



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA INDUSTRIAL**

**DISEÑO ESTRATEGIA OPERACION CENTRADA EN CONFIABILIDAD PARA
MINERA SPENCE S.A.**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN GESTION Y DIRECCION
DE EMPRESAS**

RENE MAURICIO GONZALEZ ROJAS

**PROFESOR GUIA:
LUIS ZAVIEZO SCHWARTZMAN**

**MIEMBROS DE LA COMISION:
JORGE TORRES HENRIQUEZ
OSCAR VALENZUELA SANDOVAL**

**SANTIAGO DE CHILE
OCTUBRE 2006**

RESUMEN

Minera Spence S.A. en el objetivo de implementar desde sus inicios las mejores prácticas de la administración de activos, identificó como factor clave de la excelencia operacional, el valor de la confiabilidad. En virtud a ello, la Gerencia Mina procedió a diseñar una estrategia similar a la utilizada en el mantenimiento de clase mundial, tomando los conceptos del “Mantenimiento Centrado en Confiabilidad” y extrapolándolos al diseño de una estrategia de “Operación Centrada en Confiabilidad”, que para estos efectos se ha denominado RCO[®].

No obstante, el desafío más importante que fue necesario salvar a objeto de concretar esta estrategia, correspondió a la definición de nuevos indicadores de gestión relacionados con la confiabilidad y la calidad de la producción. Estos en su conjunto, permiten controlar y analizar el nivel de cumplimiento de los planes de producción, la capacidad de la operación, cantidad de errores y la probabilidad de continuar cumpliendo satisfactoriamente con las funciones esperadas del proceso.

Para sustentar la estrategia de la confiabilidad operacional, se definió una metodología de mejoramiento continuo basado en dos ciclos de acción simultánea, divergentes en sus alcances temporales pero coincidentes en su fin, es decir, un plan con actividades concretas de mejoramiento.

La divergencia mencionada, corresponde al enfoque distintivo de cada ciclo; reactivo el primero basado en eventos de falla (RCO[®]_R – visión de pasado) y proactivo el segundo basado en riesgo potencial (RCO[®]_P – visión de futuro). Para ambos ciclos se habilitaron herramientas de priorización y selección de eventos, siendo estos respectivamente los Diagramas de Jackknife y la Matriz de Criticidad.

Así mismo, se definieron los planes de acción, los cuales serían activados al momento en que un KPI quedara fuera de control. Por ejemplo, si ambos KPI's de disponibilidad y utilización de una de las palas se reduce en más de un 1%, el EBIT de Spence se reduciría en más de US\$2 millones por año. En consecuencia, se entiende que actuar tempranamente sobre el proceso, es evitar consecuencias negativas en la última línea del resultado final de la empresa, es decir, la proactividad es rentable.

Finalmente, los KPI's de confiabilidad y calidad operacional han permitido a la fecha, conocer las brechas que nos separan de la excelencia operacional. Por lo tanto, ¡Ahora sabemos, lo que antes no sabíamos que no sabíamos!, esta estrategia lo ha hecho posible.

AGRADECIMIENTOS

A mi esposa Patricia, que con paciencia y respaldo hizo posible que llegara finalmente hasta este momento.

A mis hijos; René, Raúl y Ronald, con los cuales me siento en deuda por no haber estado presente plenamente durante estos dos años

INDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO 1. INTRODUCCION.....	6
1.1 OBJETIVOS.....	6
1.2 ALCANCE	7
CAPITULO 2. PRESENTACION DE LA EMPRESA.....	8
2.1 ANTECEDENTES.....	8
2.2 LA COMPAÑIA	9
2.2.1 <i>Ubicación</i>	9
2.2.2 <i>Geología y Recurso</i>	10
2.2.3 <i>Procesamiento de Minerales.</i>	10
2.2.4 <i>Equipamiento básico y Vista final de la Mina</i>	11
CAPITULO 3. MARCO CONCEPTUAL	14
3.1 INTRODUCCIÓN AL CONCEPTO DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL.....	14
3.2 RCO® PROCESO DE MEJORAMIENTO DE LA CONFIABILIDAD OPERACIONAL	16
3.3 ELEMENTOS BÁSICOS DE LA CONFIABILIDAD OPERACIONAL.....	17
3.3.1 <i>Falla</i>	18
3.3.2 <i>Probabilidad de Falla</i>	18
3.3.3 <i>Consecuencia de Falla</i>	20
3.3.4 <i>Riesgo</i>	20
3.4 HERRAMIENTAS DE LA CONFIABILIDAD OPERACIONAL.....	20
CAPITULO 4. DISEÑO ESTRATEGIA BASE PARA EL RCO®	22
4.1 AREAS DE GESTIÓN Y VARIABLES DEL PROCESO DE OPERACIONES MINA	23
4.2 DIAGNÓSTICO ESTADO ACTUAL PROCESO OPERACIONES MINA	24
4.2.1 <i>Subproceso de Carguío - Palas P&H 4100 XPB</i>	25
4.2.2 <i>Subproceso de Transporte - Camiones CAT 793C</i>	26
4.2.3 <i>Producción Acumulada al mes de Abril 2006</i>	27
4.3 DEFINICIÓN NUEVOS INDICADORES	28
4.3.1 <i>Calidad de la Producción (Sigma Score Z)</i>	29
4.3.2 <i>Confiabilidad de la Producción (MTBF_P)</i>	32
4.3.3 <i>Parametrización de la Variable TPD</i>	34
4.3.4 <i>Comportamiento Histórico Nuevos Indicadores</i>	37
4.4 DISEÑO PLAN DE CONTROL PARA ESTRATEGIA RCO®	38
4.4.1 <i>El Plan de Control y su Objetivo</i>	39
4.4.2 <i>Metodologías para los Planes de Acción</i>	43
CAPITULO 5. CONCLUSIONES.....	45
CAPITULO 6. BIBLIOGRAFIA.....	46
ANEXO A	47
HERRAMIENTAS DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL.....	47
ANEXO B	57
PROCEDIMIENTO RCO®	57

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Compañías agrupadas en Metales Básicos de BHPBilliton	8
Figura 2.2 Ubicación Minera Spence S.A.	9
Figura 2.3 Diagrama de Flujo del Proceso.....	11
Figura 2.4 Equipos de Operaciones Mina.....	12
Figura 3.1 Dimensiones Confiabilidad Operacional.....	15
Figura 3.2 Patrones de Probabilidad de Falla.....	19
Figura 4.1 Variables Relevantes Proceso Operaciones Mina	23
Figura 4.2 Output Simulación Proceso Carguío.....	25
Figura 4.3 Output Simulación Proceso Transporte.....	26
Figura 4.4 Gráfico Producción Acumulada	27
Figura 4.5 Gráfico Producción Diaria	28
Figura 4.6 Concepto Sigma Score	30
Figura 4.7 Data TPD Abril 2006	30
Figura 4.8 Distribución para el Cálculo Sigma Score	31
Figura 4.9 Concepto y Cálculo Índice Confiabilidad de la Producción	32
Figura 4.10 Confiabilidad de la Producción	33
Figura 4.11 Gráfico TPD real vs TPD plan mensual.....	34
Figura 4.12 Gráfico Parametrización TPD_{REAL} VS TPD_{PLAN}	35
Figura 4.13 Data ERROR Abril 2006	36
Figura 4.14 KPI's Históricos Confiabilidad Operacional	37
Figura 4.15 Causas y Efectos Entre Principales Variables.....	38
Figura 4.16 Variables Críticas del Proceso.....	38
Figura 4.17 Diagrama del Flujo de Control	40
Figura 4.18 Matriz del Plan de Control	41
Figura 4.19 Gráfico Error vs Día (TPD_{REAL} VS TPD_{PLAN}).....	42
Figura 4.20 Gráfico $MTBF_P$ vs Día	42
Figura 4.21 Gráfico Z_S vs Día	43
Figura 4.22 Ciclos del Mejoramiento Continuo	43

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 4.1 Cálculo Variable TPD	24
Ecuación 4.2 Cálculo Índice Calidad de Producción (TPD)	30
Ecuación 4.3 Condición de Falla o Defecto del Proceso	32
Ecuación 4.4 Determinación LSL_{TPD}	34
Ecuación 4.5 Precisión Condición de Falla	34
Ecuación 4.6 Variable Error – Diferencia TPD_{REAL} vs TPD_{PLAN}	35
Ecuación 4.7 Nuevo LSL Parametrizado	36
Ecuación 4.8 Cálculo Índice Calidad de Producción (Error)	36
Ecuación 4.9 Relaciones de Causalidad y Efecto	39

CAPITULO 1. INTRODUCCION

Minera Spence S.A. es el proyecto cuprífero más reciente que la corporación BHP Billiton tiene actualmente en construcción. La inversión requerida para su puesta en marcha asciende a los US\$1000 millones. La producción de su primer cátodo está programado para el mes de diciembre del presente año, no obstante, las operaciones mineras se iniciaron en el mes de junio del año pasado. Al respecto, se espera concluir el retiro del material estéril en el transcurso del mes de agosto. A partir de ese momento, la operación comenzará en franca producción de mineral de cobre.

Dentro del plan estratégico, Minera Spence S.A. ha declarado que su identidad será el de una empresa simple y destacada. Para ello entre otros aspectos, ha definido que uno de sus factores claves de éxito será la Confiabilidad Operacional.

Pese al entendimiento intuitivo que existe al respecto, el desafío que se planteó al interior de la Gerencia Mina, fue la de implementar junto al marco metodológico, las definiciones y procedimientos que sustenten objetivamente los KPI's y planes de acción que deriven de este factor.

El presente trabajo, con la finalidad de simplificar los procedimientos y garantizar una efectiva implantación de los objetivos planteados, ha enfocado sus esfuerzos en los procesos de carguío y transporte, los que sin duda concentran al menos el 80% de las variables que manejan la producción de la mina.

1.1 OBJETIVOS

- Definir el concepto de confiabilidad operacional dentro del contexto de las mejores prácticas en la gestión de activos.
- Diseñar el marco metodológico sobre el cual se desarrollará el concepto de confiabilidad operacional.
- Definir los KPI's para la medición de la confiabilidad operacional.
- Diseñar el plan de control para el seguimiento de las actividades de mejoramiento derivadas de sus respectivos planes de acción
- Definir un procedimiento estándar para la cuantificación y validación de los beneficios alcanzados (US\$, RONA, etc.).
- Complementar la estrategia de la confiabilidad operacional con estrategias del tipo RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad) y métrica Six Sigma.
- Estructurar la metodología para su exportación al resto de las faenas que BHP Billiton opera en la región: Minera Escondida, Cerro Colorado, Cerrajón, etc.

1.2 ALCANCE

El presente trabajo abarcará únicamente los procesos relacionados con Operaciones Mina, tales como: Perforación, Tronadura, Carguío y Transporte. No obstante, por su condición de variable de salida, el alcance del estudio será focalizado en los procesos de carguío y transporte.

CAPITULO 2. PRESENTACION DE LA EMPRESA

2.1 ANTECEDENTES

BHP Billiton es una de las compañías de manejo de recursos diversificados más grandes del mundo y tiene como propósito crear valor a través del descubrimiento, desarrollo y conversión de los recursos naturales, con soluciones innovadoras enfocadas al cliente y al mercado. Todo ello con una base a máximos estándares de calidad.

La actual compañía nació oficialmente en junio del año 2001 de la fusión de dos grandes empresas de reconocido prestigio mundial: BHP, de capitales australianos, y Billiton, de capitales británicos. La capitalización inicial fue cercana a los US\$ 28 mil millones.

El grupo posee más de un centenar de operaciones en más de veinte países, donde trabajan alrededor de 35 mil personas y cotiza en bolsas de comercio de Australia y Londres.

Pero, BHP Billiton se distingue de otras compañías de recurso por la calidad de sus activos; su lista de proyectos de crecimiento; comercialización enfocada al cliente, y la diversificación a través de países, materias y mercados.

Además, ocupa uno de los primeros lugares de la industria en aluminio, carbón de energía y los minerales de carbón de cobre, aleaciones ferrosas, minerales de hierro y titanio. Como estrategia de negocios, BHP Billiton administra sus compañías por grupo de sector de clientes: Petróleo, Aluminio, Metales Básicos, Carbón Energético y Metalúrgico, Materiales para Acero Inoxidable, Diamantes y Productos de Especiales.

Continente	Sitio/Cía.	Descripción
Australia	Cannington, Australia	Plata, plomo y zinc
Norteamérica	Highland Valley Cooper, Canadá	Cobre
Norteamérica	Selbaie, Canadá	Zinc y cobre concentrado
Sudamérica	Escondida, Chile	Cobre
Sudamérica	Antamina, Perú	Cobre y zinc
Sudamérica	Cerro Colorado, Chile	Cobre
Sudamérica	Tintaya, Perú	Cobre
Sudamérica	Spence, Chile	Cátodos de Cobre

Figura 2.1 Compañías agrupadas en Metales Básicos de BHPBilliton

Con el proyecto Spence en marcha, BHP Billiton se posicionará como el principal proveedor de cátodos de cobre del mercado mundial.

Spence, el proyecto "greenfield" más grande del mundo en desarrollo, consiste en una mina a rajo abierto con un proceso asociado de lixiviación, extracción por solventes (SX) y electro obtención (EW). La primera cosecha de cátodos de cobre está programada para fines del 2006.

2.2 LA COMPAÑÍA

2.2.1 Ubicación

Compañía Minera Spence S.A. es una empresa 100% propiedad de BHP Billiton, que dio sus primeros pasos en 1996 tras los positivos resultados de un completo programa de exploración realizado en la Segunda Región de Chile a 1.700 metros sobre el nivel del mar. En esa oportunidad Río Algom Limitada, posteriormente adquirida por Billiton Plc, descubrió el yacimiento que nutrirá al innovador proyecto Spence cuyo estudio de factibilidad culminó en julio de 2004, luego de este arduo trabajo de terreno que contempló 784 perforaciones y la construcción de 1.133 metros de túneles de reconocimiento.

El área de proyecto de Spence está ubicada en la comuna de Sierra Gorda, a un costado de la carretera 25, vía principal de conexión entre Antofagasta (150 kilómetros noreste) y la cabecera de la Provincia del Loa, Calama (50 kilómetros sur oeste). Ver Figura 2.2

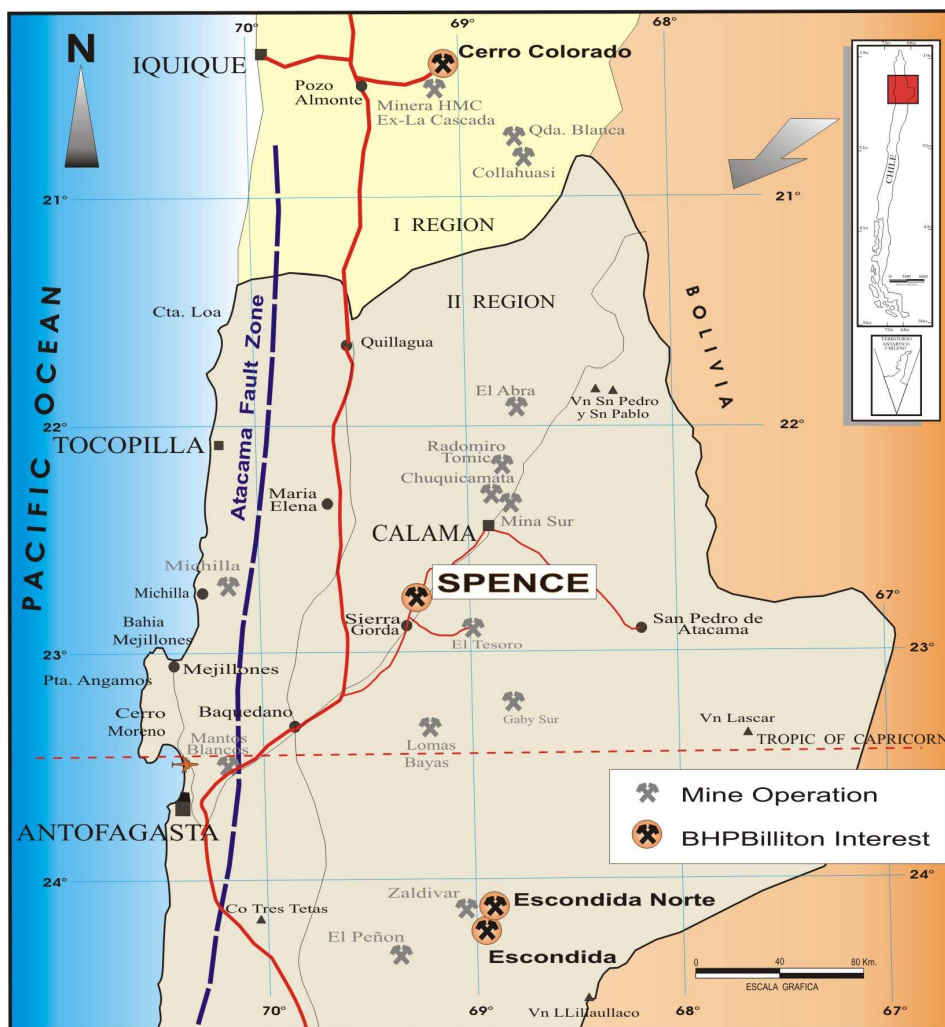


Figura 2.2 Ubicación Minera Spence S.A.

2.2.2 Geología y Recurso

En cuanto al recurso, éste corresponde a un depósito de pórfido cuprífero de la edad del alto Paleoceno (57 millones de años) y consta de mineralizaciones de óxido como también sulfuros de cobre.

La inversión total del proyecto está estimada en US \$1000 millones y considera la construcción de un rajo abierto y una planta de chancado, un tambor aglomerador, dos pilas de lixiviación dinámicas, una para sulfuros y otra para óxidos, cuatro trenes de extracción por solventes y una refinería (electro-obtención) equipada con tres puentes grúas.

De acuerdo a las proyecciones realizadas por el The Australasian Institute of Mining and Metallurgy (Instituto Australiano-Asiático de Minería y Metalurgia), la mina tendrá una vida útil de 19 años, lo que incluye los 15 meses de prestripping (remoción de material estéril) para la exposición del mineral. Durante este último período se removerán cerca de 78 millones de toneladas de material, para luego seguir con la extracción de mineral a una tasa promedio de 93 millones de toneladas por año durante los primeros once años (98,5 toneladas anuales los primeros cinco años). Esta tasa caerá a 20 millones de toneladas para el período restante.

Las reservas probadas y probables del yacimiento Spence están estimadas en 310 millones de toneladas de mineral de cobre con una ley promedio total de 1,14% a una ley de corte de mineral de 0,30%.

Estas reservas de mineral se dividen en 79 millones de toneladas de mineral de óxido lixiviable en pilas con una ley de cobre total de 1,18% y 0,88% de cobre soluble en ácido y 231 millones de toneladas de mineral de sulfuro lixiviable en pilas con una ley de cobre total de 1,13%.

La meta de producción anual corresponde a 200 mil toneladas de cátodos de cobre.

2.2.3 Procesamiento de Minerales.

El mineral será transportado desde la mina a una planta de chancado de 50 mil toneladas diarias que operará alternadamente para el chancado del mineral de óxido y sulfuro. Después del chancado ambos minerales serán aglomerados con ácido sulfúrico y transportados a distintas pilas de lixiviación dinámicas dependiendo si se trata de óxido o sulfuro de cobre. El acopio en pilas y posterior retiro del material lixiviado se llevará a cabo empleando cintas transportadoras de puente móvil, mientras que el material ya lixiviado será transportado a un área de disposición.

La planta de extracción por solventes tendrá cuatro trenes en series paralelas de extracción, 2 para PLS de óxidos y 2 para los PLS de sulfuros; una etapa de strip, otra de lavado y un tanque de orgánicos.

La solución resultante del proceso será sometida a electro obtención empleando cátodos limpios de acero inoxidable.

Los métodos son similares a los que actualmente se emplean en otras tres compañías de la división de Metales Base de BHP Billiton, como son Escondida, Cerro Colorado y Tintaya en Perú.

El diseño de las futuras instalaciones no contempla la construcción de un stockpile de mineral antes de las pilas de lixiviación. En vez de esto, el proyecto contempla utilizar dos "dosificadores", uno para óxidos y otro para sulfuros de baja ley, que estarán ubicados antes de la etapa de chancado primario. El objetivo de los dosificadores es reducir costos y garantiza el envío a las pilas de lixiviación de una mezcla de mineral homogéneo. Ver esquema completo en Figura 2.3



Figura 2.3 Diagrama de Flujo del Proceso

2.2.4 Equipamiento básico y Vista final de la Mina

En equipamiento mina, básicamente la inversión considera perforadoras, palas, cargadores frontales, camiones de carguío, equipo auxiliar y un taller mecánico para camiones y otros servicios necesarios para las instalaciones, entre otros. En la Figura 2.4 se muestran los equipos de Operaciones Mina, contemplados en el proyecto.

 <p>2 CAT-994D 23 y3</p>	 <p>2 CAT- 834 G</p>	 <p>3 CAT-16 H</p>
 <p>3 CAT-777 D</p>	 <p>3 CAT-D10T</p>	 <p>25 CAT- 793 C (240 ton)</p>
 <p>3 Ingersoll Rand Pit Viper Serie 351</p>	 <p>3 P&H 4100XPB 65 y3</p>	

Figura 2.4 Equipos de Operaciones Mina

En lo que respecta a infraestructura de proceso, contempla un circuito de chancado primario/secundario y terciario, circuito de iluminación, circuito de lixiviación y una pila de tipo ROM. A esto se suman instalaciones de extracción por solventes e instalaciones de electro-obtención.

La infraestructura de servicios comprende instalaciones para abastecimiento de agua y almacenamiento de ácido sulfúrico y reactivo. También, un campamento de construcción y operaciones, bodegas e instalaciones para administración, subestaciones de energía eléctrica y sistemas de distribución. Sistemas de comunicaciones, protección contra incendios y de seguridad e instalaciones de tratamiento y disposición de aguas servidas, desechos y residuos.

Por último, el proyecto tendrá una vista final como se muestra en la Figura 2.5.

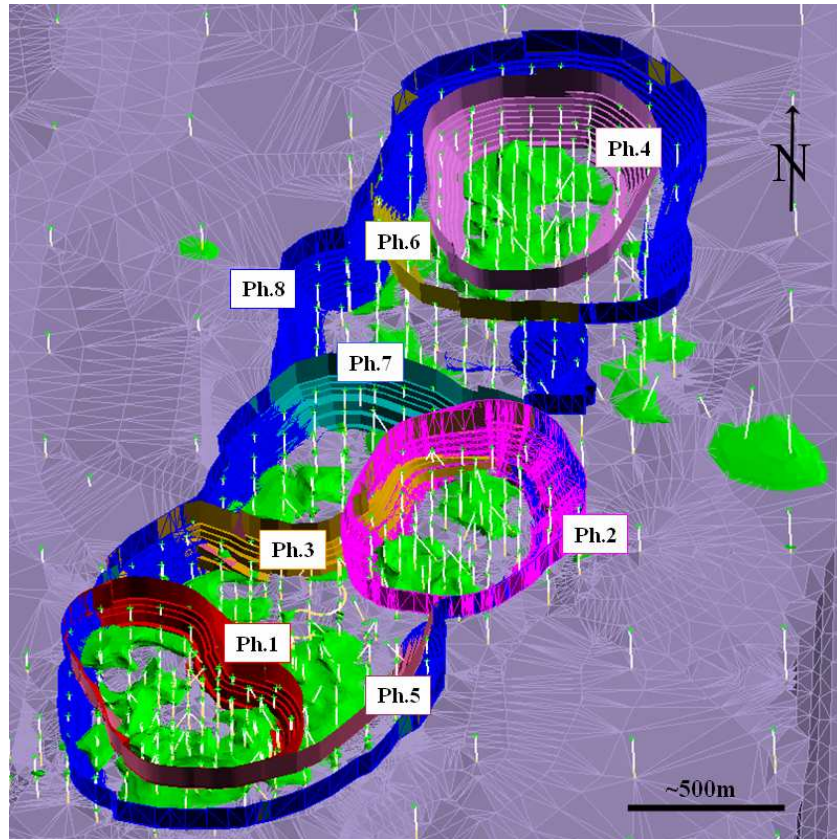


Figura 2.5 Vista final del Proyecto Spence

De acuerdo a esta figura, el plan de desarrollo de la mina considera su avance en al menos ocho fases, las cuales se sucederán en aproximadamente 19 años. Cabe destacar, que en este preciso momento las fases 1 y 2 se encuentran en franco desarrollo.

CAPITULO 3. MARCO CONCEPTUAL

La confiabilidad es un concepto probabilístico relacionado con fallas, es decir, mientras menos fallas se sucedan en un proceso en un determinado periodo de tiempo, el mismo será más confiable. Por lo tanto; confiabilidad = 1 – probabilidad de falla

Dicho concepto es utilizado hoy en día exclusivamente en el ámbito del mantenimiento, no obstante, su utilización como KPI de clase mundial no es superior a los cinco años, especialmente en la industria minera.

Por otra parte, de las empresas intensivas en capital, la mayor parte de ellas en algún momento ha intentado adoptar con distintos niveles, el concepto de la confiabilidad centrada en el mantenimiento. Lo mencionado, por intermedio de las corrientes provenientes desde EE.UU. bajo la denominadas estrategias de RCM, (Reliability Centered Maintenance).

Minera Spence, dado su actual estado de proyecto, tiene la oportunidad única de llevar adelante con éxito la internalización de los conceptos y buenas prácticas relacionadas con la confiabilidad. Es por ello, que el presente trabajo ve incluso la ventaja de extrapolar este concepto desde el ámbito del mantenimiento al de la operación global, es decir, aplicar los principios del RCM a la operación, en otras palabras, implementar RCO[®] (Reliability Centered Operation[®]). Cabe destacar, que dicho concepto en su fase preeliminar fue presentado y aprobado por la alta gerencia de Minera Spence.

3.1 Introducción al Concepto de Confiabilidad Operacional

Dentro del entorno de la gestión minera, este concepto ha ido paulatinamente ganando terreno, sin embargo, su entendimiento tiende a ser intuitivo y por lo mismo, su definición puede ser bastante amplia, por lo tanto, a objeto de no pecar de excesiva amplitud, la mejor manera de explicarlo es mediante las siguientes observaciones:

Eventos que redundan en baja confiabilidad:

- Fallas electro-mecánicas
- Reparaciones de emergencia
- Atraso arribo de repuestos
- Enfermedades laborales
- Falta de motivación
- Bajo rendimiento
- Mantenimiento y operación deficientes
- Equipos y herramientas deficientes
- Falta de entrenamiento
- Contaminación ambiental
- Deficiente adquisición de equipos
- Procedimientos deficientes
- Falta de supervisión
- Contratistas deficientes

Como se aprecia, los eventos anteriores involucran a toda la organización, por lo tanto, un plan de mejoramiento de la confiabilidad operacional beneficiaría a su conjunto.

En consecuencia, es claro que la confiabilidad no es un reducto únicamente del mantenimiento. Las empresas que insisten en confinar la confiabilidad a este departamento, simplemente están dejando de lado una serie de aspectos que podrían mejorar su productividad.

Por otra parte, quienes acepten al RCO[®] como un tema colectivo y tratan de mejorar de una manera continua, tendrán una serie de ventajas competitivas sobre los que aplican solamente RCM.

La siguiente figura esquematiza gráficamente lo mencionado:

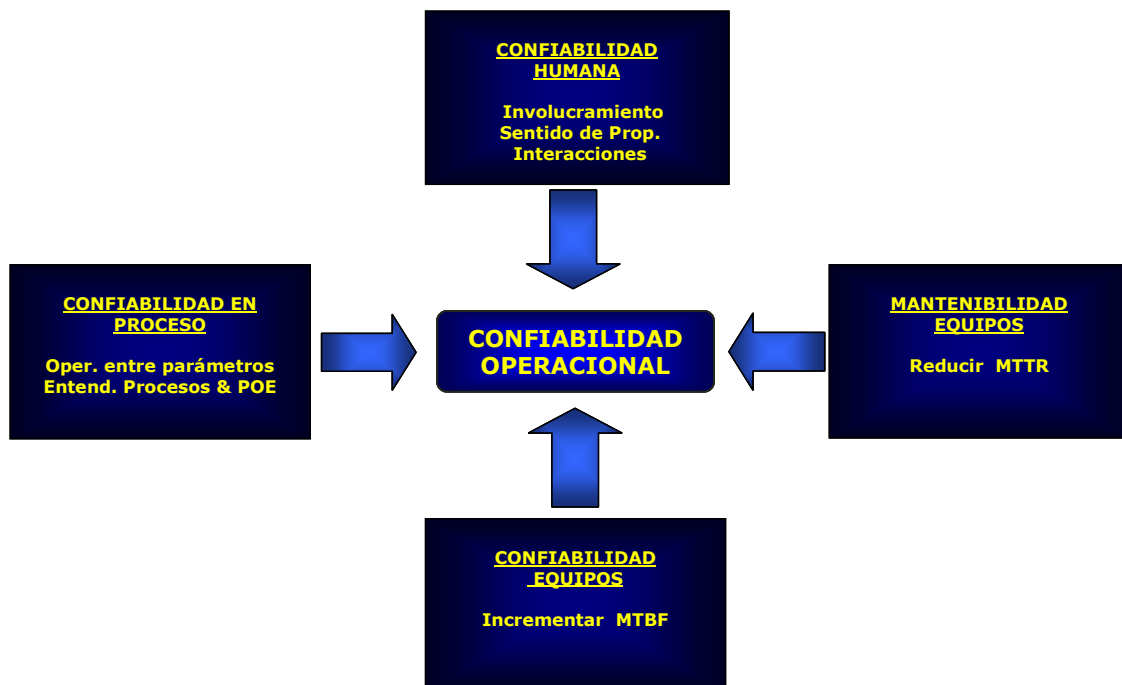


Figura 3.1 Dimensiones Confiabilidad Operacional

De acuerdo a este esquema, el RCO[®] tiene cuatro dimensiones sobre las cuales debe actuar si se requiere sustentar el mejoramiento continuo. Por lo tanto, un proceso basado en este concepto, genera cambios en la cultura de la organización haciendo que esta se convierta en una organización diferente con un amplio sentido de la productividad con una clara visión del negocio y gobernada por hechos.

Cualquier evento aislado de mejora, en alguna de las cuatro dimensiones del RCO[®] puede traer beneficios, de hecho los trae, pero al no tomar en cuenta los demás factores es probable que estos sean limitados y/o diluidos en la organización y pasen a ser sólo, el resultado de un proyecto y no de una transformación. Estos son los típicos casos de los proyectos RCM que se enfocan exclusivamente en los activos y los proyectos TQM (Total Quality Management) que se enfocan en la calidad de los procesos.

Caso diferente ocurre en la cultura japonesa, donde los planes agresivos de mejoramiento continuo, utilizan una mezcla de técnicas que les permiten avanzar al ritmo deseado y generar la revolución industrial de la calidad, pero su TQM está acompañado del Mantenimiento Productivo Total (Total Productive Maintenance TPM) y de planes agresivos de mejoramiento de la confiabilidad humana, cubriendo de este modo las cuatro dimensiones del RCO®

En el mundo occidental, la historia es diferente, generalmente se tienen fronteras muy definidas entre producción, mantenimiento, recursos humanos e ingeniería. Esto a menudo aísla los proyectos de mejoramiento, impidiendo la colaboración entre las partes y es allí donde salen a flote los límites, a veces letales para la organización.

Cuantas veces se ha escuchado decir de Mantenimiento: “Si producción colaborara sería estupendo”, ó del área de Producción: “Ese no es mi trabajo, suena muy bonito, pero aquí es imposible”.

Superar lo mencionado, requerirá de un soporte gerencial de alto nivel y convencimiento de que no es una tarea fácil ni de corto aliento, donde se debe hacer una inversión en adiestramiento, tiempo y recursos.

3.2 RCO® Proceso de Mejoramiento de la Confiabilidad Operacional

El RCO® tratará de una manera estructurada de mejorar cada una de las cuatro dimensiones que involucran la confiabilidad operacional, lo cual a su vez, redundará en mayor productividad.

A diferencia de otras iniciativas de mejoramiento continuo, el RCO® es una ruta flexible y a la medida para que compañías como Minera Spence, busquen y practiquen la excelencia operacional. Por lo tanto, es un proceso de mejoramiento continuo basado en hechos, alcanzado por una armonía de implantación de herramientas y técnicas basadas en riesgo, dicho de otro modo; es una mezcla única de soluciones técnicas, pensamiento estructurado, motivación de trabajadores y desarrollo organizacional.

El RCO® no es una fórmula mágica para mejorar automáticamente, pero sí introduce una aproximación sistemática hacia la eliminación de las causas de las fallas y los actores de mala confiabilidad que afectan los procesos críticos y la rentabilidad total de la empresa.

Son los propios trabajadores quienes resuelven los problemas y proveen la entrada que asegura el éxito. Pero sin el compromiso e involucramiento de la gerencia, aun el mayor esfuerzo no triunfará. La confiabilidad operacional crea un nuevo papel para los gerentes: “crear el ambiente para que los resultados sean obtenidos”

Los resultados pueden ser altamente significativos, no sólo en términos de productividad y rentabilidad, sino también en términos de motivación de los equipos, actitudes, seguridad y entendimiento a largo plazo.

A continuación, algunos resultados esperados:

- Disminución de averías
- Eliminación de tareas superfluas
- Disminución de riesgo operacional
- Producción adicional
- Incremento rendimiento de los activos
- Mejoramiento del ambiente de trabajo
- Optimización de las labores de mantenimiento
- Optimización de las labores operacionales
- Incremento de la vida útil de los activos
- Reducción del TCO (Total Cost Ownership)
- Reducción costo operacional (US\$/Ton)

La permanente mecanización y automatización de los procesos productivos, implica que las detenciones imprevistas tienen hoy en día graves consecuencias en la rentabilidad y en el servicio al cliente.

Los nuevos paradigmas están cambiando las creencias más básicas acerca de la operación y el mantenimiento de los activos, tal es el caso, de que debido a la gran cantidad de variables que están presentes en un contexto operacional determinado, es difícil determinar una relación directa y única entre el tiempo de vida útil de los equipos y sus probabilidades de falla. Otra, es que no existe un solo patrón de falla, si no que existen seis tipos de patrones sujetos a cambios en el tiempo. Además se ha demostrado que el riesgo puede controlarse.

Como parte de estas nuevas tendencias surgen metodologías como el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), en dónde la confiabilidad se refiere a la probabilidad de que un equipo ó componente cumpla con las funciones requeridas durante un intervalo de tiempo dado. No obstante, el RCO[®] amplía dicho concepto hacia las cuatros dimensiones de la confiabilidad global, es decir, se suma a la confiabilidad y mantenibilidad de los equipos, la confiabilidad humana y la confiabilidad del proceso.

3.3 Elementos Básicos de la Confiabilidad Operacional

Para el diseño de una estrategia RCO[®], deben establecerse directrices para asentar las bases del éxito, las cuales deben considerar los siguientes aspectos:

- Evaluación del tipo de proceso, equipos, modos de falla, ingresos y costos, entorno organizacional, síntomas percibidos, posibles causas y toma de decisiones.
- Diseño del camino para poder orientar la secuencia de las metodologías que mejor se adaptan a las circunstancias.
- Generar niveles de iniciativas que permitan determinar el impacto potencial de cada una, visualizando el valor agregado.
- Definición de proyectos, identificando actores, nivel de conocimientos, anclas, combinación de metodologías y pericia.

Por ello, el análisis de confiabilidad operacional está conformado por una serie de elementos intrínsecos a los procesos, así como a una serie de herramientas, los cuales al ser interrelacionadas proporcionan la información referencial para la toma de decisiones en cuanto al direccionamiento de los planes de mantenimiento y mejores prácticas de operación. Los elementos de confiabilidad intrínsecos en el comportamiento de los procesos y las instalaciones son los siguientes:

3.3.1 Falla

Disminución ó pérdida de la función del proceso, equipo o componente, con respecto a las necesidades de operación que se requieren para un momento determinado. Es la incapacidad de cualquier sistema físico de satisfacer un criterio de funcionamiento deseado. Esta condición puede interrumpir la continuidad o secuencia ordenada de un proceso, donde ocurren una serie de eventos que tienen más de una causa.

Las causas de cualquier falla pueden ubicarse en una de estas siete categorías:

- Defectos de diseño
- Defectos de materiales
- Manufactura o procesos de fabricación defectuosos
- Ensamblaje o instalación defectuosos
- Imprevisiónes en las condiciones de servicio
- Mantenimiento deficiente
- Operación deficiente

Para identificar y analizar las fallas, se requiere de un profundo conocimiento del sistema, las operaciones, el personal y los métodos de trabajo, por lo tanto es el resultado de un trabajo en equipo.

3.3.2 Probabilidad de Falla

Es la probabilidad de ocurrencia de un evento, en función del número de veces que ha ocurrido en un sistema o proceso en un determinado periodo.

La representación gráfica de la probabilidad condicional de falla contra la vida útil de los equipos da origen a diferentes modelos de fallas que serán representativos para una gran variedad de equipos eléctricos y mecánicos, tal como se observa en la siguiente figura 3.2:

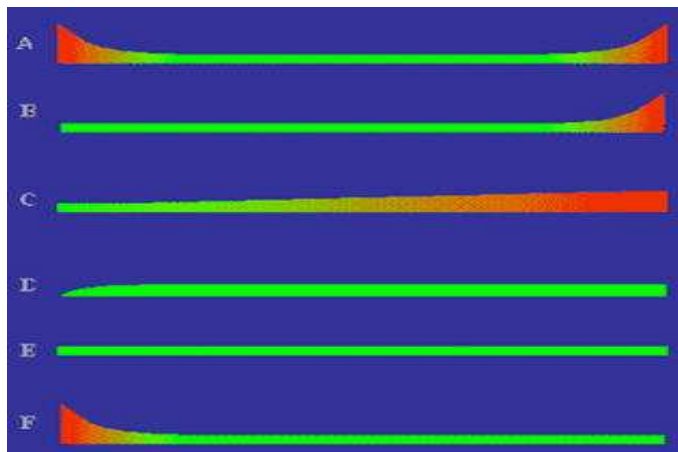


Figura 3.2 Patrones de Probabilidad de Falla

El modelo A es conocido como la curva de la bañera. Comienza con un período de mortalidad infantil que tiene una incidencia de falla alta que va decreciendo a medida que transcurre el tiempo, la frecuencia de falla disminuye hasta llegar a estabilizarse en un índice aproximadamente constante. Luego comienza el período de operación normal (falla aleatoria) donde el índice de fallas permanece aproximadamente constante y éstas pueden ocurrir en cualquier edad. Por último, ocurre el período de desgaste (falla por edad) que se caracteriza porque el índice de fallas aumenta a medida que transcurre el tiempo.

El modelo B es la llamada curva de la falla tradicional, donde el índice de fallas aumenta a medida que transcurre el tiempo.

El modelo C se diferencia de los modelos A y B en que registra un deterioro constante desde el principio, con una probabilidad de falla que aumenta con el uso.

El modelo D corresponde a un elemento cuya probabilidad de falla es baja cuando es nuevo, luego ocurre un incremento rápido de falla seguido de un comportamiento aleatorio.

El modelo E representa un elemento que tiene la misma probabilidad de falla en cualquier momento y muestra que no hay relación entre la edad funcional de los equipos y la probabilidad de que fallen.

El modelo F es la llamada curva de la "J invertida", y combina la mortalidad infantil muy alta con nivel constante de falla luego de esta dificultad inicial.

Los modelos A, B y C están asociados al envejecimiento y en el punto de desgaste definitivo se produce un incremento rápido de la probabilidad de fallas. Las características de desgaste definitivo ocurren más a menudo en los equipos que están en contacto directo con el producto; en general estos modelos son aplicados a equipos sencillos.

Los modelos D, E y F no están asociados al envejecimiento y se caracterizan porque después de un período inicial, la relación entre confiabilidad y la edad operacional es mínima o nula; estos modelos son típicos de los equipos de electrónica, hidráulica y neumática.

3.3.3 Consecuencia de Falla

Cuantificación de la magnitud de pérdida financiera que registra una empresa producto de la ocurrencia de un evento.

3.3.4 Riesgo

Nivel final ponderado de un proceso, equipo o instalación en una matriz que determina el grado de pérdida potencial asociada a un evento con probabilidad no despreciable de ocurrencia en el futuro (Riesgo = Probabilidad Falla x Consecuencia Falla).

3.4 Herramientas de la Confiabilidad Operacional

La confiabilidad como metodología de análisis debe soportarse en una serie de herramientas que permitan evaluar el comportamiento de los procesos, equipos o componentes de una forma sistemática, a fin de poder determinar el nivel de operabilidad, la magnitud del riesgo y las acciones de mitigación y de mantenimiento que requiere el mismo para asegurar al dueño del activo su integridad y continuidad operacional.

Las herramientas en cuestión, están basadas sobre una plataforma de cálculo de probabilidades estadísticas y ponderaciones relativas de los elementos financieros, operacionales, históricos y de seguridad.

El empleo de herramientas de confiabilidad permite detectar la condición más probable en cuanto al comportamiento de un proceso o un activo, ello a su vez, proporciona un marco referencial para la toma de decisiones que van a direccionar la formulación de planes estratégicos de mantenimiento ó de prácticas operacionales. No obstante, es importante aclarar que las mismas solo podrán ser útiles y efectivas sí son manejadas dentro de la sinergia de un equipo natural de trabajo.

Actualmente se ha establecido la clasificación de Mantenimiento Clase Mundial, la cual permite identificar las organizaciones que planifican y ejecutan el mantenimiento dentro de los mejores índices de costo, seguridad, tiempo y confiabilidad, esta condición solo puede alcanzarse con el empleo de las herramientas de confiabilidad desarrolladas a nivel mundial ya que son el único medio efectivo para soportar la decisión de aplicar el mantenimiento en el momento oportuno con el menor costo y sin restringir la acción de mantenimiento sobre los requerimientos reales del equipo o componente. El mismo concepto en consecuencia, debe ser extrapolado a los procesos de planificación y de operación minera, es decir, determinar las mejores estrategias de operación de nuestros activos.

Existe una extensa gama de herramientas de confiabilidad disponibles a nivel mundial, no obstante, una breve descripción de las mismas puede hallarse en el Anexo A del presente trabajo, allí se puede apreciar junto al concepto, ventajas y desventajas de cada una de ellas:

- Inspección Basada en Riesgos (IBR)
- Análisis de Criticidad (AC)
- Optimización Costo Riesgo (OCR)
- Análisis Causa Raíz (RCA)
- Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)
- Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA)
- Análisis de Árbol de Falla (AAF)

CAPITULO 4. DISEÑO ESTRATEGIA BASE PARA EL RCO®

Para que el RCO® sustente efectivamente una valorización superior de los activos, es necesario diseñar un marco estratégico que permita unificar conceptos de Ingeniería de Confiabilidad con los de administración de activos, ello a objeto de cimentar en una única metodología, las mejores prácticas a nivel mundial para identificar y desarrollar las oportunidades mejor alineadas con la visión del negocio.

Sin embargo, es preciso establecer la posición actual de Minera Spence versus la posición deseada según los objetivos mencionados.

Estado Actual	Estado Deseado
Existe un ambiente de buenas intenciones, pero aún inconexo con el plan estratégico de la empresa.	Mejora Continua sistemática, estructurada, establecida y mantenida formalmente.
Esfuerzos poco sistemáticos, y faltos de organización.	Sistema profesional, metódico, cuantificado, documentado y auditable.
Recursos informáticos subutilizados.	Gestión automatizada, trazable, estandarizada y controlada por KPI's de mejora continua.
Manejo incipiente de herramientas profesionales en gestión de Mantenimiento.	Establecer 100% metodologías exitosas de la industria actual (RCA, RCM, TPM, etc.)
Hay una deficiente cultura de capacitación	Capacitación permanente interna y externa del personal según necesidades del negocio
La gestión es inconsistente, de ahí la existencia de resultados poco predecibles.	Dominar las últimas metodologías y herramientas para anticipar fallas y/o problemas potenciales
Existen Ing. de Confiabilidad que cubren lo que se debe hacer, pero no cubren efectivamente el como y el cuando.	Contar con certificación integral, donde se cubra todo de forma sistémica.
Planes de mantenimiento preventivos	Planes fundamentalmente predictivos
Brechas alcanzables en Disponibilidad, Utilización, Confiabilidad, Costos, Stock de Repuestos, etc.	Reducción costos de mantenimiento: 5% Aumento Disponibilidad: 5% Aumento Utilización: 10% Reducción Stock repuestos hasta 40%
La organización "no aprende" de sus experiencias	Organización que hace Gestión de Conocimiento con Capacitación interna y externa alineada con la visión del negocio

Tabla 4.1 Cuadro Comparación Estado Actual – Estado Deseado

4.1 Areas de Gestión y Variables del Proceso de Operaciones Mina

En el diagrama de flujo de la Figura 4.1 se aprecian las principales variables que intervienen en el proceso de producción mina.

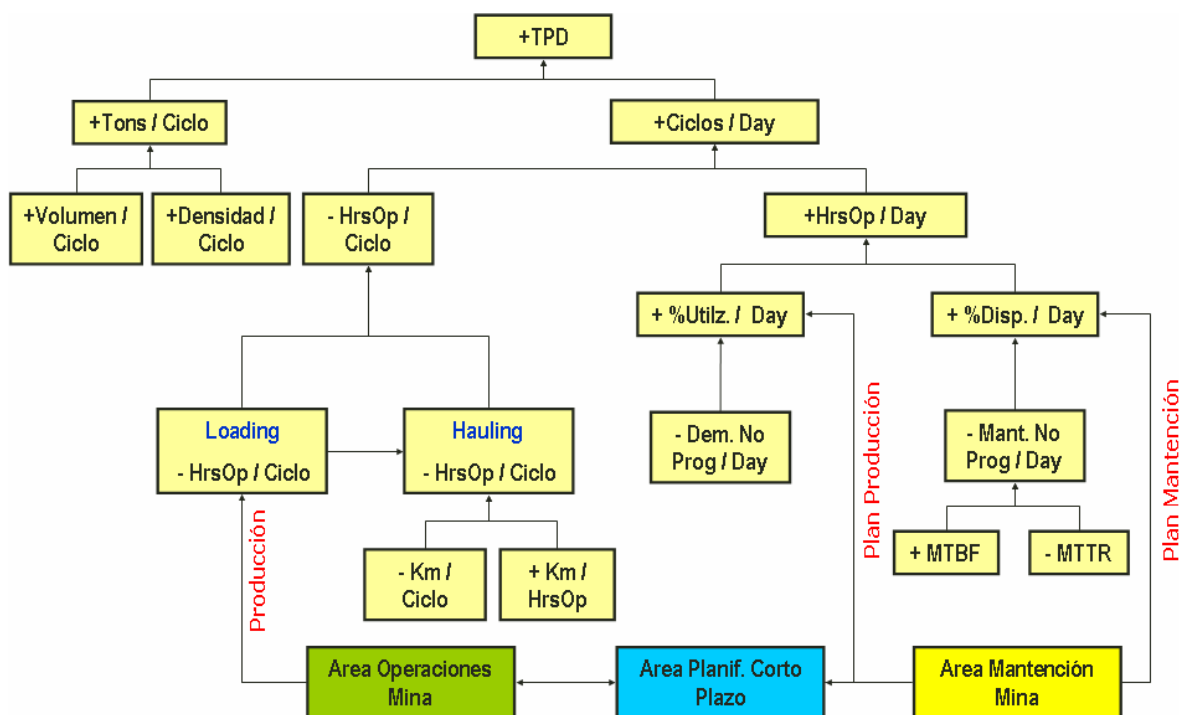


Figura 4.1 Variables Relevantes Proceso Operaciones Mina

Según lo expuesto, se pueden establecer las siguientes observaciones:

- La producción diaria (toneladas por día) depende del número de ciclos de carguío realizados en el día y de la capacidad de carguío de cada ciclo.
- Respecto de la capacidad de carguío de cada ciclo, el mismo se encuentra limitado por el diseño del sistema Pala-Camión y obviamente por las características físicas del mineral, por lo tanto, intervenir en estas variables puede demandar gran esfuerzo y al mismo tiempo ser poco rentable.
- No obstante, las oportunidades relevantes se encuentra en incrementar el número de ciclos de carguío por día. Lo cual puede lograrse mediante un incremento en la disponibilidad y utilización de los activos que conforman el proceso de Carguío y Transporte (Palas P&H 4100 XPB y Camiones CAT 793C).
- Incrementar disponibilidad significa reducir las horas de detención por eventos de mantenimiento, especialmente los no programados (Fallas electro-mecánicas).
- Incrementar utilización significa reducir horas de detención por eventos de responsabilidad de operaciones, especialmente las demoras no programadas.

En consecuencia en el proceso de producción mina intervienen tres áreas de gestión interactuando entre sí y coordinadas por la Gerencia de Operaciones Mina. Al respecto, es posible destacar de cada una de ellas las siguientes características:

- Superintendencia de Mantenimiento, responsable por la gestión del mantenimiento de los activos mina.
- Superintendencia de Planificación Corto Plazo, responsable por la generación y administración de los planes de producción e interacción con las áreas Geo-Metalúrgicas y Planificación Largo Plazo.
- Superintendencia de Operaciones, responsable por la ejecución y cumplimiento de los planes de producción.

Como puede verse, según sea la interacción de estas tres áreas es como se cumplen los objetivos y los KPI's de resultado final del proceso producción. Al efecto, es posible destacar entre estos KPI's a los siguientes:

- Disponibilidad (%Disp.): Indica la probabilidad de que un equipo se encuentre disponible para operar. Corresponde al producto del proceso de mantenimiento.
- Utilización (%Utilz.): Indica la probabilidad de que un equipo se encuentre efectivamente operando (produciendo), por lo tanto, corresponde al producto final de la gestión integrada entre las Áreas de Planificación y Operaciones.
- Rendimiento (tph): Indica el rendimiento de los procesos de carguío y transporte y corresponde a uno de los resultados del Área de Operaciones.

La interacción mencionada puede expresarse de la siguiente manera:

$$TPD = \%Disp \times \%Utilz \times tph \times 24$$

Ecuación 4.1 Cálculo Variable TPD

En consecuencia, efectivamente la productividad depende de estas tres variables, no obstante, es importante destacar que no siempre incrementar cualquiera de ellas impactará positivamente en la productividad, lo anterior en virtud a las entropías que se generan al interior del proceso y que dan origen a “trades off” entre Disponibilidad y Utilización ó Disponibilidad y Rendimiento.

4.2 Diagnóstico Estado Actual Proceso Operaciones Mina

De acuerdo a lo presentado en el punto anterior, se entrega a continuación un diagnóstico de la posición actual del proceso de producción mina, ello en base al comportamiento de las variables %Disponibilidad, %Utilización, Rendimiento y número de equipos por flota de producción. Lo anterior, desagregado para los subprocesos de Carguío y Transporte respectivamente.

4.2.1 Subproceso de Carguío - Palas P&H 4100 XPB

Para estimar la incidencia de cada una de estas variables en la productividad del proceso de carguío, se procedió a considerar información de los últimos 03 meses de operación de las palas. Posteriormente, en base a una rutina de simulación mediante el método de Montecarlo y con la data de la Tabla 4.2, se obtuvo el diagrama de sensibilidad expuesto en la Figura 4.2.

Flota PAL			
	Rend (tph)	%Disp.	%Utiliz
Promedio	4.134	90,5%	76,2%
DesvEstd	445	11,6%	11,0%
N° Total PAL	3		
N°PAL Operand	2		
N° Min	2		
Rend (tph)	4.134		
%Disp.	90,5%		
%Utiliz.	76,2%		
N° Palas	2,3		
TPD PAL	159.519		

Tabla 4.2 Input Simulación Proceso Carguío.

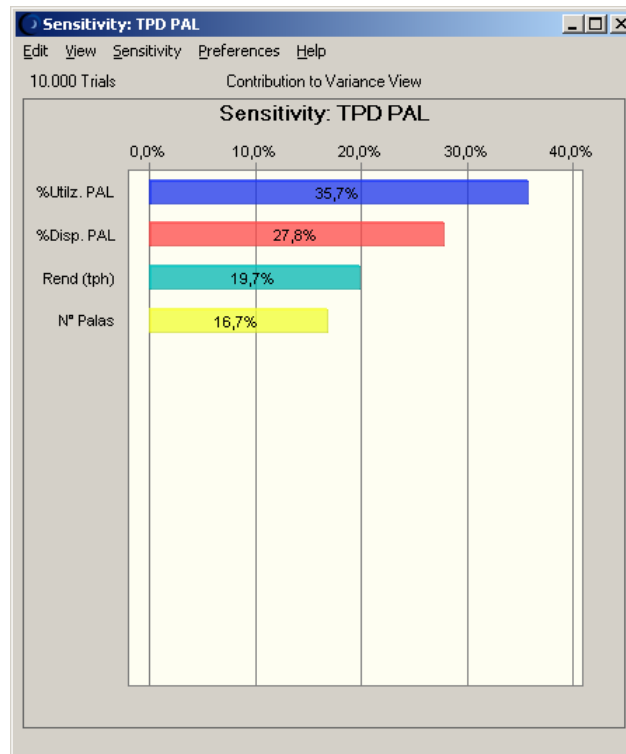


Figura 4.2 Output Simulación Proceso Carguío

Según este ejercicio, la variable utilización en las palas es la más incidente en la productividad, seguida de la disponibilidad y finalmente el rendimiento.

4.2.2 Subproceso de Transporte - Camiones CAT 793C

En base a la misma metodología, las variables utilización y rendimiento son las más incidentes en la productividad de los camiones.

Flota CEX			
	Rend (tph)	%Disp.	%Utiliz
Promedio	703,7	87,3%	70,5%
DesvEstd	58,4	6,7%	8,2%
Nº Total CEX	21		
NºCEX Operand	19		
Nº Min	17		
Rend (tph)	704		
%Disp.	87,3%		
%Utiliz.	70,5%		
Nº Camiones	18,8		
TPD CEX	195.680		

Tabla 4.3 Input Simulación Proceso Transporte

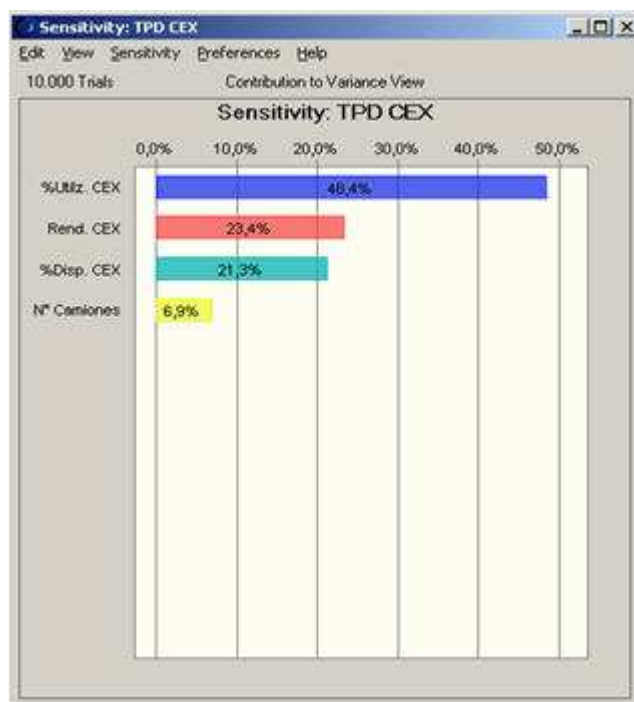


Figura 4.3 Output Simulación Proceso Transporte

Por lo tanto, en base a lo evidenciado, las oportunidades de mejora más significativas ya no son únicamente de responsabilidad de mantenimiento, sino también de las áreas operativas.

4.2.3 Producción Acumulada al mes de Abril 2006

En la Figura 4.4 puede apreciarse la evolución del proceso de producción mina desde que inició sus operaciones en junio del 2005. A la fecha, la producción real acumulada está prácticamente en sintonía con la producción esperada (Budget Fiscal Year 2006). Al parecer, el proceso se encuentra bajo control dado que la producción real es igual o levemente superior al plan de producción.

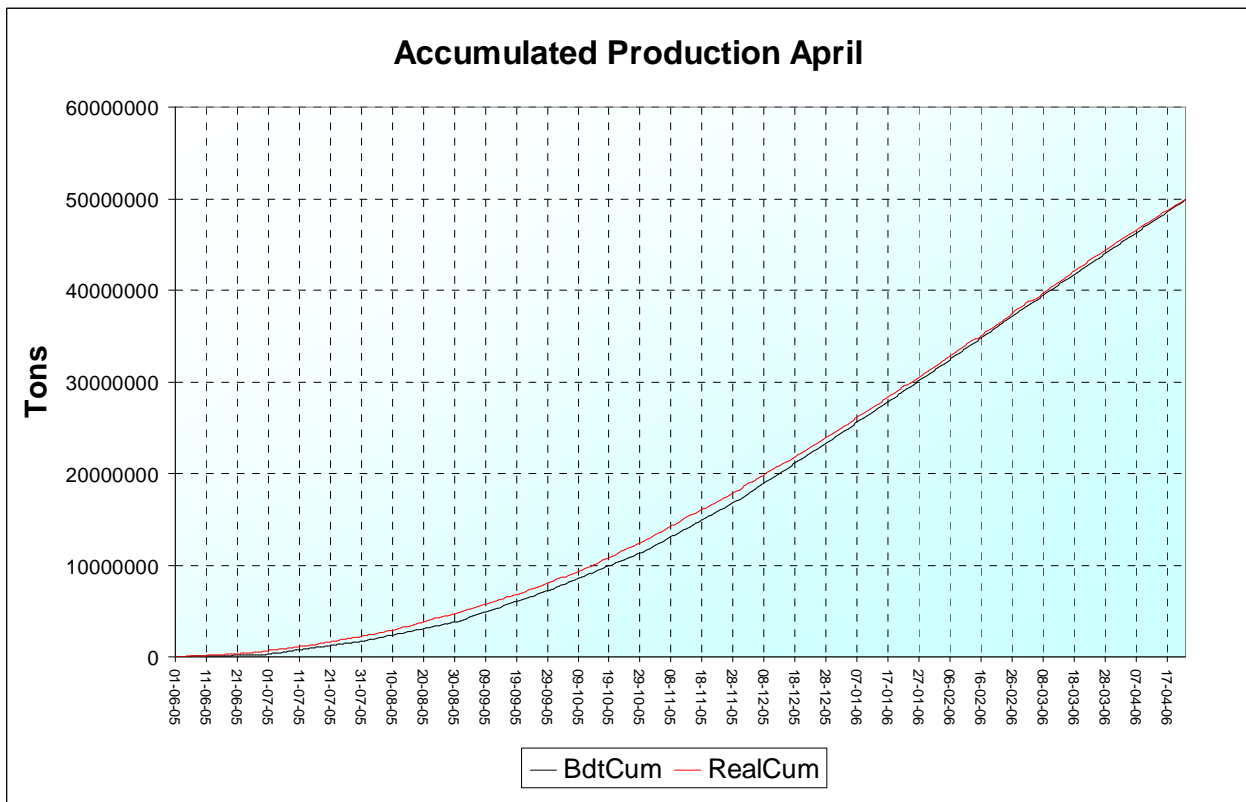


Figura 4.4 Gráfico Producción Acumulada

No obstante, la declaración anterior puede traer consigo conclusiones que auguren pronósticos que más tarde se vean incumplidos en la realidad. Por lo tanto, se hace necesario complementar esta información con otra que nos permita anticipar con menor incertidumbre los eventos venideros.

Parte importante de esta información adicional es la que proporciona el gráfico de la Figura 4.5, sin embargo, la única diferencia con el gráfico anterior es la representación diaria de la producción real y del plan. Tal como se aprecia, el plan tiene una variabilidad intrínseca y que es consistente con los programas de mantenimiento y de operaciones, no obstante, dicha variabilidad alcanza a explicar solamente un 12% de la variabilidad observada en la producción real.

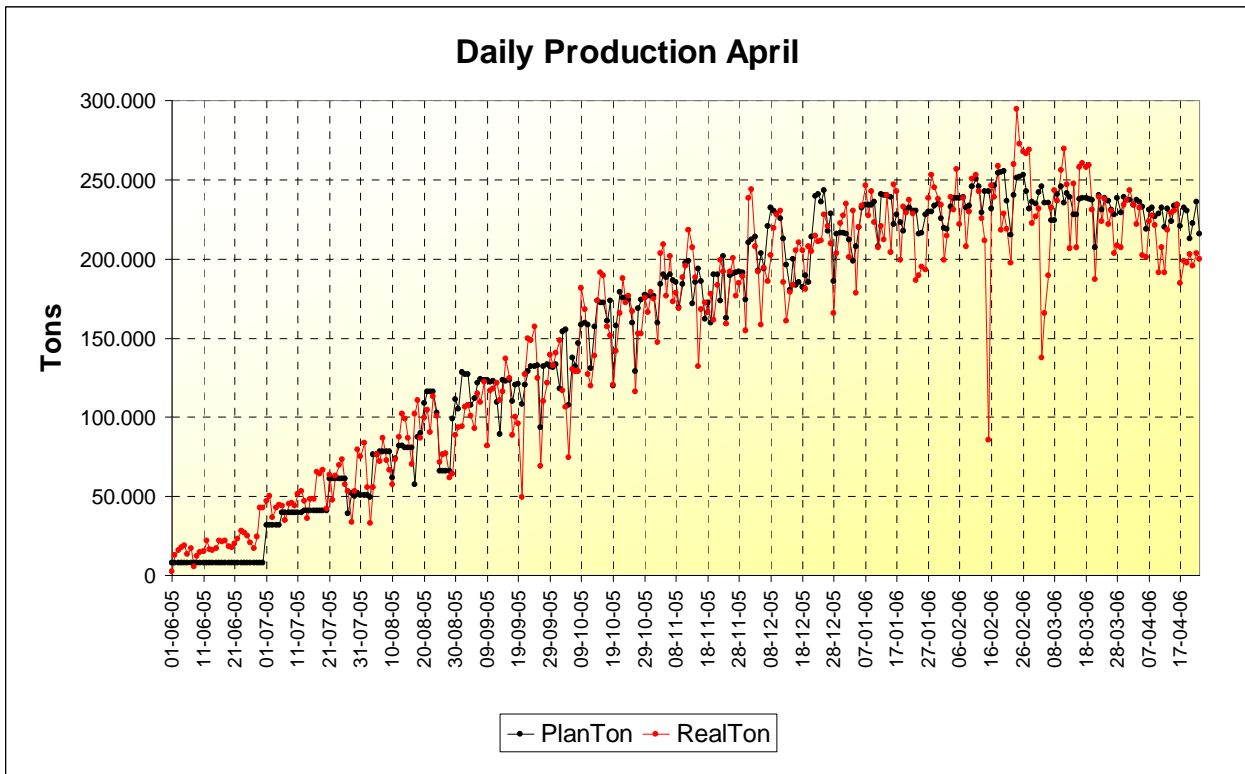


Figura 4.5 Gráfico Producción Diaria

Al respecto; caben las siguientes interrogantes:

- ¿Cuáles son los otros factores que explican el 88% de la variabilidad?
- ¿Es factible reducir y controlar esta variabilidad?
- ¿Será sustentable en el tiempo el control de esta variabilidad?
- ¿Se tienen los mecanismos para identificarla y monitorearla permanentemente?

4.3 Definición Nuevos Indicadores

Según las estadísticas acumuladas a la fecha, la producción ha cumplido con lo presupuestado, sin embargo, ello no quiere decir que el proceso respectivo sea sustentable en el tiempo y mucho menos estable. En algunos días, la producción ha sido bastante mediocre, muy por debajo de lo esperado (picos bajos en el gráfico de la Figura 4.5). Por cierto, existen causas que explican dichos eventos, no obstante, lo relevante es que no fueron visionadas por el plan de producción, es decir, los imprevistos independiente del origen, siempre ocasionan pérdidas muchas veces irre recuperables.

Por lo tanto, el objetivo de este apartado es presentar un par de indicadores que permitan anticipar y juzgar la estabilidad y confiabilidad del proceso de producción, mucho antes que la productividad se vea realmente afectada.

La estructura de estos indicadores tiene su soporte justamente en los conceptos que se vienen declarando desde el inicio de este trabajo:

Complementar el KPI de productividad (TPD) con los nuevos indicadores que a continuación se mencionan:

- Calidad de la producción (Sigma Score Z)
- Confiabilidad de la producción (MTBF_P)

4.3.1 Calidad de la Producción (Sigma Score Z)

Para medir la variabilidad del proceso de producción mina se ha optado por utilizar la métrica icono de la filosofía Six Sigma, referente a la calidad ó capacidad de los procesos a no cometer fallas y/o defectos.

En virtud a la información que se tiene de diversas corporaciones del ámbito minero, este indicador sería la primera vez que se utiliza para medir la gestión día por día de un proceso de extracción de mineral a rajo abierto. Es más, Minera Spence lo ha expresado como un KPI más de su respectivo Balance Score Card.

Al respecto, la justificación de este indicador viene dado por las siguientes aseveraciones:

- No sabemos lo que no sabemos
- No podemos actuar sobre lo que no sabemos
- No sabemos hasta que no hacemos una búsqueda
- No haremos una búsqueda de lo que no ponemos en duda
- No ponemos en duda lo que no medimos
- Por lo tanto, el fundamento es medir

Tal como se mencionó en apartados anteriores, no basta con conocer los valores acumulados de la producción o la tendencia diaria del ritmo de producción, sino que es relevante conocer la variabilidad del proceso y de esta manera, inferir acerca de la sustentabilidad del mismo.

Las ventajas de medir la operación en base a este indicador son:

- Mayor disciplina y concentración.
- Identificar y resolver los problemas más inextricables.
- Simplificar el análisis de los problemas
- Dar lugar a que los empleados usen su cabeza.
- Llevar las buenas ideas a la práctica.

El concepto de cálculo de este indicador se basa según lo expuesto en la Figura 4.6, es decir, el nivel sigma del proceso (Z) es el cuociente entre la tolerancia aceptada por el cliente (por ejemplo, el Gerente General de Minera Spence) a variaciones en una característica fundamental del proceso (por ejemplo, el promedio de las TPD).

Analíticamente, la definición anterior puede expresarse según lo expuesto en la Ecuación 4.2:



Figura 4.6 Concepto Sigma Score

$$Z_{TPD} = \frac{(\bar{X}_{TPD} - LSL_{TPD})}{\sigma_{TPD}}$$

Ecuación 4.2 Cálculo Índice Calidad de Producción (TPD)

Los términos de la Ecuación 4.2 representan los siguientes conceptos:

- \bar{X}_{TPD} : TPD promedio del período
- LSL_{TPD} : Límite de Especificación Inferior (mínimo aceptado para el proceso)
- σ_{TPD} : Desviación estándar del período de la variable TPD

A modo de ejemplo, utilizando la data de la Figura 4.7 puede estimarse el valor del Sigma Score para el mes de abril del 2006.

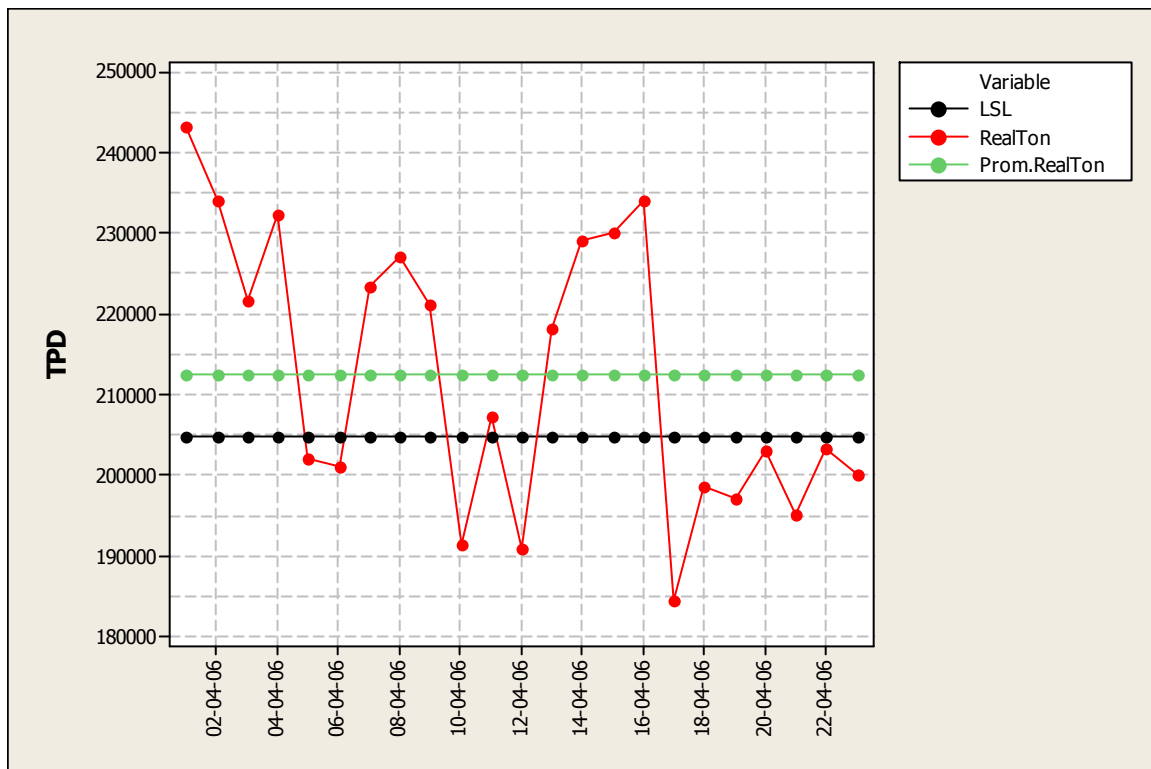


Figura 4.7 Data TPD Abril 2006

Desde la Ecuación 4.2 y/o el gráfico de la Figura 4.8 siguiente, el valor del Sigma Score para el mes de abril sería; $Z=0.45$.

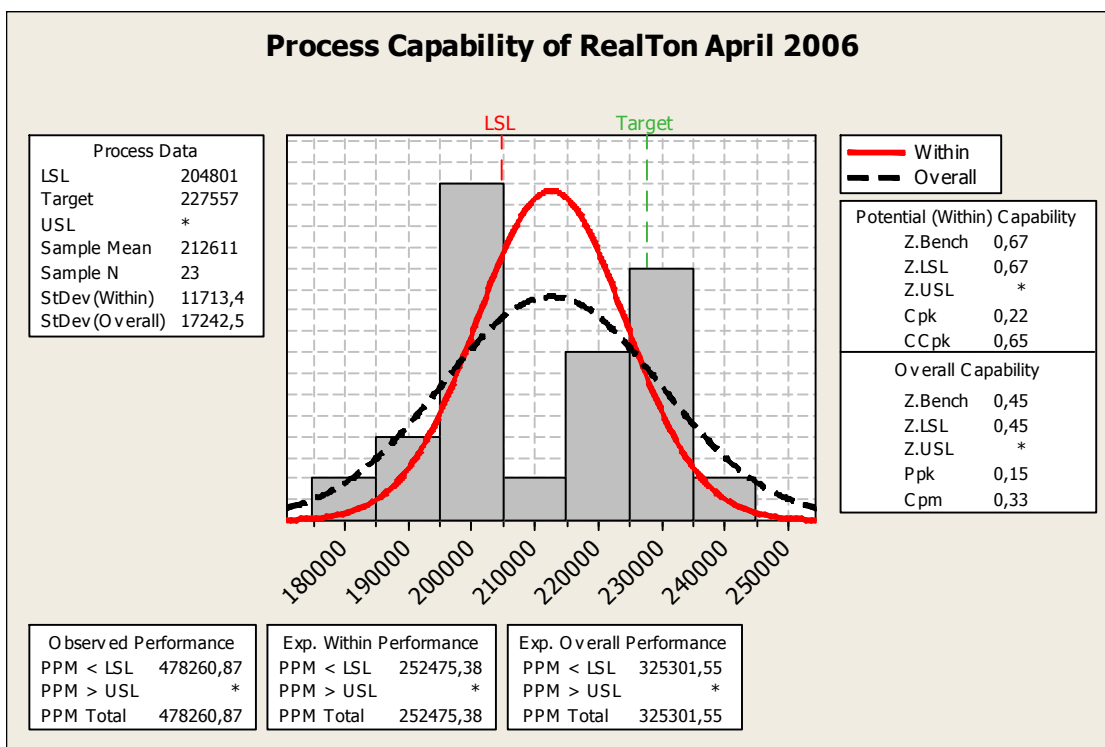


Figura 4.8 Distribución para el Cálculo Sigma Score

A continuación, algunas apreciaciones derivadas del gráfico anterior:

- Según se observa, el promedio de la distribución se encuentra a la izquierda del promedio esperado (Target).
- La cantidad de defectos medidos en PPM (partes por millón) para el mes de abril fue de 325301. Lo cual significa que del total de ciclos de carguío realizados durante este mes, un 33% de ellos fue inferior al límite especificado como mínimo requerido (LSL; Low Specification Level).
- Es claro que se tienen dos opciones para mejorar este indicador: (1) incrementar el promedio y (2) reducir su variabilidad. No obstante, de acuerdo al proceso que se está analizando, la mayor incidencia se lograría reduciendo la variabilidad y obligando al promedio acercarse al Target.

Al respecto, cabe destacar, que mientras mayor sea este indicador;

- Mejor es el proceso de producción
- Menor es el costo por calidad deficiente
- Menor es la probabilidad de defectos

4.3.2 Confiabilidad de la Producción (MTBF_P)

Sí ya es innovador utilizar el término de calidad de la producción en una operación minera, aplicar el término de confiabilidad es aún más novedoso, puesto que este concepto es utilizado únicamente en el ámbito del mantenimiento.

El indicador de confiabilidad para la producción será en consecuencia, el mismo que se utiliza en el mantenimiento; MTBF (Mean Time Between Failures), no obstante, el evento que se catalogará como falla, no será el modo de fallo en particular de algún equipo, sino que corresponderá a la oportunidad en que el proceso de producción no cumple con el plan respectivo, es decir;

$$\forall \text{ TPD}_{\text{Real}} < \text{TPD}_{\text{Plan}} \Rightarrow \text{Falla}$$

Ecuación 4.3 Condición de Falla o Defecto del Proceso

Cabe destacar, que la misma ecuación se aplica para catalogar la condición de defecto en la estimación del índice de calidad de la producción.

Con la finalidad de diferenciar el alcance de este indicador respecto del tradicional utilizado en el mantenimiento, se ha incorporado el subíndice "P", MTBF_P, para especificar que se trata del indicador de confiabilidad para el proceso global de producción.

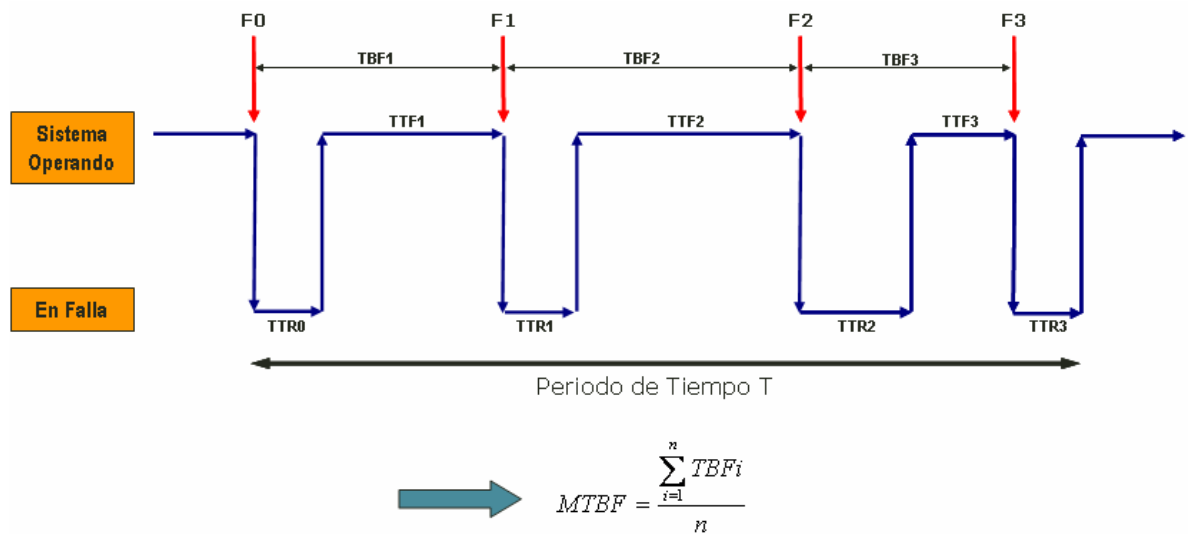


Figura 4.9 Concepto y Cálculo Índice Confiabilidad de la Producción

En la Figura 4.9 se presenta a modo de ejemplo, tres eventos consecutivos de incumplimiento del plan de producción (F1, F2 y F3) ocurridos en un período de tiempo T. También se observan los intervalos de tiempo entre cada incumplimiento (TBF1, TBF2 y TBF3), dónde el promedio de estos corresponde finalmente al MTBF_P del período.

Por otra parte en la Figura 4.10 se presentan los fundamentos mediante los cuales, el indicador $MTBF_P$ posibilita la estimación de la Confiabilidad real del proceso de producción, es decir, nos indica que el proceso efectivamente fallará al cabo de 10 días, ó que el proceso presenta un 50% de probabilidad de fallar en menos de 5 días.

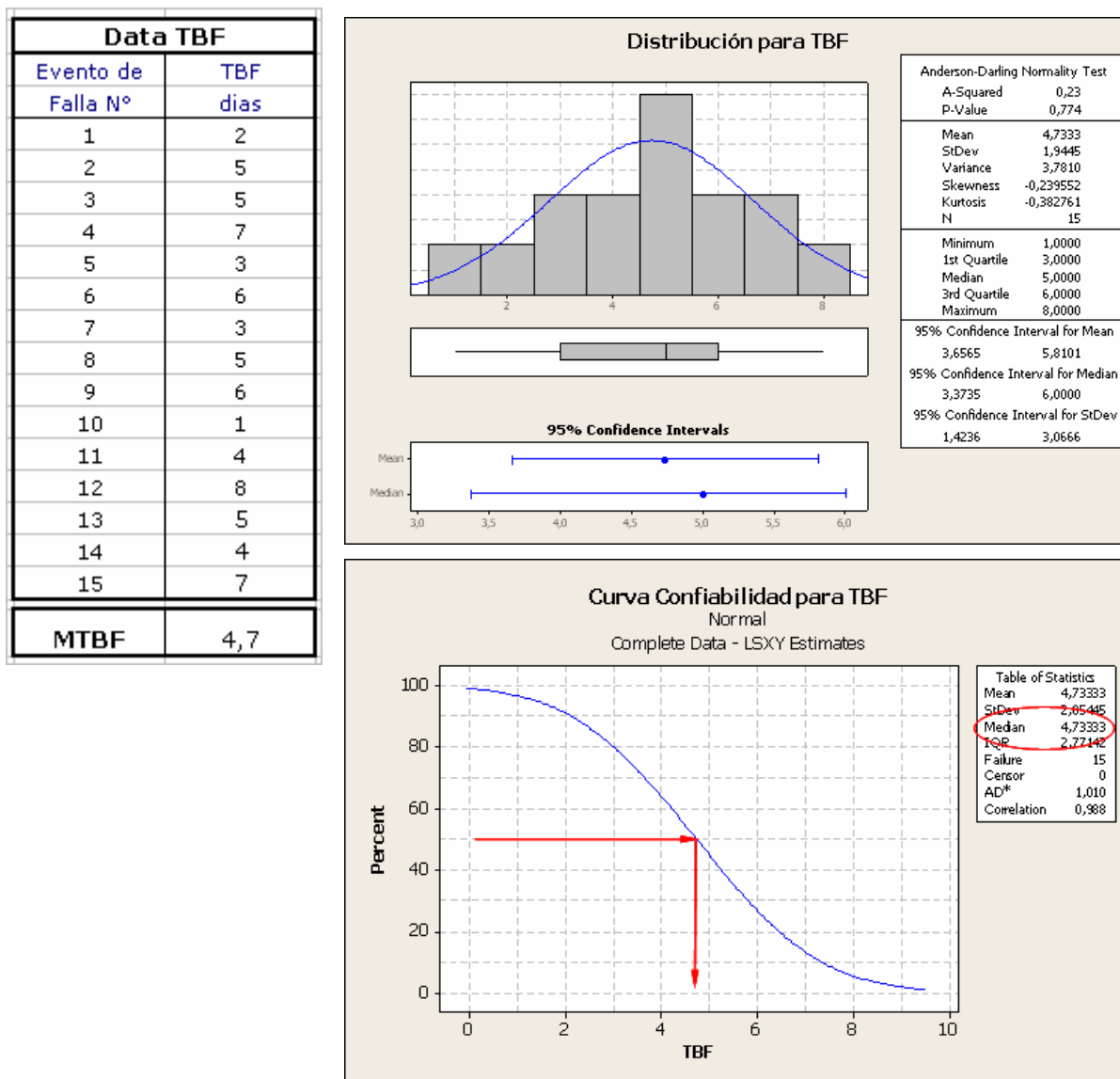


Figura 4.10 Confiabilidad de la Producción

Al respecto, cabe destacar, que mientras mayor sea este indicador ($MTBF_P$);

- Más confiable es el proceso de producción
- Menores son los eventos no deseados
- Menor es la probabilidad de defectos

4.3.3 Parametrización de la Variable TPD

Si bien es cierto, hasta aquí se ha mencionado que la variable de entrada al proceso de control por confiabilidad corresponde directamente a las TPD, no es menos cierto que dicha variable ha sido parametrizada a objeto de independizarla de la variabilidad intrínseca de los planes de producción.

Aclarando lo anterior, el modelo aplicado hasta el mes de abril del 2006 basaba su estructura de medición según se muestra en la Figura 4.11:

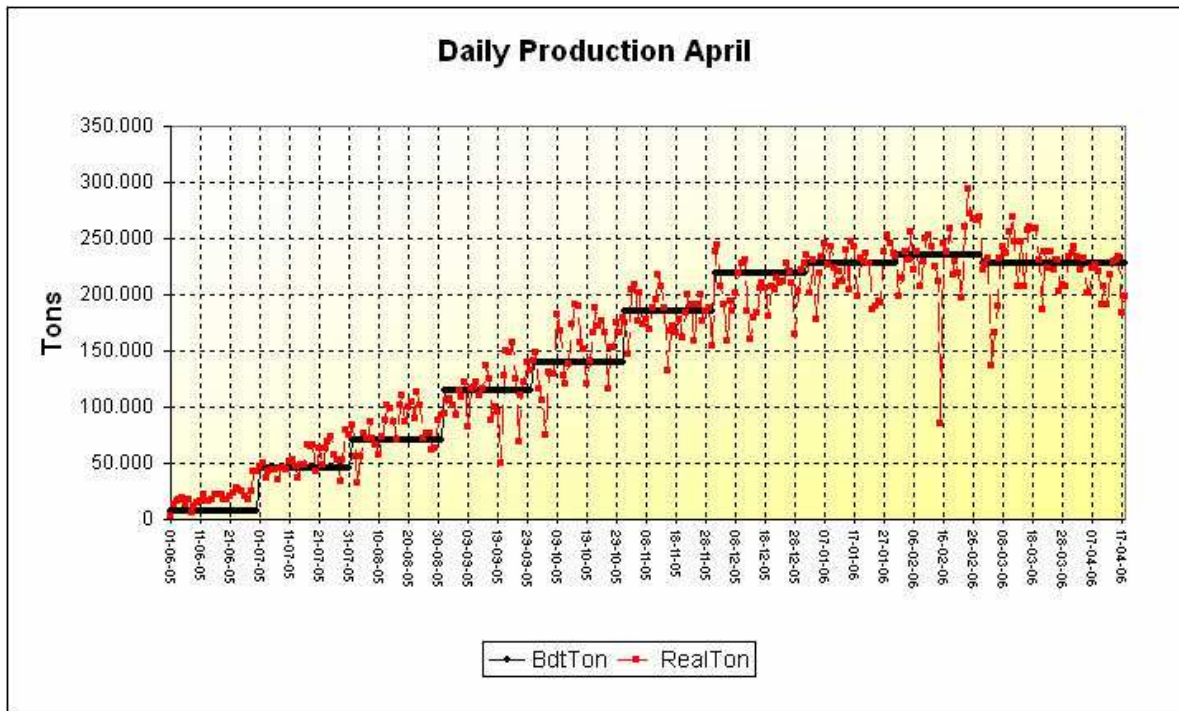


Figura 4.11 Gráfico TPD real vs TPD plan mensual

Es decir, un plan variable mes a mes y que difiere de lo presentado en el gráfico de la Figura 4.5 dónde el plan es variable día a día.

No obstante, en el caso original (Figura 4.11) el Límite de Especificación Inferior (LSL) se definía muy fácilmente mediante la siguiente expresión:

$$LSL_{TPD} = 0.9 \times TPD_{PLAN.MENSUAL}$$

Ecuación 4.4 Determinación LSL_{TPD}

$$\therefore \forall TPD_{REAL} < LSL_{TPD} \Rightarrow FALLA$$

Ecuación 4.5 Presición Condición de Falla

Lo cual significaba que toda vez que el tonelaje diario (TPD_{REAL}) logrado en la mina era inferior al 90% del plan promedio mensual ($90\% TPD_{PLAN \text{ MES}}$), el proceso dejaba de cumplir su función de producción y consecuentemente fallaba.

La parametrización mencionada fue necesaria producto de las siguientes imprecisiones del modelo original:

- Variabilidad del LSL, que impide el cálculo de un Z acumulado ó anual.
- No interpreta cabalmente los programas diarios y/o semanales de mantenimiento
- No interpreta cabalmente los planes de producción diarios y/o semanales
- No considera detenciones programadas de último momento
- Es ajeno a cualquier sensibilidad del plan
- Impide una identificación fina de causas raíces en los problemas del proceso

Ahora bien, para subsanar estas deficiencias se modifica el modelo mediante la asignación de una nueva variable de control, desde variable ***TPD*** \rightarrow ***Error***

$$Error = \frac{TPD_{REAL} - TPD_{PLAN}}{TPD_{PLAN}}$$

Ecuación 4.6 Variable Error – Diferencia TPD_{REAL} VS TPD_{PLAN}

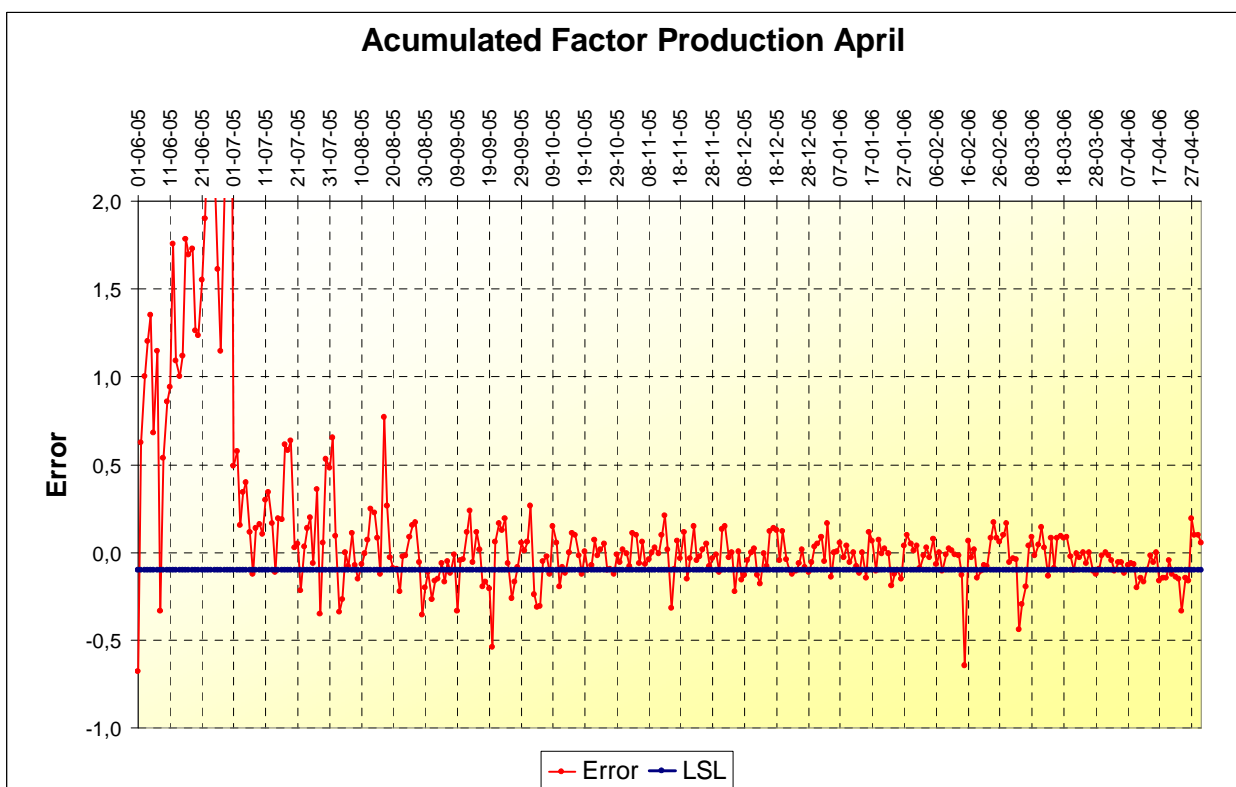


Figura 4.12 Gráfico Parametrización TPD_{REAL} VS TPD_{PLAN}

Tal como se aprecia en la Figura 4.12, con esta nueva variable (Error entre TPD real vs TPD plan), es posible concluir que desde que se inició el retiro de lastre de la mina en junio del 2005, la variabilidad del proceso se ha ido reduciendo. Sin embargo, ello no es suficiente para concluir que la calidad del proceso ha mejorado.

En fin, con esta parametrización, la base para la estimación de los indicadores queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \text{Falla} &\Rightarrow TPD_{REAL} < 0.9 \times TPD_{PLAN} \\
 &\Rightarrow TPD_{REAL} < (TPD_{PLAN} - 0.1 \times TPD_{PLAN}) \\
 &\Rightarrow \frac{(TPD_{REAL} - TPD_{PLAN})}{TPD_{PLAN}} < -0.1 \\
 &\therefore \text{Error} < -0.1 \Rightarrow \text{Falla} \\
 &\Rightarrow LSL_{ERROR} = -0.1
 \end{aligned}$$

Ecuación 4.7 Nuevo LSL Parametrizado

Por lo tanto, el indicador de calidad de la producción quedaría expresado de la siguiente manera (comparar con la Ecuación 4.2 y Figura 4.7):

$$Z_{ERROR} = \frac{(\bar{X}_{ERROR} - LSL_{ERROR})}{\sigma_{ERROR}}$$

Ecuación 4.8 Cálculo Índice Calidad de Producción (Error)

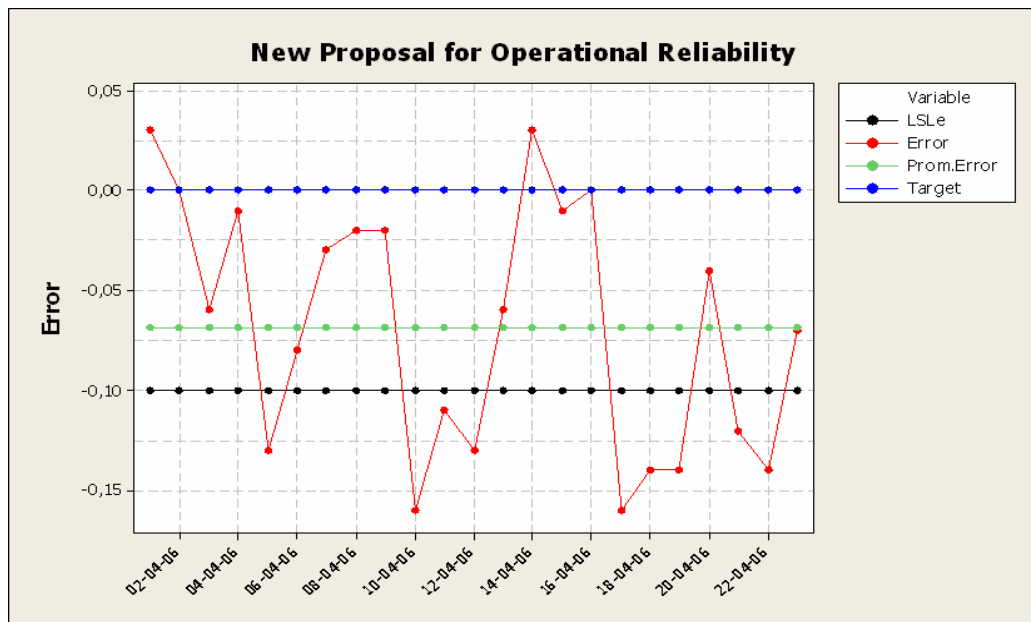


Figura 4.13 Data ERROR Abril 2006

4.3.4 Comportamiento Histórico Nuevos Indicadores

Habiendo definido el concepto de confiabilidad operacional junto al de sus respectivos índices, se presenta a continuación el comportamiento histórico de los mismos desde el momento en que se iniciaron las operaciones de Minera Spence S.A.

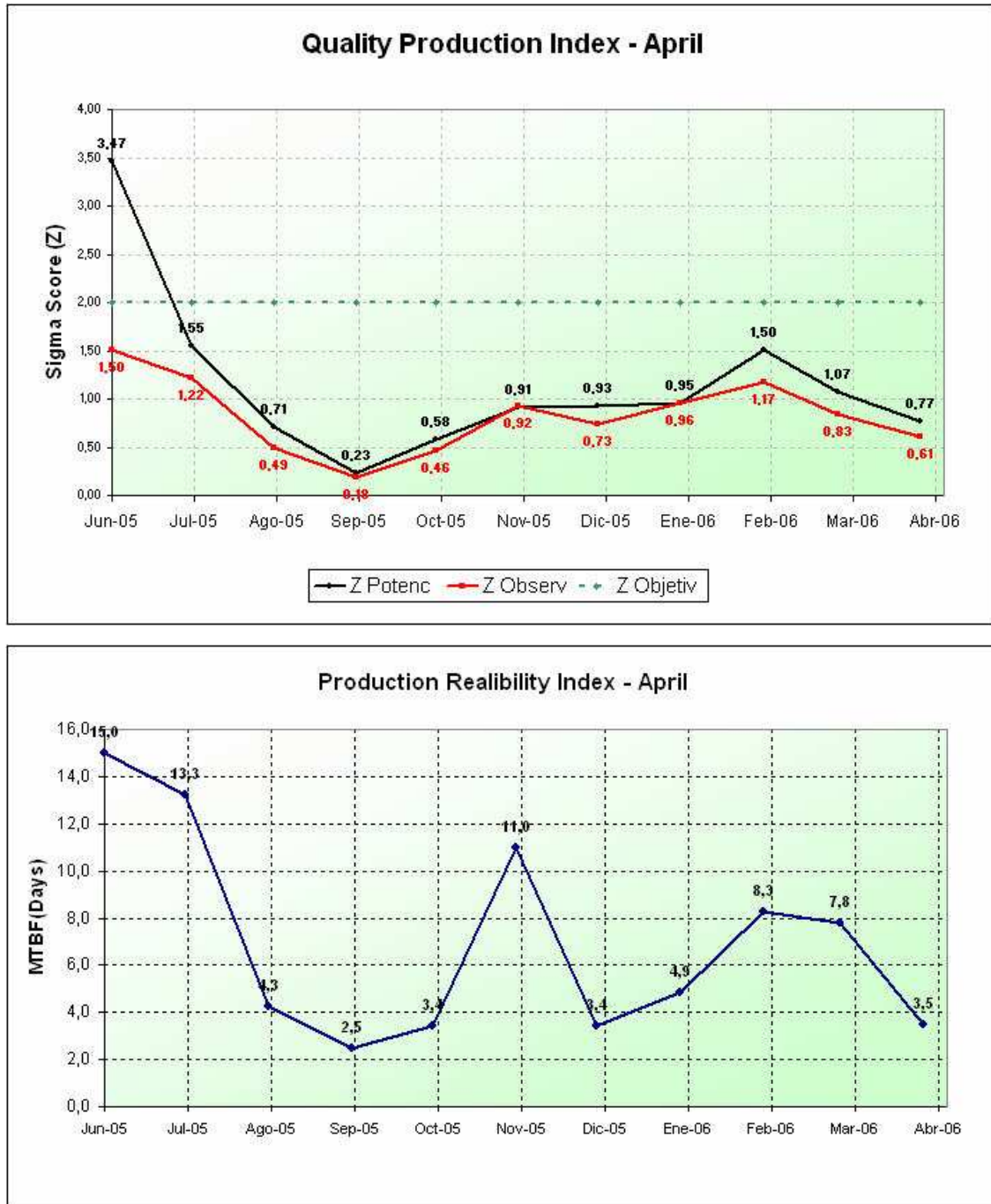


Figura 4.14 KPI's Históricos Confiabilidad Operacional

4.4 Diseño Plan de Control para Estrategia RCO®

El objetivo de este apartado, es entregar un procedimiento simple pero a la vez estructurado con criterios y metodologías, que permitan activar y desarrollar un plan de acción basado en la gestión del conocimiento que existe al interior de la organización de Minera Spence.

La activación de cualquier plan de acción tiene su origen en un plan de control que asegure en todo momento el monitoreo de sus principales variables.

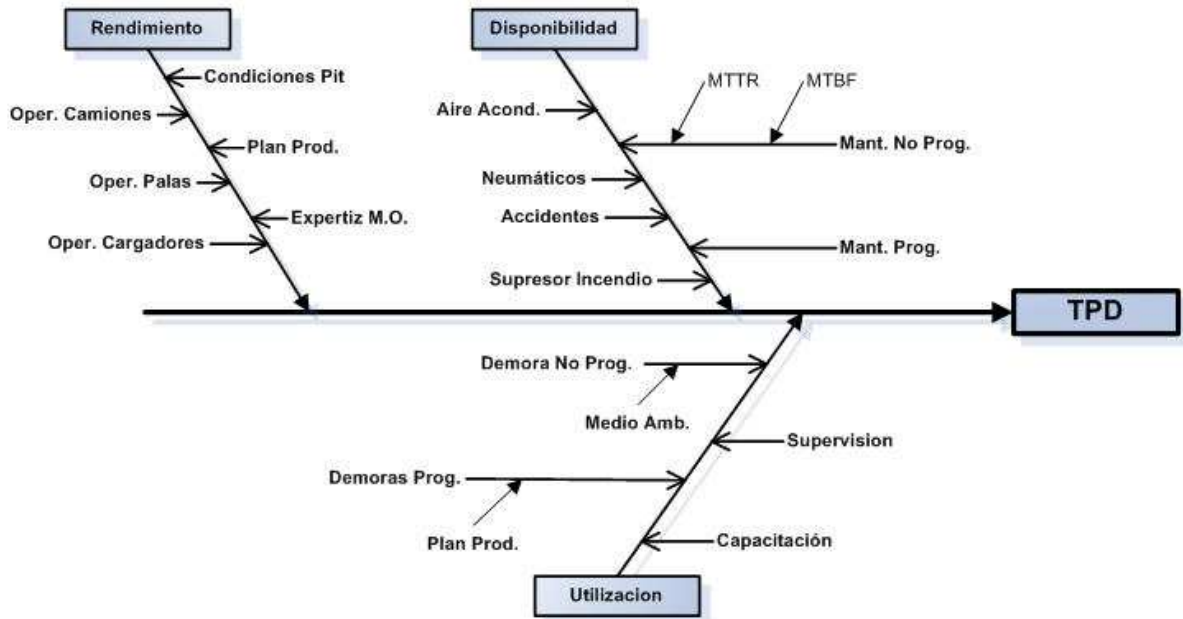


Figura 4.15 Causas y Efectos Entre Principales Variables

Dicho monitoreo deberá incluir entre sus registros, gran parte de las variables que se aprecian en la Figura 4.15, no obstante, antes de verse afectada la productividad expresada en las TPD, se verán síntomas en los índices de confiabilidad operacional definidos previamente: $MTBF_P$ y Z Sigma Score.

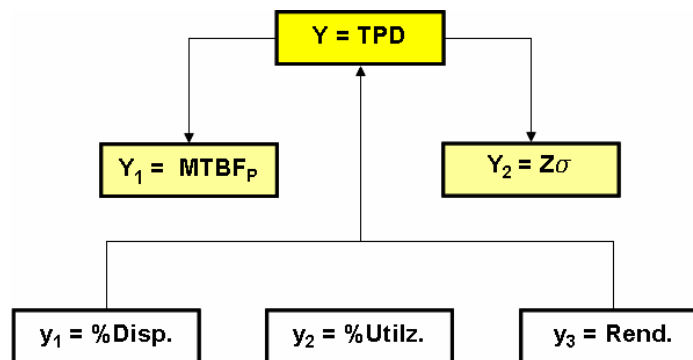


Figura 4.16 Variables Críticas del Proceso

Dicho de otro modo, a objeto de expresar lo anterior en un Plan de Control, es necesario definir las siguientes relaciones entre efectos y causalidad:

$$Y = TPD$$

$$Y_1 = MTBF_p$$

$$Y_2 = Z\sigma$$

$$y_1 = \%Disp.$$

$$y_2 = \%Utilz.$$

$$y_3 = tph$$

$$\therefore Y = f(y_1, y_2, y_3)$$

$$x_1 = MTBF$$

$$x_2 = MTTR$$

$$x_3 = \%PM$$

$$x_4 = Demoras.Operacionales$$

$$x_5 = Efectividad.Operacional$$

$$\therefore y_1 = f(x_1, x_2, x_3)$$

$$\therefore y_2 = f(x_4)$$

$$\therefore y_3 = f(x_5)$$

Ecuación 4.9 Relaciones de Causalidad y Efecto

4.4.1 El Plan de Control y su Objetivo

El Plan de Control tiene por objetivo más allá del seguimiento de las “ Y_i ó y_i ”, el control de las “ x_i ”, dado que actuar a este nivel con medidas de mitigación es actuar proactivamente, con ello es posible anticipar y/o evitar cualquier efecto nocivo en las variables de salida (“ Y ”).

Identificadas las x vitales y determinadas las mejores configuraciones para cada una de ellas, la clave está en no dejar que las configuraciones se alejen de la configuración establecida. Se puede mantener el nivel establecido como objetivo mediante la “Detección o la Prevención”. Las x_i normalmente se mantendrán a través de:

- Diagramas de control (CEP)
- Sentido común ó experiencia del personal experto
- Protección contra errores

Un plan de control debe tener el siguiente propósito:

- Definir acciones que mantienen a los procesos capaces y bajo control.
- Definir acciones correctivas cuando el proceso esté fuera de control.
- Proporcionar una descripción documentada de los sistemas que se utilizan para minimizar la variación del proceso.

Un plan de control debe cumplir con las siguientes características:

- Ser un documento vivo.
- Reflejar los métodos actuales de control.
- Identificar las mediciones que se utilizan actualmente.
- Estar integrado con el proceso global
- Ser formulado por un equipo multidisciplinario
- Incluir factores de entrada y factores durante el proceso (controlables y no controlables), el resultado final y los requisitos exigidos por el proceso de producción

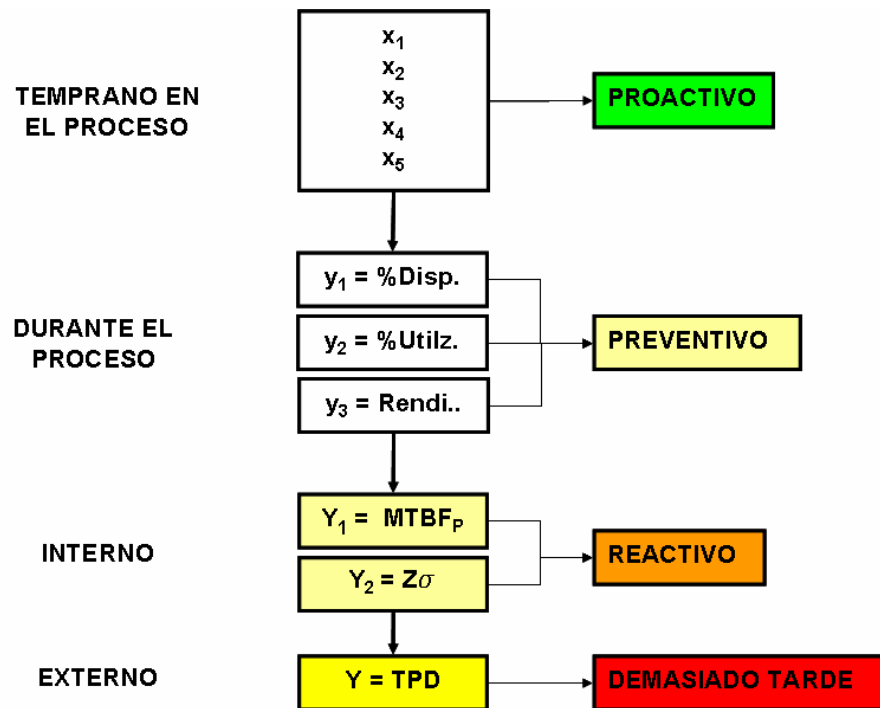


Figura 4.17 Diagrama del Flujo de Control

Observando el diagrama de la Figura 4.17, se entiende que las mediciones de las “x” y las “y” son el enfoque del plan de control, dado que aseguran respectivamente una respuesta proactiva y preventiva. El seguimiento de las “Y”, confirma la capacidad y proporciona el nivel de cumplimiento actual y obviamente, una referencia inicial para futuros proyectos.

PLAN DE CONTROL PROCESO DE PRODUCCION MINA														
Procesos Mina	KPI's	Variables del Proceso		Límites de Especificación			Estudio de Capacidad			Metodo de Control				Plan Acción
		X	Y	Inferior	Meta	Superior	Z	Fecha	Tamaño Muestra	¿Cómo se mide?	Descripción	Resp.	Frec.	
PROCESO GLOBAL DE PRODUCCION	Productividad		Error TPDplan vs TPDreal	-10%	0%		0,5	Ene - Abr 2006	120	Error diario promedio semanal	Base Gráfico de la Figura 4.19	Gerente Mina	Mensual	Sí Error Promedio es menor a -10%, activar plan identificación variables incidentes. Debe entregarse reporte mensual (Pareto de "Y")
	Confiabilidad		MTBFp	5	7			Ene - Abr 2006	30	MTBF diario acumulado mes	Gráfico de la Figura 4.20	Gerente Mina	Mensual	Sí MTBFp es menor a 5 días, activar plan de identificación variables incidentes. Debe entregarse reporte mensual (Pareto de "Y")
	Calidad		Z Sigma	0,3	0,9			Ene - Abr 2006	30	Gráfico Serie Tiempo "ZSigma"	Gráfico de la Figura 4.21	Gerente Mina	Mensual	Sí Z es < 0,3 activar plan de identificación variables incidentes. Debe entregarse reporte mensual (Pareto de "Y")
SUB- PROCESO CARGUÍO	Utilización PAL		%Utiliz. P&H4100XP B	78%	88%		1,53	Ene - Abr 2006	14	Promedio Turno Semanal		Superintendente Operaciones Mina	Mensual	Sí %UtilizPAL < 78%, activar plan de identificación variables incidentes. Debe entregarse reporte mensual (Pareto de "X")
	Rendimiento PAL		TPH P&H4100XP B	3800	4800		1,03	Ene - Abr 2006	14	Promedio Turno Semanal		Superintendente Operaciones Mina	Mensual	Sí %RendPAL < 3800 tph, activar plan de identificación variables incidentes. Debe entregarse reporte mensual (Pareto de "X")
	Demoras Prog. PAL		%DP P&H4100XP B	70%	80%		-0,47	Ene - Abr 2006	240	Promedio Turno Semanal		Superintendente Operaciones Mina	Semanal	Sí %DP < 70%, activar plan identificación y priorización de eventos relevantes, luego coordinar grupo de trabajo para RCOR
SUB- PROCESO TRANSPORTE	Utilización CEX		%Utiliz. CAT793C	75%	85%		-0,42	Ene - Abr 2006	14	Promedio Turno Semanal		Superintendente Operaciones Mina	Mensual	Sí %UtilizCEX < 75%, activar plan de identificación variables incidentes. Debe entregarse reporte mensual (Pareto de "X")
	Rendimiento CEX		TPH CAT793C	650	750		1,52	Ene - Abr 2006	14	Promedio Turno Semanal		Superintendente Operaciones Mina	Mensual	Sí %RendCEX < 650 tph, activar plan de identificación variables incidentes. Debe entregarse reporte mensual (Pareto de "X")
	Demoras Prog. CEX		%DP CAT793C	70%	80%		-1,60	Ene - Abr 2006	240	Promedio Turno Semanal		Superintendente Operaciones Mina	Semanal	Sí %DP < 70%, activar plan identificación y priorización de eventos relevantes, luego coordinar grupo de trabajo para RCOR
SUB- PROCESO MANT. PALAS	Disponibilidad PAL		%Disp. P&H4100XP B	0,88	0,91	0,95	0,21	Ene - Abr 2006	14	Promedio Turno Semanal		Superintendente Mantenimiento Mina	Mensual	Sí %DispPAL < 88%, activar plan de identificación variables incidentes. Debe entregarse reporte mensual (Pareto de "X")
	Confiabilidad PAL		MTBF P&H4100XP B	30	35		-0,57	Sep 05 - Abr 06	8	MTBF mensual		Superintendente Mantenimiento Mina	Mensual	Sí MTBF < 30 Hrs, activar priorización JackKnife y proceder con RCOR
	Mantenibilidad PAL		MTTR P&H4100XP B		2	3	2,94	Sep 05 - Abr 06	8	MTTR mensual		Superintendente Mantenimiento Mina	Mensual	Sí MTTR > 3 Hrs, activar priorización JackKnife y proceder con RCOR
SUB- PROCESO MANT. CAMIONES EXTRACCION	Disponibilidad CEX		%Disp. CAT793C	0,84	0,86	0,92	0,11	Ene - Abr 2006	14	Promedio Turno Semanal		Superintendente Mantenimiento Mina	Mensual	Sí %DispCEX < 84%, activar plan de identificación variables incidentes. Debe entregarse reporte mensual (Pareto de "X")
	Confiabilidad CEX		MTBF CAT793C	30	35		1,00	Ago 05 - Abr 06	9	MTBF mensual		Superintendente Mantenimiento Mina	Mensual	Sí MTBF < 30 Hrs, activar priorización JackKnife y proceder con RCOR
	Mantenibilidad CEX		MTTR CAT793C		2	3	0,19	Ago 05 - Abr 06	9	MTTR mensual		Superintendente Mantenimiento Mina	Mensual	Sí MTTR > 3 Hrs, activar priorización JackKnife y proceder con RCOR

Figura 4.18 Matriz del Plan de Control

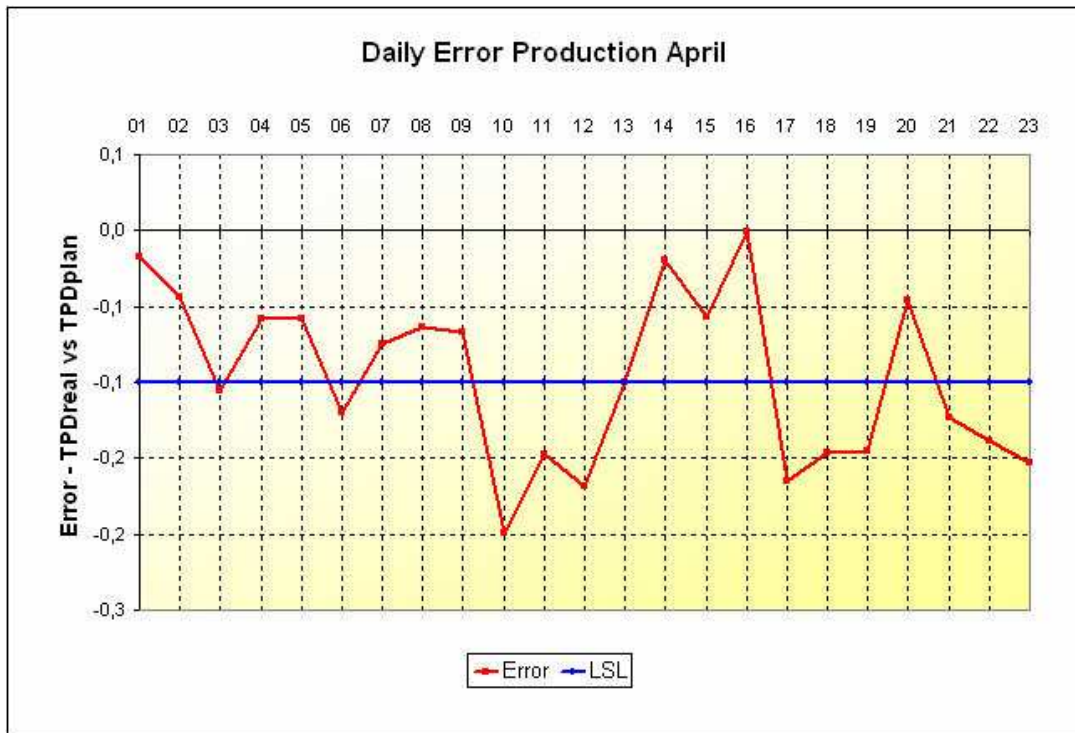


Figura 4.19 Gráfico Error vs Día (TPD_{REAL} vs TPD_{PLAN})

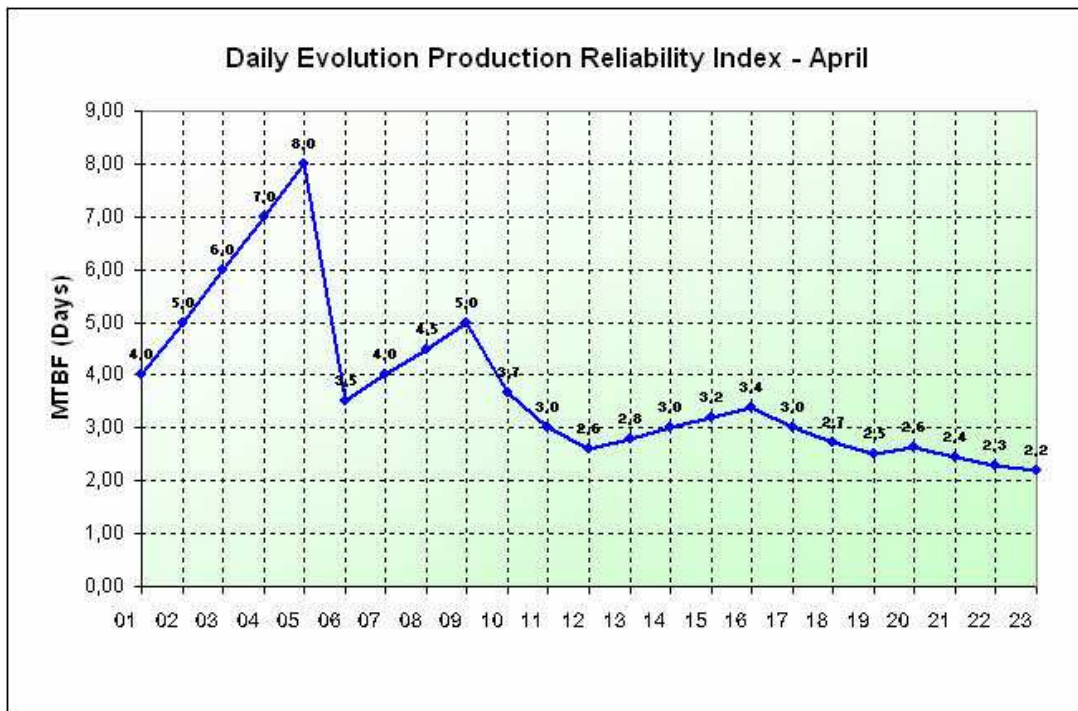


Figura 4.20 Gráfico $MTBF_p$ vs Día

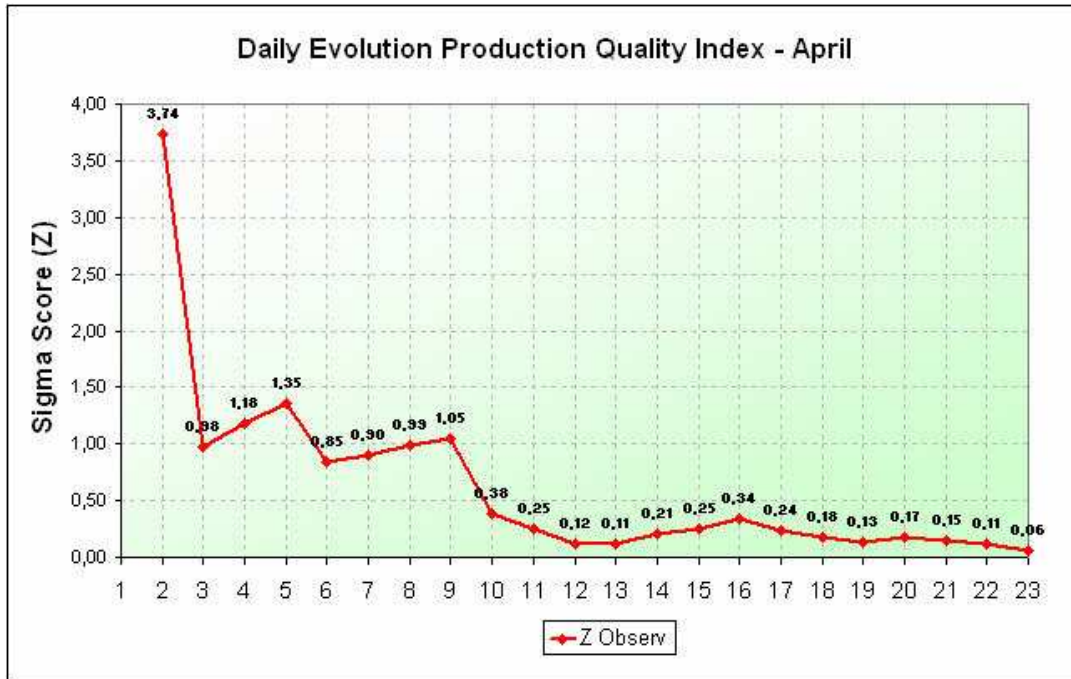


Figura 4.21 Gráfico Z vs Día

4.4.2 Metodologías para los Planes de Acción

Estas metodologías pertenecen a dos vertientes de acción claramente definidas, cuya aplicación dependerá de la condición de proactividad y/o reactividad de la variable de control.

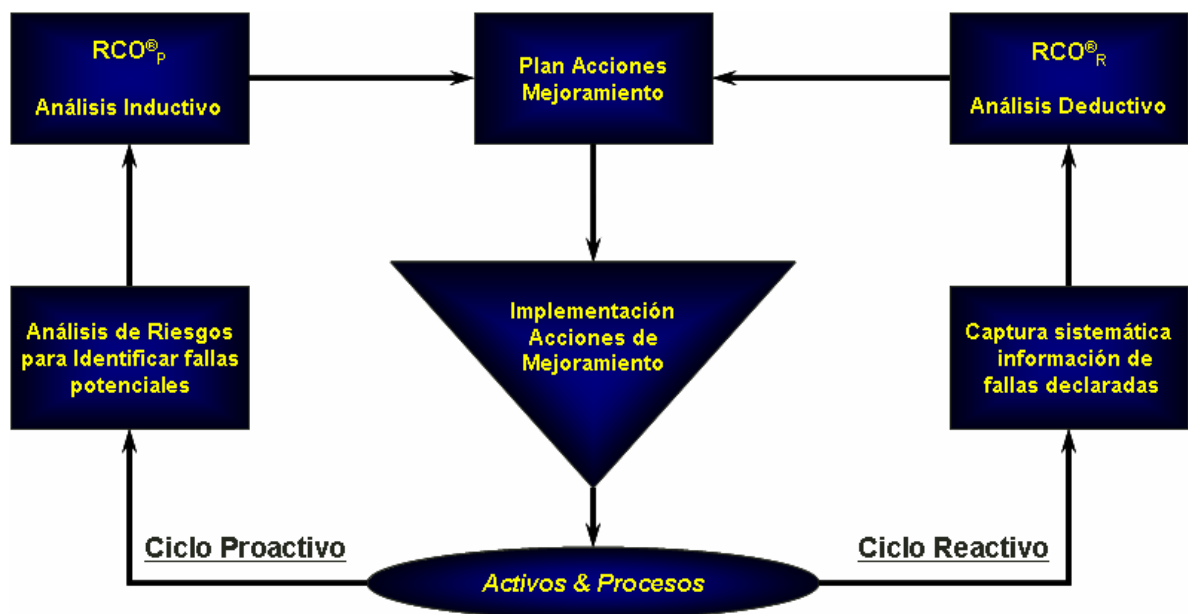


Figura 4.22 Ciclos del Mejoramiento Continuo

Dichas metodologías se encuentran consolidadas en la Figura 4.22, las cuales cabe destacar, se encuentran analizadas en extenso en el Anexo A de este documento:

- RCA, (Root Cause Analysis): Análisis Causa Raíz, proceso deductivo que se aplicará en todos aquellos casos en dónde la variable “x” quede fuera de control. No obstante, pese a que este proceso es en esencia reactivo, su justificación por el lado de la confiabilidad, es que evitará o al menos mitigará consecuencias negativas en las variables de salida del proceso.
- RCM, (Reliability Centedered Maintenance): Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, que corresponde a un proceso inductivo extrapolado desde el ámbito del mantenimiento a la operación global, el cual será aplicado en todos aquellos casos, dónde el proceso sea de alto impacto para el resultado de la gestión global (HSEC y Producción). Es decir, evaluada la criticidad del proceso (riesgo potencial) es que será candidato para ser analizado mediante esta metodología.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES

- La conclusión más relevante derivada de este trabajo, dice relación con la oportunidad de iniciar una operación minera considerando el concepto de la confiabilidad, desde la etapa de planificación. Ello, ofrece claras directrices hacia la excelencia operacional, no obstante, cualquier esfuerzo en este sentido, no rendirá sus frutos sí es que no se cuenta con el auspicio y compromiso irrestricto de la alta gerencia.
- En Minera Spence por una directriz corporativa, el 70% de la mano de obra en operaciones es prácticamente sin experiencia, en consecuencia, la dimensión de la confiabilidad operacional que tiene que ver con la variable humana, toma una rol preponderante en la definición de las estrategias de desarrollo, máximo, asumiendo el paradigma de que el 80% de los problemas en los equipos, tienen su causa raíz en las decisiones humanas.
- Los indicadores que han derivado de este trabajo y que se vienen reportando oficialmente desde enero del 2006, han generado en el entorno de la supervisión un sentido de urgencia por cumplir eficazmente con estos KPI's. Ello, ha requerido desde la gerencia en más de una oportunidad, reuniones de alineamiento en torno al cumplimiento de los objetivos de la confiabilidad operacional.
- A diferencia del RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad), El RCO[®] establece que la confiabilidad debe centrarse en la operación global antes que circunscribirse únicamente al nicho del mantenimiento.
- Lo anterior significa, para que el proceso global de producción sea confiable, la totalidad de los subprocesos involucrados también deben serlo: desde las áreas administrativas a las operativas.
- Para llevar adelante el proceso de mejoramiento continuo, se ha diseñado un procedimiento simple pero al mismo tiempo poderoso, que reúne los esfuerzos exigidos por los eventos indeseados (RCO[®]_R) y por las oportunidades que demandan eventos potenciales de alto riesgo (RCO[®]_P)
- Se entiende que actuar tempranamente a nivel de variables de procesos mediante monitoreo y ajustes, es posible anticipar y/o evitar consecuencias negativas en los KPI's de resultado final, es decir, la proactividad es mensurable y rentable.
- Es así como a mediados del 2006, los índices de calidad y confiabilidad operacional han alcanzado valores de $Z_s=1.6$ y $MTBF_P=20$ días respectivamente, muy por encima de lo registrado en el cuatrimestre de principios de año.
- Los KPI's de confiabilidad y calidad operacional han permitido a la fecha, conocer las brechas que nos separan de la excelencia operacional. ¡Ahora Sabemos!, lo que antes no sabíamos que no sabíamos. Esta medición lo ha hecho posible.

CAPITULO 6. BIBLIOGRAFIA

- Anzola, F. and Pradhan, S. (1994, Febrero 28). Maintenance Strategies for Greater Availability. Maintenance & Retrofitting, p. 39.
- Charles, E. (1997). An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering. Boston, Massachusetts. Editorial Mc. Graw-Hill.
- Chourio, J.; Flores, M.; Aguiar, H.; Huerta, R.; López, J.; Narvaez, E.; Sarno, E.; Pabón, J.; y Tovar, C. (2000, Abril). Introducción a la Confiabilidad Operacional. Curso dictado en el Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED), filial de PDVSA, Caracas. Venezuela.
- De Abreu, J. 2001. Aplicación de una Metodología de Mantenimiento en el Centro Refinador Paraguaná, que permita evaluar y elaborar Planes de Mantenimiento bajo la herramienta de confiabilidad Mantenimiento Centrado en Confiabilidad en Reversa (MCC – R). Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Facultad de Ingeniería. Universidad Simón Bolívar. Caracas. Venezuela.
- Guerrero, J. (2001). Evaluación y análisis de la aplicabilidad de las Herramientas de Confiabilidad para el manejo de problemas que afectan la utilidad operacional en el Centro de Refinación Paraguaná. Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Facultad de Ingeniería. UNEFA. Maracay. Venezuela.
- Huggett, J. The Woodhouse Partnership LT. (2000, Julio). Mantenimiento Centrado en Confiabilidad Plus. Curso dictado en el Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED), filial de PDVSA, Paraguaná. Venezuela.
- Ireson, G.; Coombs, C. Jr. y Moss, Richard. (1996). Handbook of Reliability Engineering and Management. New York. Editorial Mc. Graw-Hill.
- Kelly, A. (1994). Maintenance. England. Butterworth Heinemann.
- Moubray, J. (1997, Febrero 01). Applying and Implementing Risk-based Inspection Programs. Maintenance & Reliability. Hydrocarbon Processing, p.43.
- PDVSA Intevp. (1999, Febrero). Taller de solución de problemas (Análisis Causa Raíz "ACR"). Dictado por PDVSA Intevp. Los Teques. Venezuela.
- PDVSA Intevp. (1999, Julio). Análisis de Probabilidad, Manejo de los Mecanismos de Degradación de materiales mediante IBR. Taller dictado por PDVSA Intevp. Los Teques. Venezuela.
- PDVSA, CIED. (1998, Noviembre). Inspección Basada en Riego. Taller dictado en el Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED), filial de PDVSA, Caracas.
- PM Optimisation. Maintenance Analysis of the Future. (2000, Septiembre 14). [Página Web en línea]. Disponible: <http://www.pmoptimisation.com>. [Consulta: 2002, Mayo 18].
- Trejo E. (2002, Marzo). Análisis Causa Raíz y solución de problemas. Taller dictado en el Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED), filial de PDVSA, Paraguaná. Venezuela.
- Wassell, H. (1998, Octubre 10). Reliability and Maintenance. Reliability of Engineering Products, p. 45.

ANEXO A

Herramientas de Confiabilidad Operacional

1. INSPECCION BASADA EN RIESGOS (IBR)

Se trata de una metodología que permite determinar la probabilidad de falla en equipos que transportan y/o almacenan fluidos y las consecuencias que ésta pudiera generar.

El riesgo se modela mediante una matriz en donde se exponen en el eje de las ordenadas las probabilidades de falla de cada uno de los equipos, mientras que en el eje de las abscisas se encuentra la severidad de las consecuencias. El objetivo final es reducir niveles de riesgo. Ahora, para determinar la matriz modeladora del riesgo se establecen rangos de escalas de frecuencia y una clasificación de la severidad de las consecuencias, tal y como se muestra en las Figuras A1 y A2 a continuación:

Escala	Tipo de Evento	Probabilidad
1	Extremadamente improbable.	1.10^{-6}
2	Improbable.	2.10^{-5}
3	Algo Probable.	4.10^{-4}
4	Probable.	8.10^{-3}
5	Muy Probable.	2.10^{-1}

Fuente: Introducción a la Confiabilidad Operacional. CIED. (2000).

Figura A1 Escala de Frecuencia

Nivel	Severidad de las Consecuencias
A	No severas
B	Poco Severas
C	Medianamente Severas
D	Severas
E	Muy Severas

Fuente: Introducción a la Confiabilidad Operacional. CIED. (2000).

Figura A2 Clasificación de la Severidad de las Consecuencias

Una vez establecidos los niveles de probabilidad y de consecuencias, se procede a construir la matriz modeladora del riesgo, tal como la que se presenta en la Figura A3.

MATRIZ DE CRITICIDAD		CONSECUENCIA				
		A	B	C	D	E
PROBABILIDAD	5	Medio	Alto	Alto	Muy alto	Muy alto
	4	Medio	Medio	Alto	Alto	Muy alto
	3	Bajo	Medio	Medio	Alto	Muy alto
	2	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Alto
	1	Muy bajo	Bajo	Medio	Medio	Alto

Fuente: Introducción a la Confiabilidad Operacional. CIED. (2000).

Figura A3 Matriz Modeladora del Riesgo. Relación Probabilidad / Consecuencia

¿Cuándo aplicar Inspección Basada en Riesgos?

- Cuando se requiera fijar y revisar frecuencias de inspección.
- Cuando se requiera optimizar costos de inspección.
- Cuando se necesite cuantificar y modificar niveles de riesgos.
- Cuando se necesite mejorar la productividad y el rendimiento.

Beneficios del IBR:

- Identificar/controlar riesgos que están presentes en las plantas.
- Optimizar esfuerzos de inspección, ya que determinamos la frecuencia optima con que deben realizarse.
- Se determina el costo que genera la ocurrencia de cada evento de falla.
- Nos genera una base de conocimientos cuantificado del riesgo, permitiéndonos apoyar la toma de decisiones.
- Evaluar el impacto sobre el riesgo de acciones como:
 - Modificación de los procesos.
 - Instalación de válvulas de aislamiento.
 - Instalación de sistemas de detección y mitigación.

2. ANALISIS DE CRITICIDAD (AC)

El Análisis de Criticidad es la herramienta que permite establecer niveles jerárquicos en sistemas, equipos y componentes en función del impacto global que generan, con el objetivo de facilitar la toma de decisiones.

Es el análisis de confiabilidad que establece un orden de prioridades de mantenimiento sobre una serie de instalaciones y equipos, otorgando un valor numérico o estatus, en función de una matriz que combina la condición actual del equipo, el nivel de producción de cada equipo o instalación, el impacto ambiental, de seguridad y de producción. Establece un orden de prioridades, que dependerá de la estructura jerárquica del proceso.

¿Cómo se Realiza un Análisis de Criticidad?:

- Definiendo el alcance y objetivo para el estudio.
- Estableciendo criterios de importancia.
- Seleccionando o diseñando un método de evaluación que permita jerarquizar los sistemas objetos de estudio.

Cuando se hace mención a criterios de importancia se refiere a los siguientes:

- Seguridad.
- Ambiente.
- Producción.
- Costos de operación y mantenimiento.
- Frecuencia de falla.
- Tiempo promedio para reparar.

¿Cuándo se debe aplicar Análisis de Criticidad?:

- Establecer líneas de acciones prioritarias en sistemas complejos.
- Solventar problemas con pocos recursos
- Determinar el impacto global de cada uno de los sistemas, equipos y componentes presentes en el negocio.
- Aplicar las metodologías de Confiabilidad Operacional.
- Crear valor.

3. OPTIMIZACION COSTO RIESGO

La Optimización Costo Riesgo es una metodología que permite determinar los costos asociados a la realización de actividades de mantenimiento preventivo y los beneficios esperados por sus ejecuciones, sin dejar de considerar los riesgos involucrados, para identificar la frecuencia óptima de las acciones de mantenimiento con base al costo total mínimo/óptimo que genera.

Objetivo de una Optimización Costo Riesgo: Determinar la frecuencia óptima de las acciones de mantenimiento preventivo por medio de la realización de un balance de costos / riesgos asociados a estas actividades y los beneficios que generan.

Características de la herramienta Optimización Costo Riesgo: Los rasgos característicos de la metodología Optimización Costo Riesgo son:

- Permite realizar evaluaciones en un corto plazo con resultados certeros.
- Optimiza frecuencias y costos de actividades.

Beneficios de la Optimización Costo Riesgo:

- Frecuencias óptimas de actividades de mantenimiento preventivo, basadas en su contexto operacional.
- Extensión de la vida útil de componentes y equipos.
- Optimización de inventarios de repuestos.
- Optimización de fuerza hombre asociada a ejecución de actividades de mantenimiento.
- Costos totales optimizados en la mejor relación producción / mantenimiento.

4. ANALISIS CAUSA RAIZ (RCA)

El RCA es una herramienta utilizada para determinar las causas fundamentales que generan una repetición de falla o en su defecto dentro de un conjunto de fallas, la anomalía de mayor peso en cuanto al impacto operacional, económico y de seguridad y de medio ambiente.

Es una herramienta sistemática que se aplica con el objetivo de determinar las causas que originan las fallas, sus impactos y frecuencias de aparición, para luego mitigarlas o suprimirlas totalmente.

Se aplica generalmente en problemas puntuales para procesos, equipos y/o componentes críticos cuando existe la presencia de fallas repetitivas.

Para aplicar Análisis Causa Raíz se debe tener una definición clara del sistema para comprender la interrelación existente entre los diversos niveles de un proceso, lo que permitirá a la hora de realizar un estudio, considerar todos los aspectos y condiciones que están presentes en un entorno, ya que cualquiera de ellos puede generar una falla. Por otra parte, es necesario analizar el activo que será objeto para la aplicación de esta metodología de confiabilidad operacional, tal como se muestra en el siguiente Cuadro:

Para	Entonces
Conocer cada elemento	Debemos identificar sus funciones
Lograr relacionarlos entre sí por medio de vínculos	Debemos determinar la forma de como están relacionados para formar el sistema, por lo que lograremos conocer lo que ocurre en su entorno, aguas arriba, aguas abajo y en el ambiente.
Analizarlo dentro de un marco de limitaciones definidas	Debemos obviar los factores que limiten, relacionados por ejemplo con: Operación / Procesos Materiales. Construcción. Dirección. Presupuesto.

Fuente: Introducción a la Confiabilidad Operacional. CIED. (2000).

Figura A4 Análisis del Activo

Objetivo del Análisis Causa Raíz:

Determinar el origen de una falla, la frecuencia con que aparece y el impacto que genera, por medio de un estudio profundo de los factores, condiciones, elementos y afines que podrían originarla, con la finalidad de mitigarla o redimirla por completo una vez tomadas las acciones correctivas que nos sugiere el mencionado análisis.

Aplicaciones del Análisis Causa Raíz:

EL RCA como se dijo anteriormente, se aplica generalmente en problemas puntuales que se presentan en equipos críticos para un proceso o que presentan fallas repetitivas, por lo tanto, debe aplicarse cuando:

- Se requiera el análisis de fallas que se presentan continuamente o en procesos críticos.
- Cuando se necesite un análisis del proceso de diseño, de aplicación de procedimientos y de supervisión.
- Necesidad de analizar diferencias organizacionales y programática.

Causas Raíces:

Existen tres tipos de causas que deber ser identificadas durante el desarrollo de Análisis Causa Raíz, las cuales serán descritas a continuación:

- **Causa Raíz Física:**
Es la causa tangible de porque está ocurriendo una falla. Siempre proviene de una raíz humana o latente. Son las más fáciles de tratar y siempre requieren verificación.
- **Causa Raíz Humana:**
Es producto de errores humanos motivados por intervenciones inapropiadas. Nacen por la ausencia de decisiones acertadas, que pueden ser por convicción o comisión. Nunca utiliza nombres individuales o grupales cuando se especifica la causa. Pueden ser muy sensitivas a una política de "Punto de Vista" o "Caza de brujas". Necesitan verificación y no solamente se forman en ambientes donde el personal se siente presionado.
- **Causa Raíz Latente:**
Son producto de la deficiencia de los sistemas gerenciales de información. Proviene de errores humanos. En ciertas ocasiones afectan más que el problema que se está estudiando, ya que pueden generar circunstancias que generen nuevas fallas.

5. MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM)

Es una metodología que procura determinar los requerimientos de mantenimiento de los activos en su contexto de operación. Consiste en analizar las funciones de los activos, ver cuales son sus posibles fallas, y detectar los modos de fallas o causas de fallas, estudiar sus efectos y analizar sus consecuencias.

A partir de la evaluación de las consecuencias es que se determinan las estrategias más adecuadas al contexto de operación, siendo exigido que no sólo sean técnicamente factibles, sino económicamente viables.

Las Siete Preguntas Básicas del RCM:

El RCM centra su atención en la relación existente entre la organización y los elementos físicos que la componen, por lo tanto, es importante de que antes de comenzar a explorar esta relación detalladamente, se conozca el tipo de elementos físicos existentes y decidir cuál de ellos deben estar sujetos a una revisión de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

Posteriormente debe hacerse énfasis en la resolución de siete preguntas, las cuales permiten consolidar los objetivos de esta filosofía (aumentar la confiabilidad y disponibilidad de los activos por medio del empleo óptimo de recursos). Estas preguntas se presentan a continuación.

- 1) ¿Cual es la función del proceso, sistema, equipo ó componente?
- 2) ¿Cuales son sus fallas funcionales?
- 3) ¿Cuales son sus modos de fallo?
- 4) ¿Cual es el efecto inmediato de las fallas?
- 5) ¿Cual es la consecuencia de la fallas?
- 6) ¿Que se puede hacer para eliminar o mitigar el modo de fallo?
- 7) ¿Que se debe realizar sí no es posible eliminar y/o mitigar el modo de fallo?

Se cuenta con técnicas de confiabilidad claves en la aplicación del RCM, como ser: Análisis de los Modos y Efectos de las Fallas (FMEA) y el Árbol Lógico de Decisión. La primera nos ayuda a determinar las consecuencias de los modos de falla de cada activo en su contexto operacional, mientras que la segunda nos permite decidir cuales son las actividades de mantenimiento más optimas.

La primera técnica nos ayuda a responder las cuatro primeras preguntas, mientras que la segunda nos ayuda a responder las restantes. Establecer respuestas a las siete preguntas del RCM, requiere se analicen los siguientes aspectos:

Funciones y Estándares de Funcionamiento (1): El inicio de la aplicación conceptual del RCM consiste en determinar las funciones específicas y los estándares de comportamiento funcional asociado a cada uno de los elementos de los equipos objeto de estudio, en su contexto operacional, con lo cual se logra responder la primera pregunta.

Fallos Funcionales (2): Luego de determinar las funciones y los estándares de comportamiento funcional de cada uno de los elementos que componen el equipo al que vamos aplicarle el RCM, debemos definir la forma en que puede fallar cada elemento en el cumplimiento de sus deberes. Esto nos arrastra al término de fallo funcional, el cual se define como la incapacidad de un elemento o componente de un equipo para cumplir con los estándares de funcionamiento deseado.

Modos de Fallo (3): El paso siguiente que debemos concretar es el de conocer cuál de los modos de fallo tienen mayor posibilidad de causar la pérdida de una función y determinar de una vez, cuál es la causa origen de cada falla así como procurar que cada modo de fallo sea considerado en el nivel más apropiado.

Efectos de los Fallos (4): Consiste en determinar los efectos o lo que pasa cuando ocurre una falla.

Consecuencia de los Fallos (5): El objetivo primordial de este paso es determinar cómo y cuanto importa cada falla, para tener un claro consentimiento si una falla requiere o no prevenirse. El RCM clasifica las consecuencias de los fallos de la siguiente forma:

- Consecuencia de Fallos no Evidentes: Son aquellos fallos que no tienen un impacto directo, pero que pueden originar otros fallos con mayores consecuencias a la organización. Por lo general este tipo de fallas es generada por dispositivos de protección, los cuales no poseen seguridad inherente. El RCM le da a este grupo de fallos una alta relevancia, adoptando un acceso sencillo, práctico y coherente con relación a su mantenimiento.
- Consecuencia en el Medio Ambiente y en la Seguridad: El RCM presta mucha atención al impacto que genera en el ambiente la ocurrencia de una falla, así como las repercusiones en la seguridad haciéndolo antes de considerar la cuestión del funcionamiento.
- Consecuencias Operacionales: Son aquellas que afectan la producción, por lo que repercuten considerablemente en la organización (calidad del producto, capacidad, servicio al cliente o costos industriales además de los costos de reparación).
- Consecuencias no Operacionales: Son aquellas ocasionadas por cierta clase de fallos que no generan efectos sobre la producción ni la seguridad, por lo que el único gasto presente es el de la reparación.

Objetivo del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad:

El objetivo del RCM es mejorar la confiabilidad, disponibilidad y productividad de la unidad de procesos, a través de la optimización del esfuerzo y los costos de mantenimiento, disminuyendo las tareas de mantenimiento correctivo y aumentando las tareas de mantenimiento preventivo y predictivo.

Aplicaciones del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad:

El RCM se aplica en áreas donde hay equipos que presenten las siguientes características:

- Que sean indispensables para la producción, y que al fallar generen un impacto considerable sobre la seguridad y el ambiente.
- Generan gran cantidad de costos por acciones de mantenimiento preventivo o correctivo.
- Si no es confiable el mantenimiento que se las ha aplicado
- Sean genéricos con un alto coste colectivo de mantenimiento.

Beneficios del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad:

- Mayor protección y seguridad en el entorno.
- Se logran aumentar los rendimientos operativos.
- Optimización de los costos de mantenimiento.
- Se extiende el período de vida útil de los equipos.
- Se genera una amplia base de datos de mantenimiento.
- Motivación en el personal.
- Mayor eficiencia en el trabajo de grupo.

Limitaciones del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad:

- El tiempo requerido para obtener resultados es relativamente largo.
- Si bien es cierto que a largo plazo aumenta la relación costo / beneficio, en un principio, requiere una alta inversión de recursos.

6. ANALISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLA (FMEA)

El FMEA es un método que nos permite determinar los modos de fallas de los componentes de un sistema, el impacto y la frecuencia con que se presentan. De esta forma, se podrán clasificar las fallas por orden de importancia, permitiéndonos directamente establecer tareas de mantenimiento en aquellas áreas que están generando un mayor impacto económico, con el fin de mitigarlas o eliminarlas por completo.

Este proceso necesita de cierto período de tiempo para aplicarlo en el estudio de un sistema, un análisis detallado y una documentación acertada para poder generar una jerarquía clara y bien relacionada. Su procedimiento como tal, implica las siguientes actividades:

- Definir el sistema: Se refiere a que se debe definir claramente el sistema a ser evaluado, las relaciones funcionales entre los componentes del sistema y el nivel de análisis que debe ser realizado.
- El análisis de los modos de fallo: Consiste en definir todos los modos de falla potenciales a ser evaluados en el nivel más bajo. Por ejemplo, la pérdida del rendimiento, funcionamiento intermitente, etc.
- Análisis de los efectos de fallas: Define el efecto de cada modo de falla en la función inmediata, los niveles más altos de riesgos en el sistema, y la función misión a ser realizada. Esto podría incluir una definición de síntomas disponible al operador.
- La rectificación (Opcional): Determina la acción inmediata que debe ejecutar el operador para limitar los efectos de las fallas o para restaurar la capacidad operacional inmediatamente, además de las acciones de mantenimiento requeridas para rectificar la falla.

- Cuantificación Tasa de Fallas (Opcional): Si existe suficiente información, la tasa de falla, o la probabilidad de falla de cada modo de fallo deberían ser definidas.
- Análisis crítico (Opcional): Nos permite determinar una medida que combina la severidad o impacto de la falla con la probabilidad de que ocurra.
- Acción correctiva (Opcional): Define cambios en el diseño operando procedimientos o planes de prueba que mitigan o reducen las probabilidades críticas de falla.

Por su parte un FMEA Funcional se basa en la estructura funcional del sistema en lugar de los componentes físicos que lo componen. Un FMEA de este tipo debe utilizarse si cualquiera de los componentes no tienen identificación física o si el sistema es muy complejo. Es idéntico al FMEA normal, sólo que los modos de fallos son expresados como fallas para desarrollar las funciones particulares de un subsistema.

Igualmente el análisis funcional debe considerar las funciones primarias y secundarias, que quieren decir, las funciones para que el subsistema está provisto y las funciones que son solamente una consecuencia de la presencia del subsistema respectivamente.

7. ANALISIS DE ARBOL DE FALLAS (AAF)

Análisis de Árbol de Falla (AAF), es un método que permite identificar todas las posibles causas de un modo de falla en un sistema en particular. Además, proporciona una base para calcular la probabilidad de ocurrencia por cada modo de falla del sistema. Esta técnica es conveniente aplicarla en sistemas que contengan redundancia.

Mediante un AAF se puede observar en forma gráfica la relación lógica entre un modo de fallo de un sistema en particular y la causa básica de fracaso. Esta técnica usa una compuerta "y" que se refiere a que todos los eventos debajo de la compuerta deben ocurrir para que el evento superior a la misma pueda ocurrir. De la misma forma utiliza una compuerta "o" que denota que al ocurrir cualquier evento situado debajo de la compuerta, el evento situado arriba ocurrirá.

Luego de realizado el AAF se procede a calcular por medio de los métodos de sistemas en serie, sistemas en paralelo, sistemas paralelos activos con redundancia parcial y sistemas con unidades de reserva, la probabilidad de falla del sistema.

Con una acertada aplicación esta técnica se puede determinar los elementos potencialmente críticos durante la temprana etapa de diseño, mientras que cuando se requiere un análisis más profundo del sistema en la etapa de detalle del diseño, aplicamos un Análisis de Modo y Efecto de Falla. Los AAF nos proveen de una base objetiva para analizar el diseño de un sistema, desempeñando estudios de comercio / fuera, analizando casos comunes o modos de fallas comunes, evaluando la complacencia en los requisitos de seguridad las justificaciones de diseño de mejoras.

Limitaciones del AAF:

Las limitaciones prácticas de esta técnica se deben a la cantidad de tiempo y de esfuerzo que debe invertirse. De la misma forma requiere de una metodología muy estricta, una documentación sin errores, una acertada elección de los eventos de la cima más apropiados y niveles de análisis para no mal gastar esfuerzos.

ANEXO B
Procedimiento RCO®

1. OBJETIVO

Este documento tiene por objetivo formalizar un proceso sistemático y continuo de identificación y eliminación de causas de fallas potenciales y/o declaradas, todas ellas referidas a eventos que generen pérdida operacional. La razón básica de investigar y de divulgar las causas de fallos, es permitir la identificación, realización y seguimiento de las acciones adecuadas para prevenir su ocurrencia y/o repetición. En consecuencia, cada investigación de fallo declarado (proceso **Reactivo**, RCO®_R) y/o potencial (proceso **Proactivo**, RCO®_P), junto a su respectiva divulgación, deberá acogerse estrictamente a este procedimiento, de tal manera de lograr su permanencia y estandarización.

2. ALCANCE

Este procedimiento es aplicable en todos los procesos de operación y mantenimiento en dónde intervienen los activos y procesos que obran bajo la responsabilidad de la Gerencia Mina.

3. RESPONSABILIDADES

Acciones a Realizar	GA	SA	IC	EM
Cumplir los Requisitos establecidos en este procedimiento	R	P	P	P

GA Gerente & Superintendente Área	Ingeniero Confiabilidad	R	Responsable
SA Supervisor Área	Mantenedor	P	Participa

4. DESCRIPCION PROCEDIMIENTO

4.1 Justificación del Procedimiento

- Soportar metodológicamente la búsqueda del mejoramiento continuo
- Evitar la tendencia a convivir sistemáticamente con fallas
- Evitar la tendencia a simplificar las consecuencias de las fallas
- Evitar la tendencia a centrarse en el problema del día
- Cumplir con las directrices estratégicas de la Gerencia Mina

4.2 Criterio de aplicación

El RCO[®] como metodología para el análisis de pérdida operacional no se justifica en todos los casos, por tal motivo, es importante definir y acotar los criterios que permitan desencadenar su aplicación, por ejemplo:

- Cuando la falla atente contra la seguridad de las personas y el medio ambiente.
- Cuando la falla provoque pérdidas de producción
- Cuando la falla derive en elevados costos de reparación

En el caso de fallas, salvo las que comprometan la normativa HSEC, el resto deberá acogerse al criterio indicado mensualmente por el “Diagrama Jackknife”. Mediante esta herramienta se clasificarán y priorizarán las fallas de acuerdo a su frecuencia y tiempo de reparación. Por lo tanto, todos aquellos modos de fallos que ocurran más de 3 veces en el mes y cuyo MTTR (tiempo medio de reparación) supere las 2 horas, serán candidatos para el proceso RCO[®].

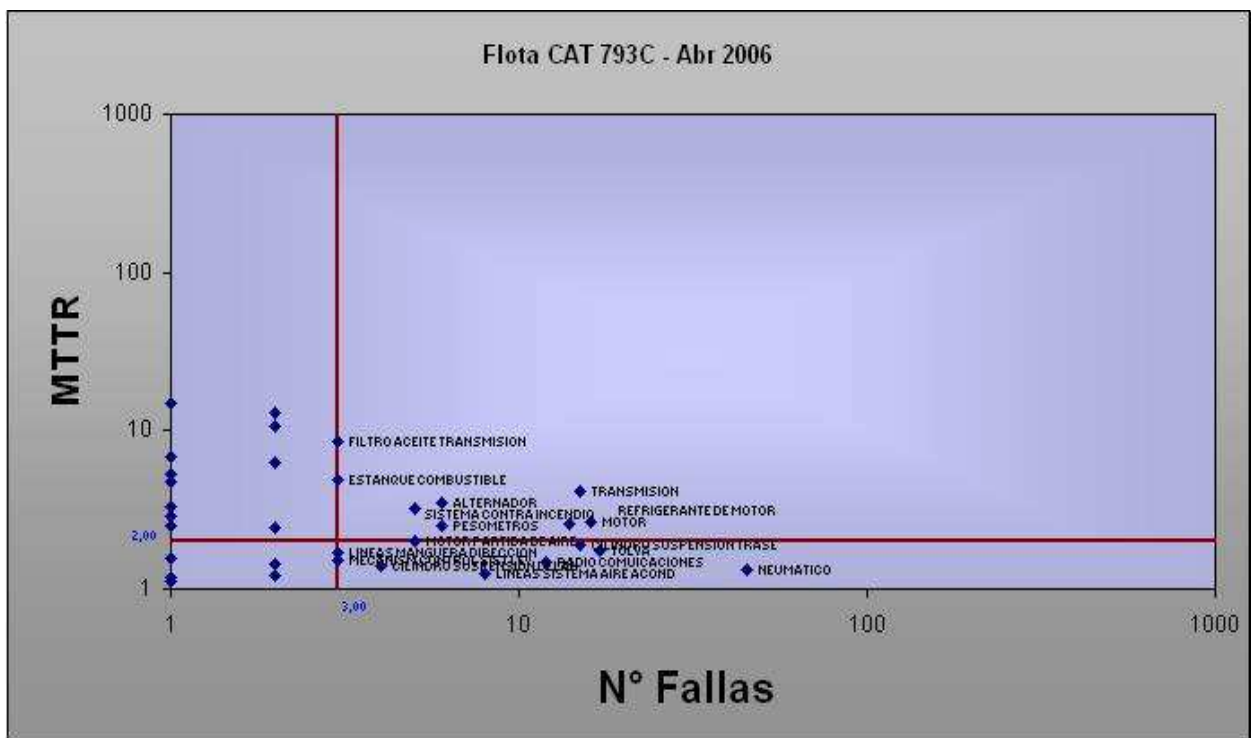


Figura B0 Ejemplo Diagrama Jackknife

Posteriormente, en virtud a la carga de trabajo del área de Confiabilidad, se aplicará el RCO[®] en aquellos modos de fallos que presenten el mayor riesgo para la operación.

La selección definitiva de los modos de fallo que se analizarán mediante RCO[®], deben ser acordados y programados en las reuniones semanales que efectúen las respectivas unidades de confiabilidad tanto para la Flota CAT como para la Flota P&H.

4.3 Conformación Grupos de Trabajo RCO®

Una vez seleccionados los modos de fallos que serán abordados bajo esta metodología, la actividad siguiente será la conformación del grupo de trabajo que desarrollará el análisis. Al efecto, la responsabilidad de liderar y facilitar las actividades de estos grupos, le corresponderá al(los) Ingeniero(s) de Confiabilidad en turno, ya sean estos de Minera Spence o de las empresas colaboradoras.

Dependiendo de la complejidad del análisis, así como de los plazos estipulados para su ejecución, el grupo de RCO® puede estar constituido por un número variable de personas. En casos extremos, puede ser solamente el Ingeniero de Confiabilidad pero con entrevistas o reuniones puntuales con los especialistas involucrados, o bien, en grupos de trabajo que sesionarán en uno ó más días dedicados exclusivamente a este análisis. Ejemplos de grupo de trabajo:

- 1) Facilitador (Ing. Confiabilidad)
- 2) Mantenedor Mecánico / Eléctrico
- 3) Operador
- 4) Planificador de Mantenimiento

Al respecto, la participación del personal con supervisión directa deberá contar con la autorización de su jefatura, no obstante, las excusas por la exclusión de cualquier especialista requerido en el análisis, deberán ser presentadas al Superintendente de Mantenimiento Mina para su aprobación.

4.4 Metodología RCO®_R

Para asegurar una óptima aplicación de las actividades involucradas en el desarrollo de un RCO®_R, se ha adoptado como estructura metodológica vertebral, los conceptos y algoritmos asociados a un FMEA, que por sus siglas en inglés significa “Análisis de Modos y Efectos de Falla”, la cual corresponde a la herramienta icono de la confiabilidad y que es utilizada ampliamente en el desarrollo de las estrategias de RCM “Mantenimiento Centrado en Confiabilidad”, equivalente en este caso al RCO®_P

Por lo tanto, el valor agregado e implícito en el presente procedimiento, radica en la innovación de considerar en un único conjunto de herramientas, una estrategia global de mejoramiento continuo, tal como se ejemplifica en el diagrama de la Figura B1.

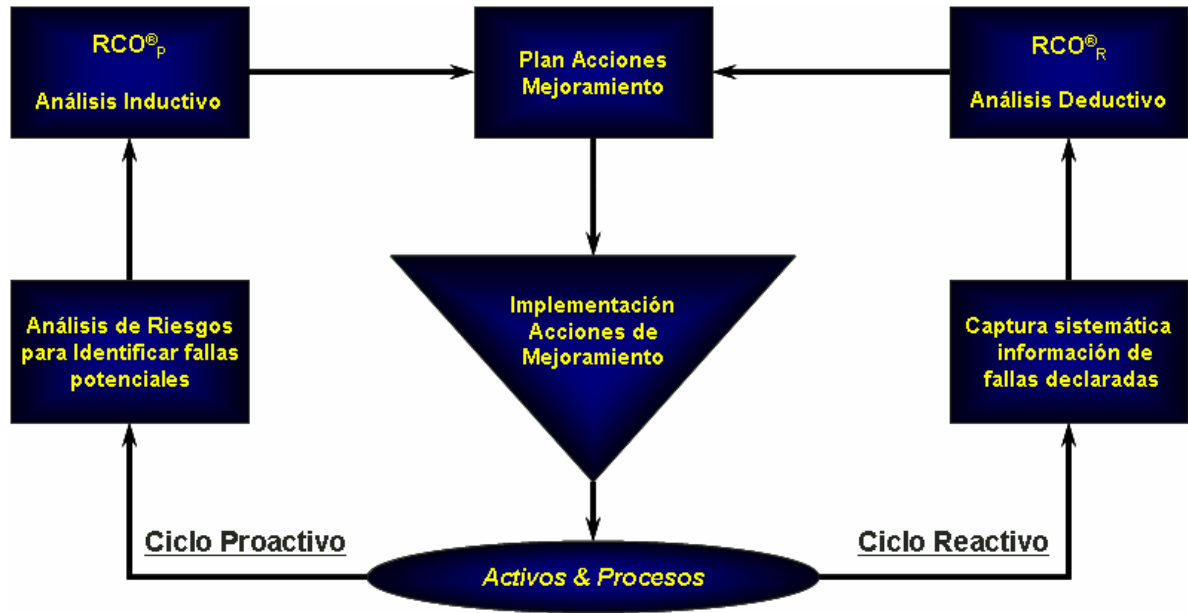


Figura B1 Proceso de Mejoramiento Continuo

En consecuencia, las ventajas inmediatas de esta definición, son pavimentar y simplificar futuras implementaciones de RCM, al mismo tiempo que se reduce el stress en el personal por tener que adoptar y aplicar un innumerable conjunto de herramientas de mejores practicas en apoyo al mejoramiento continuo.

5. FMEA – Herramienta central del RCO^{P/R}

El FMEA (Análisis de Modo y Efectos de Fallos, es una herramienta de gran utilidad en el desarrollo de nuevos procesos, dado que permite asegurar que han sido considerados y analizados todos los modos de fallos potenciales, es decir, permite identificar las variables significativas del proceso para determinar y establecer las acciones correctoras necesarias para la prevención del fallo o la detección del mismo si éste se produce (visión proactiva - inductiva - RCO^P). Sin embargo, para el RCO^R, dicha herramienta tiene por objetivo guiar y estructurar el análisis desde un punto de vista reactivo (deductivo), de tal manera de garantizar un óptimo registro de toda la información que se genere en este proceso.

Según la literatura relativa a esta herramienta, la definición exacta de FMEA sería:

“Método dirigido a lograr el Aseguramiento de la Calidad, que mediante el análisis sistemático, contribuye a identificar y prevenir los modos de fallo, tanto de un producto como de un proceso, evaluando su gravedad, ocurrencia y detección, mediante los cuales se priorizarán las causas raíz de fallo y sobre las cuales habrá que actuar, para evitar que se presenten los modos de fallo respectivos”.

Por lo tanto, los objetivos que se pretenden alcanzar cuando se realiza un FMEA dentro de un proceso de RCO[®]_R son:

- Identificar los efectos y consecuencias del modo de fallo en su real magnitud
- Identificar las causas raíces y su interacción en la generación del modo de fallo
- Entender la función de los componentes involucrados en el fallo
- Verificar cumplimiento de especificaciones de procesos y/o criterios de diseño
- Verificar efectividad de los sistemas de protección y/o detección de “transientes”
- Validar las prácticas y/o tácticas de mantenimiento aplicadas
- Adoptar acciones correctoras de forma de suprimir y/o mitigar las causas de fallo
- Valorar la eficacia de las acciones tomadas y ayudar a documentar el proceso
- Apoyar la introducción de la filosofía de mejoramiento continuo

Facilitador	René González	Grupo RCA N°	1	Participantes del Grupo													
Fecha Reunión	29-06-05	Fecha Revisión	29-Jun	Flota Mina	Palas P&H 4100XPB	Función											
Revisado por	Julio Sotella	Revisión N°	01	Equipo	PAL02	Función											
Observ. Revisión	Sistema / Subsistema																
N°	COMPONENTE	FALLA FUNCIONAL	EFECTO FALLA	GRAVE	CAUSA RAIZ	FRECU	Controles Actuales	DETEC	NPR	Acciones Recomendadas	Resp.	Acciones Tomadas	GRAVE	FRECU	DETEC	NPR	
	¿Cuál es la Función que Falló en el Componente?	¿De que manera falló la función del componente?	¿Cuál fue el efecto y/o consecuencia de la Falla?	¿Cuán grave fue el impacto de la falla?	¿Cuál es la causa raíz de la falla?	¿Con qué frecuencia se produce u ocurre a Falla?	¿Cuáles son los controles y procedimientos actuales que previenen ó predicen la ocurrencia de la Falla?	¿Cuán bien se puede detectar una causa Raíz?	N° Pricidad de Riesgo	¿Cuáles son las acciones para reducir la incidencia de la causa o mejorar la detección? Las acciones deberían ser sólo en caso de altos NPR o arreglos fáciles. Tácticas y/o Tareas de Mantenimiento.	¿Quién es el responsable de la acción recomendada?	¿Cuáles son las acciones efectivamente realizadas? Recalcular NPR Asegurarse de incluir el mes/año de finalización.					
1				10		10		10	1000				5	5	5	125	

Figura B2: Matriz FMEA

A continuación se indican los pasos necesarios para la aplicación estructurada del método FMEA dentro del proceso de RCO[®]_R

Paso-1: Identificación del componente en Fallo

En la parte superior del formato FMEA se identifica la flota de equipos mina, el equipo en particular, el sistema y el subsistema del cual es parte el componente en análisis.

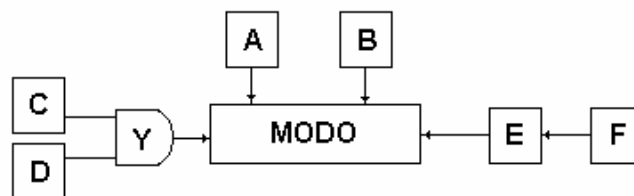
Paso-2: Función

Aquí se identifican las funciones primarias a nivel de equipo, sistema y componente.

Paso-3: Modo de fallo

Un modo de fallo significa que un elemento o sistema no satisface o no funciona de acuerdo con la especificación, o simplemente no se obtiene lo que se espera de él. El fallo es una desviación o defecto de una función o especificación.

Con esta definición, un fallo puede no ser inmediatamente detectable y sin embargo, hemos de considerarlo como tal. Es importante destacar, que un modo de fallo puede ser originado por una o más causas. Éstas, pueden ser independientes entre sí tales como la A o la B de la figura. También pueden combinarse entre ellas, es decir, que el modo de fallo está condicionado a que se presenten ambas, como por ejemplo; C y D. Y por último, puede que las causas estén encadenadas como E y F, es decir, la E no se presentará si no aparece antes la F.



Lo más importante es establecer la cadena de sucesos en el orden correcto para una mejor comprensión del problema y una adecuada valoración de los índices de ocurrencia.

Paso-4: Efectos del fallo

En esta columna se describirán los efectos del mismo tal como lo haría un operador. Los efectos corresponden a los síntomas. Cuando se analiza una parte o componente se tendrá también en cuenta la repercusión en todo el sistema, lo que ofrecerá una descripción más clara del efecto. Si un modo de fallo tiene muchos efectos a la hora de evaluar, se elegirá el más grave.

Entre los efectos típicos de fallo podrían citarse los siguientes:

- Ruido extraño
- No opera
- Olor a quemado
- No puede sujetar
- No puede alinearse
- No puede perforar

Paso-5: Causa del fallo

En esta columna se reflejan todas las causas potenciales de fallo atribuibles a cada modo de fallo. La causa potencial de fallo se define como indicio de una debilidad del diseño o proceso cuya consecuencia es el modo de fallo. Las causas relacionadas deben ser lo más concisas y completas posibles, de modo que las acciones correctoras y/o preventivas puedan ser orientadas hacia las causas pertinentes.

Ejemplo de causas raíz de modos de fallo

- Porosidad
- Material incorrecto
- Sobrecarga
- Mala operación
- Táctica inadecuada de mantenimiento

Paso-6: Controles actuales

En esta columna se reflejarán todos los controles existentes en la actualidad para prevenir las causas del fallo y detectar el efecto resultante.

Paso-7: Gravedad del fallo

Este índice está íntimamente relacionado con los efectos del modo de fallo. El índice de gravedad valora el nivel de las consecuencias sentidas por el cliente. Esta clasificación está basada únicamente en los efectos del fallo. El índice de gravedad o también llamado de severidad, es independiente de la probabilidad de ocurrencia (frecuencia) y la probabilidad de no detección.

En la tabla de la Figura B3 se aprecian los índices respectivos:

VALORIZACION DE GRAVEDAD (G)			
A) RIESGOS EN SEGURIDAD			
CALIFICACION	DESCRIPCION	ESCALA	VALOR DIMENSION A
Nulo	La Falla no genera un riesgo perceptible a la seguridad de los trabajadores	1	
Bajo	La falla genera un riesgo menor que puede ser controlado	2 a 3	
Moderado	Se genera un riesgo de seguridad serio, pero este puede ser controlado	4 a 6	
Alto	La falla genera un riesgo a la seguridad que no puede controlarse con los actuales	7 a 8	
Muy Alto	La falla genera un riesgo incontrolable que puede tener efecto catastrófica	9 a 10	
B) RIESGOS AL MEDIO AMBIENTE			
CALIFICACION	DESCRIPCION	ESCALA	VALOR DIMENSION B
Nulo	La falla genera un riesgo perceptible al medio ambiente	1	
Bajo	La falla genera un riesgo medioambiental que puede ser controlado	2 a 3	
Moderado	Se genera un riesgo medioambiental serio, pero este puede ser controlado	4 a 6	
Alto	La falla genera un riesgo medioambiental que no puede controlarse con los actuales	7 a 8	
Muy Alto	La falla genera un riesgo medioambiental incontrolable que puede tener efecto catastrófica	9 a 10	
C) PERDIDAS DE PRODUCCION - TIEMPO FUERA SERVICIO			
CALIFICACION	DESCRIPCION	ESCALA	VALOR DIMENSION C
Muy Bajo	La falla no produce detenciones de equipo o procesos	1	
Bajo	La falla provoca la detencion de equipos y/o procesos criticos menores a una hora	2 a 3	
Moderado	La falla provoca la detencion de equipos y/o procesos criticos mayores a una hora y menores a dos	4 a 6	
Alto	La falla provoca la detencion de equipos y/o procesos criticos entre dos y ocho horas	7 a 8	
Muy Alto	La falla provoca la detencion de equipos y/o procesos criticos mayores a ocho horas	9 a 10	
D) COSTOS DE REPARACION/REEMPLAZO			
CALIFICACION	DESCRIPCION	ESCALA	VALOR DIMENSION D
Muy Bajo	El costo de reparacion /reemplazo es inferior a US\$ 1000	1	
Bajo	El costo de reparacion /reemplazo se encuentra entre US\$ 100 y US\$ 1000	2 a 3	
Moderado	El costo de reparacion /reemplazo entre US\$ 1000 y US\$10.000	4 a 6	
Alto	El costo de reparacion /reemplazo se encuentra entre US\$ 10.000 y US\$20.000	7 a 8	
Muy Alto	El costo de reparacion /reemplazo es mayor a US\$ 20.000	9 a 10	

Figura B3: Matriz FMEA – Índice de Gravedad (G)

Siempre que la gravedad sea 9 ó 10, y que la frecuencia y detección sean superiores a 1, consideraremos el fallo y las características que le corresponden como críticas. Aunque el NPR resultante sea menor que el especificado como límite, conviene actuar sobre estos modos de fallo.

Paso-8: Probabilidad de ocurrencia

Ocurrencia se define como la probabilidad de que una causa específica se produzca y dé lugar al modo de fallo. El índice de la ocurrencia representa más bien un valor intuitivo más que un dato estadístico matemático, a no ser que se dispongan de datos históricos de fiabilidad o se haya modelado y previsto éstos. En esta columna se pondrá un valor de probabilidad de ocurrencia de la causa específica. Tal y como se acaba de decir, este índice de frecuencia está íntimamente relacionado con la causa de fallo y consiste en calcular la probabilidad de ocurrencia en una escala del 1 al 10, como se indica en la tabla de la figura siguiente:

TABLA DE VALORIZACION DE LA FRECUENCIA (F)

FRECUENCIA	PROBABILIDAD DE FALLA	VALOR
hasta 1 vez x año	Pequeña, la falla es improbable	1
más de 1 vez x año	.	2
hasta 1 vez x mes	Moderada, fallas ocasionales	3
más de 1 vez x mes	.	4
hasta 1 vez x semana	alta , falla frecuentes	5
más de 1 vez x semana	.	6
hasta 1 vez x día	Muy alta, muy frecuente	7
mas de 1 vez x día	.	8
hasta 1 vez x turno	.	9
más de 1 vez por turno	.	10

Figura B4: Matriz FMEA – Índice de Frecuencia (F)

Cuando se asigna la clasificación por ocurrencia, deben ser consideradas dos probabilidades:

- La probabilidad de que se produzca la causa potencial de fallo. Para esto, deben evaluarse todos los controles actuales utilizados para prevenir que se produzca la causa de fallo en el elemento designado.
- La probabilidad de que una vez ocurrida la causa de fallo, ésta provoque el modo de fallo indicado. Para este cálculo debe suponerse que la causa del fallo y de modo de fallo son detectados antes de que se afecte la producción.

Para reducir el índice de frecuencia hay que emprender una o dos acciones:

- Cambiar el diseño, para reducir la probabilidad de que la causa de fallo pueda producirse.
- Incrementar o mejorar los sistemas de prevención y/o control que impiden que se produzca la causa de fallo.

El consejo que se da para reducir el índice de frecuencia de una causa es atacar directamente la "raíz de la misma". Mejorar los controles de vigilancia debe ser una acción transitoria, para más tarde buscar alguna solución que proporcione una mejora de dicho índice.

Paso-9: Probabilidad de No Detección

Este índice indica la probabilidad de que la causa y/o modo de fallo supuestamente aparecido, llegue a generar pérdida operacional. En consecuencia, se puede deducir que este índice está íntimamente relacionado con los controles de detección actuales y la causa.

Es necesario no confundir control y detección, pues una operación de control puede ser eficaz al 100%, pero la detección puede resultar nula si las piezas no conformes son finalmente enviadas por error al cliente. Para mejorar este índice será necesario mejorar el sistema de control de detección, aunque por regla general aumentar los controles signifique un aumento de coste, que es el último medio al que se debe recurrir para mejorar la calidad. Algunos cambios en el diseño también pueden favorecer la probabilidad de detección. A continuación se muestra una de tabla que relaciona la probabilidad de que el defecto genere pérdida y el índice de no-detección

TABLA DE VALORACION DE DETECTABILIDAD (D)		
DETECCION	PROBABILIDAD DE DETECCION	VALOR
Muy Alta	El problema es evidente , se detectara con certeza	1 a 2
Alta	Existe alta probabilidad de deteccion	3 a 4
Moderado	Se puede detectar la falla mediante un programa de verificacion	5 a 6
Bajo	Aun usando un programa de verificación, es improbable que se detecte el problema	7 a 8
Muy Bajo	No se detecta, con alta probabilidad un problema	9
Nulo	Falla oculta; no se detectara o bien no existe un programa de verificacion que permita detectarla	10

Figura B5: Matriz FMEA – Índice de Detectabilidad (D)

Paso-10: Número de Prioridad de Riesgo (NPR)

El Número de Prioridad de Riesgo (NPR) es el producto de la probabilidad de ocurrencia, la gravedad, y la probabilidad de no detección y debe ser calculado para todas las causas de fallo. El NPR es usado con el fin de priorizar la causa potencial del fallo para posibles acciones correctoras.

Número de Prioridad de Riesgo:

$$NPR = F * G * D$$

Paso-11: Acción correctora (RCO[®]_{P/R})

En este paso se incluye una descripción breve de la acción correctora recomendada. Para las acciones correctoras es conveniente seguir un cierto orden de prioridad en su elección. El orden de preferencia en general será el siguiente:

- Cambio en el diseño del producto, servicio o proceso general.
- Cambio en el proceso de mantenimiento u operación.
- Incremento del control o de la inspección.

Para un mismo nivel de calidad o un mismo valor del índice de prioridad NPR en dos casos, suele ser más económico el caso que no emplea ningún control de detección. Es en general más económico reducir la probabilidad de ocurrencia de fallo (si se encuentra la manera de conseguirlo) que dedicar recursos a la detección de fallos.

Es conveniente considerar aquellos casos cuyo índice de gravedad sea 10, aunque la valoración de la frecuencia sea subjetiva y el NPR menor de 100 o del valor considerado como límite.

Paso-12: Definir responsables

En esta columna se indicarán los responsables de las diferentes acciones propuestas y, si se cree preciso, las fechas previstas de implantación de las mismas.

Paso-13: Acciones implantadas

En esta columna se reflejarán las acciones realmente implantadas que pueden en algunos casos, no coincidir con las propuestas inicialmente recomendadas.

Paso-14: Nuevo Número de Prioridad de Riesgo

Como consecuencia de las acciones correctoras implantadas, los valores de la probabilidad de ocurrencia (F), la gravedad (G), y/o la probabilidad de no detección (D) habrán disminuido, reduciéndose por tanto, el Número de Prioridad de Riesgo.

Sí a pesar de la implantación de las acciones correctoras, no se cumplen los objetivos definidos en algunos Modos de Fallo, es necesario investigar, proponer el implantar nuevas acciones correctoras, hasta conseguir que el NPR sea menor que el definido en los objetivos. Aunque muchas opciones han sido consideradas en el desarrollo de estas prácticas, es importante recordar siempre, que el juicio y la experiencia de los representantes del servicio en terreno serán la llave hacia una exitosa implementación de cualquier programa de mejoramiento continuo.

Mientras se desarrolla el FMEA y dependiendo de las necesidades que demanda el análisis, dicho proceso puede ser complementado con los siguientes asistentes:

- Diagramas de bloque
- Brainstorming
- Espina de pescado
- Diagrama de Causa-Efecto priorizado por Efecto vs Esfuerzo
- Diagrama lógico de árbol
- Análisis Weibull