabla 6.8- Tabla de indicadores promedios para planes con mantenimiento preventivo y política de inventario con revisión periódica (S, R)

Indicador	Promedio
Tiempo de detención por mantenimiento correctivo	5,487
Cantidad de fallas	38,069
Cantidad que espera repuesto por quiebre de stock	0,712
Disponibilidad	99,348
Utilización	99,839
Costo de compra de repuesto 1	342369
Cantidad comprada del repuesto 1	23
Costo de compra de repuesto 2	59300,111
Cantidad comprada del repuesto 2	28
Costo de compra de repuesto 3	25472
Cantidad comprada del repuesto 3	26
Costo de inventario	66027,111
Costo por mantención correctiva	50024,333
Costo por mantención preventiva	19084,778
Costo total	562277,89

De acuerdo a las tablas anteriores se puede genera una tabla resumen con el promedio de todos los indicadores definidos de acuerdo a cada uno de los prototipos planteados, tabla que permite percibir de mejor manera las variaciones de los datos.

Gracias a la tabla 6.10 se puede obtener una visualización más claras para comparar los 6 prototipos utilizados, que no entrega una respuesta final, pero sí una buena comparación.

Respecto a la cantidad de fallas producidas por el filtro se puede apreciar que los prototipos con mantenimiento correctivo generan más fallas que los con mantenimiento preventivo, por lo cual el número de fallas disminuye gracias a la política de mantenimiento aplicada, no así el tiempo que se toma para reparar la falla, ya que los menores tiempos son para los prototipos con política de inventario (s,S, R) la cual asegura mejores niveles de stock en comparación a las políticas (S, R), que son las que demoran más por reparación, lo cual va

de la mano con el número de quiebres de stock promedio que provocan, lo que finalmente se ve reflejado en la disponibilidad y utilización.

Tabla 6.9- Tabla de indicadores promedios para planes con mantenimiento preventivo y política de inventario con revisión continua (Q,r)

Indicador	Promedio
Tiempo de detención por mantenimiento correctivo	3,041
Cantidad de fallas	37,013
Cantidad que espera repuesto por quiebre de stock	0,269
Disponibilidad	99,518
Utilización	99,955
Costo de compra de repuesto 1	406287,3
Cantidad comprada del repuesto 1	28
Costo de compra de repuesto 2	61121,8
Cantidad comprada del repuesto 2	29
Costo de compra de repuesto 3	26000,7
Cantidad comprada del repuesto 3	27
Costo de inventario	124678,9
Costo por mantención correctiva	35244,3
Costo por mantención preventiva	19109,9
Costo total	558076,4

Los prototipos que generan mejores indicadores de disponibilidad y utilización son los con política de inventario (s, S, R) por lo que se puede decir que es la mejor opción en cuanto a política de inventario, dejando atrás la política (S, R) que es la menos conveniente.

De acuerdo a los costos se hará la comparación solo con los costos de compras totales, los de inventario y los por mantenimiento correctivo, ya que los costos por mantenciones preventivas se mantienen relativamente estables y no se aplican a todos los prototipos.

En términos de costos de compras los prototipos más favorecidos son los de políticas de mantenimiento correctivo, lo cual se puede asociar a que sus compras solo se deben a mantenciones correctivas y no preventivas. Pero a su vez el prototipo 3 es uno de los prototipos con más altos costos en compras, por lo que no se puede otorgar al mantenimiento correctivo la mejor opción en este ítem ni tampoco a una política de inventario en específico, si no a la combinación con las políticas (s, S, R) y (S, R).

El costo de inventario presenta una notoria alza en los prototipos que presentan política de inventario (s, S, R) por lo cual queda claro que no es una política favorable en estos términos. Donde más se ahorra en cuanto a inventario es en la combinación de política correctiva y planes (Q, r) y (S, R), a pesar que el último caso representa el costo más alto en compras. Esto concuerda con que estos prototipos poseen un alto número de quiebres de stock que producen dicho ahorro.

Tabla 6.10- Tabla resumen de indicadores promedios de cada prototipo

Indicador	M.Correctiva +(s,S,R) Prototipo 1	M.Correctiva +(S,R) Prototipo 2	M.Correctiva +(Q,r) Prototipo 3	M.Preventiva +(s,S,R) Prototipo 4	M.Preventiva +(S,R) Prototipo 5	M.Preventiva +(Q,r) Prototipo 6
Tiempo de detención MC	3,346	4,658	4,557	3,300	5,487	3,941
Cantidad de fallas	45,904	45,825	45,845	38,698	38,069	37,013
Cantidad prom. quiebre de stock	0	0,444	0,46	0	0,712	0,260
Disponibilidad	99,650	99,511	99,520	99,526	99,348	99,518
Utilización	100	99,867	99,873	100	99,839	99,955
Costo compra repuesto 1	330853,778	256763,222	238897,16	415225,661	342369	406287,3
Cant. comprada del repuesto 1	23	18	16	28	23	28
Costo compra repuesto 2	49817,278	43759,333	41793,9	65607,556	59300,111	61121,7
Cant. comprada del repuesto 2	24	21	20	31	28	29
Costo compra repuesto 3	20199	18230	17910,8	27630,611	25472	26000,7
Cant. comprada del repuesto 3	21	19	18	28	26	27
Costo total por compras	400869	318752	617352	508462	427141	493408
Costo de inventario	153454,556	62240,556	50043,73	151811,167	66027,111	124678,9
Costo por MC	37111,611	51820,889	50834,32	30895,833	50024,333	35244,3
Costo por MP	No aplica	No aplica	No aplica	19359,389	19084,778	19109,4
Costo total	591436,272	432813,9	369832,15	710530,240	562277,89	558076,

Finalmente los costos de mantenimiento correctivo van de la mano con la cantidad de fallas y tiempo de reparación en cada una, por lo cual los prototipos más perjudicados en este ítem son los con política (S, R). Y los prototipos con costos más favorables en cuando a mantenimiento correctivo son los prototipos 4 y 6, con mantenimiento preventivo y política (s, S, R) y (Q, r) respectivamente.

Bajo el examen de asignar a los indicadores de los prototipos una calificación de Bueno, Aceptable y Malo en cada ítem comparado se concluye que los mejores prototipos son el prototipo 1 (Mantenimiento correctivo y política (s, S, R)), el prototipo 4 (Mantenimiento preventivo y política (s, S, R)) y el prototipo 6 (Mantenimiento preventivo y política (Q, r)) dejando a la vista que si se mejora la estrategia de mantenimiento preventivo, los datos y el enfoque utilizado quedaría demostrado su ventaja sobre el mantenimiento correctivo. En

cuanto al peor se nomina al prototipo 5 donde la política (S, R) y la mantención preventiva se ponen en desventaja en la mayoría de los indicadores.

A modo de conclusión gráfica se presentan dos figuras que comparan el costo total en USD con la disponibilidad (figura 6.2) y con la utilización (figura 6.3) que entrega un panorama mejor con respecto a cuál podría ser un plan óptimo al momento de evaluar.

Es importante destacar que los costos considerados como “Costo total” representan el costo acumulativo de los ítems durante toda la réplica (5 años), que es directamente al costo anual de la estrategia.

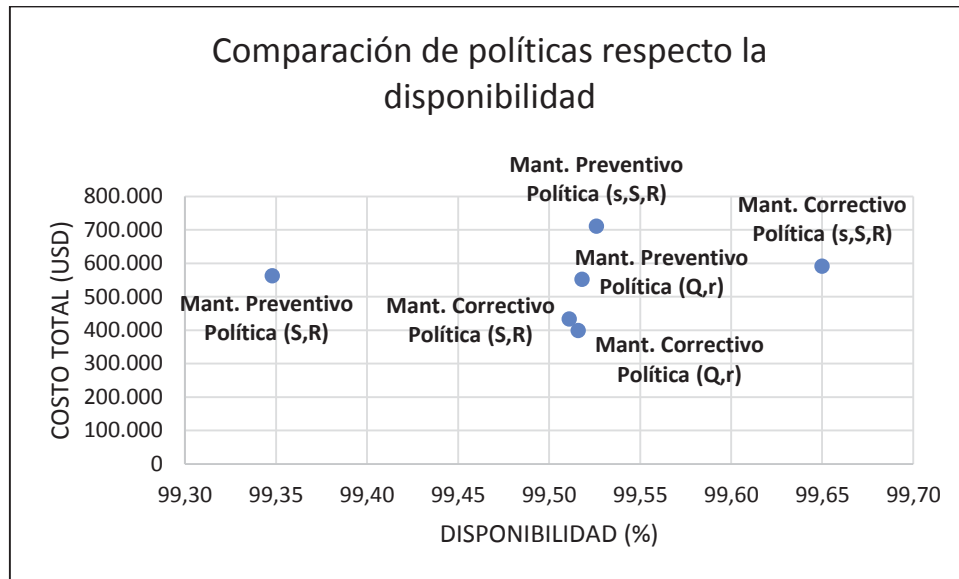


Figura 6.2- Comparación de políticas con respecto a la disponibilidad.

Bajo los criterios considerados en esta evaluación se podría decir que la mejor opción serían los planes con políticas de mantenimiento correctivo y política de inventario (Q, r) ya que sus costos son considerablemente menores y su disponibilidad es aceptable. Pero si se considera el criterio de la disponibilidad sobre los costos claramente se debería aplicar la política (s, S, R) con mantención correctiva, análisis que concuerda con lo rescatado de la tabla 6.10.

En la figura 6.2 queda demostrado como afecta las inspecciones preventivas a la disponibilidad y a los costos, pero es importante recordar que se está usando un enfoque orientado a los repuestos y no al equipo, que en su totalidad se vería beneficiado con las mantenciones preventivas.

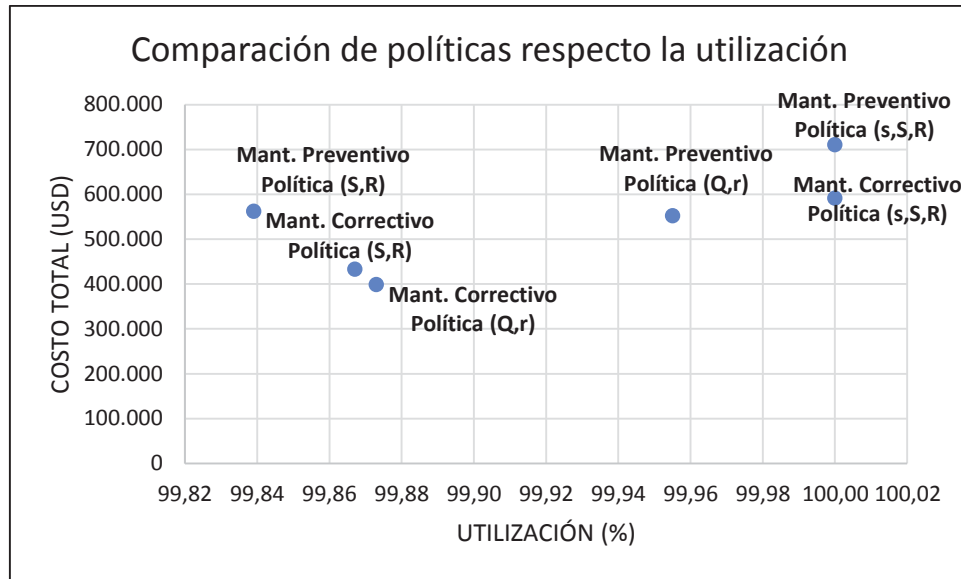


Figura 6.3- Comparación de políticas con respecto a la utilización.

En la figura 6.3 se aprecia cómo cambia el escenario para los planes preventivos en cuanto a la utilización, ya que observando esa perspectiva quedan como mejor opción, aunque para poder decidir cuál es mejor plan se deben considerar otros factores, como por ejemplo el detalle de los costos.

Si la decisión recae en una opción con mayor utilización se debiese elegir una de las opciones con la política (s, S, R), para esto se detallarán y comparan el desglose de costos entre estas dos opciones.

Como ya se ha dicho los planes preventivos con políticas (s, S, R) tiene un mayor costo total debido a la alza en sus costo de inventario, costos de mantenimiento preventivo y costos de compra de sus repuestos, esto se debe a la efectividad con respecto al nivel de servicio que viene de la mano con los efectos que tiene el mantenimiento preventivo en estos mismos. Además es importante destacar que dicho entrecruce posee el costo más bajo en mantención correctiva, ya que se generan menos fallas, por ende menos detenciones ociosas, de echo es el entrecruce que posee en promedio menos tiempo de detención por reparación.

Los costos del plan correctivo y política (s, S, R) se mantienen dentro de los estándares, a excepción del costo de inventario, siendo el más alto entre todas las políticas, esto se debe a la frecuencia de los pedidos y que su consumo es más lento, ya que a pesar de que se producen más fallas, no se consumen a causa de mantenimientos preventivos.

Por ende para poder concluir cual plan es el óptimo se debe definir criterios adicionales para la toma de decisión, como por ejemplo considerar los costos directos del mantenimiento correctivo que considera más factores aparte de la pérdida de producción.

6.7 Análisis de política de mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo ofrece buenos indicadores en cuanto a la disponibilidad y utilización, con algunas excepciones a causa de la sensibilización de los parámetros que producen ciertos quiebres de stock, pero en general los indicadores son favorables.

Teóricamente los tiempos de detención por parte de la mantención correctiva deberían ser superiores a los de mantención preventiva, a causa del tiempo detenido por la espera por repuestos (*lead time* de pedidos) y a los beneficios que otorgan las mantenciones preventivas, pero en este análisis no se ve reflejada dicha diferencia, lo cual deja pendiente un mejoramiento del simulador y de la estrategia aplicada en la actual evaluación.

La cantidad de fallas de los planes correctivos bordean las 45 fallas de manera estable, pero varían en cuanto al tiempo que demora su reemplazo, siendo los planes (s, S, R) los con menor tiempo de detención por reparación, por ende menores costos por mantenimiento. Los costos se mantienen estables respecto a las compras, no así el de inventario, que varían considerablemente entre cada uno de las políticas de inventario, siendo la más alta la política (s, S, R) que debido a su estructura asegura el stock realizando pedidos más frecuentemente.

En la figura 6.4 se presenta el comportamiento de los planes con mantenimiento correctivo respecto a la disponibilidad, donde se muestra lo estable que se mantiene el indicador en la mayoría de sus planes, exceptuando algunos casos sensibilizados en -20% que presentan una baja en la disponibilidad, ya que al disminuir sus parámetros la estrategia se debilita generando quiebres de stock que afectan a la disponibilidad. Además se puede apreciar que los planes más costosos son los planes con política de mantención (s, S, R) que aumenta aumentan sus costos debido a los niveles de servicio exigidos y la frecuencia de pedido, que a su vez impacta en el tamaño de este y en consecuencia en los costos.

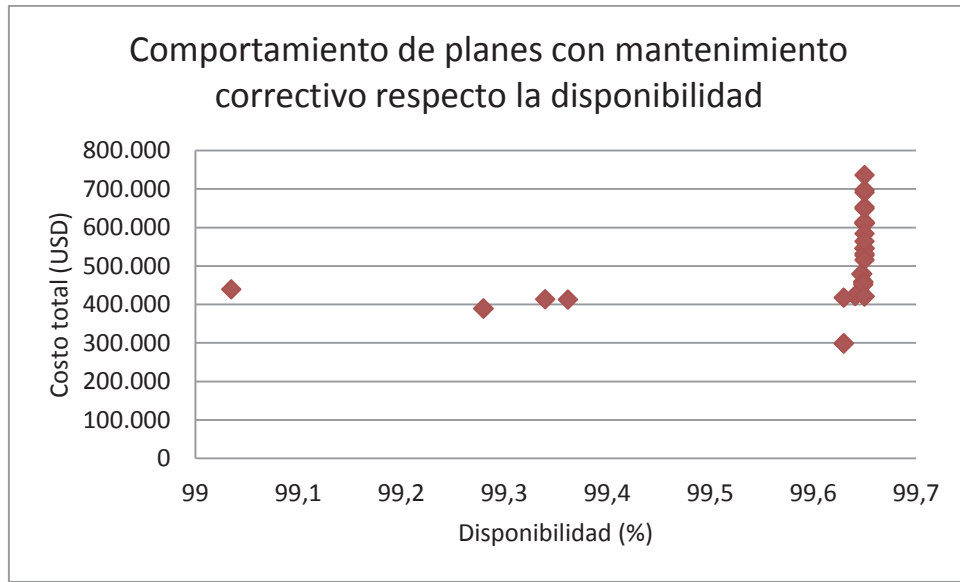


Figura 6.4-Comportamiento de planes con mantenimiento correctivos respecto la disponibilidad para distintas políticas de inventario.

El comportamiento respecto a la utilización no entrega información adicional a la ya concluida gracias a la disponibilidad. Solo se puede agregar que hay planes que alcanzan un 100% de utilización, esto quiere decir que no quedan detenidos ociosamente en espera de la llegada de un repuesto.

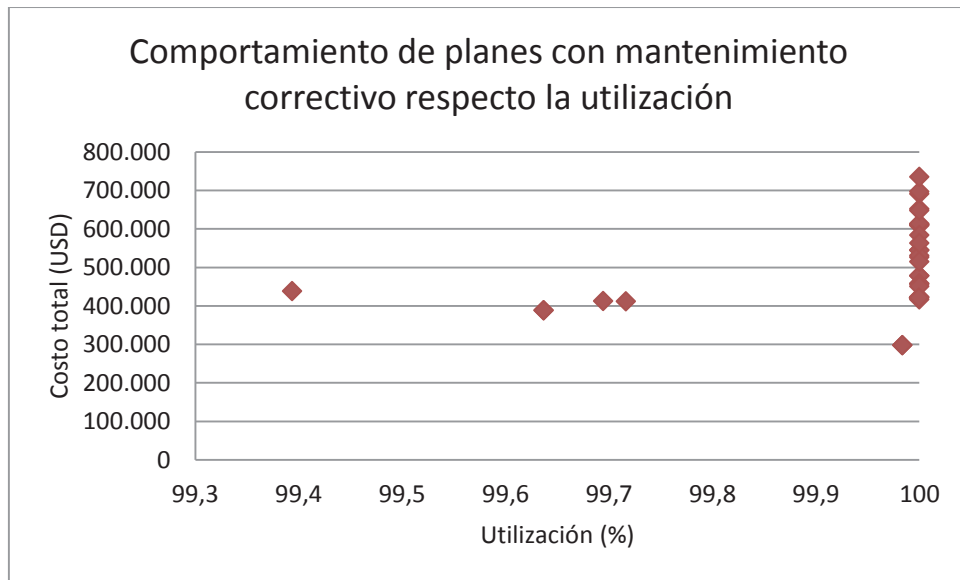


Figura 6.5-Comportamiento de planes con mantenimiento correctivos respecto la utilización para distintas políticas de inventario.

6.8 Análisis de política de mantenimiento preventivo

Los planes con políticas de mantención preventiva se comportan de manera similar que los correctivos en cuanto a utilización, pero difieren en el comportamiento respecto a la disponibilidad, entregando uno de los valores más altos del indicador.

El número de fallas en los tres tipos de políticas de inventario se mantienen constante, 38 fallas aproximadamente, pero sí varía el tiempo promedio de reparación, siendo menor el tiempo el de los planes con política (s, S, R), por ende menor costo por mantenimiento correctivo. Dicho plan tiene como característica que no produce quiebre de stock, a diferencia de los planes con políticas (S, R) y (Q, r) que poseen costos menores, pero no asegura el nivel de servicio esperado en cuanto a disponibilidad.

En el gráfico de la figura 6.6 se presenta el comportamiento de acuerdo a la disponibilidad, que posee ciertas diferencias a la figura 6.7 que representa lo mismo, pero respecto a la utilización.

Los cinco casos que se observan bajo el 99,4% de disponibilidad corresponden a casos sensibilizados de la política (S, R) en -20% y en el caso de política de inventario (Q, r), por lo cual se puede concluir que son casos más inestables a medida que los valores y niveles de servicio se reducen y no serían buenas alternativas al momento de elegir un plan.

De todo los planes con disponibilidad que bordea el 99,526% (disponibilidad más frecuente) se debiera elegir el con menor costo para obtener el óptimo de los planes con mantención preventiva. Dentro de estos planes se encuentra planes con revisión de inventario del tipo (S, R) y del tipo (s, S, R) todos sensibilizados en +20% lo que indica que los mientras exista mayor holgura en los parámetros asegurará la disponibilidad y costos menores en dichos planes con mantención preventiva.

Los costos totales de los planes con mayor disponibilidad (99,526%) y mantención varían en 300.000 USD aproximadamente, diferencia que se debe a que va directamente proporcional al aumento de costos por repuestos del tipo 1 y costos de inventario que varían de la misma forma, los costos de compra del repuesto 2 y 3 se mantienen relativamente estables. Los planes con mayores costos son planes con revisión periódica (s, S, R) sensibilizados en +20%.

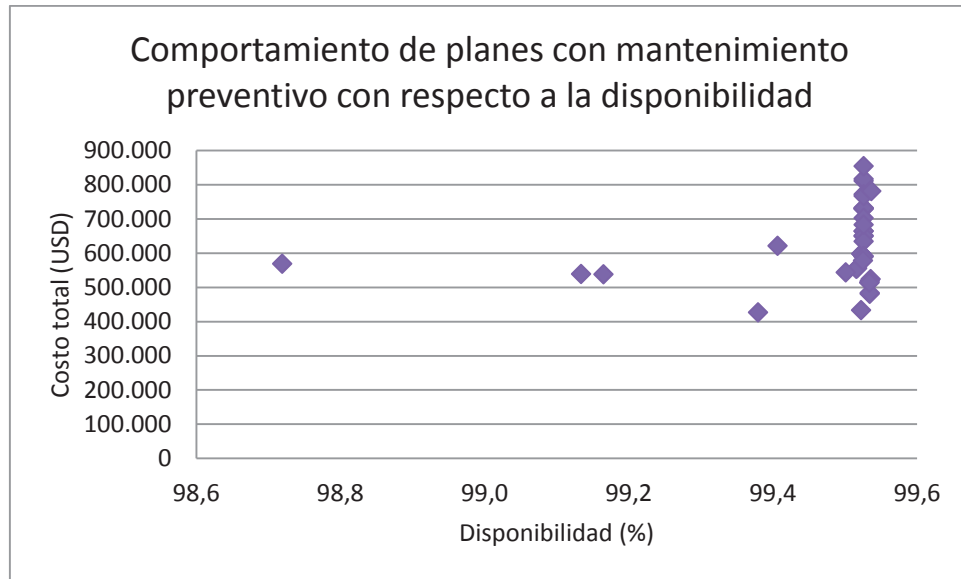


Figura 6.6-Comportamiento de planes con mantenimiento preventivo respecto a la disponibilidad para distintas políticas de inventario.

La utilización en estos casos sigue el mismo comportamiento que la disponibilidad, por lo cual no difiere la conclusión realizada anteriormente, pero sí es importante analizar la utilización cuando se desea comparar con políticas de mantención correctiva.

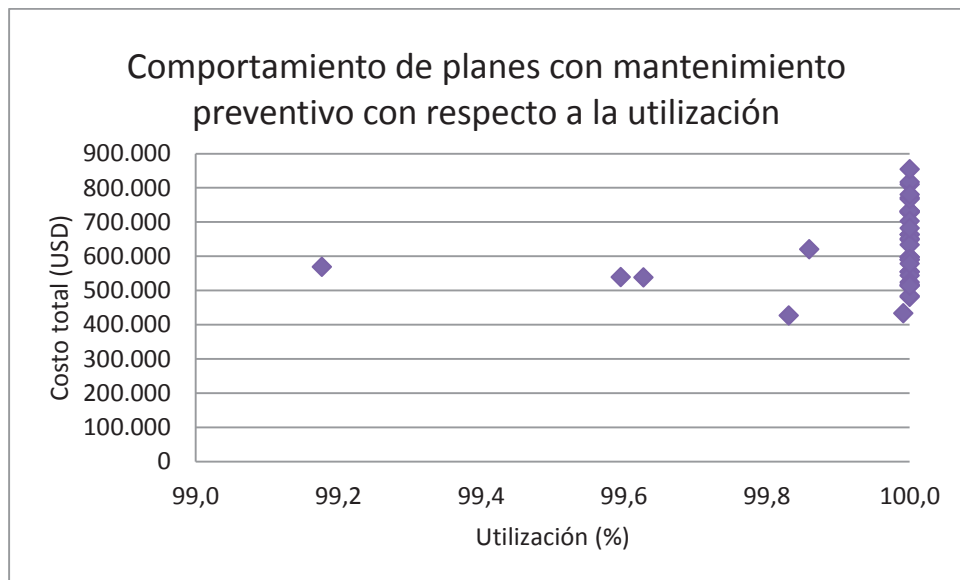


Figura 6.7-Comportamiento de planes con mantenimiento preventivo respecto a la utilización para distintas políticas de inventario.

6.9 Análisis de planes con políticas de inventario con revisión periódica

A los planes con políticas de inventario de revisión periódica se le aplicaron ciertas variaciones que generaron escenarios distintos en cuanto a nivel de servicio y frecuencia de revisión. Para las ambas políticas se variaron los periodos de revisión en 3 tipos: por turnos (8 horas), diarios (24 horas) y semanal (168 horas) y en el caso (s, S, R) también se varió el nivel de servicio en 90% y 99%.

6.9.1 Planes con políticas de inventario con revisión periódica (S, R)

Para realizar el análisis del impacto que produce el cambio de frecuencia de revisión en planes con revisión periódica (S, R) se dividió en tres partes: análisis para los casos con mantención correctiva, los con mantención preventiva y un análisis de los planes no sensibilizados.

Respecto a los planes de mantención correctiva se concluye que la disponibilidad entre casos con revisión por turnos y diaria no difiere mayormente, pero en el caso semanal se ve una notoria disminución en la disponibilidad debido a que se producen más quiebres de stock que influyen en dicho indicador y por ende en el costo de mantenimiento. Los otros costos se mantienen relativamente estables.

Para los planes donde se aplican mantenciones preventivas se presenta una leve disminución en cuanto a la disponibilidad, a medida que aumenta el periodo de revisión aumenta a su vez el tiempo promedio de reparación por repuesto y el número de repuestos impactando directamente en el indicador. En el caso de la revisión semanal se produce un mayor número de quiebres de stock lo que afecta directamente a los costos totales de dichos planes.

Finalmente analizando los planes no sensibilizados se pueden obtener conclusiones concretas respecto esta política de inventario. La disponibilidad y la utilización se ven afectadas con la mantención preventiva por el hecho de la suspensión de equipo para las inspecciones, factor que también influye en los costos. Pero el punto importante a destacar es que el número de fallas disminuye considerablemente (7 fallas menos) cuando se aplica mantenimiento preventivo y revisión (S, R) en comparación al mantenimiento correctivo, además el tiempo por detención para reparación es mayor en los planes semanales de dicha revisión.

6.9.2 Planes con políticas de inventario con revisión periódica (s, S, R)

Para analizar cómo afectan los cambios de periodos y nivel de servicio en planes con revisión periódica (s, S, R) se dividió en las mismas secciones que el análisis anterior, pero se incorporaron observaciones respecto al nivel de servicio.

Para los planes que solo tienen mantenciones correctivas se presenció que la variación de periodos y nivel de servicio no influyen en la disponibilidad y utilización, ya que la cantidad de fallas se mantiene estable. Pero en los costos sí se presenciaron diferencias. En los costos totales hubo un aumento en los periodos semanales principalmente por el aumento en costos de compra, ya que al ser periodos más largos los pedidos son mayores y por en los costos de compra e inventario aumentan. Además cuando se exigen un nivel de servicio más alto se refleja un crecimiento en todos los costos.

Cuando se incorporan las inspecciones preventivas sucede lo mismo que en el caso correctivo, no hay influencia del nivel de servicio ni la frecuencia de revisiones en la disponibilidad y utilización, se mantienen estables. Pero sí influye en los costos, aumento en costos de compra e inventario, principalmente el nivel de servicio que impacta de mayor medida a que aumenta, y si a eso se le agrega la reducción de frecuencia de revisión los costos crecen aún más.

Para concluir el análisis a los planes con revisión (s, S, R) se revisaron los planes no sensibilizados concluyendo que la disponibilidad disminuía al incluir las inspecciones preventivas, pero la utilización aumentaba, comportamiento explicado anteriormente, pero lo que es importante recalcar es la disminución de fallas una vez incorporado el mantenimiento preventivo en dicho caso.

Respecto al nivel de servicio y los costos se produce un aumento directo al asegurar un mayor nivel de servicio, que se refleja principalmente en los costos de inventario que aumentan aproximadamente 24% en cualquiera de estos planes, generando además un aumento del 10% en el costo total, donde influye el aumento de prácticamente todos los otros costos considerados.

6.10 Análisis de planes con políticas de inventario con revisión continua

En los planes con política de revisión continua se nota el mismo efecto que el caso anterior, donde los planes con mayor disponibilidad corresponden a los con mantención correctiva, no así a los con mejor utilización que corresponden a los planes de mantención preventiva. Una vez más se presenta la incongruencia sobre la mantención preventiva que beneficia los indicadores y el equipo.

La razón principal que afecta a los planes preventivos respecto los correctivos son los tiempos de mantenimiento y su efecto que no se ve reflejado en los valores finales, pero como se ha planteado durante el proyecto es un problema que se espera calibrar mejorando los datos y el enfoque en un futuro próximo.

Los planes que presentan la disponibilidad más alta son los planes correctivo sensibilizados en +20%, lo cual exageran sus niveles de servicio asegurando así que el equipo

esté disponible el 99,65% del tiempo. En contraposición se encuentran los planes correctivos sensibilizados en -20% que se ven afectados mayormente con la disminución de sus parámetros, llegando a una disponibilidad que bordea el 99,28%, debido a que dicha disminución afecta generando mayor número de quiebres de stock y en consecuencia equipos ociosos, lo cual también se ve reflejado en la utilización donde se encuentran los índices más bajos 99,63%.

En cuanto a costo existe un alza considerable en los preventivos, generando una desventaja en cuanto a sus pares correctivos, esto se debe principalmente a la inclusión del costo de mantención y los costos de compra e inventario que aumentan también por el hecho de que se debe asegurar el stock para el funcionamiento normal y también para disponer en caso de realizar una mantención preventiva, lo cual se ve plenamente reflejado en el resultado final.

Si solo se consideran los costos de mantenimiento correctivo se presenta una ventaja en los planes preventivos, ya que indudablemente generan menos fallas y muy poca espera por repuesto (solo en los casos sensibilizados en -20%) por lo tanto queda demostrado nuevamente que la mantención preventiva si favorece la disminución de fallas, solo falta pulir la estrategia para que finalmente quede reflejado en su totalidad.

Finalmente es importante destacar que la variación en el nivel de servicio no genera mayor efecto en los planes con política de inventario continuo. Esto se debe a que la frecuencia con que falla el equipo es baja, por lo cual la diferencia entre el 90% de nivel de servicio versus el 99% no generan el efecto buscado. Aunque es importante destacar que el único caso que si se nota una diferencia es el caso de mantenimiento preventivo sensibilizado en -20% donde se presenta una diferencia del 0,1% entre el plan con nivel de servicio de 90% y el de 99%, lo que deja a la vista que si hay un efecto, pero debe ser reforzado y alineado a lo que sucedería en la realidad.

6.11 Análisis de sensibilidad

Un análisis de sensibilidad permite probar la respuesta que tienen los modelos o sistemas al momento de variar ciertos parámetros y poder concluir y decidir cómo actuar en esos casos, permite decidir cuanta holgura se puede tener en los elementos variados y su impacto en el resultado final.

En el proyecto planteado se realizó un análisis de sensibilidad a todos los planes básicos (20) disminuyendo o aumentando en 20% sus parámetros “s” o “r” y “S” o “Q” dependiendo de la política de inventario aplicada. Esos planes se consideraron como un plan más llegando así a los 70 planes distintos a evaluar y analizar.

Las observaciones obtenidas del análisis de sensibilidad se describirán a continuación y están hechas en base a la tabla 6.11 que muestra la diferencia porcentual de cada indicador y de cada tipo de plan una vez que se sensibilizó en -20% y +20%.

Respecto a los datos obtenidos de la disponibilidad y la utilización se puede decir que la sensibilización no afecta mayormente a la cantidad de fallas y al tiempo utilizado en repararlas, por lo cual su impacto es muy leve, afectando principalmente a los planes con revisión de inventario (Q, r) y (S, R) que generan quiebres de stock cuando se disminuyen sus parámetros.

El impacto mayor se genera en los costos. Para el costo relacionado a la compra del repuesto 1 se nota un aumento mayor en los planes con políticas (s, S, R) debido a la efectividad que tienen de cubrir necesidades se realizan mayores tamaños de pedidos afectando principalmente al repuesto 1 que es el más costoso. El impacto del costo del repuesto 2 y 3 es mucho menor debido a que sus costos son menores y las diferencias presenciadas son menores, obedecen al comportamiento del aumento o disminución de los parámetros variados.

El costo de inventario es el más afectado y sensible al momento de variar los parámetros relacionados a las políticas de inventario, ya que si se aumenta el valor de "S" o "Q" el tamaño del pedido será mucho mayor en caso, lo mismo sucede si se disminuye, y en consecuencia se tendrán más repuestos inventariados. Dentro de este punto es importante destacar que los planes más afectados son los con política (Q, r) que debido a la frecuencia en que se realizan los pedidos se mantiene mayor stock en inventario.

El costo de mantenimiento correctivo se comporta de manera inversa a los otros costos, esto quiere decir que si se disminuye el valor de "S" o "Q" habrá menos stock en inventario, por lo cual aumenta la probabilidad de quiebre de stock generando así detenciones del equipo más prolongadas a causa de la espera de los repuestos. Esta espera influye directamente en el costo de mantención correctiva ya que esta se calcula como el costo de no producir en el periodo que el equipo está detenido. Es importante que enfatizar en este indicador ya que en el caso de mantenimiento preventivo y política (Q, r) su aumento es superior al 200% del plan original.

El costo de mantenimiento preventivo es relativamente constante, solo se producen variaciones en el caso de políticas (S, R) y (Q, r) debido a que las mantenciones preventivas programadas se aplazan una vez que hay quiebres de stock.

Finalmente el costo total sufre variaciones en ciertos casos, pero son de bajo impacto, ya que las diferencias de los otros costos se compensan o no se reflejan mayormente en el resultado final. Los casos más críticos son los planes con política (s, S, R) donde sus variaciones al aumentar los parámetros en un 20% crecen sobre el 20%, bajo esto se puede

concluir que el costo del repuesto 1 tiene mayor incidencia y peso que el costo de inventario, por lo cual, en este caso, se puede incluir el costo del repuesto 1 como un indicador valido para tomar una decisión.

Tabla 6.11- Diferencia porcentual de cada indicador al sensibilizar los planes

Indicador	M.Correctiva +(s,S,R)		M.Correctiva +(S,R)		M.Correctiva +(Q,r)		M.Preventiva +(s,S,R)		M.Preventiva +(S,R)		M.Preventiva +(Q,r)	
	-20%	20%	-20%	20%	-20%	20%	-20%	20%	-20%	20%	-20%	20%
Disponibilidad	0%	0%	-0,39%	0,40%	-0,35%	0,02%	0%	0%	-0,51%	0,52%	-0,23%	-0,08%
Utilización	0%	0%	-0,39%	0%	-0,35%	0,02%	0%	0%	-0,53%	0%	-0,15%	0%
Costo de compra de repuesto 1	-9,7%	21,71%	-6,76%	13,44%	-6,03%	5,99%	-7,71%	16,95%	-8,27%	13,84%	-11,33%	8,85%
Costo de compra de repuesto 2	-7,8%	17,12%	-5,24%	10,70%	-5,41%	5,18%	-5,88%	12,45%	-6,23%	10,58%	-6,97%	5,24%
Costo de compra de repuesto 3	-5,1%	11,03%	-8,89%	15,72%	-6,29%	5,26%	-3,83%	8%	-10,01%	15,48%	-10,35%	5,64%
Costo de inventario	-24%	66,07%	-31,08%	86,95%	-35,83%	35,98%	-24,81%	66,49%	-31,12%	84,98%	-32,41%	31,67%
Costo por mant. correctiva	-0,2%	0,20%	107,1%	-51,87%	96,41%	-4,63%	-0,38%	0,37%	166,37%	-62,43%	53,24%	-0,52%
Costo por mant. preventiva	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	0%	0%	-4,07%	4,35%	-3,79%	0,04%
Costo total	-12%	29,1%	0,18%	8,21%	30,37%	41,03%	-10,45%	23,59%	-0,36%	6,94%	5,31%	31,16%

6.12 Análisis de costos

Durante toda la sección de análisis de resultados se analizaron desde distintos ángulos los costos, pero en este ítem se concluirá de manera global el comportamiento del costo de inventario y del costo total.

Los costos de inventario siempre son un elemento a considerar, ya que pueden ser controlados con una buena política de inventario, pero en la evaluación de los planes se comprobó que la política de inventario (s, S, R) genera mayores costos, seguidos por la política (S, R) y finalmente por la política (Q, r), esto indica que la primera política prefiere

mantener más repuestos en stock para evitar los quiebres de stock, hecho comprobado en la evaluación, en cambio los otros planes pueden generar quiebres de stock y por ende aumentan otros costos, como por ejemplo el costo por mantención correctiva.

Tabla 6.12- Resumen de costos de planes básicos.

Plan	Mantenimiento	Rev. de Inventarios	Nivel de servicio	Periodos	Costo anual (USD)	Costo diario (USD)
Plan 28	Correctivo	Continuo (Q, r)	90%	No aplica	59.746,270	163,688
Plan 31	Correctivo	Continuo (Q, r)	99%	No aplica	59.746,474	163,689
Plan 61	Preventivo	Continuo (Q, r)	90%	No aplica	96.208,924	263,586
Plan 64	Preventivo	Continuo (Q, r)	99%	No aplica	102.817,584	281,692
Plan 19	Correctivo	Periódico (S,R)	No aplica	turnos	84.726,47	232,127
Plan 22	Correctivo	Periódico (S,R)	No aplica	diario	84.416,51	231,278
Plan 25	Correctivo	Periódico (S,R)	No aplica	semanal	83.446,54	228,621
Plan 52	Preventivo	Periódico (S,R)	No aplica	turnos	111.093,16	304,365
Plan 55	Preventivo	Periódico (S,R)	No aplica	diario	110.819,45	303,615
Plan 58	Preventivo	Periódico (S,R)	No aplica	semanal	108.824,49	298,149
Plan 1	Correctivo	Periódico (s, S, R)	90%	turnos	109.079,38	298,848
Plan 4	Correctivo	Periódico (s, S, R)	99%	turnos	121.949,95	334,109
Plan 7	Correctivo	Periódico (s, S, R)	90%	diario	109.080,88	298,852
Plan 10	Correctivo	Periódico (s, S, R)	99%	diario	122.830,47	336,522
Plan 13	Correctivo	Periódico (s, S, R)	90%	semanal	116.860,38	320,165
Plan 16	Correctivo	Periódico (s, S, R)	99%	semanal	129.740,23	355,453
Plan 34	Preventivo	Periódico (s, S, R)	90%	turnos	132.843,10	363,954
Plan 37	Preventivo	Periódico (s, S, R)	99%	turnos	145.712,56	399,213
Plan 40	Preventivo	Periódico (s, S, R)	90%	diario	132.828,14	363,913
Plan 43	Preventivo	Periódico (s, S, R)	99%	diario	146.574,79	401,575
Plan 46	Preventivo	Periódico (s, S, R)	90%	semanal	140.587,91	385,172
Plan 49	Preventivo	Periódico (s, S, R)	99%	semanal	153.467,42	420,459

De acuerdo a los costos diarios y anuales se puede decir que siguen el mismo comportamiento que los costos de inventario, los valores más altos se encuentran en los planes (s, S, R) y los menores en los con política continua, esto obedece a lo ya explicado con respecto al repuesto 1, que su alto costo tiene un mayor impacto, inclusive mayor que el costo de inventario, por lo cual a medida que este costo crece, crece también el costo total anual y diario. El impacto del precio del repuesto 1 se ve reflejado también en que el costo total de planes con revisión semanal es mayor a los planes por turnos. Es importante destacar que en este proyecto no se consideró otros costos de la cadena de suministros que funcionan a escala, como costos fijos. Si los costos de compra de los repuestos fueran más cercanos lo más probable es que el costo de inventario juegue un rol más importante en la toma de decisiones.

En la tabla 6.12 se presentan los planes básicos (sin sensibilizar) y sus costos anuales y diarios ordenados de menor a mayor, donde se presenta lo dicho anteriormente.

6.13 Análisis de rejuvenecimiento del repuesto

En el contexto del análisis de planes de evaluación para un filtro Larox de la Minera Esperanza se presencié una omisión en cuanto a cómo se efectuaba el mantenimiento preventivo respecto a la estrategia definida, que inicialmente señalaba que la pieza al ser sometida a mantenimiento preventivo y si no era necesario el reemplazo, solo se hacían trabajos de mantención que hacían que la pieza siguiera el curso en el tiempo, sin cambios profundos, solo una reprogramación del instante a fallar.

Pero luego de los primeros análisis se determinó que la estrategia no reflejaba el real procediendo al momento de la mantención preventiva, y que al realizarla era necesario generar un efecto en la pieza, que resultó finalmente en una actualización del atributo “tpoE” rejuveneciéndolo, esto quiere decir, reduciendo su edad en un 50%. Por lo cual se definirá esta acción como un “rejuvenecimiento de la pieza” y como “Rejuvenecido” a todos los planes que poseen esta variación.

Inicialmente se buscaba que la incorporación del rejuvenecimiento tuviese un efecto ventajoso frente a su par correctivo, ya que teóricamente la mantención preventiva beneficia la disponibilidad del equipo, teoría que no se vio reflejada en el desarrollo de este proyecto. Finalmente el rejuvenecimiento aportó en mejorar la estrategia, pero no a tener conclusiones relevantes en cuanto a la ventaja sobre el mantenimiento correctivo, por lo cual se espera que en una segunda etapa del proyecto el simulador se pueda acercar cada vez más al funcionamiento real del filtro.

En la tabla 6.13 se muestra el resumen de los cambios incorporados que solo se hicieron sobre algunos planes, y en el caso de los planes con política de inventario periódica solo se consideró los con periodo de revisión diaria.

En la tabla se puede notar el efecto positivo que tuvo en rejuvenecimiento en los planes preventivos con políticas de revisión periódica, que en todos los casos mejoró levemente en cuanto a disponibilidad y costo total (la utilización no se vio afectada por el rejuvenecimiento). No se puede decir lo mismo respecto al caso con política de inventario continuo que no refleja efecto alguno en cuanto sus indicadores.

La mejora es alentadora para poder seguir trabajando en ella, esto implica que el mantenimiento preventivo si beneficia a las piezas, pero aún no lo suficiente para superar la disponibilidad de su par con mantenimiento correctivo, que está por sobre su valor.

En cuanto a los costos si se genera una ventaja considerable en los planes con política de revisión periódica, donde se presenta una reducción aproximadamente del 25% de los costos totales, que provienen principalmente en la reducción del número promedio de fallas.

Finalmente se puede concluir que dentro de las mejoras que se harán en la segunda etapa del proyecto es necesario buscar una calibración óptima en los datos, mejorar el enfoque del envejecimiento del equipo y agregar el rejuvenecimiento a la estrategia de mantención para poder dejar el simulador en óptimas condiciones.

Tabla 6.13- Incorporación de rejuvenecimiento en los planes.

Mantenimiento	Política de inventario	Nivel de servicio	Rejuvenecido	Disponibilidad	Utilización	Costo total
Preventivo	(s, S, R)	90%	Sí	99,534%	100%	484030,170
Preventivo	(s, S, R)	90%	No	99,526%	100%	664.140,720
Correctivo	(s, S, R)	90%	No	99,650%	100%	545.404,41
Preventivo	(s, S, R)	99%	Sí	99,534%	100%	518.391,430
Preventivo	(s, S, R)	99%	No	99,526%	100%	732.873,927
Correctivo	(s, S, R)	99%	No	99,650%	100%	614.152,33
Preventivo	(S, R)	No aplica	Sí	99,522%	100%	433.293,610
Preventivo	(S, R)	No aplica	No	99,516%	100%	554.097,235
Correctivo	(S, R)	No aplica	No	99,641%	100%	422.082,53
Preventivo	(Q, r)	99%	Sí	99,534%	100%	514.087,920
Preventivo	(Q, r)	99%	No	99,534%	100%	514087,03
Correctivo	(Q, r)	99%	Sí	99,630%	99,983%	298.732,370

6.14 Análisis final

Para desarrollar el análisis final se pueden considerar cuatro panoramas distintos con respecto a los elementos evaluados, ya sea considerando todos los planes (incluyendo planes sensibilizados) o los planes originales, y decidiendo bajo el alero de la disponibilidad o de la utilización. Además al momento de tomar una decisión se puede establecer límites en los indicadores, por ejemplo un mínimo de disponibilidad aceptable y un costo máximo anual, panorama que se dejará como ejemplo en la figura 6.12.

El gráfico 6.8 muestra el panorama completo respecto a todos los planes evaluados y su comportamiento respecto a la disponibilidad. Allí se muestra como hay un grupo de planes que presenta una disponibilidad alta del 99,65% mientras otros planes disminuyen su disponibilidad bordeando el 98%.

La disponibilidad se mantiene relativamente estable y entregando resultados favorables, en promedio el 99%, esto se da a lo ya comentado durante el proyecto, los datos utilizados no son los óptimos y el enfoque utilizado dio los resultados esperados, por lo que no representa el comportamiento real del filtro, pero de todos modos permite notar diferencias

entre los planes, así lo muestra el gráfico, donde hay planes que logran la disponibilidad máxima, pero varían el costo, lo que ayuda bastante al momento de elegir un plan.

Del gráfico de la figura 6.8 se puede concluir que el plan óptimo, el con mayor disponibilidad y menor costo total es el plan 30: plan con mantenimiento correctivo y política de inventario (Q, r) sensibilizado en +20% y con un nivel de servicio del 90%. Dicho plan tiene una disponibilidad de 99,65% (disponibilidad máxima observada) y un costo anual de 84.260,136 USD. El plan que lo sigue es el mismo, pero con un nivel de servicio de 99%, el cual tiene la misma disponibilidad, pero difiere en el costo anual 84.260,528 USD, diferencia prácticamente nula, lo cual permite concluir que la diferencia entre los niveles de servicio no se ven reflejados en la mayoría los casos.

En la figura 6.9 se presenta la misma comparación, pero respecto a la utilización, segundo indicador evaluado, donde un grupo se concentra en una utilización del 100%, o sea no hay tiempo ocioso a causa de espera de repuestos. Esto se debe a que los niveles de servicio lograron el objetivo buscado: no generar quiebres de stock, y así se presenció en la mayoría de los casos logrando dicha utilización.

Los casos que presentan utilización bajo el 100% son planes con políticas de inventario (S, R) y (Q, r) que generaron quiebres de stock, mayoritariamente los sensibilizados en -20%, dejando muy al límites los parámetros que aseguran que esto no ocurra: punto de re orden y tamaño de lote.

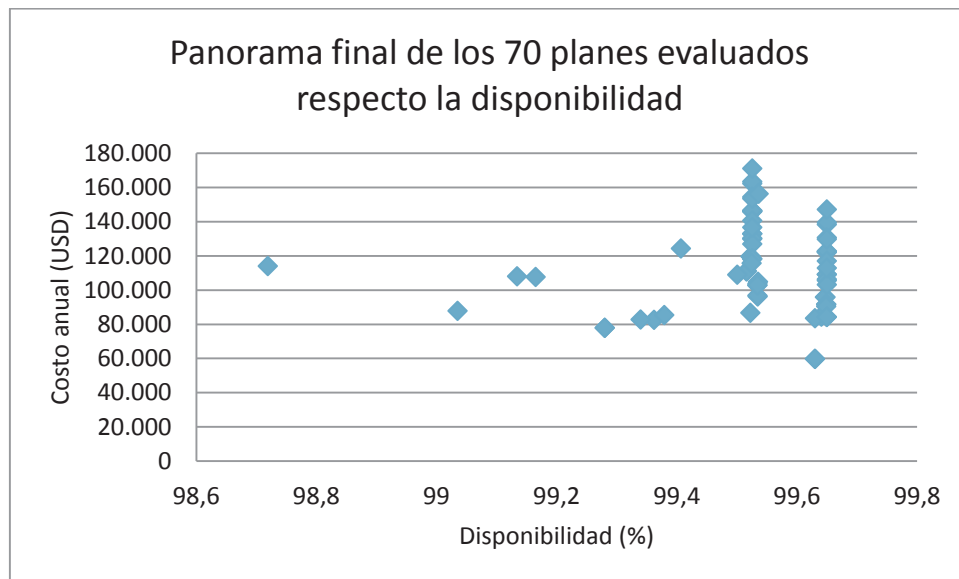


Figura 6.8- Gráfico del panorama final de los 70 planes evaluados respecto a la disponibilidad.

De acuerdo a la utilización se obtiene otro plan óptimo si se consideran todos los evaluados como se muestra en la figura 6.9, este es el plan 25: plan con mantenimiento correctivo y política de inventario con revisión periódica del tipo (S, R) no sensibilizada y con revisiones semanales, generando una utilización del 100% y un costo anual 83.446,54 USD, lo cual no implica que es el mejor plan, ya que este caso presenta una disponibilidad de 99,63%.

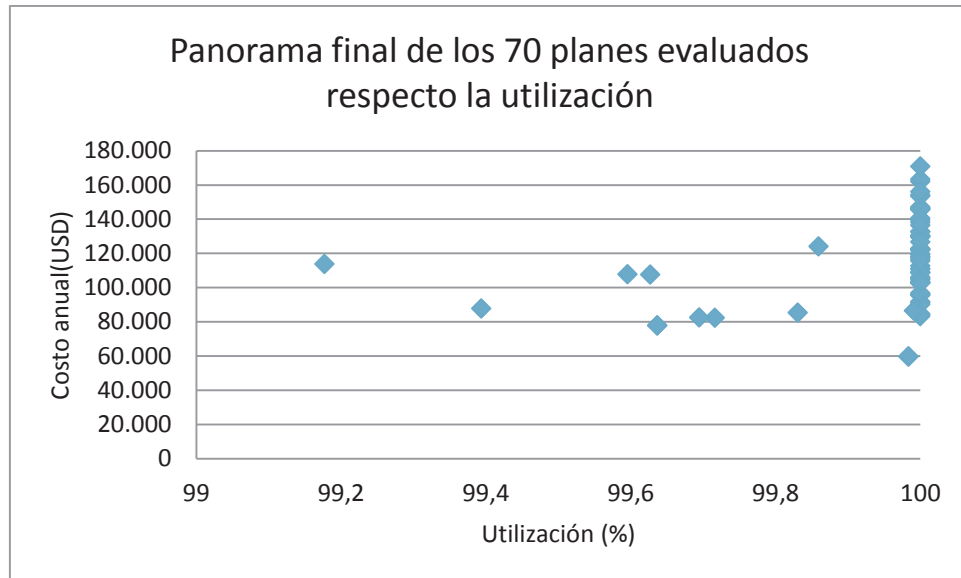


Figura 6.9- Gráfico del panorama final de los 70 planes evaluados respecto a la utilización.

Luego si solo se consideran los planes originales y se evalúa respecto a la disponibilidad, como se muestra en la figura 6.10, se tiene que el plan óptimo es el plan 1: plan con mantenimiento correctivo y política de inventario con revisión periódica del tipo (s, S, R), con nivel de servicio del 90% y con revisiones por turnos.

Finalmente si se consideran solos los planes originales y se decide en base a la utilización como el gráfico de la figura 6.11 el plan óptimo sería el plan 25: plan con mantenimiento correctivo con política de inventario con revisión periódica del tipo (S, R) y con revisiones semanales.

Respecto al nivel de servicio no se pudo concluir si favorece o no en la disponibilidad, ya que en la mayoría de los casos no se presentó diferencia en el indicador en los mismos planes, pero con distinto nivel de servicio, en cambio sí se presentaron diferencias en cuanto al costo, que lógicamente aumentaba a medida que se aseguraba un mayor nivel de servicio.

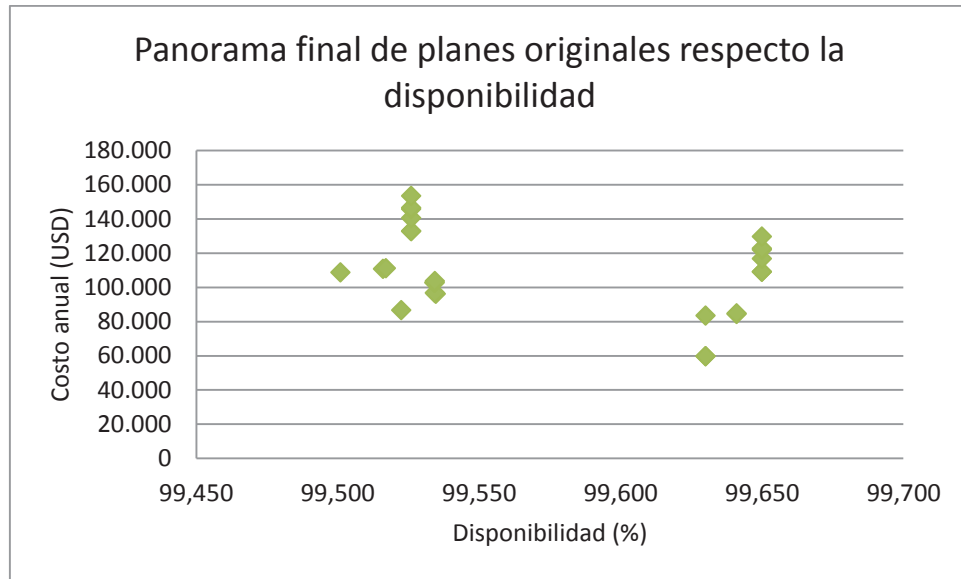


Figura 6.10- Gráfico del panorama final de los planes originales respecto a la disponibilidad.

De acuerdo a los periodos de revisión periódica tampoco se pudo obtener conclusiones definitivas respecto a la ventaja generada respecto a la disponibilidad, ya que planes iguales con distintos periodos de revisión podían obtener la disponibilidad. No así el costo, que aumentaba mientras mayor era el periodo de revisión, ya que aumentan los costos de comprar y de inventario.

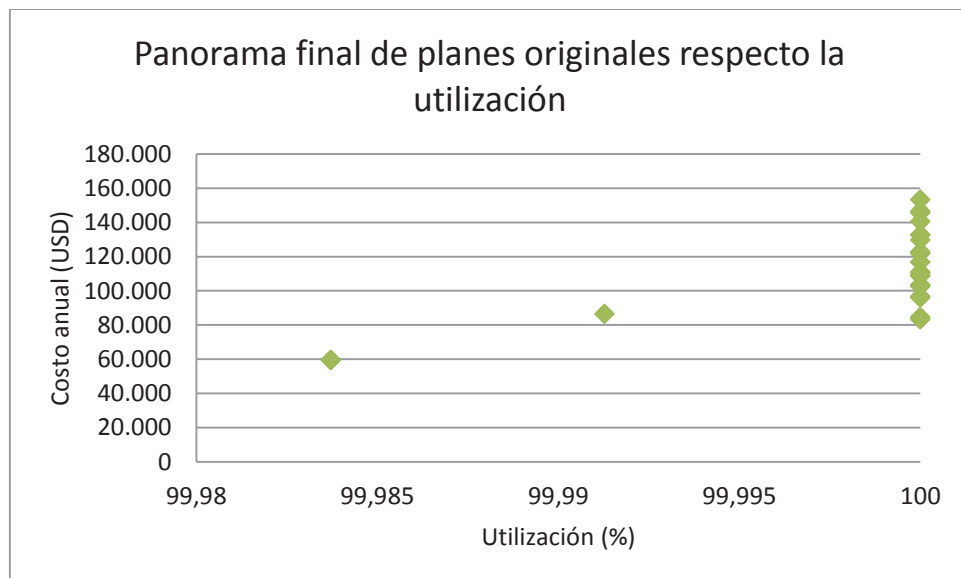


Figura 6.11- Gráfico del panorama final de los planes originales respecto a la utilización.

Para profundizar más en el análisis de los resultados se presenta la figura 6.12 con un ejemplo del caso evaluado, pero como si estuviese limitado en costos con un máximo de 100.000 USD anuales y con una disponibilidad mínima 99,6%. En este caso el óptimo cambia, ya que los indicadores están limitados, y en este caso sería el plan 19: plan de mantenimiento correctivo y política de inventario del tipo (S, R) con revisión por turnos.

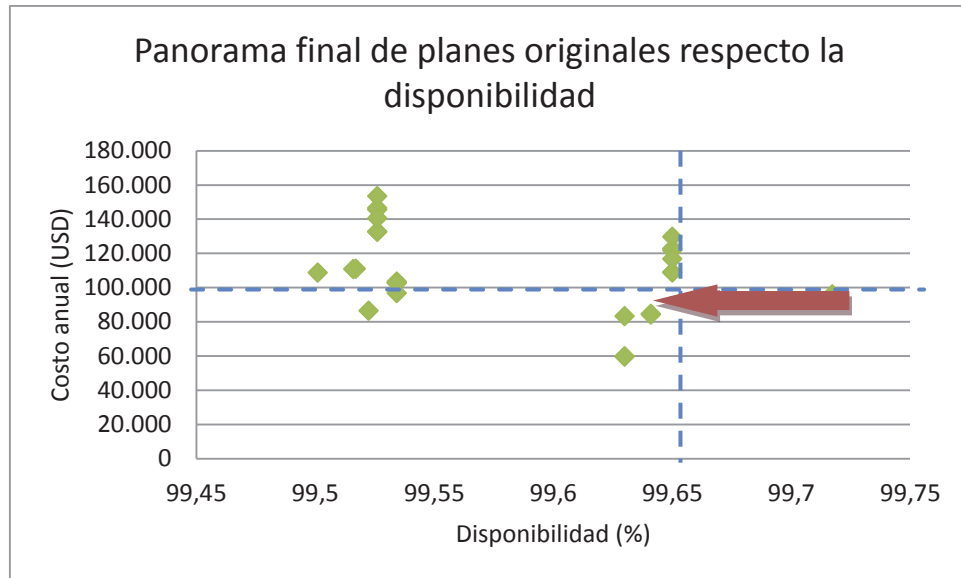


Figura 6.12- Gráfico de elección de plan con indicadores limitados.

De este modo se puede concluir que la elección del plan óptimo dependerá de los límites que la empresa establezca con relación a sus indicadores, y qué indicadores elijan. En esta evaluación se optó por los que fueron más sencillos a evaluar, pero en un caso real se deberían agregar otros indicadores como la confiabilidad y detallar otros costos que pueden ser cruciales al momento de diseñar la política de inventarios.

En la sección de anexos se adjunta la tabla de resultados finales.

7 Conclusiones

El objetivo del simulador es ser una herramienta útil para la toma de decisión en un equipo, inicialmente orientado a la minería, pero que se debería poder implementar en cualquier tipo de industria.

Bajo el desarrollo del simulador nacieron distintos proyectos que continuarán la misma línea de trabajo con el objetivo de mejorar dicha herramienta e implementarla en empresas reales.

Una de las opciones que se puede generar a través del simulador y el proyecto de la Minera Esperanza es representar el comportamiento global del proceso de filtrado incorporando los dos filtros Larox en la simulación, que funcionen de manera paralela y desfasada, como es en la realidad, y así poder decidir qué planes incorporar al proceso de filtrado. Además para dicho caso sería necesario incluir todas las fallas que afectan al proceso de filtrado, tanto críticas como no críticas, y de ese modo obtener un escenario real del proceso en el muelle de la Minera Esperanza.

Independiente del proyecto desarrollado con la Minera Esperanza, se espera robustecer el modelo incorporando otros elementos de la cadena de suministros, como por ejemplo considerar distintos proveedores de repuestos, incluir costos de transporte, variar el tiempo real de mantenimiento preventivo, incorporar modelos con mantenimiento predictivo, que llevarán a la herramienta a ser de verdadera utilización y aporte a la empresa.

Otra alternativa que se desarrollará en el futuro es un modelo de optimización en cuanto a la elección de políticas de inventario y mantenimiento, incorporando elementos de la cadena de suministros no señalados en el simulador, pero son parte importante al momento de decidir.

La herramienta desarrollada logró el objetivo de representar un prototipo y concluir aspectos y diferencias en cuanto a los planes evaluados y el impacto que tienen las políticas de inventario y mantenimiento.

Los resultados obtenidos no son determinante aún para la toma de decisiones, tal como queda demostrado en el análisis de resultados, donde sólo se pudo generar un panorama general del comportamiento del filtro, pero no se pudo obtener un escenario comparable con la realidad, por lo cual se concluye que la herramienta elaborada es solo un prototipo inicial apto para su perfeccionamiento.

Los indicadores analizados fueron útiles para generar una idea del funcionamiento del filtro a medida que fallaba, pero no son suficientes para la toma de decisión de una empresa al momento de optar por un modelo de mantenimiento u otro, es necesario incluir indicadores

como la confiabilidad que señalan la probabilidad que tiene un equipo de asegurar su funcionamiento sin fallar en un determinado periodo, pero para lograr esto se debe realizar un estudio profundo respecto a cómo se puede incluir el cálculo de la confiabilidad.

En la actual evaluación no se pudo generar un panorama real del comportamiento del filtro, como en un inicio se esperaba, ya que los datos utilizados como parámetros no fueron suficientes y en algunos casos se debieron adaptar cálculos y estimaciones para poder utilizarlos en el simulador. Por lo tanto, para llegar a un resultado real se debe hacer un estudio paralelo alineado a los objetivos del simulador u modelo a implementar.

De acuerdo a lo concluido respecto a los resultados es crucial decir que falta perfeccionar el simulador, incorporando elementos más detallados, por parte de los datos, y otros indicadores que permitan llegar a conclusiones más detalladas.

Como se mencionó anteriormente la idea es incluir elementos de la cadena de suministros que fueron obviados en el proyecto, de modo de simplificarlo y obtener un prototipo base, pero que llevarán a la herramienta a generar el escenario que se desea encontrar y que sea útil. También es ideal que el simulador sea flexible en cuanto a la interacción de éste con otros equipos o la adición de fallas, críticas y no críticas.

Finalmente se puede concluir que el enfoque utilizado debe ser perfeccionado si se desea seguir la orientación a repuestos, ya que los datos obtenidos y utilizados son del equipo respecto al repuesto y no de los repuestos como tal. Eso generó una complicada adaptación del comportamiento real del filtro al simulador, generando menos fallas al mes, situación difícil de mejorar sin un levantamiento de información detallado y sin acceso a los proveedores de los repuestos. Una opción posible es adaptar el simulador, enfocándose al equipo como un generador de fallas, al estilo caja negra, pero sin diferenciar que repuesto falla, ignorando el comportamiento de estos, pero enfatizándose en el comportamiento global del equipo y su desgaste.

Bibliografía

- Barroso, Fernando. (2012) **Introducción sobre la historia y evolución de la gestión del mantenimiento.** Ago. Disponible vía web en <http://es.slideshare.net/VizZioR/gestion-de-mantenimiento>.
- Bottini, Roberto (2010) **Mantenimiento y Confiabilidad: modelos de optimización.** Nov. Disponible vía web en <https://es.scribd.com/doc/44388040/confiabilidad-de-mantenimiento>.
- Cavaliere,S;Garreti,M;Pinto,R (2008) Production Planning and Control **A decision-making framework for managing maintenance spare parts**, London, v.19, n.4, p. 379-396, Jun.
- Crespo, Adolfo; Gómez, Juan; López, Mónica. (2013) Computers in Industry. **Modelling using UML and BPMN the integration of open reliability, maintenance and condition monitoring management systems: an application in an electric transformer system.** Sevilla, v.64, n.5, p.524-542, Mar.
- C.O. Hamilton (2012) **Maintenance planning in underground mining operations.** Jul. Disponible vía web en <http://www.maintenanceworld.com/wp-content/uploads/2013/07/Maintenance-Planning-Underground-Mining-Operations.pdf>
- Ellmann, Enrique (2008) **Confiabilidad: Una estrategia de negocios diferente.** Disponible vía web en <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/Ellmann.pdf>
- Espinoza, Margaret (2011). **¿Qué es una caja negra?** Feb. Disponible vía web en <http://margaespinoza.com>.
- García, Santiago (2013) **Indicadores en mantenimiento.** Nov. Disponible vía web en <https://es.scribd.com/doc/73300323/Calculo-Indicadores-de-Mantenimiento>
- Juan, A; Serrat, C (2006) **Distribuciones habituales en fiabilidad.** Disponible vía web en http://www.uoc.edu/in3/e-math/docs/Q1P_EI_02.pdf
- Kennedy,W; Patterson,J; Fredendall,L(2002) International Journal of Production Economics. **An overview of recent literature on spare parts inventories.** Clemson, v.76, n.2, p.201-215. Mar.
- Klimasauskas, Rubén (2007) **Mantención en minería. Primera y segunda parte.** Mar. Disponible vía web en <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/notas/mineria2.pdf>.
- Krellis,O; Singleton, T (1998). **Mine maintenance - the cost of operation.** In: Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australia, p.81-90.

Halperin, Pablo (2010) **Un enfoque integral del mantenimiento en la actividad minera y su contribución a la rentabilidad.** Jun. Disponible vía web en <http://es.slideshare.net/phalperin/enfoque-integral-del-mantenimiento-en-la-industria-minera-4434081>

Law, Averill (2014) **Simulation modeling and analysis.** McGraw-Hill, cap.1.

Louit, D; Pascual, R; Banjevic, D; Jardine ,A (2010) Journal of the Operational Research Society. **Optimization models for critical spare parts inventories—a reliability approach** v.62, n.6, p. 992–1004. Jun.

Mesa, Dairo; Ortiz, Yesid; Pinzón Manuel (2006). Revista Scientia et Technica. **La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento,** v.1, n.30, p.155-160.

Minera Esperanza (2013). Información general. Disponible vía web en <http://www.mineraesperanza.cl>.

Minera Esperanza (2013). **Política de inventario.**

Minera Esperanza (2013). **Proyecto Gestión Integrada de Materiales Muelle Minera Esperanza.**

Pauro, Ricardo (2008) **Indicadores de mantenimiento: Qué se debe medir y porqué.** Disponible vía web en <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/notas/IndicadMant.pdf> .

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

Revista Online Área Minera (2013). Entrevista Jaime tapia, superintendente Mantención Mina, Minera Esperanza: “El mantenimiento predictivo es vital para el éxito del modelo de gestión de Minera Esperanza”. Disponible vía web en <http://www.aminera.com>. Sep.

Roda, I; Macchi, M; Fumagalli,L; Viveros,P (2012) On the classification of spare parts with a multi-criteria perspective. In: 2nd Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Services and Technology. Sevilla: p.19-24.

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

Simchi-Levi, David; Kaminsky, Philip; Simchi-Levi, Edith (2004) **Managing the supply chain**. McGraw-Hill, Cap.1,p.1-3.

SPM Ingeniería en Mantenimiento (2013). Desarrollo de Estrategias de mantenimiento. Disponible vía web en <http://www.spm-ing.com>.

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

Anexos

Anexo 1- Detalle de planes evaluados

Plan	Tipo mantenimiento	Revisión de inventario	Nivel de servicio	Periodos de revisión	Con rejuvenecimiento
Plan 1	Correctivo	Periódico (s,S,R)	90%	Turnos	No
Plan 2	Correctivo	Periódico (s,S,R) -20%	90%	Turnos	No
Plan 3	Correctivo	Periódico (s,S,R) +20%	90%	Turnos	No
Plan 4	Correctivo	Periódico (s,S,R)	99%	Turnos	No
Plan 5	Correctivo	Periódico (s,S,R) -20%	99%	Turnos	No
Plan 6	Correctivo	Periódico (s,S,R) +20%	99%	Turnos	No
Plan 7	Correctivo	Periódico (s,S,R)	90%	Diario	No
Plan 8	Correctivo	Periódico (s,S,R) -20%	90%	Diario	No
Plan 9	Correctivo	Periódico (s,S,R) +20%	90%	Diario	No
Plan 10	Correctivo	Periódico (s,S,R)	99%	Diario	No
Plan 11	Correctivo	Periódico (s,S,R) -20%	99%	Diario	No
Plan 12	Correctivo	Periódico (s,S,R) +20%	99%	Diario	No
Plan 13	Correctivo	Periódico (s,S,R)	90%	Semanal	No
Plan 14	Correctivo	Periódico (s,S,R) -20%	90%	Semanal	No
Plan 15	Correctivo	Periódico (s,S,R) +20%	90%	Semanal	No
Plan 16	Correctivo	Periódico (s,S,R)	99%	Semanal	No
Plan 17	Correctivo	Periódico (s,S,R) -20%	99%	Semanal	No
Plan 18	Correctivo	Periódico (s,S,R) +20%	99%	Semanal	No
Plan 19	Correctivo	Periódico (S,R)	No aplica	Turnos	No
Plan 20	Correctivo	Periódico (S,R) -20%	No aplica	Turnos	No
Plan 21	Correctivo	Periódico (S,R) +20%	No aplica	Turnos	No
Plan 22	Correctivo	Periódico (S,R)	No aplica	Diario	No
Plan 23	Correctivo	Periódico (S,R) -20%	No aplica	Diario	No
Plan 24	Correctivo	Periódico (S,R) +20%	No aplica	Diario	No
Plan 25	Correctivo	Periódico (S,R)	No aplica	Semanal	No
Plan 26	Correctivo	Periódico (S,R) -20%	No aplica	Semanal	No
Plan 27	Correctivo	Periódico (S,R) +20%	No aplica	Semanal	No
Plan 28	Correctivo	Continuo (Q,R)	90%	No aplica	Sí
Plan 29	Correctivo	Continuo (Q,R) -20%	90%	No aplica	Sí
Plan 30	Correctivo	Continuo (Q,R) +20%	90%	No aplica	Sí
Plan 31	Correctivo	Continuo (Q,R)	99%	No aplica	Sí
Plan 32	Correctivo	Continuo (Q,R) -20%	99%	No aplica	Sí
Plan 33	Correctivo	Continuo (Q,R) +20%	99%	No aplica	Sí
Plan 34	Preventivo	Periódico (s,S,R)	90%	Turnos	No
Plan 35	Preventivo	Periódico (s,S,R) -20%	90%	Turnos	No
Plan 36	Preventivo	Periódico (s,S,R) +20%	90%	Turnos	No
Plan 37	Preventivo	Periódico (s,S,R)	99%	Turnos	No

Plan 38	Preventivo	Periódico (s,S,R) -20%	99%	Turnos	No
Plan 39	Preventivo	Periódico (s,S,R) +20%	99%	Turnos	No
Plan 40	Preventivo	Periódico (s,S,R)	90%	Diario	No
Plan 41	Preventivo	Periódico (s,S,R) -20%	90%	Diario	No
Plan 42	Preventivo	Periódico (s,S,R) +20%	90%	Diario	No
Plan 43	Preventivo	Periódico (s,S,R)	99%	Diario	No
Plan 44	Preventivo	Periódico (s,S,R) -20%	99%	Diario	No
Plan 45	Preventivo	Periódico (s,S,R) +20%	99%	Diario	No
Plan 46	Preventivo	Periódico (s,S,R)	90%	Semanal	No
Plan 47	Preventivo	Periódico (s,S,R) -20%	90%	Semanal	No
Plan 48	Preventivo	Periódico (s,S,R) +20%	90%	Semanal	No
Plan 49	Preventivo	Periódico (s,S,R)	99%	Semanal	No
Plan 50	Preventivo	Periódico (s,S,R) -20%	99%	Semanal	No
Plan 51	Preventivo	Periódico (s,S,R) +20%	99%	Semanal	No
Plan 52	Preventivo	Periódico (S,R)	No aplica	Turnos	No
Plan 53	Preventivo	Periódico (S,R) -20%	No aplica	Turnos	No
Plan 54	Preventivo	Periódico (S,R) +20%	No aplica	Turnos	No
Plan 55	Preventivo	Periódico (S,R)	No aplica	Diario	No
Plan 56	Preventivo	Periódico (S,R) -20%	No aplica	Diario	No
Plan 57	Preventivo	Periódico (S,R) +20%	No aplica	Diario	No
Plan 58	Preventivo	Periódico (S,R)	No aplica	Semanal	No
Plan 59	Preventivo	Periódico (S,R) -20%	No aplica	Semanal	No
Plan 60	Preventivo	Periódico (S,R) +20%	No aplica	Semanal	No
Plan 61	Preventivo	Continuo (Q,R)	90%	No aplica	Sí
Plan 62	Preventivo	Continuo (Q,R) -20%	90%	No aplica	Sí
Plan 63	Preventivo	Continuo (Q,R) +20%	90%	No aplica	Sí
Plan 64	Preventivo	Continuo (Q,R)	99%	No aplica	Sí
Plan 65	Preventivo	Continuo (Q,R) -20%	99%	No aplica	Sí
Plan 66	Preventivo	Continuo (Q,R) +20%	99%	No aplica	Sí
Plan 67	Preventivo	Periódico (s,S,R)	90%	Diario	Sí
Plan 68	Preventivo	Periódico (s,S,R)	99%	Diario	Sí
Plan 69	Preventivo	Periódico (S,R)	No aplica	Turnos	Sí
Plan 70	Preventivo	Continuo (Q,R)	99%	No aplica	No

Anexo 2- Parámetros de la simulación y su modo de obtención

Parámetro/Falla	Falla Tela	Falla Placa	Falla Grampa	Modo de obtención del dato
Lead Time (días)	30	15	7	Estimado de acuerdo a necesidades del problema
Costo compra (USD)	14569,86	2117,35	976,55	Calculado de datos reales
Costo inventario (USD)	2913,972	423,47	195,31	Calculado de datos reales
Costo inventario diario (USD)	7,983485	1,1601918	0,53509589	Calculado de datos reales
Tiempo reemplazo (horas)	4,485	4,495	1,28	Calculado de datos reales
Vida útil (días)	180	180	180	Estimado de acuerdo a necesidades del problema
Demanda mensual	3	4	2	Estimado con datos reales
Q, S para modelo (Q,r) y (S,R) respectivamente	3	4	2	Estimado con datos reales
r (90%)	6	4	2	Estimado con datos reales
r (99%)	8	5	3	Estimado con datos reales
s (90%)x turno	6	4	2	Estimado con datos reales
s (90%) diario	6	4	2	Estimado con datos reales
s (90%) semanal	7	6	3	Estimado con datos reales
s (99%) x turno	8	5	3	Estimado con datos reales
s (99%) diario	8	6	3	Estimado con datos reales
s (99%)semanal	9	7	4	Estimado con datos reales
S máx. (90%)x turno	9	8	4	Estimado con datos reales
S máx. (90%) diario	9	8	4	Estimado con datos reales
S máx. (90%) semanal	10	10	5	Estimado con datos reales
S máx. (99%) x turno	11	9	5	Estimado con datos reales
S máx. (99%) diario	11	10	5	Estimado con datos reales
S máx. (99%)semanal	12	11	6	Estimado con datos reales

Anexo 3- Tabla de resultados

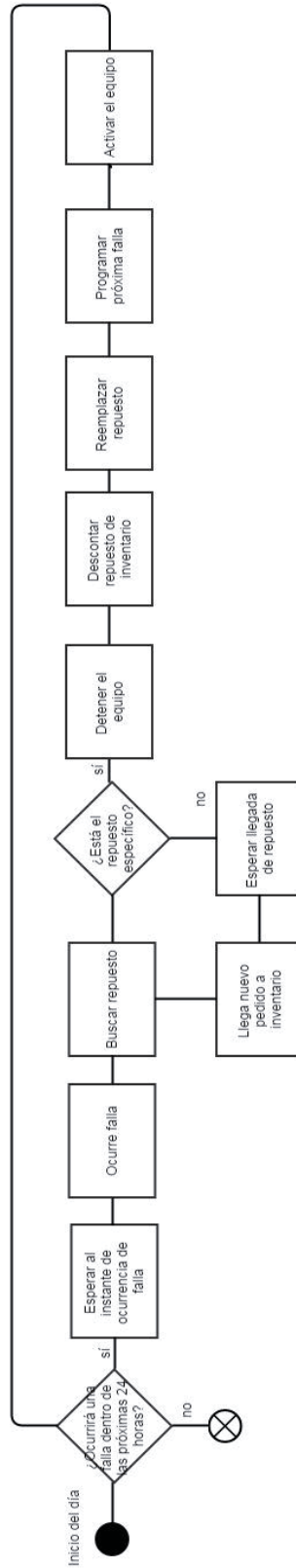
Plan	Disponibilidad (%)	Utilización (%)	Costo compra repuestos	Costo inventario	Costo por MC	Costo por MP	Costo anual USD
Plan 1	99,65	100	377.892	130.417	37.089	---	109.079,38
Plan 2	99,648	100	344.841	97.007	37.298	---	95.829,13
Plan 3	99,65	100	411.363	163.793	37.093	---	122.450,06
Plan 4	99,65	100	410.123	162.538	37.089	---	121.949,95
Plan 5	99,65	100	369.298	121.067	37.097	---	105.492,49
Plan 6	99,65	100	450.266	203.999	37.080	---	138.269,06
Plan 7	99,65	100	377.887	130.420	37.098	---	109.080,88
Plan 8	99,647	100	344.799	97.007	37.343	---	95.829,77
Plan 9	99,65	100	411.331	163.801	37.095	---	122.445,24
Plan 10	99,65	100	412.235	164.820	37.098	---	122.830,47
Plan 11	99,65	100	371.104	123.116	37.077	---	106.259,29
Plan 12	99,65	100	453.289	206.953	37.082	---	139.464,75
Plan 13	99,65	100	397.207	150.021	37.073	---	116.860,38
Plan 14	99,65	100	362.859	115.678	37.073	---	103.122,01
Plan 15	99,65	100	431.555	184.234	37.073	---	130.572,54
Plan 16	99,65	100	429.438	182.190	37.073	---	129.740,23
Plan 17	99,65	100	387.755	138.913	37.096	---	112.752,97
Plan 18	99,65	100	472.419	226.208	37.082	---	147.141,98
Plan 19	99,641	100	321.716	63.937	37.980	---	84.726,47
Plan 20	99,362	99,716159	300.555	44.328	67.574	---	82.491,34
Plan 21	99,649	100	339.699	82.009	37.126	---	91.766,74
Plan 22	99,641	100	320.810	63.227	38.046	---	84.416,51
Plan 23	99,34	99,694452	299.649	43.760	69.919	---	82.665,43
Plan 24	99,649	100	338.656	81.311	37.126	---	91.418,72
Plan	99,63	100	317.096	60.971	39.165	---	83.446,54

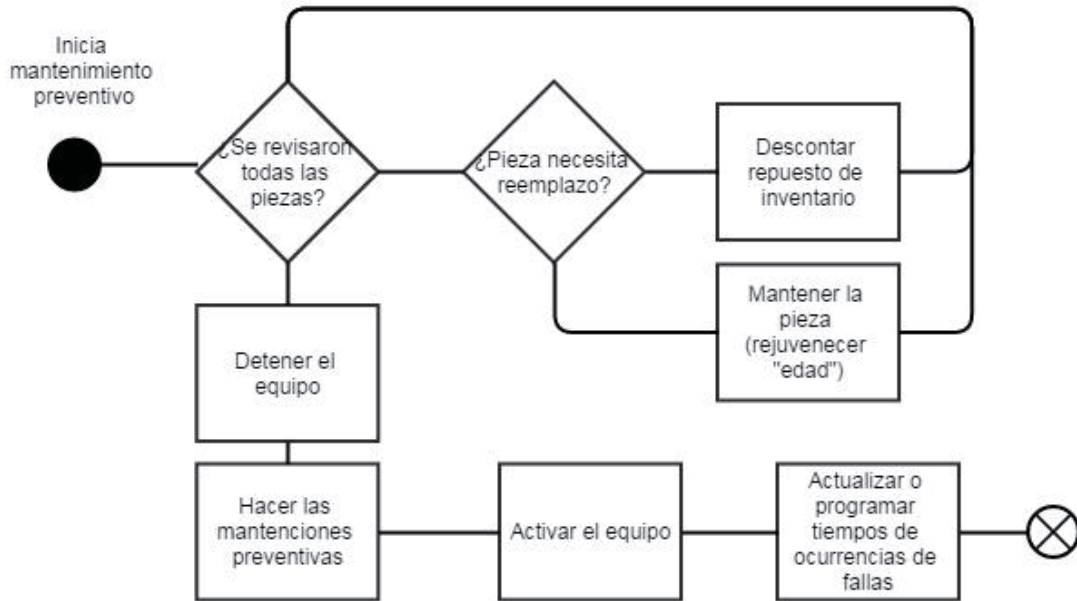
25							
Plan 26	99,035	99,393444	295.299	41.586	102.279	---	87.832,81
Plan 27	99,649	100	335.293	79.036	37.173	---	90.300,476
Plan 28	99,630	99,983718	298.731	50.017,050	38.925,60 0		59.746,270
Plan 29	99,28	99,63669	280.915	32.094	76.459		77.893,452
Plan 30	99,65	99,999709	316.159	68.017	37.124		84.260,136
Plan 31	99,630	99,983718	298.732	50.018,690	38.925,60 0		59.746,474
Plan 32	99,28	99,636778	280.913	32.097	76.448		77.891,720
Plan 33	99,65	99,999709	316.160	68018,3	37124,22		84.260,528
Plan 34	99,526	100	485.215	128.780	30.861	19.360	132.843,099
Plan 35	99,523	100	452.264	95.372	31.192	19.356	119.636,938
Plan 36	99,526	100	518.382	162.172	30.832	19.360	146.149,233
Plan 37	99,526	100	517.446	160.896	30.861	19.360	145.712,563
Plan 38	99,526	100	478.042	120.847	30.825	19.360	129.814,851
Plan 39	99,526	100	558.528	202.212	30.884	19.360	162.196,817
Plan 40	99,526	100	485.218	128.708	30.855	19.360	132.828,144
Plan 41	99,523	100	451.871	95.314	31.209	19.353	119.549,455
Plan 42	99,526	100	518.445	162.080	30.876	19.360	146.152,200
Plan 43	99,526	100	519.566	163.093	30.855	19.360	146.574,785
Plan 44	99,526	100	479.382	121.932	30.865	19.360	130.307,985
Plan 45	99,526	100	561.689	205.126	30.861	19.360	163.407,447
Plan 46	99,526	100	504.668	148.061	30.852	19.360	140.587,906
Plan 47	99,526	100	470.314	113.726	30.881	19.360	126.856,245
Plan 48	99,526	100	539.016	182.277	30.849	19.360	154.300,319
Plan 49	99,526	100	536.899	180.230	30.849	19.360	153.467,421
Plan 50	99,526	100	495.138	137.545	30.872	19.360	136.583,035
Plan 51	99,526	100	580.265	224.230	30.846	19.360	170.940,421

Plan 52	99,517	100	435.520	68.799	31.802	19.345	111.093,160
Plan 53	99,165	99,627075	402.048	47.704	69.862	18.673	107.657,436
Plan 54	99,526	100	454.012	87.085	30.849	19.360	118.261,226
Plan 55	99,516	100	434.764	68.078	31.911	19.344	110.819,447
Plan 56	99,134	99,595559	400.626	47.024	73.135	18.616	107.880,271
Plan 57	99,526	100	453.396	86.373	30.864	19.360	117.998,767
Plan 58	99,501	100	427.570	63.709	33.510	19.333	108.824,492
Plan 59	98,719	99,176768	390.162	43.459	117.372	18.372	113.873,398
Plan 60	99,525	100	446.172	82.013	30.914	19.360	115.692,005
Plan 61	99,717	100	481.045	111.685,320	29.955,270	19.351,810	96.208,924
Plan 62	99,379	99,830543	427.103	72.202	47.439	18.589	85.420,524
Plan 63	99,536	100	524.138	150.118	29.866	19.360	104.827,558
Plan 64	99,534	100	514.088	138283,87	29998,19	19351,81	102.817,584
Plan 65	99,407	99,8594	461.115	96.750	44.435	18.647	216.412,604
Plan 66	99,537	100	552.971	179.035	29.773	19.360	266.821,640
Plan 67	99,534	100	484.030	128818,57	29988,64	19360	96.806,034
Plan 68	99,534	100	518.391	163205,07	29989,03	19360	103.678,286
Plan 69	99,522	99,991271	433.294	68604,12	31285,45	19307,35	86.658,722
Plan 70	99,534	100	514.087	138.284	29.998	19.352	102.817,406

Anexo 4- Diagrama de flujo Mantenimiento correctivo

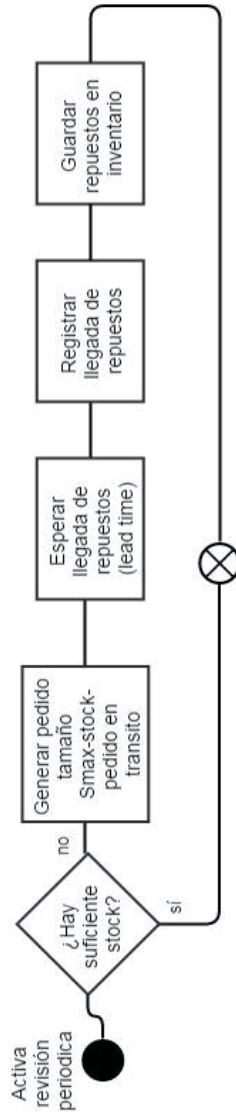
Falla en el equipo - Mantenimiento Correctivo



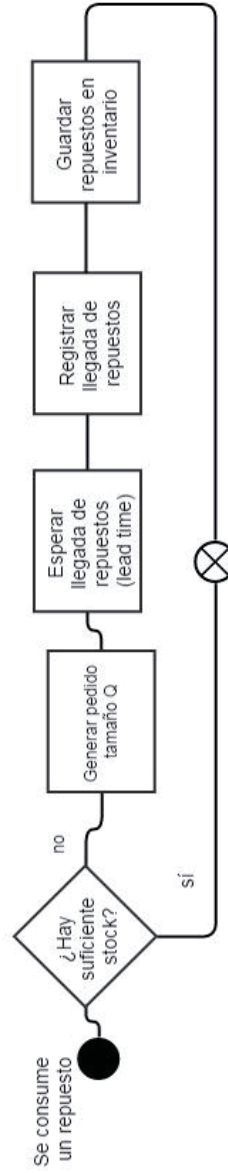
Anexo 5- Diagrama de flujo Mantenimiento preventivo**Mantenimiento Preventivo**

Anexo 6- Diagrama de flujo de Políticas de inventario

Política de inventario con revisión periódica



Política de inventario con revisión continua



Anexo 7- Actualizaciones del simulador.

Actualización	Razón
Actualización inicial	Ocurre en el instante 0 de la simulación e instancia los atributos en los valores que representan a un repuesto nuevo.
Actualización para próxima falla	Una vez ocurrida una falla en particular y su reparación respectiva, el simulador realiza ésta actualización para que se agende una próxima falla de dicho tipo representando la pieza como nueva.
Actualización por tiempo de reparación	Cuando una falla es gatillada toma un tiempo en ser reemplazada, tiempo que debe ser sumado a los instantes de ocurrencia de fallas de cada entidad que aún están en espera de activarse, debido a que en ese tiempo el equipo estuvo inactivo. Esto ya que se considera que hay desgaste en la pieza únicamente cuando el equipo está activo.
Actualización semanal	Cada semana se actualizan todos los atributos señalados con el fin de representar el envejecimiento de los repuestos, esto quiere decir que se le suma 7 días el atributo "tpoE" y se recalculan los otros valores.
Actualización post mantenimiento preventivo	Esta actualización se debe a la misma razón que la actualización por tiempo de reparación, ya que cuando el equipo está en mantenimiento preventivo se encuentra inactivo, por ende se le debe sumar ese tiempo a los instantes en que las fallas ocurrirán de manera de no alterar su comportamiento actual.