



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

MODELO DE TOMA DE DECISIONES DE MANTENIMIENTO PARA EVALUAR
IMPACTOS EN DISPONIBILIDAD, MANTENIBILIDAD, CONFIABILIDAD Y COSTOS.

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN GESTIÓN Y DIRECCIÓN DE
EMPRESAS

JOSÉ LUIS RIVERA ESTAY

PROFESOR GUÍA:
JUAN PABLO ZANLUNGO MATSUHIRO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
IVÁN BRAGA CALDERÓN
ESTEBAN MOLINA DÍAZ

SANTIAGO DE CHILE
2015

RESUMEN EJECUTIVO

El presente estudio tomó como tema central la mejora continua en los procesos de mantenimiento, y desde esta forma de administrar esta disciplina, este documento se hizo cargo de desarrollar un Modelo de Toma de decisiones de Mantenimiento para evaluar impactos en KPI de relevancia como lo son: Disponibilidad, Mantenibilidad, Confiabilidad y Costos.

La propuesta de valor radica en que la organización donde se desarrolla este estudio carecía de una forma de evaluar en tiempo real las decisiones que se toman. No existía una metodología que permita pre y post evaluar los efectos sobre indicadores de interés respecto a las decisiones que se toman sobre la administración del mantenimiento de equipos.

El objetivo del modelo desarrollado fue entregar los elementos de juicio técnico y económico para optimizar las decisiones de mantenimiento sobre los equipos móviles que administra la Superintendencia de Mantenimiento Mina subterránea, Gerencia Minas, Codelco División Andina.

Se escogió dentro de las técnicas de análisis de confiabilidad, la técnica llamada Cost Scatter Diagrams (CSD), además de evaluar la calidad e información con que se disponía para validar las conclusiones obtenidas a través de su representatividad.

La técnica permite representar los KPI de interés en distintos escenarios de acuerdo a sus eventos de falla, por lo que se propuso una metodología para también proyectar posibles resultados de acuerdo a propuestas de mejora y así identificar una tendencia para tomar la decisión de realizar o no la mejora.

Por último fue posible desarrollar un software que contenga los algoritmos de la metodología propuesta para aportar en oportunidad y valor sobre la gestión de la organización en cuestión.

Dentro de las conclusiones más relevantes de lo desarrollado se puede mencionar que se generó una solución de gestión en el ámbito del mantenimiento que permitió:

- La posibilidad de descartar entre propuestas de mejora para eventos de falla, mediante un modelo que permite pre evaluar escenarios.
- La posibilidad de medir la gestión de un número determinado de tomadores de decisión de mantenimiento a través de la post evaluación de mejoras, cuando ellas ya se han ejecutado.

TABLA DE CONTENIDO

	RESUMEN EJECUTIVO	2
	INTRODUCCIÓN	4
I.	DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y JUSTIFICACIÓN	5
II.	ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DISPONIBLE	10
III.	METODOLOGÍA Y JUSTIFICACIÓN	17
IV.	MÉTODO DE ANÁLISIS DE FLOTA	21
V.	TABLERO DE RESULTADOS	25
VI.	FALLAS Y MEJORA DE FLOTA A PROBAR EN MODELO	28
VII.	PRE Y POST EVALUACIÓN DE RESULTADOS	30
VIII.	RECOMENDACIONES	36
IX.	CONCLUSIONES	38
	BIBLIOGRAFÍA	40
	INDICE DE ILUSTRACIONES	41

INTRODUCCIÓN.

En un escenario de minería del cobre donde, actualmente conviven costos altos y precios no tan favorables como hace algunos años atrás, se hace cada vez más importante mirar hacia aquellos sectores de la cadena de generación de valor del producto, dónde es posible mejorar la gestión para que el proceso se haga más eficiente, obteniendo más con menos.

Con esta realidad, el mantenimiento se muestra como una de las áreas donde existen más espacios para las mejoras de gestión, ya que permite el replanteo continuo de sus procesos vía el perfeccionamiento de diferentes entradas tales como: estrategia de intervenciones de mantenimiento, uso racional de repuestos e insumos, buen uso de mano de obra, reducción de reproceso, prolongación de vida útil de componentes y eliminación de excesos, entre otros, obteniendo el mayor rendimiento de los activos vía aplicación de Ingeniería de mantenimiento.

En específico, los eventos de falla caracterizan la performance de un equipo. Describen que tan seguido fallan, cuánto dura la falla y en definitiva cuánto cuesta la gestión del activo.

De acuerdo a lo anterior, el presente estudio describe cómo se puede modelar el efecto de las mejoras de gestión, basadas en los eventos de falla, sobre los KPI de interés con que se mide y controla habitualmente una organización común de mantenimiento.

La idea es determinar las acciones y métricas de interés para pre y post evaluar efectos de mejoras en gestión, a través de un modelo desarrollado para las necesidades de una organización específica. El objetivo propuesto es obtener un modelo de toma de decisiones de mantenimiento para evaluar impactos de mejoras sobre eventos de falla, en indicadores tales como: Disponibilidad, Mantenibilidad, Confiabilidad y Costos.

En este contexto, se puede acotar que en la actualidad, existen iniciativas de análisis con software disponible en el mercado, que son capaces de analizar información de este tipo, es decir, capturar información de eventos de falla pasados, generando informes y proyecciones. El problema de los citados softwares, es que en general sólo son una muestra estándar de lo que sucede, ya que carecen de acercamiento a la realidad operativa, porque han sido desarrollados para equipos estándar, que en muchas oportunidades pueden distanciarse mucho de una realidad, por el simple hecho del lugar de operación y con mayor razón debido a que, en su mayoría evalúan equipos con característica de planta. Por otra parte el fuerte de estos análisis es poner su foco en modelar lo sucedido sin oportunidad de pre evaluar iniciativas.

Surge de esto la propuesta motivo de un estudio que proponga una metodología de análisis personalizada, que ésta pueda ser probada con una iniciativa en concreto y entregar además una propuesta de valor que efectivamente entregue el mejor costo con el mayor rendimiento posible de los activos en responsabilidad.

I. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y JUSTIFICACIÓN.

La organización de mantenimiento donde se realiza el presente estudio, es la Superintendencia de Mantenimiento Mina Subterránea, perteneciente a la Gerencia Minas, Codelco División Andina.

La Superintendencia, se caracteriza por administrar el mantenimiento con una organización compuesta por personal propio, realizando la ingeniería y ejecución del mantenimiento con una interacción mínima de personal externo a la División. Cerca de 200 personas ejecutan la gestión del mantenimiento de equipos mina, organizándose en turnos 4x4, con 4 días de trabajo y 4 días de descanso, de 12 [horas]. De esta forma se desprende que la ejecución del mantenimiento y el ingreso de información relacionada, se desenvuelve con la acción de una gran cantidad de personas, que además rotan con una periodicidad bastante elevada, lo que agrega una importancia especial a la estandarización de prácticas, ya que de ellas dependerá la validez de la información utilizada para los análisis a realizar.

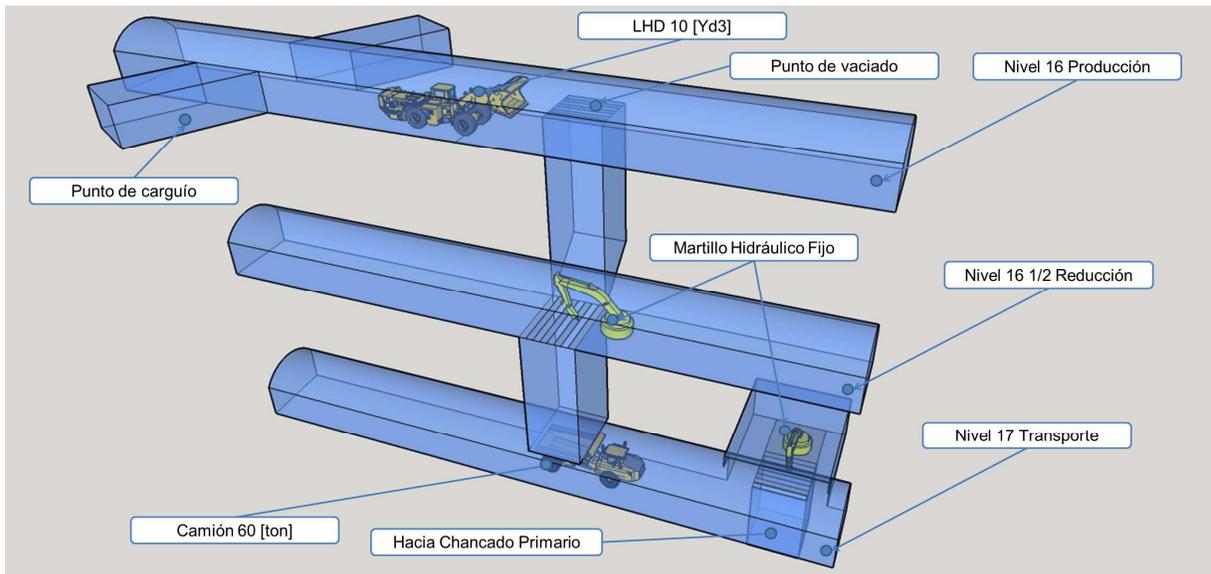
La instalación de la mina subterránea se ubica a 3.500 [metros] de altura y a 8 [km] desde la superficie con aproximadamente 120 [km] desde Santiago, en la cordillera de la V región de Valparaíso. El clima característico de la zona genera constantes nevadas y cierres de caminos que aíslan la operación, por lo que la logística de repuestos e insumos es un factor preponderante en la administración del mantenimiento en cuestión.

Esta Superintendencia, administra el mantenimiento de todos los equipos mina subterránea, pudiendo contar entre ellos, Equipos móviles de producción, Equipos fijos de producción, Equipos de desarrollo mina, Equipos de apoyo, Infraestructura eléctrica y electrónica, con un parque de más de 200 equipos. Las flotas de interés productivo principal, se refieren a Equipos móviles, 08 cargadores LHD y 10 camiones de bajo perfil, ya que son equipos prácticamente sin redundancia y además existe un número mínimo de ellos con que se puede lograr la meta productiva diaria que asciende a las 40.000 toneladas de mineral, a poner en disposición de la planta concentradora.

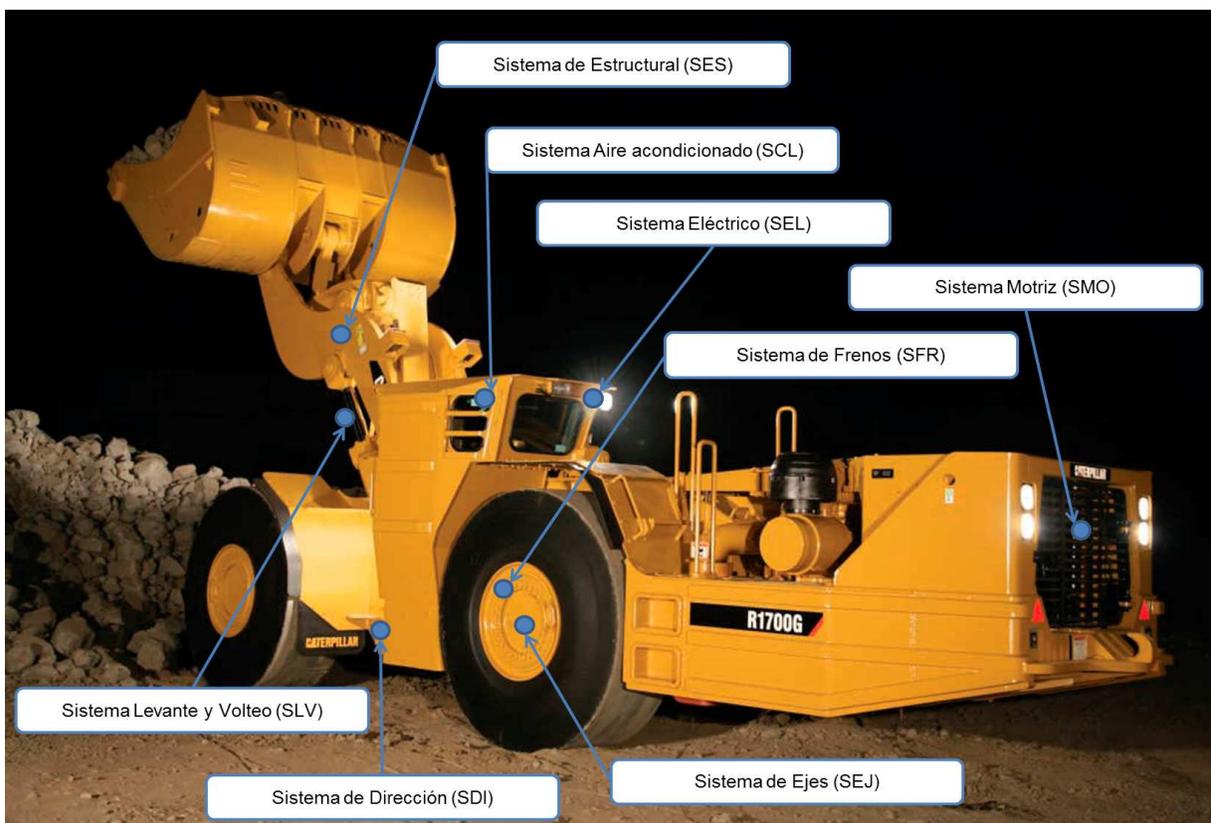
El estudio sólo aborda la gestión del mantenimiento para la flota de 08 equipos LHD de producción, ya que ésta es una flota homogéneamente joven con aproximadamente 4000 [hrs] cada equipo y además de marca única Caterpillar. Una flota con estas características, se configura como un buen volumen de control para evaluar posibles acciones de mejora y sus distintos resultados por sobre indicadores de interés, ya que permite estandarizar prácticas, materiales e insumos y lograr un impacto visible y no reducido por la influencia de vicios anteriores. Lo anterior otorga una importante base para la validación de los análisis de data a obtener.

El LHD Caterpillar R1700G es un equipo de carguío de bajo perfil para minería subterránea con una capacidad de balde para 10 [Yd³]. Actualmente en Mina Subterránea División Andina se cuenta con 08 equipos con un rendimiento de producción aproximado de 350 [ton/hr] cada uno, siendo parte de la línea de producción principal de la mina, en la etapa de explotación llamada III Panel, como se muestra en Ilustración 1. El equipo como se muestra en Ilustración 2, posee a su vez 08 sistemas principales, mediante los cuales se pueden agrupar por pertenencia todos

los eventos de falla. La Metodología de mantenimiento aplicable a este tipo de equipos es un mantenimiento preventivo por horas de operación y un mantenimiento correctivo para corregir eventos de falla.



Ilustraci3n 1. L3nea de producci3n III Panel Mina Subterránea, Divisi3n Andina.



Ilustraci3n 2. 08 sistemas principales LHD R1700G.

El mercado objetivo de este estudio posee distintos actores que influyen en el ciclo de vida de los activos en que se busca generar mejoras. Los actores más relevantes del mercado se describen a continuación:

- Operaciones mina: Esta organización es definida como el usuario del activo. Hace uso de acuerdo a prácticas operacionales bien definidas y espera de la organización de mantenimiento, la cantidad de equipos disponibles para generar la producción de mineral comprometida.
- Mantenimiento: Es la organización que se encarga de garantizar la oferta anual de horas disponibles de equipos, a través de la gestión del mantenimiento. Utiliza el mantenimiento preventivo sistemático, correctivo y sintomático para caracterizar las intervenciones sobre los equipos. Su objetivo es cumplir con la cantidad de equipos disponibles al menor costo.
- Representante de la marca del equipo: En este caso Finning representa a la marca Caterpillar. Se constituye como un actor relevante ya que, a este ente se le compran los equipos y sus insumos, provee soporte técnico y es con él con quién se validan y gestionan las mejoras profundas de producto.

Problema a resolver.

La gestión productiva de una mina subterránea, normalmente se caracteriza por lo rápido con que suceden los eventos. Turno tras turno la presión productiva genera el perverso incentivo en que es más fácil, rápido y efectivo cambiar partes y piezas ante una falla, en vez de detenerse, evaluar, generar la mejora y post evaluar los resultados. El incentivo viene dado en que mientras más tiempo tome la falla más producción potencial se pierde. Esta producción, en tiempos de buen precio del cobre y bajos costos, puede pagar en su valor casi cualquier medida que se tome.

De esta forma, los tiempos para evaluar, ejecutar y comprobar medidas, cerrando un ciclo para mejorar la gestión de mantenimiento, se hacen casi nulos, además que se toman decisiones que generalmente no se someten a post evaluación, donde se pueda determinar su real acción sobre los KPI de interés.

En la organización donde se desarrolla este estudio, actualmente no existe una metodología que pondere en tiempo real las distintas variables, por lo que no se generan las instancias donde se evalúan las acciones por tomar ni las ejecutadas, identificar brechas, posibles anulaciones de efectos sobre indicadores que se contraponen, ni mucho menos establecer rutas de mejora clara de objetivos clave.

Dado lo anterior, es motivación de este estudio, poder modelar el impacto de distintas decisiones que se toman día a día. Se abre la posibilidad de pre y post evaluar costo y beneficio de cada decisión relevante sobre indicadores claves como disponibilidad, confiabilidad, mantenibilidad y costos, pero sobre la base de un modelo que resuma las multi variables de interés y otorgue elementos de juicio inmediatos para tomar decisiones más eficientes para la organización. Una estimación básica del

universo de estos beneficios económicos, permite apreciar que la Superintendencia de Mantenimiento Mina Subterránea utiliza aproximadamente el 25% del presupuesto productivo de la mina subterránea. Por otra parte si se piensa en asegurar confiabilidad y disponibilidad de los activos, se estarán poniendo sobre la mesa horas productivas que tienen un costo de oportunidad en el evento que éstas pueden ser traducidas en una producción de aproximadamente 350 [ton/hr] de mineral por equipo.

Los objetivos específicos buscados de la resolución del problema presentado, se resumen a continuación:

- Organizar el ingreso de información a los sistemas oficiales de registro de fallas.
- Obtener una data confiable que permita realizar análisis de ella.
- Obtener un modelo que a través de una función objetivo, sea capaz de evaluar KPI de interés.
- Probar el modelo y proponer la obtención de pre y post evaluaciones de decisiones de mantenimiento en base al modelo desarrollado.

Variables del problema.

Existen una serie de variables que caracterizan el problema presentado y que es necesario explicar previo desarrollo del estudio:

- **Eventos de Falla:** Se refiere a la situación que origina la pérdida de operatividad del activo. De este evento será necesario obtener básicamente su repetición, es decir la frecuencia con que ha sucedido y el tiempo de pérdida de operatividad que ha originado, es decir el tiempo fuera de servicio relacionado.
- **Registro de eventos de falla:** Actividad realizada por personal de mantenimiento quién registra la información originada de los eventos de falla. Para la organización donde se desarrolla el estudio, existe la dificultad en que la data de los eventos de fallas se encuentra en un grado de confiabilidad muy baja, es decir, su calidad no permite tomar conclusiones de peso, ya que no todos los eventos se informan y de lo informado aún falta información. Para la organización de este estudio se utiliza un software de gestión llamado SAP PM.
- **Disponibilidad:** Se refiere al tiempo en que el activo está mecánicamente preparado para operar, es decir, es el tiempo del que dispondrá la unidad de operaciones, para hacer un uso productivo del activo. De este tiempo se deben descontar tiempos varios tales como: colación, traslados, limpieza, etc., para obtener la utilización efectiva del activo. Comúnmente se utiliza el indicador % Disponibilidad para evaluar esta característica.

$$\% \text{ Disponibilidad} = \frac{\text{Tiempo Nominal} - \text{Tiempo Fuera de Servicio}}{\text{Tiempo Nominal}}$$

Ilustración 3. % Disponibilidad.

- **Mantenibilidad:** Se refiere a la característica de un equipo o sistema que describe lo rápido con que se pueden ejecutar sus intervenciones de mantenimiento. Factores clave para apalancar este concepto son: diseño, ubicación física, estrategia de repuestos, estrategia de intervenciones, etc. Comúnmente se utiliza el indicador llamado MTTR, es decir, Mean time to repair por sus siglas en inglés, para evaluar esta característica. Su aplicabilidad radica en que como lo describe su nombre, se evalúa el tiempo medio para reparar de equipos o sistemas en un periodo de tiempo dado, es decir:

$$\text{MTTR} = \frac{\text{Tiempo Fuera de Servicio}}{\text{Número de detenciones}}$$

Ilustración 4. MTTR.

- **Confiabilidad:** Se refiere a la característica de un equipo o sistema que describe la frecuencia con que éstos, requieren una intervención correctiva. Factores clave para apalancar este concepto son: diseño, ubicación física, estrategia de repuestos, estrategia de intervenciones, etc. Comúnmente se utiliza el indicador llamado MTBF, es decir Mean time between failure por sus siglas en inglés, para evaluar esta característica. Su aplicabilidad radica en que como lo describe su nombre, se evalúa el tiempo medio entre fallas (o detenciones) de equipos o sistemas en un periodo de tiempo dado. Se evalúa desde el inicio de una falla hasta el inicio de la próxima falla como ciclo completo de tiempo entre fallas.

$$\text{MTBF} = \frac{\text{Tiempo Nominal}}{\text{Número de detenciones}}$$

Ilustración 5. MTBF.

- **Costos:** En el ámbito del mantenimiento, la función de costos será descrita entre otras cosas, por los denominados Costos Directos de los cuáles se pueden mencionar: materiales, repuestos, mano de obra, servicios de terceros, insumos de mantenimiento, etc.

La interacción de los conceptos anteriores también generará una desviación en la función de costos, por ejemplo mientras mayor sea la **mantenibilidad y confiabilidad** lograda en equipos o sistemas, en base a la gestión y a la mejora continua, mayor será la **disponibilidad** lograda y con esto el costo [USD/hr] de operación efectiva obtenida será menor.

II. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DISPONIBLE.

El mantenimiento en Mina Subterránea Codelco División Andina, se caracteriza por la utilización oficial de dos sistemas en donde se registra y obtiene información gestionable de los equipos móviles en administración. Los sistemas son el Software SAP a través de su módulo de mantenimiento PM y el Software Dispatch. Las características y sus aplicaciones específicas son descritas a continuación:

SAP PM.

La gestión del mantenimiento en CODELCO, tiene como mandato corporativo la utilización del siguiente modelo:

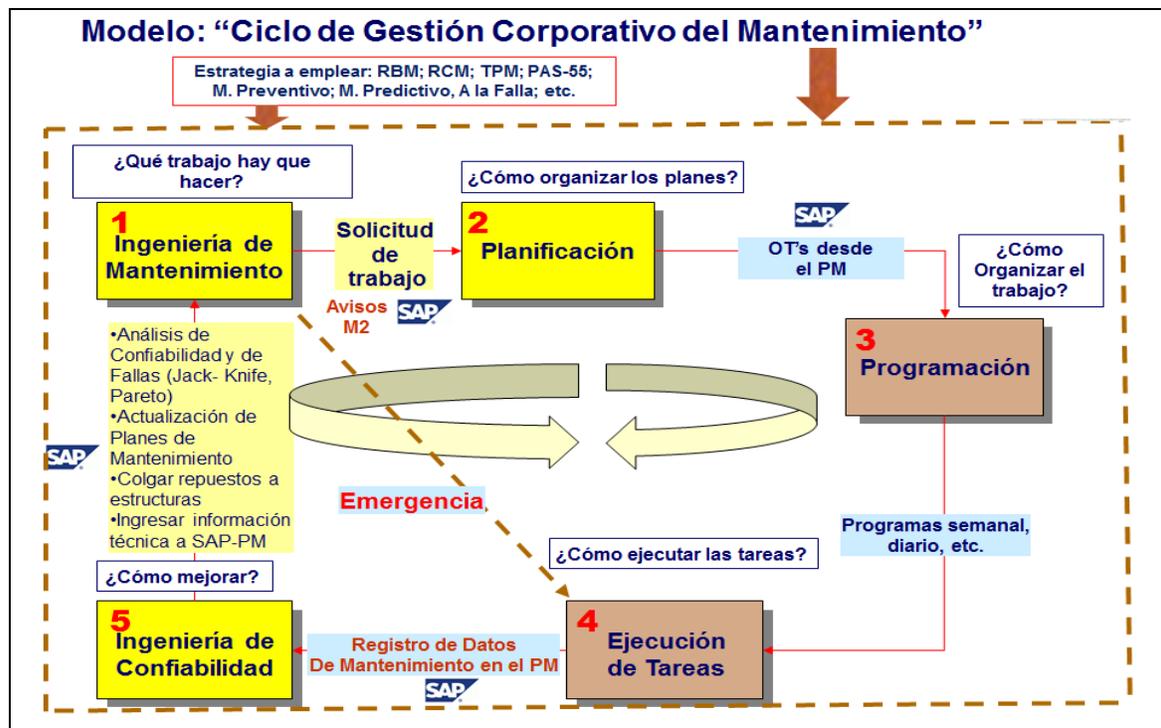


Ilustración 6. Ciclo de Gestión Corporativa del Mantenimiento CODELCO.

El modelo exige realizar la gestión de mantenimiento en torno al software SAP con su módulo de mantenimiento PM. Para ello, se organiza el proceso de mantenimiento en 5 etapas base, las cuales son: Ingeniería de Mantenimiento, Planificación, Programación, Ejecución de Tareas e Ingeniería de Confiabilidad.

Del modelo se desprenden principalmente las siguientes actividades que significan el producto de cada etapa de mantenimiento, en ellas se registra información relevante para el proceso:

- a. Solicitud de Trabajo Preventivo mediante un documento electrónico llamado "Aviso tipo M3". En él se registra la información técnica respecto a la detención preventiva, que en general está asociada a una intervención cíclica al cumplimiento de un cierto periodo de funcionamiento del elemento a mantener. Para que la información registrada se considere completa, se debe registrar: Equipo, Ciclo de detención, Fecha y Hora de Inicio, Fecha y Hora de término de la detención.
- b. Solicitud de Trabajo Correctivo mediante un documento electrónico llamado "Aviso tipo M2". En él se registra la información técnica respecto a la detención correctiva, que en general está asociada a una falla que necesita una corrección para restituir la condición operativa original del elemento a mantener. Para que la información registrada se considere completa, se deben registrar 09 campos obligatorios: Equipo en falla, Sistema en falla, Parte del sistema en falla, Síntoma de falla, Causa de falla, Tic que indica si hubo detención de equipo, Fecha y Hora de Inicio, Fecha y Hora de término de la detención.
- c. Orden de Trabajo preventiva o correctiva, mediante documento electrónico llamado "OT". En él se registra principalmente la información respecto al gasto en insumos y horas hombre relacionadas al trabajo a realizar. Por otra parte este documento permite organizar el trabajo en secuencia y momento de ejecución.
- d. Una vez ejecutado el trabajo, se ingresa en el módulo PM la información consolidada, a partir de lo recabado en la labor, para su posterior análisis y mejora continua, mediante el área de ingeniería de confiabilidad.

Todo el proceso descrito es llevado a cabo por personal perteneciente a la organización de mantenimiento, es decir la calidad de esta información es de total responsabilidad del área que la utiliza para hacer gestión de ella.

Dispatch.

Por otra parte, también existe otro sistema en paralelo que registra el estado de los equipos, además de su rendimiento operativo ya que registra las cargas de mineral, este sistema se llama Dispatch.

El sistema Dispatch es el software de gestión operativo que utiliza la unidad de operaciones mina. El sistema consiste en el registro en tiempo real del estado de los

equipos mina por parte del operador a cargo a bordo del equipo, en una base de datos con interfaz online y disponible para todos los usuarios conectados.

El proceso se resume en el ingreso de dos grandes estados, ellos son: Tiempo Disponible y Fuera de servicio. De ellos se desprenden sub estados y sus respectivos motivos para cada caso.

Los estados operativos posibles se resumen a continuación:

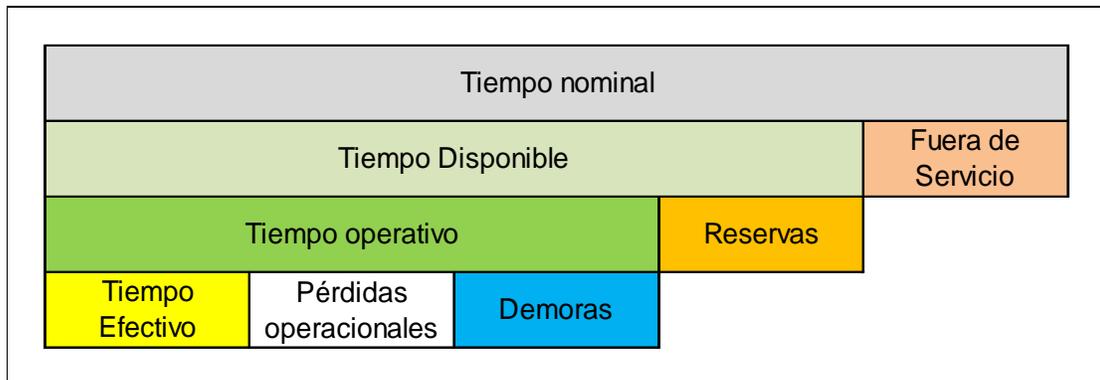


Ilustración 7. Estados operativos Dispatch.

De los estados posibles, el estado “Fuera de Servicio”, es el estado que indica la pérdida de operatividad de un equipo debido a un mantenimiento preventivo o correctivo, por lo cual este estado, será ingresado por el operador, cuando se requiera el equipo para su mantenimiento preventivo o cuando el operador detecte una anomalía a la que atribuya una falla, por lo que éste ingresará el motivo de la avería que no es otro que el sistema en falla.

Para el caso de una avería o mejor dicho una falla, es posible informar el Equipo en falla y el Sistema en Falla relacionado, quedando registrado también la Fecha y Hora de Inicio además de la Fecha y Hora de término de la detención.

El momento y el motivo de la detención, dependen inicialmente del operador del equipo, quien tiene como objetivo transformar en tiempo efectivo el tiempo disponible de la máquina asignada. El operador cuando detecta una pérdida de operatividad del equipo declara el estado fuera de servicio y su mejor aproximación al sistema en falla, a través de un display instalado en cabina que transmite en forma online esta información para toda la organización. El equipo de mantenimiento en este momento dispone de sus recursos humanos y materiales para superar la condición de falla y así dejar en estado disponible el equipo, para que pueda ser usado en labores productivas.

Este sistema es utilizado en forma oficial para registrar y evidenciar la disponibilidad para toda la organización, ya que éste reporta el 100% del tiempo para todos los equipos. Con esta información se realizan las proyecciones de producción y costos de la Mina Subterránea.

Oportunidades y Debilidades para ambos sistemas.

Comparativamente las oportunidades de ambos sistemas se resumen a continuación:

SAP PM	DISPATCH
Se reporta sólo el tiempo que se ingresa al sistema. El resto se asume como Tiempo operativo.	100% Tiempo reportado. Se define el estado del equipo por cada operador, es decir para cada momento se reporta el estado real del equipo.
Información técnica acabada.	Información en tiempo real.
Información de costos acabada.	Se puede observar la relación del estado operativo y fuera de servicio del equipo.
Información histórica disponible y gestionable.	Información histórica disponible y gestionable.

Las debilidades de ambos sistemas se resumen a continuación:

SAP PM	DISPATCH
El tiempo no reportado se asume como Tiempo operativo, por lo que al omitir reportes se obtienen disponibilidades más elevadas que lo real.	La información ingresada carece de prolijidad, es decir los sub estados y motivos no son apegados a la realidad, ya que dependen del sesgo del operador que ingresa la información. Esto aún permite apreciar una disponibilidad real.
La información ingresada no es auditada en calidad.	La información ingresada no es auditada en calidad.
La información ingresada no es auditada en cantidad.	La información ingresada no es auditada en cantidad.
Existen muchos usuarios debido al rotativo de tunos, por lo que la no estandarización de prácticas tiene un impacto muy elevado.	Existen muchos usuarios debido al rotativo de tunos, por lo que la no estandarización de prácticas tiene un impacto muy elevado.

Plan de aseguramiento de calidad de Información.

Debido a las razones antes expuestas, ha sido necesario trabajar en un plan sistematizado para asegurar la calidad de la información disponible. Este plan lleva un año en curso y ha sido diseñado para potenciar las oportunidades y atenuar las debilidades antes resumidas.

En primer lugar se debe mencionar que la información proveniente de SAP PM debe prevalecer, ya que esto pertenece al mandato corporativo, por lo que Dispatch debe ser usado sólo como referencia para gestión.

De acuerdo a lo comentado, se debe asegurar el uso de SAP PM para la gestión de mantenimiento y este software debe representar lo que sucede respecto a las detenciones, por lo que para describir que tan representativo es este sistema, se observaron dos variables desde los reportes realizados en este software respecto al total de detenciones. La primera de ellas describe la cantidad de reportes realizados y la segunda representa el tiempo fuera de servicio reportado, respecto al total de detenciones.

La Ilustración 8 presenta el estado de la reportabilidad en SAP PM, en cuanto a la cantidad de reportes, observado previo al plan de aseguramiento de calidad de información:

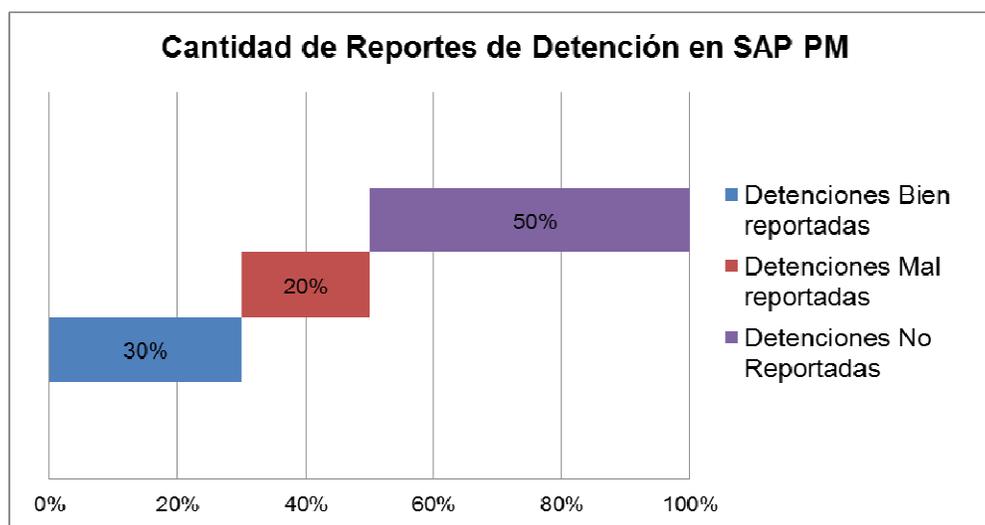


Ilustración 8. Cantidad de Reportes de Detención SAP PM.

De lo anterior se puede mencionar que:

- Detenciones Bien reportadas: Corresponde a las detenciones reportadas con todos los campos necesarios y suficientes para poder realizar análisis, es decir los 09 campos obligatorios.
- Detenciones Mal reportadas: Corresponde al reporte de detenciones que carece de alguno de los 09 campos obligatorios por lo que no puede ser utilizado para realizar análisis.
- Detenciones No reportadas: Corresponde a la cantidad de detenciones que no quedan plasmadas en un aviso SAP PM por lo cual, representa información no disponible para análisis.

La Ilustración 9 presenta el estado de la reportabilidad en SAP PM, en cuanto al tiempo fuera de servicio reportado previo al plan de aseguramiento de calidad de información:

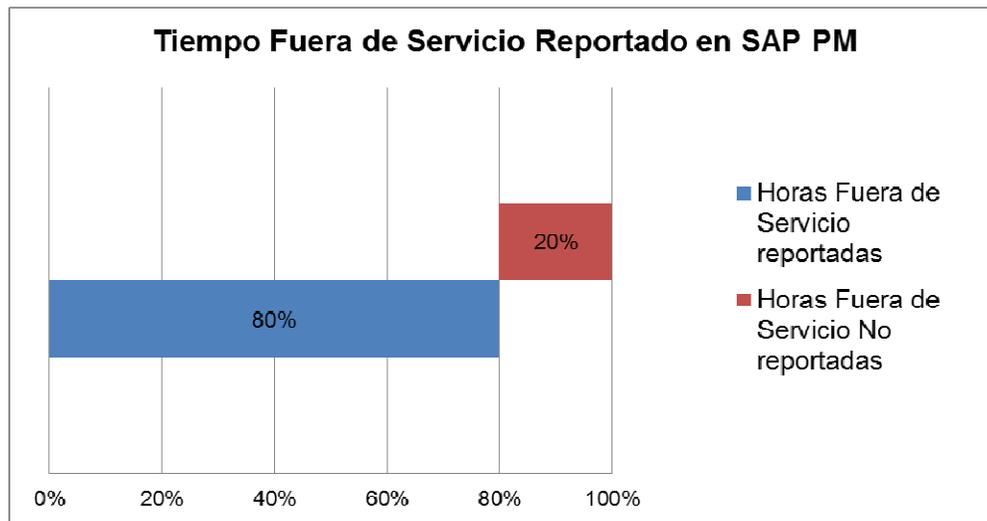


Ilustración 9. Tiempo Fuera de Servicio reportado en SAP PM.

De lo anterior se puede mencionar que:

- Horas Fuera de Servicio reportadas: Corresponde a la suma de los tiempos fuera de servicio de las detenciones reportadas. De aquí se puede concluir que si bien es cierto no se reportan todas las detenciones, al menos existe una tendencia a justificar el tiempo fuera de servicio reportándolo.
- Horas Fuera de Servicio No reportadas: Corresponde a la suma de los tiempos fuera de servicio de las detenciones No reportadas.

Debido a lo antes mencionado, es necesario generar un plan de medidas, de manera de asegurar que la información obtenida para análisis posteriores sea representativa. El plan se resume como el siguiente compendio de medidas:

- a. Limpiar y organizar en SAP PM lo que se ingresa como información de mantenimiento. Es necesario estandarizar la práctica dentro del personal que realiza este trabajo, indicando qué y donde ingresar la información, removiendo lo innecesario del software y evitando errores de ingreso.
- b. Limpiar y organizar en Dispatch lo que se ingresa como información. Es necesario estandarizar la práctica dentro del personal que realiza este trabajo, indicando qué y donde ingresar la información, removiendo lo innecesario del software y evitando errores de ingreso.
- c. Estandarización del ingreso de información en ambos sistemas. Se especifica y controla una forma única de ingreso de información, es decir, se contará con los mismos equipos y sistemas en falla para ser reportados en SAP PM y Dispatch,

de manera de controlar el total de detenciones tomando como referente a Dispatch, ya que este último software cuenta con el 100% del tiempo reportado.

- d. Control de la calidad de información ingresada en SAP PM a través de KPI de control llamado "Calidad de aviso". Este KPI considera como un aviso completo, por lo tanto una detención bien reportada, con el ingreso de 9 ítems básicos para poder hacer uso de esta información en análisis posteriores. Se podría decir que este KPI sanciona la calidad de los avisos.
- e. Con el objetivo de disminuir las detenciones no reportadas, se plantea igualar lo que se reporta en ambos sistemas, de manera que cada vez que un equipo quede fuera de servicio y se reporte en Dispatch, éste debe ser reportado en su homólogo SAP PM. De esta forma se utilizará Dispatch para aumentar la reportabilidad de SAP, controlando la Cantidad (Frecuencia) y Tiempo (Fuera de servicio) ingresado para los equipos en ambos sistemas, a través de KPI de control llamado "Adherencia Dispatch SAP". Este KPI considera medir la similitud entre lo reportado en Dispatch y SAP PM.

De esta forma se plantea la siguiente metodología para ponderar la Calidad de la información disponible para análisis de este estudio, considerando los dos KPI antes mencionados:

"% Calidad de Información"	:	% CI
"% Calidad de Avisos"	:	% CA
"% Adherencia Dispatch SAP"	:	% AD
$\% CI = \% CA \times \% AD$		

Ilustración 10. % Calidad de Información.

Periodo a analizar.

El conjunto de medidas mencionadas han sido implementadas a cabalidad a partir del mes de Enero 2014, es decir, a partir de esta fecha se ha podido capacitar y otorgar las herramientas necesarias a los 8 analistas de mantenimiento, 8 supervisores y 4 Jefes de turno, quienes son las personas que ingresan información respecto a las fallas de equipos en SAP PM y quienes tienen relación con los puestos en Operaciones que ingresan la información en Dispatch. Por otra parte se ha permitido a las mismas personas corregir lo que se ingresa en Dispatch conforme el diagnóstico de fallas amerita cambiar la razón de fuera de servicio o más bien dicho el sistema relacionado. Se tomará entonces el periodo a partir de Enero 2014 como periodo representativo para todos los análisis, otorgando como medida de "confianza" en la información utilizada para análisis el % CI.

III. METODOLOGÍA Y JUSTIFICACIÓN.

Se utilizó la siguiente secuencia de trabajo:

- a. Analizar los Eventos de Falla. La motivación de este estudio se refiere a determinar un método para pre y post evaluar los indicadores de mantenimiento de interés, una vez que se propongan y ejecuten medidas por sobre los eventos de falla.

El evento en sí, es la situación que caracterizará a un equipo respecto a su estado, entregando sus frecuencias de falla además del tiempo y dinero que implica su carencia de operatividad, por lo que es necesario como primera medida, administrar el correcto ingreso de información de eventos de falla, por parte de los ejecutores del mantenimiento. Sólo después de esto será posible analizar tendencias y tomar conclusiones.

- b. Se propone como método, direccionar los esfuerzos en validar esta información, otorgando una medida de confianza, ya que en ella radica la validez de las conclusiones finales.
- c. Desarrollo de Modelo de Toma de decisiones de mantenimiento. Una vez sean propuestas las medidas por sobre los eventos de falla, éstas se deben evaluar bajo una metodología que este estudio debe desarrollar. La función objetivo debe ser representada por un método de análisis propuesto, que involucre los indicadores de gestión del mantenimiento más relevantes.

Se propone como método, exponer y elegir desde las técnicas clásicas de análisis de data de mantenimiento, para formar un modelo de toma de decisiones del mantenimiento que cumpla con la función objetivo para esta organización.

Para ello se define la maximización de la disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad además de satisfacer las proyecciones de costos.

- d. Prueba del modelo. El modelo desarrollado deberá ser probado a través de un ciclo completo de al menos una mejora. El ciclo se define en los siguientes tres puntos.
- e. Pre Estimación de Efectos. Dada la función anterior, sensibilizando los efectos sobre los indicadores de gestión, se puede estimar un beneficio ponderado, respecto a posibles acciones.
- f. Acción que maximiza Función objetivo. Se debe elegir la acción a tomar, gestionar su desarrollo y registrar sus resultados.
- g. Análisis de resultados obtenidos. La acción tomada debe ser evaluada en los mismos términos por los cuáles se inclinó por ella. Debe poder entregar su valor agregado y su costo final.

Método de Evaluación de Fallas.

Cost Scatter Diagrams (CSD).

De acuerdo a la bibliografía recopilada, existe un método desarrollado por los autores llamado Cost Scatter Diagrams (CSD), que se presenta en paper de referencia [a], que tiene como objetivo integrar en un análisis la evaluación de la Confiabilidad a través de la Tasa de fallas, la Mantenibilidad a través del indicador MTTR, la No Disponibilidad y los Costos asociados a eventos de falla, para discriminar sus criticidades y por lo tanto otorgar a un administrador de mantenimiento, herramientas de juicio para priorizar recursos y acciones de mejora sobre los activos en responsabilidad. El análisis presenta tres etapas. En la primera etapa se obtiene un diagrama de dispersión, llamado comúnmente Jack Knife, donde en el eje "Y" se grafica el MTTR y en el eje "X" se grafica la tasa de falla o frecuencia, encontrando en la multiplicación de ambos factores la No disponibilidad relacionada al evento. La gráfica se debe dividir en cuatro cuadrantes con el promedio de las mediciones para cada eje.

Las relaciones entre los factores se resumen a continuación:

Tipo de Evento	:	i
Tiempo Fuera de Servicio	:	TFS [ut]
No disponibilidad	:	D [-]
Cantidad de Eventos i	:	n [N]
Tasa de falla i	:	f _i [1/ut]

$$MTTR_i = TFS_i / n_i \quad D_i = MTTR_i \times f_i$$

$$f_i = n_i / \text{Tiempo Nominal} \quad f_i = 1 / MTBF_i$$

Debido a que, utilizando directamente la relación anterior, gráficamente las curvas ISO D quedan como hipérbolas se utiliza la identidad:

$$\log D_i = \log MTTR_i + \log f_i$$

Con esto se obtienen curvas de ISO D rectas.

Ilustración 11. Relaciones en CSD etapa 1.

Un diagrama de dispersión tipo, de acuerdo a la etapa 1, se muestra en la Ilustración 11, donde se representan 11 tipos de evento. De esta forma el cuadrante superior derecho tendrá los eventos más críticos ya que superarán al promedio de las mediciones de MTTR en el eje "Y" y al promedio de las mediciones de las tasas de falla f en el eje "X". Como las ISO D son superiores conforme los eventos se acercan a este cuadrante, también aquí se encontrarán los eventos que generan mayor indisponibilidad.

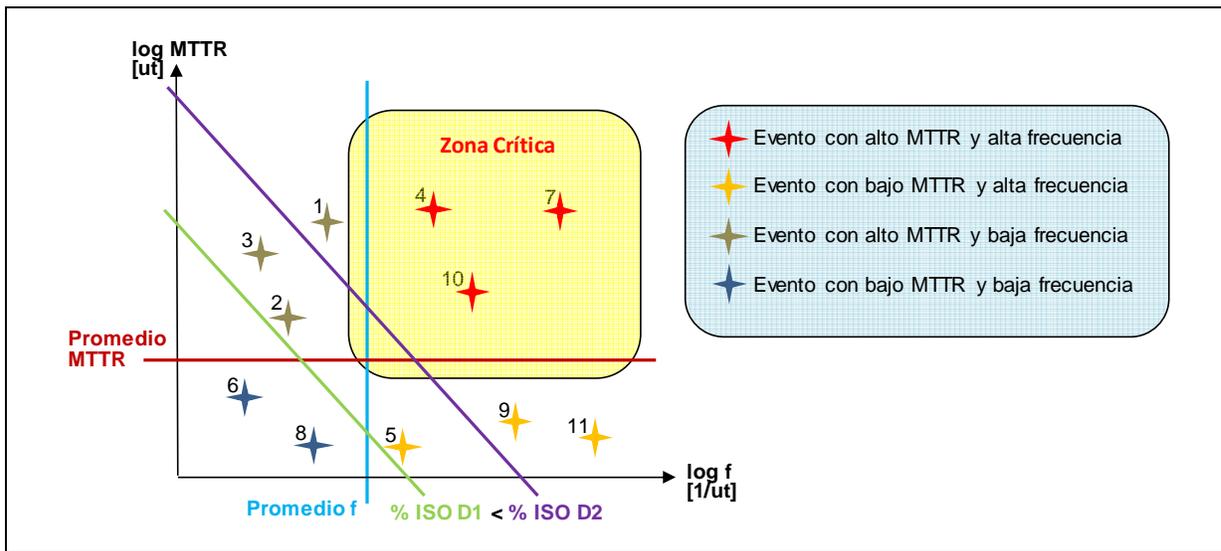


Ilustración 12. Diagrama de dispersión etapa 1.

En la segunda etapa se presenta un diagrama de dispersión, donde en el eje “Y” se grafica la No disponibilidad y en el eje “X” se grafican los costos. Los costos a considerar pueden ser tan amplios como lo desee el evaluador a cargo, es decir dependiendo del evaluador se ingresarán costos que pueden ser de disciplinas tales como: mantenimiento, producción, abastecimiento, finanzas, etc.

A continuación se resumen las relaciones del CSD en etapa 2:

Costo Directo de falla	: Cf_i [um/ut FS]
Costo de No producción por falla	: Cp_i [um/ut FS]
Costo de Bodegaje y amortización	: Cb_i [um/ut FS]
Costos de Inversión para asegurar Confiabilidad	: Cc_i [um/ut FS]
Costo global específico	: Cge_i [um/ut FS]
Costo global	: CG [um/ut]

$$D_i = MTTR_i \times f_i$$

$$CG = \sum (Cf_i + Cp_i + Cb_i + Cc_i) \times MTTR_i \times f_i$$

$$CG = Cge_i \times D_i$$

Las curvas ISO CG serán hipérbolas utilizando directamente la relación anterior, por lo que nuevamente se utiliza la identidad:

$$\log CG = \log Cge_i + \log D_i$$

Con esto se obtienen curvas de ISO CG rectas.

Ilustración 13. Relaciones en CSD etapa 2.

A continuación en Ilustración 14, se presenta un diagrama de dispersión tipo para etapa 2. En este diagrama se evalúan los mismos 11 eventos. De esta forma el cuadrante superior derecho nuevamente tendrá los eventos más críticos ya que superarán al promedio de las mediciones de Indisponibilidad D en el eje "Y" y al promedio de las mediciones de Costo global específico Cge en el eje "X". Como los ISO Costo Globales CG son superiores conforme los eventos se acercan a este cuadrante, también aquí se encontrarán los eventos que generan mayor Costo global.

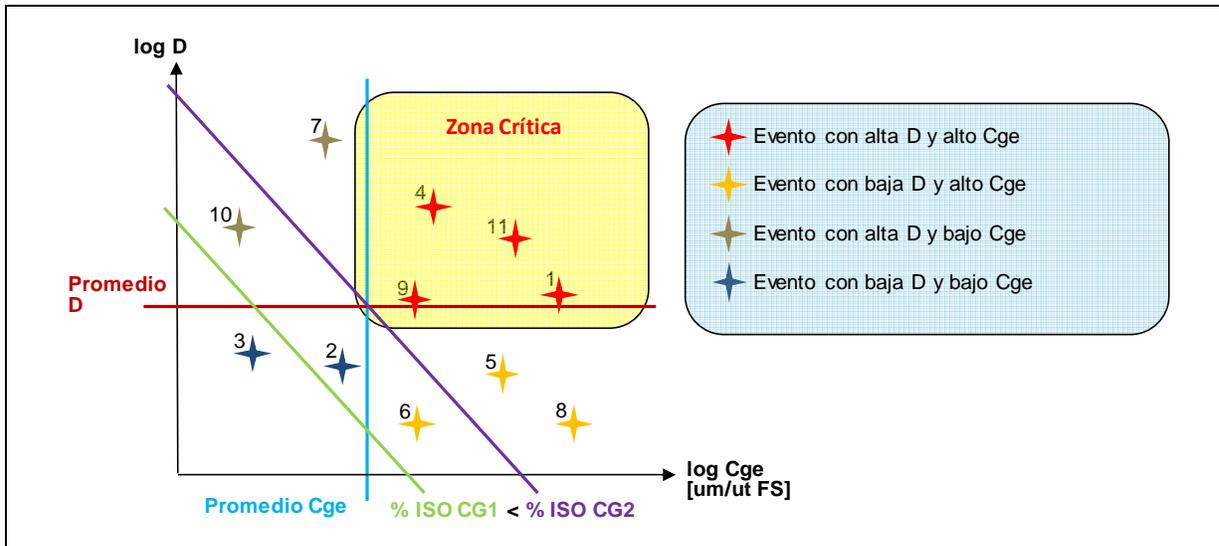


Ilustración 14. Diagrama de dispersión etapa 2.

En un último paso, en Ilustración 15, se presenta el diagrama de dispersión de la primera etapa destacando además de sus eventos críticos, a los eventos críticos obtenidos en la segunda etapa, obteniendo una gráfica que muestra la evaluación de la Confiabilidad, Mantenibilidad, No Disponibilidad y Costos.

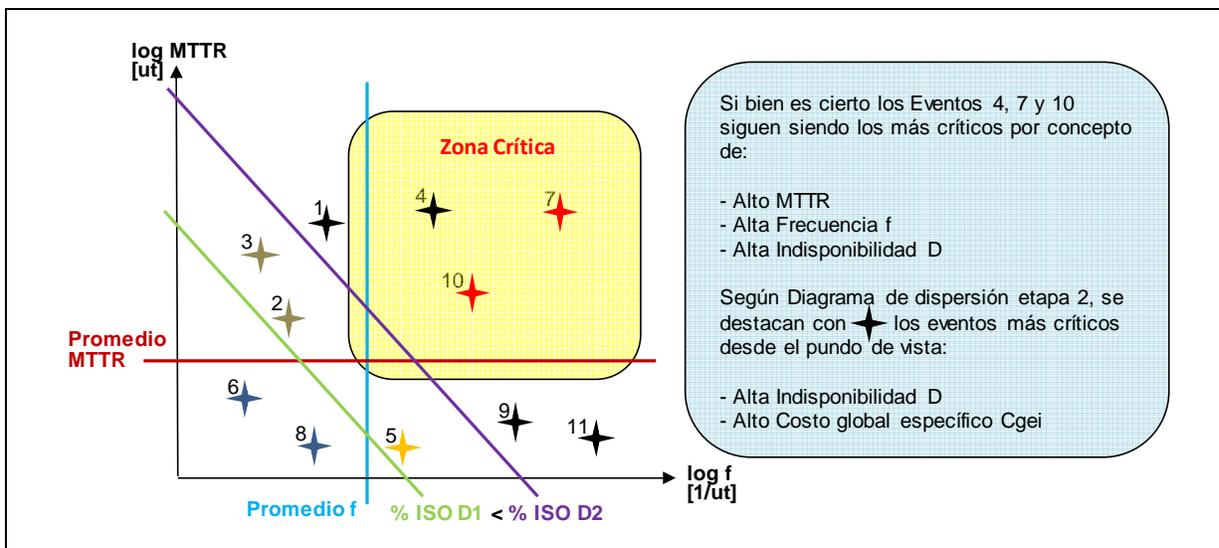


Ilustración 15. Diagrama de dispersión etapa 3.

IV. MÉTODO DE ANÁLISIS DE FLOTA

El objetivo es obtener un modelo para evaluar decisiones de mantenimiento en base a los eventos de falla de una flota de 08 equipos LHD Caterpillar R1700G, en términos de Confiabilidad, Mantenibilidad, Disponibilidad y Costos, por lo que dado el método CSD presentado en el capítulo anterior, que satisface la evaluación de Indicadores básicos propuestos para este estudio, se concentrará el esfuerzo en armar un esquema para la toma de decisiones utilizando esta metodología.

El esquema básico propuesto contempla que, dado un estado inicial A que se desea mejorar, se pueda evaluar una acción X para su mejora y pre estimar sus efectos para tomar la decisión de realizarla o no, en desmedro de otras alternativas que ataquen el mismo u otros problemas. Por último se contempla post evaluar la decisión tomada, obteniendo sus efectos sobre los KPI de interés que se desean medir.

Dado lo anterior será necesario separar las acciones a realizar en las siguientes actividades que se detallan a continuación:

- a. Identificar periodo pasado a evaluar T1: Los eventos de falla deben ser sujetos a un periodo determinado para ser evaluados. Este periodo no podrá ser muy extenso hacia atrás, ya que los eventos de falla pueden ser influenciados por otros eventos que están sucediendo al mismo tiempo. Por otra parte no puede pasar un tiempo muy prolongado entre una evaluación y otra ya que se pierde espacio de mejora.

Se propone utilizar un periodo de un mes, ya que éste dará espacio para la planificación mensual de la mina que funciona en ese plazo, además que provee el tiempo necesario para adquirir insumos y ordenar recursos necesarios.

- b. Identificar Equipo Crítico de Flota: Según metodología CSD, si se listan los eventos de falla de la flota, separados por equipo, se podrá identificar un equipo entre los 08 LHD, como el equipo más frecuente, con más tiempo fuera de servicio, con más indisponibilidad y con mayor Costo, por lo tanto el equipo más crítico.
- c. Identificar Sistema Crítico de Equipo Crítico y/o Flota: Si a su vez se pueden listar los eventos de falla del equipo crítico determinado en punto anterior, ordenándolos por sistema, se podrá identificar usando CSD, el sistema crítico. Para saber si el problema afecta a la Flota o sólo al equipo crítico será necesario listar los eventos de falla de toda la flota y separarlos por sistema, para determinar el sistema crítico de flota.
- d. Identificar si mejora aplicará a Equipo o Flota. Contrastando las dos miradas de los puntos anteriores, se podrá identificar si la acción de mejora será aplicada a un Equipo de la flota, ya que es un problema localizado del equipo crítico, o si la acción será para toda la flota ya que es un problema generalizado. Un buen supuesto es que en general si se desea controlar algún evento de falla de un equipo, lo lógico será realizar la mejora a toda la flota para suprimir la posibilidad

de detención en el resto de los equipos, ya que el problema puede ser una muestra extensible al resto.

- e. Graficar Sistema relacionado en CSD A. El sistema crítico será graficado en un diagrama de dispersión llamado CSD A. Éste diagrama será representativo del periodo que se decidió evaluar en punto a.

En la Ilustración 16, se muestra un ejemplo aplicado donde se grafica un escenario CSD A para los sistemas de un LHD crítico o toda la flota.

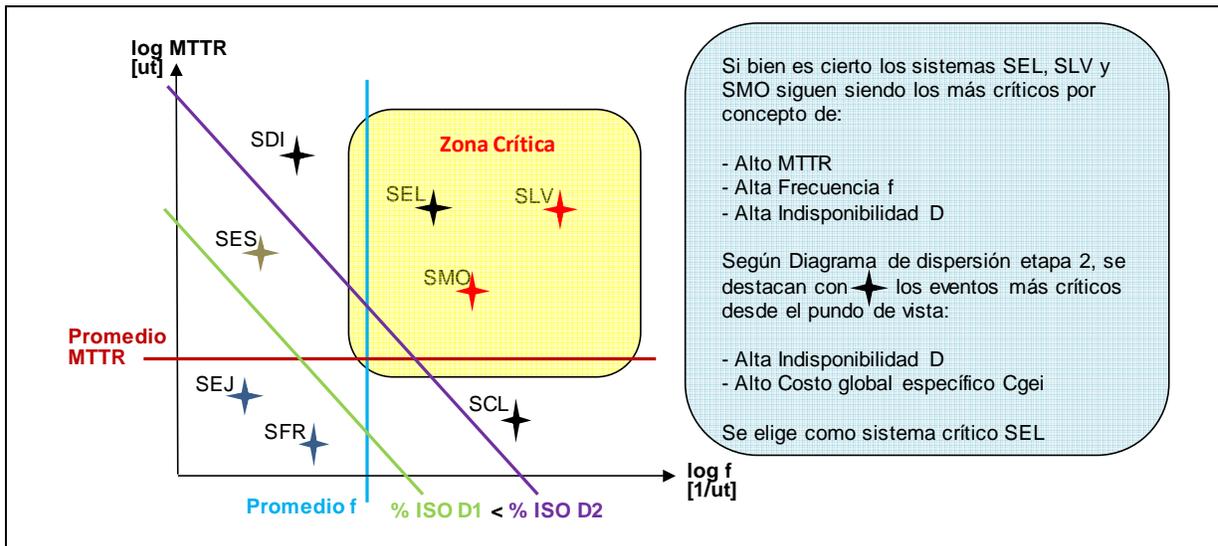


Ilustración 16. CSD A Ejemplo.

- f. Proponer Mejora y cuantificarla a través de una actividad planificada en Mantenimiento Programado: El análisis experto proveerá un set de mejoras, de las cuáles se debe elegir una a la vez para que sea cuantificada. Es decir, la cuantificación deberá estimar la mejora a través de un Evento de detención de control j (EDCj) con: MTTR [ut], Frecuencia [1/ut] y Costo específico [um/ut FS] propios.

La razón para generar este EDCj es que la mejora implicará en el peor de los casos una o varias detenciones de equipos para ser aplicado. De esta forma el mejor momento para realizar la detención, será en una actividad planificada asociada a una detención programada, para aprovechar la presencia del equipo en taller.

- g. Proyectar Mejora y pre evaluar: Como una forma de pre evaluar los efectos de una mejora entre otras, se propone volver a graficar el sistema relacionado a la mejora en un CSD A' = CSD A + EDCj - 100% de Eventos de detención relacionados a la mejora (ya que se supone que la falla será evitada).

La justificación es poder reproducir un escenario futuro utilizando el escenario anterior como base, aplicando los efectos de la mejora a través del EDCj y

asumiendo que los eventos de falla que motivaron la mejora serán suprimidos en su totalidad.

- h. Graficar trayectoria de escenarios CSD A / CSD A' y calcular entre ambos las diferencias de: MTTR, Frecuencia, Indisponibilidad y Costos: Este paso será necesario ya que se debe pre evaluar el efecto neto de la mejora y para ello, se utilizará el efecto neto sobre los indicadores de interés.

Cabe destacar que en este paso se podrán utilizar variados criterios para evaluar el efecto neto ya citado, ya que dependiendo del momento de la organización, se podrán privilegiar los efectos netos positivos de uno o el conjunto de varios indicadores para diferenciar y priorizar las intervenciones de mejora. De esta forma se podrá generar una función objetivo en base a los indicadores: F (MTTR, Frecuencia, Indisponibilidad, Costos). La definición de esta función óptima podrá ser objetivo de otro estudio que se aleja del propósito del presente, pero por ahora se utilizará la aproximación de asignar una ponderación de importancia a cada factor a conveniencia, teniendo en cuenta que el objetivo será siempre minimizar los valores por separado.

En la Ilustración 17, se muestra un ejemplo del cómo podría ser aplicado un caso hipotético donde se grafica la trayectoria de escenarios CSD A / CSD A' para un evento de falla relevante del sistema SEL.

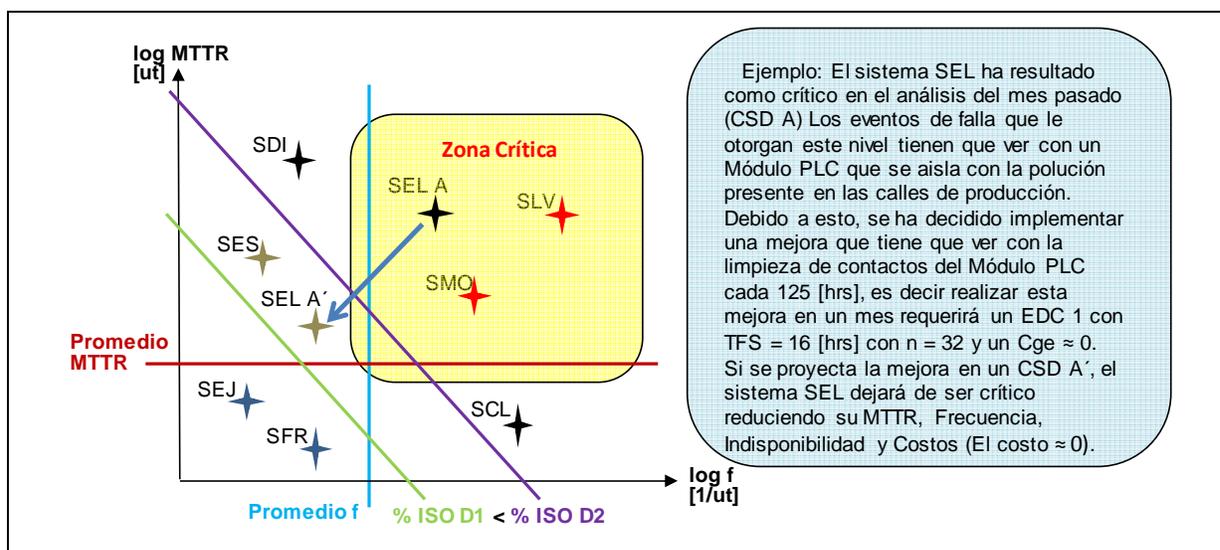


Ilustración 17. Trayectoria de escenarios CSD A / CSD A'.

- i. Ejecutar Mejora y graficar para el sistema relacionado a la mejora, un escenario CSD B evaluado en un periodo $T2 \sim T1$.
- j. Graficar trayectoria de escenarios CSD A / CSD B y calcular entre ambos las diferencias de: MTTR, Frecuencia, Indisponibilidad y Costos para evaluar en función de: F (MTTR, Frecuencia, Indisponibilidad, Costos) a convenir.

A continuación se muestra la Ilustración 18 que resume el Método de análisis de flota propuesto.

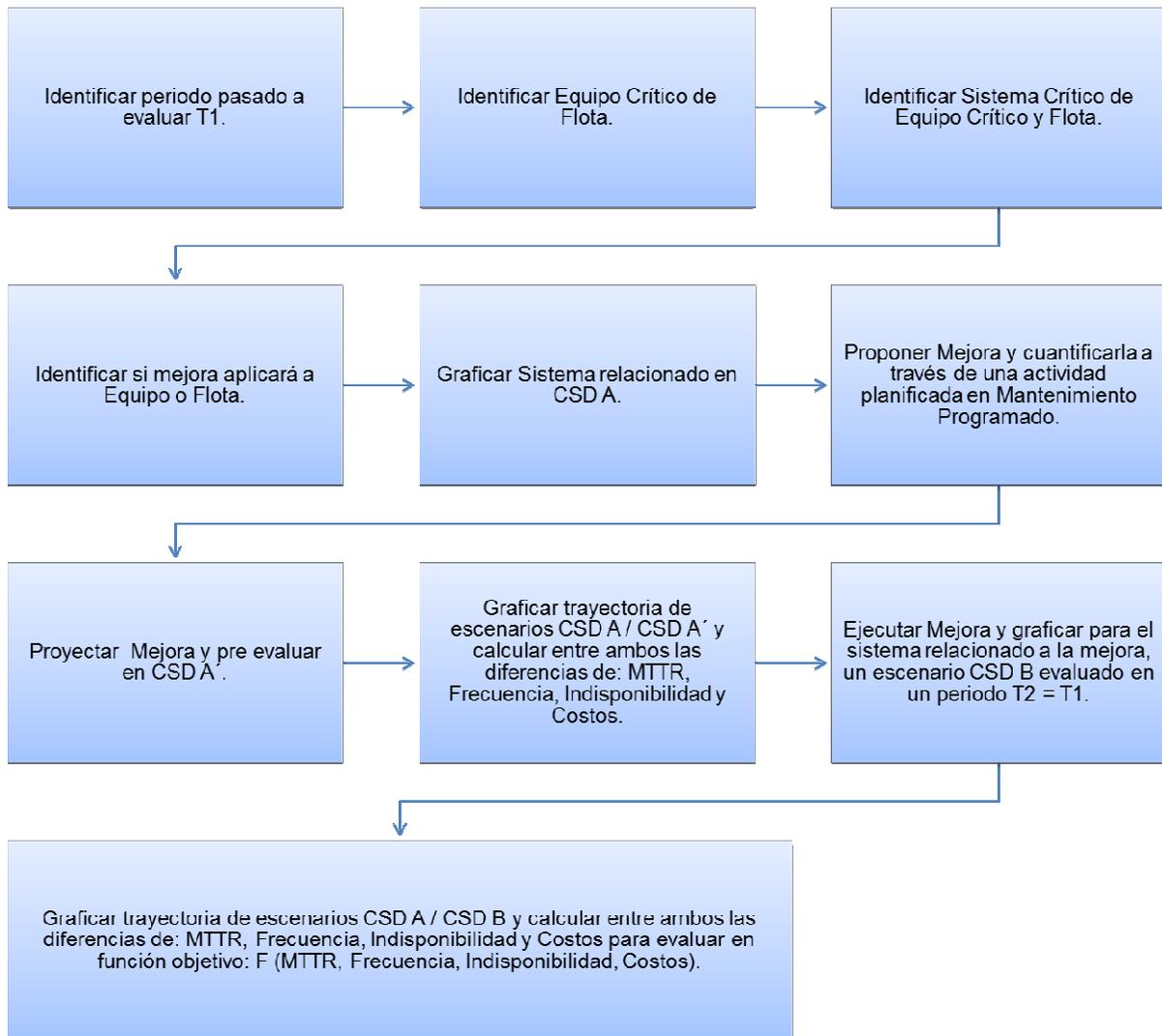


Ilustración 18. Método de análisis de flota.

V. TABLERO DE RESULTADOS

En este capítulo se buscó obtener una interfaz que muestre los resultados obtenidos de la aplicación del método propuesto, que además sea capaz de cumplir en oportunidad y en valor generado, entregando conclusiones valiosas para la gestión de equipos de esta organización.

A continuación se detallan los pasos mínimos que deben ser ejecutados por la interfaz de manera de dar flexibilidad a los análisis:

- a. Primero que todo, se debe tener claro que la interfaz debe recibir una base de datos con información de SAP PM y de Dispatch para tratarlas por separado, y que además esta información puede ser ajustada o modificada después de emitida, es decir siempre existe la posibilidad de modificar lo ingresado con anterioridad, lo primero que se debe tener es la posibilidad de hacer dos acciones:
 - ✓ Analizar la información ya ingresada con anterioridad.
 - ✓ Ingresar nueva información o lo mismo anterior pero actualizado.
- b. El siguiente paso debe ser que la interfaz pueda entregar el propuesto indicador % Calidad de Información con los factores que la componen, para saber en base a qué calidad de información, se está trabajando y en qué nivel este porcentaje es aceptable para emitir conclusiones. Es necesario que en este paso se pueda dar la opción de consultar por distintas alternativas:
 - ✓ Periodo T a consultar.
 - ✓ Filtro de Grupos Mineros.
- c. En este momento, se deben preguntar por las siguientes alternativas para desplegar un análisis en modo CSD de Prueba, en base a la información de SAP PM:
 - ✓ Periodo T1 a consultar.
 - ✓ Filtro de Equipos.
 - ✓ Filtro de Sistemas.
 - ✓ Filtro de Grupos Mineros.
 - ✓ Variar en cualquier momento Disponibilidad objetivo.
 - ✓ Variar en cualquier momento Costo específico objetivo.

Este paso permitirá realizar los pasos b, c y d del método de análisis de flota propuesto. Por otra parte se debe tener acceso a la base de datos para revisar los eventos de falla relacionados para visualizar los que se quieran suprimir con la mejora.

- d. De acuerdo al paso anterior se debe elegir el planteamiento que se denominará como CSD A. La interfaz debe permitir guardarla con denominación única y se debe poder acceder a los eventos de falla relacionados. Este paso permitirá ver el estado de flota en un análisis.
- e. El siguiente paso es realizar la evaluación de la proyección $CSD A' = CSD A + EDCj - 100\%$ de Eventos de detención. Por lo que la interfaz deberá:
 - ✓ Poder seleccionar uno de los CSD guardados.
 - ✓ Elegir de este último CSD A los eventos de falla que se deben suprimir con la mejora y seleccionarlos en forma manual para que sean suprimidos para la evaluación.
 - ✓ Generar uno o varios Eventos de mejora EDC y poder guardarlos, para poder ser editados con posterioridad. Los EDC tendrán sus respectivos:
 - Equipos donde aplicar.
 - Sistemas donde aplicar.
 - Tiempo fuera de servicio por evento.
 - Repeticiones de eventos.
 - Costo por evento.
 - ✓ Con esta información se debe generar el $CSD A' = CSD A + EDCj - 100\%$ de Eventos de detención.
- f. La Interfaz en este paso debe graficar la trayectoria de escenarios CSD A / CSD A', previamente guardados. Esta trayectoria también podrá ser guardada en conjunto a la evaluación de las diferencias entre escenarios CSD A / CSD A' en cuanto a: MTTR, Frecuencia, Indisponibilidad y Costos, de manera porcentual y con el valor de la diferencia de cada uno.

Complementariamente habrá un indicador conjunto $\% F_{A-A'}$, como función objetivo que le asignará un porcentaje de ponderación $\%_{P_{1,2,3,4}}$ (que sumarán un 100%) para cada porcentaje de diferencia de indicadores para la evaluación CSD A / CSD A'.

Para escenarios CSD A / CSD A´:

$$\% F_{A-A'} = - [\%_{P1} \times \text{Dif MTTR} + \%_{P2} \times \text{Dif f} + \%_{P3} \times \text{Dif D} + \%_{P4} \times \text{Dif Costos}]$$

Ilustración 19. Indicador conjunto % FA-A´.

Lo anterior representa la evaluación conjunta de indicadores en una función objetivo que debe ser maximizada para comparar dos alternativas.

- g. Una vez que la mejora se ejecute lo más apegado posible a la proyección EDC realizada, se debe volver a analizar un escenario CSD B evaluado en un periodo $T2 \sim T1$, para verificar el resultado real de la mejora.

Tal como en el paso d, la interfaz debe permitir guardar el escenario con denominación única y se debe poder acceder a los eventos de falla relacionados. Este paso permitirá ver el estado de flota en un análisis posterior a la mejora.

- h. Como en el paso f, se debe graficar la trayectoria de escenarios CSD A / CSD B, previamente guardados. Esta trayectoria también podrá ser guardada en conjunto a la evaluación de las diferencias entre escenarios CSD A / CSD B en cuanto a:

- MTTR
- Frecuencia
- Disponibilidad
- Costos.

El indicador conjunto % F_{A-B} también podrá ser obtenido.

VI. FALLAS Y MEJORA DE FLOTA A PROBAR EN MODELO.

En este capítulo se describe una falla específica de flota con sus alcances y efectos para luego, aplicar el modelo propuesto.

Fallas repetitivas de Sistema de Aire Acondicionado (SCL).

La flota de LHD R1700G durante la primera mitad del 2014, presenta el siguiente estatus respecto a fallas, desde el punto de vista de sus sistemas, constituyendo el escenario CSD A:

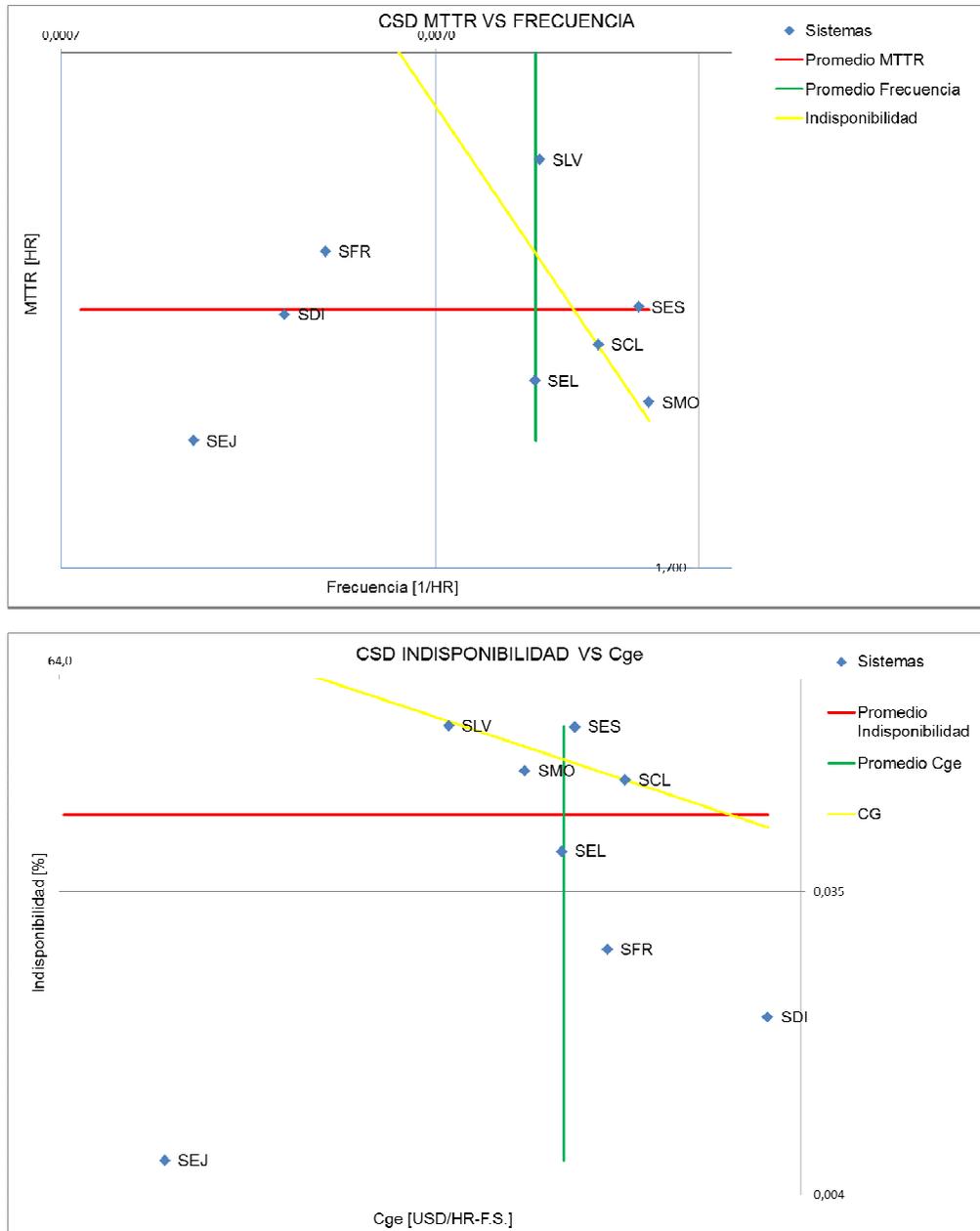


Ilustración 20. Escenario CSD A para sistema SCL.

Aplicando la técnica de análisis CSD, presentada en el estudio, se pueden identificar como Sistemas Críticos, a los sistemas SES y SCL, ya que se encuentran en las zonas de más alta indisponibilidad, mayor frecuencia, mayor tiempo fuera de servicio y mayor costo global. De ellos, el estudio se hace cargo del análisis para el sistema SCL, ya que si se descuentan los efectos de algunas fallas que ha asumido el fabricante como defecto del producto para el sistema SES, se encontrará que el único que prevalece será el sistema SCL.

El sistema SCL entre los meses enero y julio del 2014 cuenta con la siguiente evaluación de indicadores para un estado CSD A:

KPI	Escenario CSD A para SCL
MTTR	4,29 [hr]
Frecuencia	0,019 [1/hr]
Indisponibilidad	8,1 [%]
Costo Global	21,8 [USD/hr]

Ilustración 21. KPI para escenario CSD A y sistema SCL.

Cuando se despliegan los 96 eventos de falla (413 [hr] de tiempo fuera de servicio) que corresponden a los relacionados al sistema SCL para su análisis, se pueden identificar un listado compuesto en su mayoría a deficiencias en el know how del cómo realizar mantenimiento en este sistema y nula uniformidad de prácticas entre los ejecutantes.

De esta forma lo realizado hasta el momento provocaba entre otras cosas, deterioro del sistema por una mala carga de refrigerante, rotura de componentes de filtrado, baja lubricación del compresor, baja eficiencia de filtrado y con ello daños en el compresor que obligaba a su cambio con anterioridad a lo proyectado como vida útil (antes de las 5000 [hr]).

Debido a lo anterior, por medio de discusión con el equipo experto de profesionales de mantenimiento se acuerda conformar un plan específico para este sistema, que se constituye en la mejora a realizar. El plan comprende las siguientes actividades:

Ilustración 22. Escenario CSD A'. MTTR VS Frecuencia.

Los resultados de la Pre evaluación indican gráficamente lo siguiente para un estado CSD A' en cuanto a Indisponibilidad VS Cge:

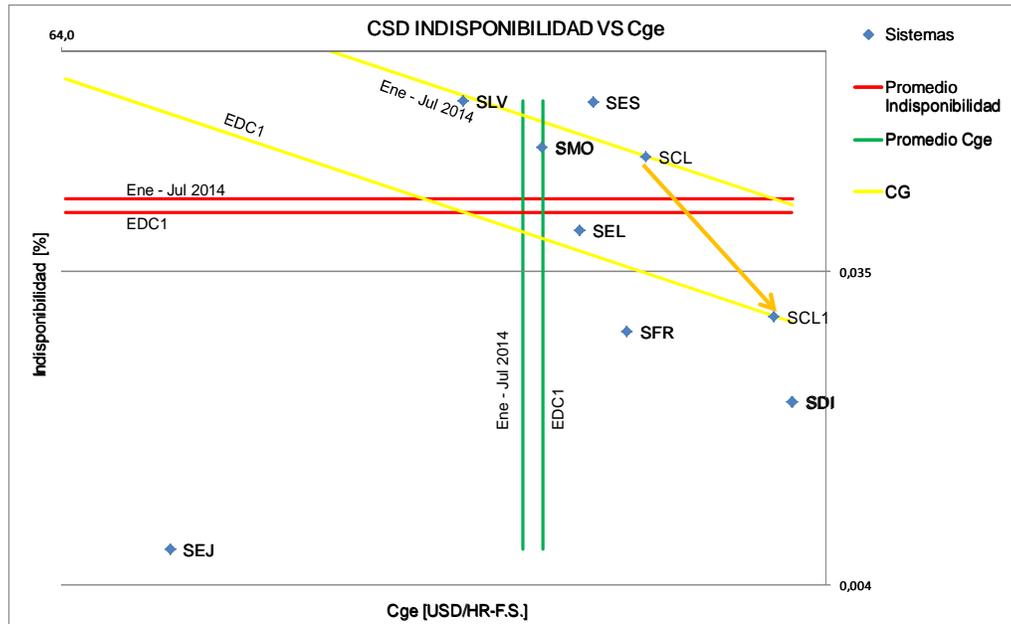


Ilustración 23. Escenario CSD A'. Indisponibilidad VS Cge.

La pre evaluación de la mejora propuesta en el sistema SCL cuenta con el siguiente cambio de indicadores para un escenario CSD A' y su respectivo Δ para el proceso con respecto a escenario A:

KPI	Escenario CSD A	Escenario CSD A'	Δ
MTTR	4,29 [hr]	8,0 [hr]	(-)
Frecuencia	0,019 [1/hr]	0,0032 [1/hr]	(+)
Indisponibilidad	8,1 [%]	2,5 [%]	(+)
Costo Global	21,8 [USD/hr]	9,3 [USD/hr]	(+)

Ilustración 24. KPI para escenario CSD A' y Δ para el proceso.

Cabe recordar que este cambio de indicadores en el sistema SCL, se debe a la inclusión en el escenario CSD A, es decir en el horizonte enero a julio 2014 (5064 [hr]), de un “Evento de control” EDC1, definido por la mejora, es decir, se evaluó para sus actividades de mantenimiento lo siguiente:

Evaluación de EDC1	Valores
Duración de actividades estándar	4 [hr]
Duración de cambio de compresor	8 [hr]
Costo de actividades estándar	440 [USD]
Costo de cambio de compresor	4980 [USD]
Frecuencia de actividades estándar	2/equipo
Frecuencia de cambio de compresor	1/equipo

Ilustración 25. Evaluación de EDC1.

Por otra parte, al escenario CSD A se le han descontado los 96 eventos de falla relacionados al sistema SCL, correspondientes al periodo enero a julio 2014. Éstos constituyen la totalidad de eventos ocurridos en el periodo. Con lo anterior se constituye el escenario CSD A´.

Post evaluación de resultados.

La citada mejora se realiza en su primera etapa en la última semana de Julio 2014. Durante este primer periodo se realizan las actividades estándar más el cambio de compresores preventivo de manera de iniciar con elementos nuevos la evaluación.

Una vez que transcurren 1000 [hr] de operación por cada equipo, llega el momento de volver a realizar las actividades estándar de mantenimiento del sistema SCL. Esto ocurre para toda la flota en la última semana de Octubre 2014. Esta vez no se planifica un cambio de compresores ya que se espera al menos cumplir con una vida útil de componente de al menos 5000 [hr]. La post evaluación aplicará para lo ocurrido entre los meses de agosto y noviembre 2014.

Los resultados de la Post evaluación indican gráficamente lo siguiente para un estado CSD B en cuanto a MTTR VS Frecuencia:

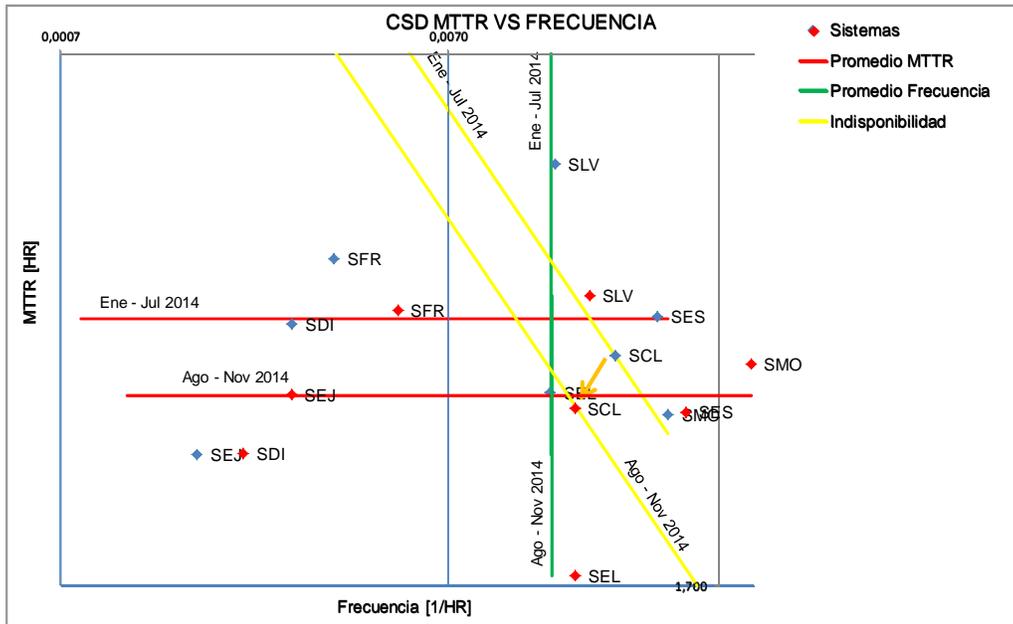


Ilustración 26. Escenario CSD B. MTTR VS Frecuencia.

Los resultados de la Post evaluación indican gráficamente lo siguiente para un estado CSD B en cuanto a Indisponibilidad VS Cge:

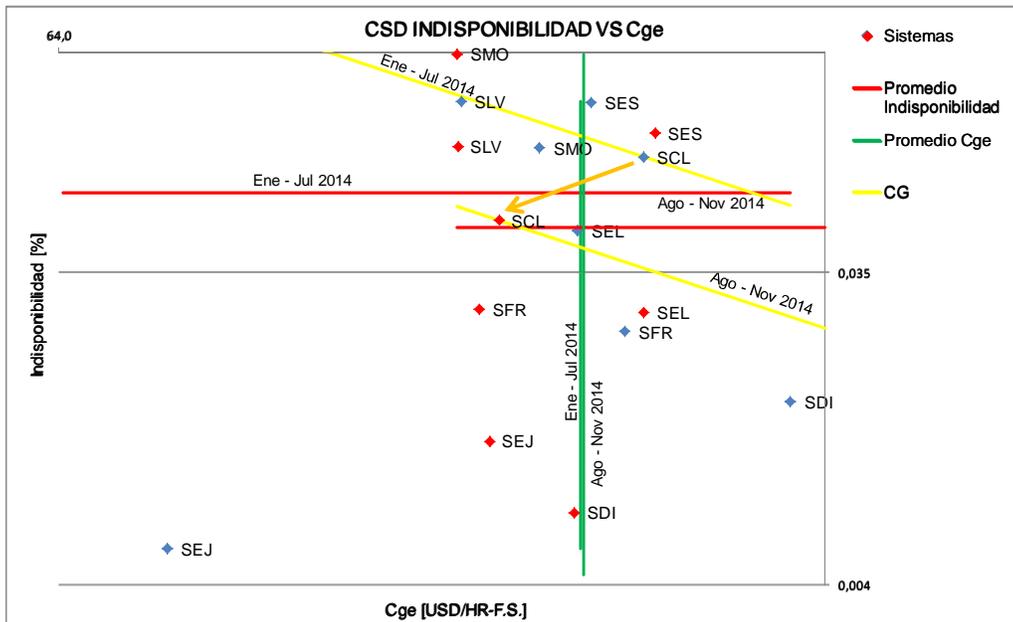


Ilustración 27. Escenario CSD B. Indisponibilidad VS Cge.

La post evaluación de la mejora propuesta en el sistema SCL cuenta con el siguiente cambio de indicadores para un escenario CSD B y su respectivo Δ para el proceso con respecto a escenario CSD A:

KPI	Escenario CSD A	Escenario CSD B	Δ
MTTR	4,29 [hr]	3,48 [hr]	(+)
Frecuencia	0,019 [1/hr]	0,015 [1/hr]	(+)
Indisponibilidad	8,1 [%]	5,2 [%]	(+)
Costo Global	21,8 [USD/hr]	9,7 [USD/hr]	(+)

Ilustración 28. KPI para escenario CSD B y Δ para el proceso.

El sistema SCL presenta 43 eventos de falla y 150 [hr] de tiempo fuera de servicio para el periodo evaluado entre agosto y noviembre 2014.

Calidad de Información utilizada en evaluación.

A continuación y de acuerdo a lo planteado en Capítulo II Análisis de Información Disponible, se presentan los indicadores para describir la calidad de información con que se realiza el presente estudio:

“% Calidad de Avisos”	(%CA)	=	94 [%]
“% Adherencia Dispatch SAP”	(%AD)	=	84 [%]
“% Calidad de Información”	(% CI)	=	94 [%] x 84 [%] = 78 [%]

Ilustración 29. % Calidad de Información de estudio.

Resumen de Resultados Obtenidos.

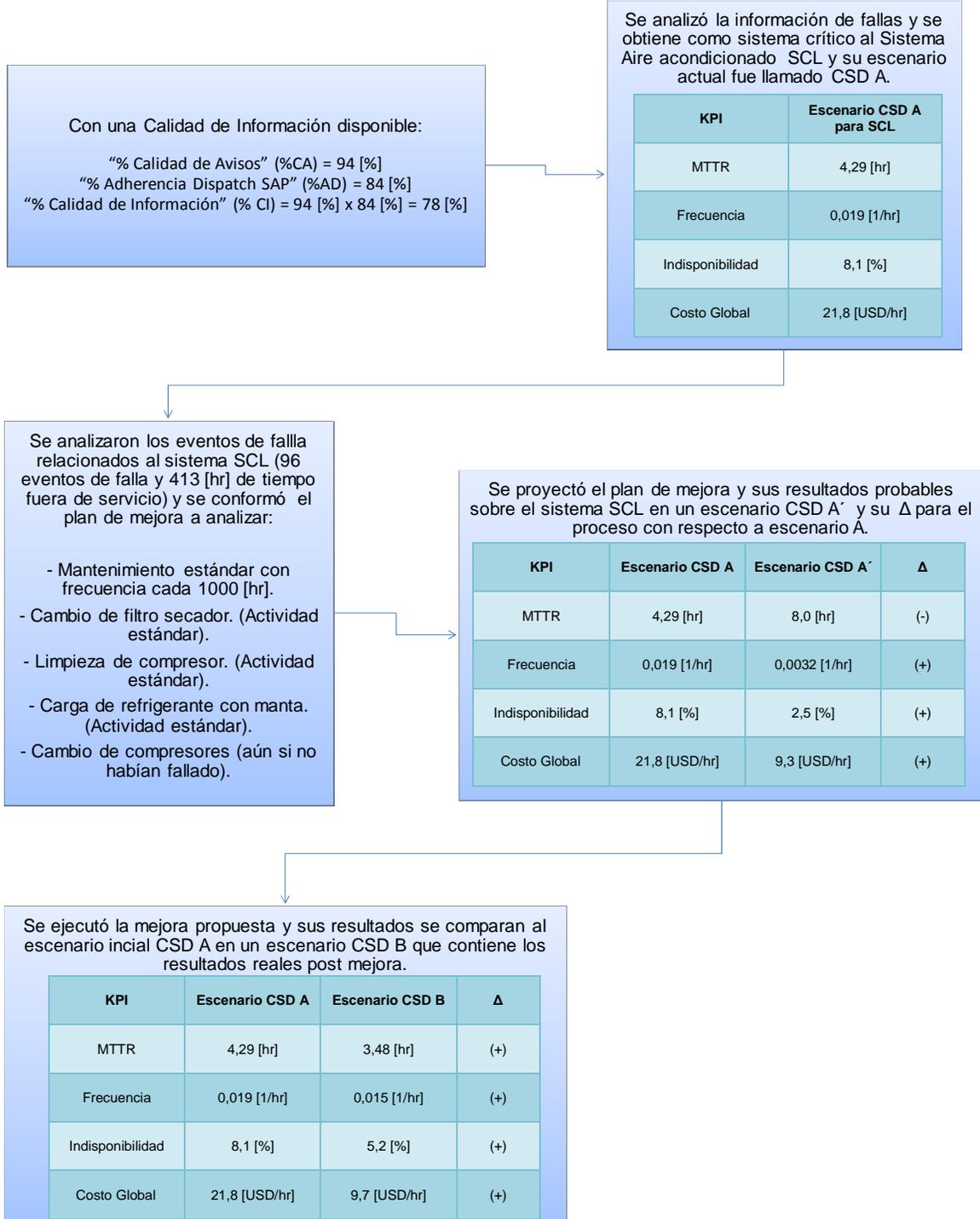


Ilustración 30. % Resumen de Resultados obtenidos.

VIII. RECOMENDACIONES.

- a. Trazabilidad de gestión del modelo: Dado que el modelo de este estudio, representa un método de toma de decisiones instantáneas, será necesario tener en claro, que las decisiones tomadas hoy, impactarán a las de mañana de forma acumulativa, por lo que se recomienda para complementar y desarrollar más este estudio, contemplar una metodología para rescatar las decisiones tomadas y graficar un tiempo de gestión pasado, en base a las decisiones, para evaluar el efecto acumulativo de ellas.

De esta forma se podría evaluar para un periodo, el efecto neto de la gestión de uno o varios tomadores de decisiones, agruparlos en grupos de trabajo y medir su gestión para un ciclo de trabajo en un sistema de gestión de desempeño.

Considerando la organización donde se desarrolla este estudio, se ve muy apropiado poder tomar esta vía de desarrollo, ya que la gestión del mantenimiento es realizada por distintos equipos de trabajo organizados en un gran grupo ejecutor de aproximadamente 160 personas, que a su vez se divide en 4 grupos con distintos turnos y un grupo menor de carácter administrativo con aproximadamente 40 personas. Dado lo anterior se puede inferir que se hace muy difícil segmentar la gestión de un grupo u otro.

Cada grupo minero puede ser considerado un equipo de trabajo tomador de decisiones y a su vez sujeto a una evaluación de gestión, con una aplicación de este modelo que lleve las decisiones en forma personalizada para un ciclo de trabajo determinado.

- b. Estrategia de Repuestos: Otro campo de potencial a ser desarrollado en forma análoga a este estudio, contempla la gestión de repuestos. Dentro de la gestión de mantenimiento, la estrategia de repuestos adoptada tiene una importancia primordial por varios motivos, entre ellos, el gran movimiento de capital involucrado, que por una planificación deficiente en términos de una demanda mayor que a lo proyectado, puede provocar eventos de indisponibilidad de equipos y que por otro lado si se enfrenta una demanda menor que lo proyectado puede llevar a contar con un alto valor de capital inmovilizado.

De acuerdo a lo anterior, se puede acotar que también es posible modelar con una técnica parecida a los Cost Scatter Diagrams CSD, el comportamiento de los repuestos consumidos a partir de los eventos de falla involucrados, de acuerdo a una demanda observada, un costo, una relevancia por costo oportunidad, riesgo, Indisponibilidad asociada, etc., en una técnica llamada Spares Scatter Diagrams SSD [b].

Considerando la organización donde se desarrolla este estudio, será una buena alternativa tomar esta vía de desarrollo, ya que a pesar de ser una operación muy cercana a Santiago y de esta forma bien conectada con centros de abastecimiento de repuestos en el mundo, la mina Subterránea de Codelco División Andina es una faena minera con aislamiento intermitente por diversos motivos, tales como eventos climatológicos e interferencias causadas por

intervención de la comunidad cercana. Por otra parte dentro de la mina sólo se debe almacenar lo de primera necesidad por dos motivos, primero por condiciones de humedad, ya que cualquier elemento que se almacene por un periodo prolongado inicia un rápido proceso de deterioro y segundo dentro de la mina sólo se cuenta con condiciones de espacio muy limitado.

- c. Análisis de Weibull: De acuerdo a la técnica de proyección estadística de confiabilidad de elementos mecánicos [c], basada en la distribución Weibull, es posible realizar evaluaciones estadísticas de confiabilidad de elementos, en base a eventos de falla y su proyección a través de la distribución.

Esta evaluación puede dar respuestas de probabilidad de falla y confiabilidad estadística de partes mecánicas por lo que se recomienda estudiar la inclusión de esta técnica para complementar el modelo presentado.

Con esta técnica además se pueden evaluar los óptimos económicos y técnicos para proyectar la conveniencia de las detenciones si serán preventivas o correctivas de un elemento mecánico, por lo que se ofrece un espectro de optimización de prácticas.

IX. CONCLUSIONES.

Respecto a los objetivos específicos planteados en el estudio se puede mencionar lo siguiente:

- a. Organizar el ingreso de información a los sistemas oficiales de registro de fallas:
 - ✓ Efectivamente se consiguió organizar el ingreso de información en los sistemas de información de la superintendencia donde se desarrolló el estudio, pero esta actividad evidenció la necesidad de disponer de una fuerte carga de trabajo en el control de la prolijidad con que se registran los eventos de falla, su reporte a los interesados y un cierre con registro de los resultados. Lo anterior se debe a que estas nuevas prácticas vienen a contravenir el uso y costumbre que llevaba una organización durante varios años.
 - ✓ Complementariamente, se dio la necesidad de ingresar estas nuevas prácticas a los sistemas de gestión del desempeño internas de cada uno de los trabajadores de la superintendencia, para que éstas formaran parte de las metas anuales a cumplir.

- b. Obtener una data confiable que permita realizar análisis de ella:
 - ✓ Como se comentó en punto anterior, las nuevas prácticas tienen que ver con el cambio en los usos y costumbre de un gran grupo de personas, por lo que esto explica un poco la no adopción absoluta de la forma de trabajo propuesta. Muestra de ello es el indicador de calidad de la información utilizada para el estudio, en donde hubo que hacer un trabajo extenuante para recién lograr la calidad de un 78 [%], que parece no ser suficiente para elevar a técnicas estadísticas la data obtenida.
 - ✓ El trabajo de asegurar una información suficiente y con calidad óptima para realizar el análisis, ha significado para esta organización, el primer paso de análisis de data automatizado y bajo un modelo específico, por lo que con este paso se abren expectativas de realizar otros estudios en base a otras técnicas.

- c. Obtener un modelo que a través de una función objetivo, sea capaz de evaluar KPI de interés:
 - ✓ Se obtuvo un modelo, y de su aplicación a un caso concreto como el del sistema SCL, se pudo apreciar que existen diferencias entre la pre evaluación y lo que realmente sucede y que se representa en la post evaluación.

Se pudo apreciar que la pre evaluación constituye un método equivalente a lo que sería un estudio de perfil ya que servirá básicamente para eliminar entre opciones de mejoras más que para acertar con un pronóstico de una sola en particular.

Se observa que en el cuadro de KPI y los Δ para el proceso en una pre evaluación, existe más bien una tendencia de indicadores que se debe tomar en cuenta, más que el valor absoluto para cada uno de ellos. Esto se debe a que el supuesto de supresión de eventos de falla es muy optimista, ya que lo que sucede en la realidad es que los eventos de falla y sus tiempos de fuera de servicio bajan en una proporción determinada y no se reducen a cero.

De esta forma un indicador conjunto, como el propuesto $\% F_{A-A'}$, pierde algo de sentido para representar una función objetivo que interrelacione KPI's de interés.

d. Probar el modelo y proponer la obtención de pre y post evaluaciones de decisiones de mantenimiento en base al modelo desarrollado:

- ✓ El modelo se prueba para un caso del sistema SCL y de él se desprende que para sistemas más complejos que el mismo SCL, se recomienda aislar el problema en subsistemas, ya que la interacción con otras partes puede constituir que la mejora ejecutada se diluya por malas prácticas o problemas que no le son propias a la falla inicial. Por lo mismo su pre y post evaluación se hace menos apegado al pronóstico y a la misma realidad.

En el caso del sistema SCL, no hubo tal problema ya que la totalidad de fallas estaban cubiertas por el plan implementado, pero aun así no se lograron suprimir todos los eventos de falla, por varios motivos, entre ellos: la adquisición de mejores prácticas por parte de los ejecutores es muy lenta y no todas las buenas prácticas fueron puestas en funcionamiento y por otra parte el sistema SCL aún sigue teniendo un uso muy extremo con encendidos y apagados cada 1 [hr] y funcionamiento a full frío que congela a los componentes y los daña.

- ✓ Se recomienda de acuerdo a punto anterior, generar subsistemas para favorecer el aislamiento de fallas y mejoras.
- ✓ Se recomienda trabajar en base a periodos de análisis de hasta 6 meses para evitar que los focos de falla se contaminen con otros que surjan.

BIBLIOGRAFÍA

- [a] Pascual R., Del Castillo G., Lout D., Knights P. 2009. Business oriented prioritization: A novel graphical technique [en línea] Reliability Engineering and System Safety, Volume 94, Issue 8, Pages 1308-1313 (August 2009).
<<http://web.ing.puc.cl/~rpascual/mispapers/pascual09.pdf>>
[Consulta: 27 octubre 2014]
- [b] Pascual R., 2009. Capítulo 58: Diagramas de priorización. En: El Arte de Mantener. Versión 3.01. Chile, Centro de Minería, Pontificia Universidad Católica de Chile. pp.1117-1144.
- [c] Pascual R., 2009. Capítulo 11: Modelos básicos de confiabilidad. En: El Arte de Mantener. Versión 3.01. Chile, Centro de Minería, Pontificia Universidad Católica de Chile. pp.155-202.

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Línea de producción III Panel Mina Subterránea, División Andina	6
Ilustración 2. 08 sistemas principales LHD R1700G	6
Ilustración 3. % Disponibilidad.	9
Ilustración 4. MTTR.	9
Ilustración 5. MTBF.	9
Ilustración 6. Ciclo de Gestión Corporativa del Mantenimiento CODELCO.	10
Ilustración 7. Estados operativos Dispatch.	12
Ilustración 8. Cantidad de Reportes de Detención SAP PM.	14
Ilustración 9. Tiempo Fuera de Servicio reportado en SAP PM.	15
Ilustración 10. % Calidad de Información.	16
Ilustración 11. Relaciones en CSD etapa 1.	18
Ilustración 12. Diagrama de dispersión etapa 1.	19
Ilustración 13. Relaciones en CSD etapa 2.	19
Ilustración 14. Diagrama de dispersión etapa 2.	20
Ilustración 15. Diagrama de dispersión etapa 3.	20
Ilustración 16. CSD A Ejemplo.	22
Ilustración 17. Trayectoria de escenarios CSD A / CSD A´.	23
Ilustración 18. Método de análisis de flota.	24
Ilustración 19. Indicador conjunto % FA-A´.	27
Ilustración 20. Escenario CSD A para sistema SCL.	28
Ilustración 21. KPI para escenario CSD A y sistema SCL.	29
Ilustración 22. Escenario CSD A´. MTTR VS Frecuencia.	30
Ilustración 23. Escenario CSD A´. Disponibilidad VS Cge.	31
Ilustración 24. KPI para escenario CSD A´ y Δ para el proceso.	31

Ilustración 25. Evaluación de EDC1.	32
Ilustración 26. Escenario CSD B. MTTR VS Frecuencia.	33
Ilustración 27. Escenario CSD B. Disponibilidad VS Cge.	33
Ilustración 28. KPI para escenario CSD B y Δ para el proceso.	34
Ilustración 29. % Calidad de Información de estudio.	34
Ilustración 30. Resumen de Resultados obtenidos.	35