

**Universidad de Valparaíso  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil Industrial**



**MODELO DE SISTEMA DE GESTIÓN DE  
MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD  
EN LA GRAN MINERÍA**

Por

Cristian Eduardo Jerez Antimil

Trabajo de Título para Optar al Grado de  
Licenciado en Ciencias de la Ingeniería y  
Título de Ingeniero Civil Industrial

Prof. Guía Wilber Enrique Fajó Briceño

Noviembre, 2015

## ***Agradecimientos***

*En primer lugar mis mayores agradecimientos sean dados a Dios, por acompañarme en este proceso de estudios y permitirme superar una etapa más en mi vida. A ti, Dios te doy las gracias y te alabo, porque me has dado sabiduría y fuerzas, porque en los momentos difíciles de pruebas y obstáculos has estado a mi lado, porque has permanecido fiel en mi vida, porque siempre has estado aquí, no me olvidaste, jamás me has dejado y nunca has fallado Señor. A ti Dios sea toda la honra y gloria desde ahora y para siempre.*

*A mis padres, Juana y Rubén, a quienes con su esfuerzo, cariño y constancia, han contribuido para finalizar este proceso superando todas las adversidades.*

*A mis tíos, tías, primos y primas, de las familias Antimil y Paillao que desde la cercanía y distancia me brindaron todo su apoyo y ánimo.*

*A mis profesores guías que tuve en este camino, Mauricio Valle, que me ayudó en gran parte de este proceso de trabajo de título, y a Enrique Faijo.*

*A mis profesores de la carrera, que con paciencia y constancia me entregaron sus conocimientos y pronta respuesta a las dudas que aparecían en los temas de estudios.*

*A todas las personas que trabajan en el Departamento de Mantención de la empresa Minera Zaldívar, que me brindaron: ayuda y asesoría para la elaboración de este trabajo.*

*Y finalmente a todas las personas que se cruzaron en este camino y que me dieron palabras de aliento y apoyo.*

*A todos ustedes, muchas gracias.*

*Cristian Jerez Antimil.*

## ***Dedicatoria***

*Luego de este largo proceso, este trabajo de título concluye una parte de mi vida y el comienzo de una nueva etapa, es por esto, que dedico este trabajo de tesis a mi familia; en especial a mi madre, que durante este proceso siempre me brindó todo su apoyo, amor y cariño para que yo diera todo de mí y sea la persona que soy hoy día.*

*A ti madre te dedico esta memoria de título.*

*Te quiero mucho.*

*Cristian Jerez Antimil.*

## Índice

Glosario -----	7
Lista de abreviaturas y siglas-----	11
Lista de símbolos -----	12
Lista de figuras -----	13
Lista de tablas -----	14
Resumen -----	15
Abstract -----	17
<i>CAPÍTULO I</i> -----	<i>19</i>
1.1 Introducción y antecedentes del tema-----	19
1.2 Planteamiento del problema-----	20
1.3 Objetivos-----	21
1.3.1 Objetivo general-----	21
1.3.2 Objetivos específicos -----	21
1.4 Alcances y limitaciones-----	22
1.5 Resultados esperados-----	22
1.6 Metodología -----	23
<i>CAPÍTULO II: ANTECEDENTES DE LA EMPRESA</i> -----	<i>24</i>
2.1 Ubicación -----	24
2.2 Superficie -----	25
2.3 Historia y antecedentes -----	26
2.4 Proceso de producción -----	27
2.4.1 Planta de chancado-----	27
2.4.2 Flotación y relaves -----	28
2.4.3 Apilado y lixiviación -----	29
2.4.4 Extracción por solventes (SX) y electro - obtención -----	29
2.5 Capacidad de producción-----	30
2.6 Definición de las áreas funcionales área seca CMZ -----	31
<i>CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO</i> -----	<i>33</i>
3.1 Generalidades -----	33
3.2 Definición de mantenimiento -----	33
3.2.1 Objetivos del mantenimiento -----	34
3.2.2 Tipos de mantenimiento-----	35
3.3 El mantenimiento y su evolución durante el siglo xx-----	36
3.3.1 Primera generación -----	36
3.3.2 Segunda generación-----	36
3.3.3 Tercera generación-----	37

3.4	Indicadores en la gestión de mantenimiento -----	38
3.4.1	Relación entre disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad -----	40
3.4.2	Medición de disponibilidad en sistemas configurados en serie y paralelo -----	41
3.5	Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) -----	42
3.5.1	Evolución del RCM-----	42
3.5.2	Preguntas que formula el RCM -----	43
3.5.3	Fases de Desarrollo del RCM -----	44
3.6	Confiabilidad operacional -----	48
3.6.1	Beneficios de la confiabilidad operacional -----	49
3.6.2	Aplicación de la confiabilidad operacional-----	49
3.6.3	Herramientas de la confiabilidad operacional-----	50
3.7	Análisis de criticidad (CA)-----	51
3.8	Análisis de modo, efecto y criticidad de fallas (FMECA) -----	53
3.8.1	Objetivo de análisis de fallos -----	55
3.8.2	Datos que se deben recopilar al estudiar un fallo -----	56
3.8.3	Causas de los fallos -----	57
3.8.3.1	Fallos en el material-----	57
3.8.3.2	Error humano del personal de producción -----	58
3.8.3.3	Error humano del personal de mantenimiento-----	58
3.8.3.4	Condiciones externas anómalas -----	59
3.8.4	Medidas preventivas para adoptar en caso de fallo-----	60
3.8.4.1	Prevención para fallos en el material -----	60
3.8.4.2	Prevención para error humano del personal de producción -----	61
3.8.4.3	Prevención para error humano del personal de mantenimiento -----	61
3.8.4.4	Prevención para condiciones externas anómalas-----	62
3.8.4.5	El stock de repuestos-----	62
3.9	Tareas de mantenimiento -----	62
<i>CAPÍTULO IV: DISEÑO DE LA SOLUCIÓN -----</i>		<i>65</i>
4.1	Modelo de gestión -----	65
4.2	Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) -----	66
4.2.1	Levantamiento de procesos -----	66
4.2.2	RCM -----	66
4.3	Análisis económico-----	67
<i>CAPÍTULO V: EVALUACIÓN DE LA SOLUCIÓN-----</i>		<i>68</i>
5.1	Levantamiento de procesos -----	68
5.1.1	Extracción de mineral -----	69
5.1.2	Chancado del mineral -----	69
5.1.3	Pilas de lixiviación -----	71
5.1.4	Flotación y Relaves -----	72
5.1.5	Extracción por solventes y electro-obtención -----	74
5.1.6	Diagrama de flujo del proceso productivo-----	76
5.2	Análisis de criticidad-----	77
5.2.1	Identificación de los equipos a estudiar-----	77
5.2.2	Selección del personal a entrevistar -----	78

5.2.3	Recolección de datos para análisis de criticidad-----	79
5.2.4	Verificación y análisis de datos-----	83
5.2.5	Resultados del análisis de criticidad-----	83
5.3	Análisis de modo, efecto y criticidad de fallas (FMECA)-----	89
5.3.1	Fuentes de información para el FMECA-----	89
5.3.2	Verificación y análisis de datos-----	89
5.3.3	Análisis funcional de sistemas en cintas transportadoras-----	90
5.3.4	Contexto Operacional CT- 32-----	94
5.3.5	Contexto Operacional CT- 34-----	97
5.3.6	Contexto Operacional CT- 200-----	100
5.3.7	Contexto Operacional CT- 201-----	103
5.3.8	Desarrollo del análisis de modo y efecto de fallas para las cintas transportadoras-----	107
5.3.8.1	Identificación de modos de fallas-----	107
5.3.8.2	Identificación de efectos de los modos fallas-----	108
5.3.10	Desarrollo del análisis de criticidad, efecto y modos de fallas-----	112
5.3.10.1	Datos para determinar el Número de Prioridad de Riesgo (NPR)-----	115
5.3.10.2	Resultados del análisis de modo, efecto y criticidad de fallas-----	117
5.3.11	Desarrollo del FMECA con NPR Mitigado-----	122
5.3.11.1	Medidas de detección y aislación de modos de fallas-----	122
5.3.11.2	Resultado de las Medidas de detección y aislación por modos de fallas-----	123
5.4	Indicadores de gestión de mantenimiento propuestos-----	131
5.5	Análisis del beneficio económico de la implementación de RCM-----	132
5.5.1	Consecuencia económica-----	136
<i>CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES-----</i>		<i>138</i>
6.1	Conclusiones-----	138
6.2	Recomendaciones-----	140
<i>BIBLIOGRAFÍA-----</i>		<i>141</i>
<i>ANEXOS-----</i>		<i>143</i>
<i>APÉNDICE A-----</i>		<i>143</i>
A.1	<i>Encuestas de Criticidad a Personal CMZ-----</i>	<i>143</i>

## Glosario

- 1) **Análisis de ultrasonido (US):** Este método estudia las ondas de sonido de baja frecuencia producidas por los equipos que no son perceptibles por el oído humano. Esta técnica permite determinar espesores y fallas en componentes, máquinas, estanques, etc.
- 2) **Análisis de vibraciones mecánicas (VM):** Es una técnica predictiva, permite la identificación de las amplitudes predominantes de las vibraciones detectadas en un elemento o máquina, la determinación de las causas de la vibración, y la corrección del problema que ellas representan.
- 3) **Análisis termográfico infrarrojo (TG):** La Termografía Infrarroja es una técnica que permite, a distancia y sin ningún contacto, medir y visualizar, con precisión, temperaturas de superficie e internas de estructuras, máquinas, etc.
- 4) **Ánodo:** Placas metálicas de cobre o plomo que se instalan en la celda electrolítica por las cuales entra la corriente eléctrica (carga positiva),
- 5) **Área de apilamiento:** Es el área donde se deposita el mineral del área seca de una minera, lo cual se hace en una pila, para luego ser irrigado por goteo con una solución de ácido sulfúrico que generalmente bordea el 4%. Posteriormente, la solución ácida es percolada.
- 6) **Área seca:** Es el área de una mina donde se desarrollan las siguientes actividades, operaciones de transporte de mineral desde la mina, pasando por los chancadores primarios, secundarios y terciarios, acopios de mineral para chancadores secundarios y terciarios, terminando en el envío del mineral a las pilas de lixiviación.
- 7) **Biolixiviación:** es el nombre que se le entrega al conjunto de reacciones químicas que tienen como resultado la disolución de minerales por parte de bacterias, las cuales lixivian, es decir, disuelven las rocas o minerales.
- 8) **Block caving:** Es un método de explotación subterránea de mineral por hundimiento, se basa en que tanto la roca mineralizada como la roca encajadora esté fracturada bajo condiciones más o menos controladas. La extracción del mineral crea una zona de hundimiento sobre la superficie por encima del yacimiento.
- 9) **Cátodo:** placas metálicas de acero inoxidable o cobre puro que se instalan en la celda electrolítica, por las cuales sale la corriente eléctrica. El cátodo tiene carga negativa y, por tanto, atrae a los cationes de cobre que son iones de carga positiva

- 10) **Commodity:** Término anglosajón que se aplica a todo producto heterogéneo vendido a granel, tales como metales, petróleo y granos que a menudo se venden en mercados financieros internacionales.
- 11) **Confiabilidad:** Es la capacidad de un producto de realizar su función de la manera prevista. De otra forma, la confiabilidad se puede definir también como la probabilidad en que un producto realizará su función prevista sin incidentes por un período de tiempo especificado y bajo condiciones indicadas.
- 12) **Chancado:** Proceso mediante el cual se disminuye el tamaño de las rocas mineralizadas triturándolas en chancadoras y molinos. El material extraído pasa por tres tipos de chancadoras (chancador primario, secundario y terciario) hasta llegar a tamaños menores a ½ pulgada.
- 13) **Disponibilidad:** Es la capacidad de un activo o componente para estar en un estado tal que le permita realizar una función requerida bajo condiciones dadas en un instante dado de tiempo o durante un determinado intervalo de tiempo, asumiendo que los recursos externos necesarios se han proporcionado.
- 14) **Electro-winning (electro-obtención):** Es un proceso de electrometalurgia mediante el cual se recupera el cobre que se encuentra concentrado en la solución de cobre (que se obtiene del proceso de lixiviación) con el propósito de producir cátodos de alta pureza de cobre (99,99%), muy cotizados en el mercado.
- 15) **Extracción por solvente:** La extracción por solventes (SX), es uno de los procesos más efectivos y económicos para purificar, concentrar y separar los metales valiosos que se encuentran en las soluciones enriquecidas, provenientes de procesos de lixiviación.
- 16) **Floor:** Contrato que asegura a un agente económico un tipo de interés mínimo durante un periodo determinado.
- 17) **KPI (Key Performance Indicators):** Son indicadores claves de desempeño que miden el nivel del desempeño de un proceso, enfocándose en el "cómo" e indicando el rendimiento de los procesos, de forma que se pueda alcanzar el objetivo fijado.
- 18) **Lixiviación:** Proceso hidrometalúrgico mediante el cual se provoca la disolución de un elemento desde el mineral que lo contiene para ser recuperado en etapas posteriores mediante electrólisis. Este proceso se aplica a las rocas que contienen minerales oxidados, ya que éstos son fácilmente atacables por los ácidos. En la lixiviación del cobre se utiliza una solución de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

- 19) **Mantenibilidad:** Es la capacidad (o probabilidad si se habla en términos estadísticos), bajo condiciones dadas, que tiene un activo o componente de ser mantenido o restaurado en un periodo de tiempo dado a un estado donde sea capaz de realizar su función original nuevamente, cuando el mantenimiento ha sido realizado bajo condiciones prescritas, con procedimientos y medios adecuados.
- 20) **Planificación de los Recursos Empresariales (ERP):** Es un sistema integral de gestión empresarial que está diseñado para modelar y automatizar la mayoría de procesos en la empresa (área de finanzas, comercial, logística, producción, etc.). Su misión es facilitar la planificación de todos los recursos de la empresa.
- 21) **Mantenimiento correctivo o mantenimiento por rotura:** Es un tipo de mantenimiento en el que no utilizan métodos y/o técnicas preventivas, ni predictivas, solo se interviene la máquina o equipo una vez suscitada la falla.
- 22) **Mantenimiento predictivo:** Es un tipo mantenimiento proactivo, se fundamenta en la determinación del estado de la máquina en operación. El concepto se basa en que las máquinas darán un tipo de aviso antes de que fallen y este mantenimiento trata de percibir los síntomas para después tomar acciones que permitan evitar detenciones no programadas de mantenimiento y sus costos asociados.
- 23) **Mantenimiento preventivo:** Es una actividad programada de inspecciones, tanto de funcionamiento como de seguridad, ajustes, reparaciones, análisis, limpieza, lubricación, calibración, que deben llevarse a cabo en forma periódica en base a un plan establecido. El propósito es prever averías o desperfectos en su estado inicial y corregirlas para mantener la instalación en completa operación a los niveles y eficiencia óptimos.
- 24) **Osmosis inversa:** Consiste en separar un componente de otro en una solución, mediante las fuerzas ejercidas sobre una membrana semi-permeable. Su nombre proviene de "osmosis", el fenómeno natural por el cual se proveen de agua las células vegetales y animales para mantener la vida.
- 25) **PLS:** Sigla en inglés de la expresión *pregnant leaching solution* (solución de lixiviación cargada). Se refiere a la solución que sale de las instalaciones de lixiviación (pilas, bateas, etc.) y que ha sido enriquecida por la disolución del cobre desde el mineral. Esta solución tiene una concentración de hasta 9 gramos por litro (gpl).
- 26) **Productividad:** Es la relación entre la cantidad de productos obtenida por un sistema productivo y los recursos utilizados para obtener dicha producción. También puede ser

definida como la relación entre los resultados y el tiempo utilizado para obtenerlos: cuanto menor sea el tiempo que lleve obtener el resultado deseado, más productivo es el sistema.

- 27) **RCM (*Reliability Centered Maintenance*):** Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Es un proceso que se usa para determinar los requerimientos del mantenimiento de los elementos físicos en su contexto operacional.
- 28) ***Stocks*:** voz inglesa, se usa en español con el sentido de existencias.
- 29) **Torque:** Momento de fuerza o torque es el efecto giratorio que produce una fuerza aplicada a un cuerpo provisto de un eje.
- 30) **Ventaja Competitiva:** Una empresa posee una ventaja competitiva cuando tiene alguna característica diferencial respecto de sus competidores, que le confiere la capacidad para alcanzar unos rendimientos superiores a ellos, de manera sostenible en el tiempo.
- 31) **Sondajes:** Son perforaciones de pequeño diámetro y gran longitud que se efectúan para alcanzar zonas inaccesibles desde la superficie o laboreos mineros. Los sondajes permiten obtener muestras de dichas zonas a profundidades de hasta 1.200 m para ser estudiadas y analizadas por los geólogos. Las técnicas más utilizadas actualmente son la perforación con recuperación de testigos o diamantina y la con recuperación de detritos o aire reverso. En la primera se utiliza una tubería engastada en diamantes en la punta, obteniéndose un cilindro de roca de un diámetro entre 2 y 5 pulgadas, en tanto que la segunda se realiza con herramientas que van moliendo la roca, permitiendo obtener sólo trozos de roca de hasta 1 cm.

## Lista de abreviaturas y siglas

- 1) **CA:** Análisis de criticidad.
- 2) **CMZ:** Compañía Minera Zaldívar.
- 3) **COCHILCO:** Comisión Chilena del Cobre.
- 4) **CODELCO:** Corporación Nacional del Cobre de Chile
- 5) **CT:** Cinta Transportadora.
- 6) **ERP (*Enterprise Resource Planning*):** Planificación de los Recursos Empresariales.
- 7) **FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*):** Análisis de Modo y Efecto de Falla.
- 8) **FMECA (*Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*):** Análisis de Modo, Efecto y Criticidad de Falla.
- 9) **KPI (*Key Performance Indicators*):** Indicadores Claves de Desempeño.
- 10) **LME (*London Metal Exchange*):** Bolsa de Metales de Londres.
- 11) **MTBF (*Mean Time Between Failures*):** Tiempo Medio Entre Fallas.
- 12) **MTTR (*Mean Time To Repair*):** Tiempo Medio Para Reparar.
- 13) **NPR:** Número de Prioridad de Riesgo.
- 14) **PLS (*Pregnant Leaching Solution*):** Solución de Lixiviación Cargada.
- 15) **RCM (*Reliability Centered Maintenance*):** Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.
- 16) **RSD:** Residuos Sólidos Domésticos.
- 17) **RISES NP:** Residuos Sólidos Industriales No Peligrosos

### Lista de símbolos

%: Por ciento.

=: Igual.

$e$ : Constante Neperiana ( $e = 2,303 \dots$ )

$\lambda$ : Tasa de fallas o número total de fallas por período de operación.

$t$ : Tiempo.

$\Sigma$ : Operador Sumatoria.

$\mu$ : Tasa de reparaciones o número total de reparaciones efectuadas con relación al total de horas de reparación del equipo.

$\Pi$ : Operador Multiplicatoria.

## Lista de figuras

FIGURA 2.1 LOCALIZACIÓN MINA ZALDÍVAR, REGIÓN DE ANTOFAGASTA, CHILE -----	24
FIGURA 2.2 VISTA PANORÁMICA MINA ZALDÍVAR, REGIÓN DE ANTOFAGASTA, CHILE-----	25
FIGURA 2.3 CHANCADOR PRIMARIO - ÁREA SECA CMZ -----	28
FIGURA 2.4 PROCESO DE PRODUCCIÓN CMZ-----	30
FIGURA 2.5 ARENADO Y CHANCADO ÁREA SECA CMZ -----	31
FIGURA 3.1 PROCESO DE UN MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO APLICANDO RCM-----	47
FIGURA 3.2 PARÁMETROS DE LA CONFIABILIDAD OPERACIONAL-----	48
FIGURA 3.3 HERRAMIENTAS DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL-----	50
FIGURA 3.4 DIAGRAMA DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA Y SUS EFECTOS ----	55
FIGURA 3.5 PROCESO DE SELECCIÓN DE TAREAS DE MANTENIMIENTO -----	64
FIGURA 4.1 MODELO DE GESTIÓN CENTRADO EN RCM ÁREA SECA. -----	66
FIGURA 5.1 STOCK PILE CMZ -----	70
FIGURA 5.2 PILA DINÁMICA, APILADOR MÓVIL Y ROTOPALA CMZ-----	72
FIGURA 5.3 TRANQUE DE RELAVES CMZ-----	73
FIGURA 5.4 INSTALACIONES CMZ -----	75
FIGURA 5.5 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO PRODUCTIVO CMZ -----	76
FIGURA 5.6 ECUACIÓN DE CRITICIDAD. -----	79
FIGURA 5.7 CRITICIDAD NUMÉRICA CT-200-----	84
FIGURA 5.8 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CRITICIDAD EN EL ÁREA SECA -----	86
FIGURA 5.9 COMPONENTES DEL SISTEMA MOTRIZ DE CT -----	90
FIGURA 5.10 SUB SISTEMAS DE LAS CINTAS TRANSPORTADORAS -----	93
FIGURA 5.11 SISTEMAS Y SUBSISTEMAS DE LA CT-32 -----	94
FIGURA 5.12 NIVELES DE ESTUDIO FMEA CT-32 -----	95
FIGURA 5.13 ESQUEMA CT-32-----	95
FIGURA 5.14 SISTEMAS Y SUBSISTEMAS DE LA CT-34 -----	97
FIGURA 5.15 NIVELES DE ESTUDIO FMEA CT-34 -----	98
FIGURA 5.16 ESQUEMA CT-34-----	98
FIGURA 5.17 SISTEMAS Y SUBSISTEMAS DE LA CT-200-----	101
FIGURA 5.18 NIVELES ESTUDIO FMEA CT-200. -----	101
FIGURA 5.19 ESQUEMA CT-200 -----	102
FIGURA 5.20 SISTEMAS Y SUBSISTEMAS DE LA CT-201-----	104
FIGURA 5.21 NIVELES ESTUDIO FMEA CT-201-----	104
FIGURA 5.22 ESQUEMA CT-201 -----	105
FIGURA 5.23 FÓRMULA DE CRITICIDAD -----	115
FIGURA 5.24 NÚMERO DE PRIORIDAD DE RIESGO -----	115
FIGURA 5.25 COMPARACIÓN ENTRE NPR ACTUAL Y EL NPR MITIGADO-----	129
FIGURA 5.26 CICLO PREDICTIVO -----	130
FIGURA 5.27 COMPARACIÓN ENTRE LA DISPONIBILIDAD ACTUAL Y ALTERNATIVAS DE MEJORAS PARA LOS EQUIPOS CRÍTICOS DEL SUB ÁREA DE APILADO -----	135

## Lista de tablas

TABLA 3.1 MANTENIMIENTO Y SU EVOLUCIÓN -----	37
TABLA 3.2 ACCIONES DEL MANTENIMIENTO TRADICIONES Y ACCIONES CON RCM-----	43
TABLA 5.1 IDENTIFICACIÓN DE EQUIPOS POR ÁREAS -----	77
TABLA 5.2 FORMATO ENCUESTA ANÁLISIS DE CRITICIDAD -----	80
TABLA 5.3 PONDERACIONES DE LOS PARÁMETROS DEL ANÁLISIS DE CRITICIDAD-----	81
TABLA 5.4 RESPUESTAS Y PONDERACIÓN INGENIERO PLANIFICADOR PARA CT-200-----	83
TABLA 5.5 PUNTAJES FINALES CT-200-----	84
TABLA 5.6 PONDERACIONES DE LAS RESPUESTAS CT-200 -----	85
TABLA 5.7 RESULTADOS PONDERADOS DEL ANÁLISIS DE CRITICIDAD EN EL ÁREA SECA-----	87
TABLA 5.8 FICHA TÉCNICA MOTOR-REDUCTOR CT-32 -----	96
TABLA 5.9 FICHA TÉCNICA POLEAS CT-32 -----	96
TABLA 5.10 FICHA TÉCNICA MOTOR-REDUCTOR CT-34 -----	99
TABLA 5.11 FICHA TÉCNICA POLEAS CT-34-----	99
TABLA 5.12 FICHA TÉCNICA MOTOR-REDUCTOR CT-200-----	102
TABLA 5.13 FICHA TÉCNICA POLEAS CT-200 -----	103
TABLA 5.14 FICHA TÉCNICA MOTOR-REDUCTOR CT-201 -----	105
TABLA 5.15 FICHA TÉCNICA POLEAS CT-201 -----	106
TABLA 5.16 MODOS DE FALLAS DEL SISTEMA CT-32 -----	109
TABLA 5.17 PONDERACIÓN DE SEVERIDAD DE EFECTOS EN UN PROCESO FMEA -----	112
TABLA 5.18 PONDERACIÓN DE FRECUENCIA PARA FMEA -----	112
TABLA 5.19 PONDERACIÓN DE LA GRAVEDAD DEL EFECTO PARA FMEA-----	113
TABLA 5.20 PONDERACIÓN PARA DETECTABILIDAD PARA FMEA -----	114
TABLA 5.21 FRECUENCIAS Y TIEMPOS DE DETENCIÓN NO PROGRAMADOS DE LOS EQUIPOS CRÍTICOS	116
TABLA 5.22 FMECA SUBÁREA APILADO CT-32 SUBSISTEMA MOTOR -----	117
TABLA 5.23 FMECA SUBÁREA APILADO CT-32 SUBSISTEMA REDUCTOR -----	119
TABLA 5.24 FMECA SUBÁREA APILADO CT-32 SUBSISTEMA POLEA-----	120
TABLA 5.25 FMECA SUBÁREA APILADO CT-32 SUBSISTEMA POLINES -----	121
TABLA 5.26 FMECA SUBÁREA APILADO CT-32 SUBSISTEMA BANDA-----	121
TABLA 5.27 SUBSISTEMA MOTOR DE CT-32 NPR MITIGADO -----	123
TABLA 5.28 SUB-SISTEMA REDUCTOR DE CT-32 NPR MITIGADO -----	125
TABLA 5.29 SUB-SISTEMA POLEA DE CT-32 NPR MITIGADO -----	126
TABLA 5.30 SUB-SISTEMA POLINES DE CT-32 NPR MITIGADO -----	128
TABLA 5.31 SUB-SISTEMA BANDA DE CT-32 NPR MITIGADO-----	128
TABLA 5.32 DATOS PARA ESTIMAR LA DISPONIBILIDAD EQUIPOS CRÍTICOS DEL SUB ÁREA DE APILADO -----	133
TABLA 5.33 DISPONIBILIDAD EQUIPOS CRÍTICOS DEL SUB ÁREA DE APILADO AUMENTANDO EL MTBF -----	133
TABLA 5.34 DISPONIBILIDAD EQUIPOS CRÍTICOS DEL SUB ÁREA DE APILADO DISMINUYENDO EL MTTR -----	134
TABLA 5.35 DISPONIBILIDAD EQUIPOS CRÍTICOS DEL SUB ÁREA DE APILADO AUMENTANDO EL MTBF Y DISMINUYENDO EL MTTR -----	135

## Resumen

El objetivo principal de este trabajo es diseñar un modelo de gestión de mantenimiento centrado en confiabilidad de la gran minería, que permita mejorar la disponibilidad de equipos en la operación mina, a fin de aportar una solución a los problemas de aumento de detenciones no programadas de maquinarias, las cuales afectan al proceso de producción de la planta industrial.

Para alcanzar este objetivo, primeramente se establece un método que sirva de instrumento para la búsqueda y evaluación de escenarios que pueden representar un impacto adverso en los procesos, sistemas y equipos de la planta industrial, recopilando información bibliográfica y la conformación de un grupo interdisciplinario de personal de la empresa.

En segundo lugar, se identifican los escenarios de mayores riesgos para los cuales es necesario establecer acciones tendientes a minimizar los mismos, a través de un análisis de criticidad, el cual se aplica a sistemas y equipos pertenecientes a las sub áreas de chancado primario, chancado terciario y apilado respectivamente. Los resultados del análisis de criticidad identificaron cuatro sistemas de alto riesgo, los cuales pertenecen a la sub área de apilado, estos sistemas son: cinta transportadora CT-200, cinta transportadora CT-32, cinta transportadora CT-201 y cinta transportadora CT-34.

En tercer lugar, se plantean soluciones a los problemas de alto riesgo mediante un análisis de modos, efectos y criticidad de fallas y la estimación de un número de prioridad de riesgo para cada modo de falla, obteniendo como resultado que los mayores riesgos se encuentran en los modos de fallas de polines, motor y banda de las cintas transportadoras. Las soluciones planteadas para mitigar el riesgo consisten en realizar análisis de imágenes infrarrojas o termografía, análisis de ultrasonido, análisis de vibraciones mecánicas, análisis de imágenes fotográficas y de imágenes de rayos X, obteniendo con ello una propuesta de sistema de gestión de mantenimiento enfocado en detectar fallas eventuales, mediante análisis predictivos, a los sistemas de alta criticidad. Permitiendo de esta forma aumentar la disponibilidad de la planta, la producción, mejorar la confiabilidad y, por ende, disminuir los costos asociados de detenciones no programadas de la producción para toda la mina.

En cuarto lugar, se establecen indicadores de gestión de mantenimiento enfocados a monitorear la evolución del modelo de mantenimiento propuesto y estos corresponden a medir la disponibilidad, tiempos medios entre fallas (MTBF) y tiempos medios para reparar (MTTR) para la sub área de apilado, los cuales se pueden implementar en las demás áreas de la planta.

En quinto lugar, se realiza una evaluación del beneficio económico para el sistema de gestión de mantenimiento propuesto para la empresa en estudio, el que consistió en evaluar la

nueva producción que se lograría realizar considerando un aumento de un 30% en los tiempos medios entre falla (MTBF) y disminución simultanea de un 30% en los tiempos medios para reparar (MTTR). Como resultado se logra aumentar la disponibilidad anual en un 5,48%, lo que implica un aumento en la producción de 18 millones de libras de cobre fino. De esta forma el nivel de venta podría aumentar en un 6,25%, equivalentes a ingresos adicionales por ventas del orden de US\$64 millones anuales. Por último, considerando un margen de contribución de un 35%, el aumento en las utilidades podría alcanzar a los US\$ 22,5 millones anuales. Quedando demostrado que una mejora en la disponibilidad de los equipos, puede traer consecuencias económicas favorables a las empresas, ya que las utilidades aumentan considerablemente.

Como desarrollo futuro, si bien las empresas mineras disponen de metodologías basadas en RCM, se plantea ampliar la gestión de mantenimiento centrado en confiabilidad a otras áreas, acompañado de una estandarización de los procesos de mantención. Esto permitirá disminuir las fallas imprevistas, incrementar la disponibilidad del parque de máquinas, optimizar la utilización de los equipos de sus plantas, aumentar la rentabilidad y disminuir costos derivados de detenciones no programadas.

**Palabras clave:** Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), Análisis de criticidad (CA), Análisis de modos de fallas, efecto y criticidad (FMECA), Disponibilidad.

## **Abstract**

The main objective of this work is to design a model of management of reliability centered maintenance of the great mining, which allows improving the equipment availability in the operation mines, in order to contribute a solution to the problems of increase of not programmed detentions of machineries, which can affect to the production process of the industrial plant.

To achieve this objective, first establishes a method that serves as the instrument for the search and evaluation of scenarios that can represent an adverse impact in the processes, systems and equipment of the industrial plant, collecting bibliographic information and the formation of an interdisciplinary group of staff of the company.

Secondly, it identifies the scenarios of greater risks for which it is necessary to establish actions tending to minimize the same ones, through an analysis of criticality, which applies to systems and equipment belonging to the sub areas of primary crusher, tertiary crusher and to stack uprespectively. The results of the criticality analysis identified four systems of high risk, which belong to the sub area of stacking; these systems are the following ones: belt conveyor CT-200, belt conveyor CT-32, belt conveyor CT-201 and belt conveyor CT-34.

Thirdly, propose solutions to the problems of high risk through failure modes, effects and criticality analysis and the estimation of a priority number of risk for each mode of failure, obtaining as a result that the greatest risks are in the failure modes of idler, engine and band of the belt conveyors. The solutions raised to mitigate risk consist of analysis of infrared images or thermography, ultrasound, analysis of mechanical vibration, analysis of photographs and x-ray images, obtaining with this proposal for a system of maintenance management focused on detecting flaws possible, using predictive analytics, to systems of high criticality. Allowing this way to increase the availability of the plant, production, improve the reliability and, therefore, reduce associate costs of not programmed stops of the production for the whole mine.

Fourthly, there establish indicators of management of maintenance focused to monitor the evolution of the model of proposed maintenance and consist of measuring the availability, mean times between failures (MTBF) and mean times to repair (MTTR) for the sub area of stack, which can be implemented in other areas of the plant.

Fifthly, we conduct an evaluation of the economic benefit to the system of maintenance management proposed for the company in study, which consisted of comparing the new production that would be obtained considering an increase of 30% in the mean times between failure (MTBF) and simultaneous decline 30% in the mean times to repair (MTTR). As a result is achieved increase the annual availability in a 5.48%, which implies an increase in the production of 18 million pounds of fine copper. In this way, the level of sales could be increased by 6.25%, equivalent to additional revenue for sales on the order of \$64 billion a year. Finally, considering a contribution margin of 35%, the increase in profits could reach the US\$ 22.5 million annually. Which shows that an improvement in the availability of the equipment, you can bring economic consequences favorable to businesses, since the utilities increase greatly.

As future development, although the mining companies have methodologies based on RCM, considers expand the management maintenance centered reliability to other areas, accompanied by a standardization of the maintenance processes. This will allow reduce the failures unforeseen, increase the availability of the park of machines, optimize the use of the equipment of its plants, increase profitability and decrease costs derived from not programmed detentions.

**Key Words:** Reliability centered maintenance (RCM), Criticality analysis (CA), Failure modes, effects and criticality analysis (FMECA), Availability.

# CAPÍTULO I

## 1.1 Introducción y antecedentes del tema

El siguiente estudio está enfocado en generar una mejora significativa y continua en la gestión de mantenimiento que realizan las empresas industriales pertenecientes a la gran minería del cobre, aunque factible de extrapolar a organizaciones de otras áreas. Se plantea el uso de herramientas de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), que permita a las empresas disminuir fallas imprevistas en la Operación Mina, incrementar la disponibilidad del parque de máquinas, optimizando con ello la disponibilidad de material rodante para las plantas en áreas seca, contribuyendo de esta manera a mejorar considerablemente el nivel de producción, y por ende la rentabilidad de la empresa. El caso de estudio se lleva a cabo en Compañía Minera Zaldívar (CMZ).

En la categoría de empresas chilenas que integran la gran minería del cobre están todas aquellas que cumplen los siguientes requisitos, estipulados en el Artículo N°1 de la Ley N° 16.624 del 20 de abril de 1967, con modificaciones: empresas que produzcan, dentro del país, cobre "blister", refinado a fuego o electrolítico, en cualquiera de sus formas, en cantidades no inferiores a 75.000 toneladas métricas anuales mediante la explotación y beneficio de minerales de producción propia o de sus filiales o asociados. (Ministerio de minería, 1967)

Las empresas mineras pertenecientes a la gran minería del cobre en Chile, que actualmente están activas, son las siguientes: Codelco División El Teniente, Codelco División Norte (Chuquicamata y Radomiro Tomic), Codelco División Salvador y Codelco División Andina; Mantos Blancos; Michilla; Escondida; Los Pelambres; El Tesoro; Cerro Colorado; Quebrada Blanca; SCM Candelaria; SCM El Abra; Compañía Minera Zaldívar (CMZ); y Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM. (COCHILCO, 2012)

Como es de esperar, empresas de esta magnitud son organizaciones que buscan aumentar su producción y mejorar la eficiencia, donde el papel del mantenimiento en sus plantas es esencial para contribuir en la competitividad y el valor de la empresa, por ejemplo, el programa implementado por CODELCO bajo la metodología RCM (+), en la planta de Chancado división salvador, *permitió aumentar la producción en un 14%* (Duran, 2011). Es por ello que el presente estudio se enfocará en analizar los puntos críticos detectados en el área seca, que en el común de las empresas productoras de cobre es un sector integral de la línea crítica. Esto servirá como proyecto piloto para después extrapolar el mismo a las otras áreas de la mina. Para detectar los puntos críticos, primero se hará un diagnóstico del mantenimiento del área a modo de examinar el estado actual de la empresa, luego se realizará un levantamiento de los procesos de la compañía con el fin de diseñar un mapa que nos permita obtener una visión

lógica, ordenada y simple de las actividades y subprocesos actualmente ejecutados para cumplir los objetivos.

## **1.2 Planteamiento del problema**

Las empresas mineras y en general toda organización productora de bienes y servicios, compiten en un mercado global, donde el objetivo principal de estas es disminuir sus costos operacionales, mientras mantienen y aumentan sus niveles de producción. Este objetivo se hace aún más evidente en las empresas mineras, donde el precio de venta de los minerales, está establecido por mercados internacionales, donde los precios presentan alta variación día a día, lo que conlleva a la incertidumbre acerca del ingreso por venta que tendrán este tipo de empresas.

Por otra parte, a medida que las minas se hacen más profundas y más lejanas, estas se encarecen aún más. Debido a que se necesita mayor infraestructura, logística y recursos humanos para extraer el mineral.

Esta necesidad de la industria minera, hace que las empresas cambien la estrategia al realizar el proceso de producción, innoven continuamente, para optimizar los costos operacionales. Por ejemplo, incorporan maquinaria nueva, más eficiente, que permita mayor rapidez en la producción y que requiera menor energía que la antigua máquina.

Adicionalmente, la planta industrial minera no tiene otra opción que enfrentar un mayor mantenimiento a los nuevos equipos y mayor inactividad en los sistemas de producción que pueden ser, por necesidad, más largos, más potentes y más complejos que sus predecesores, por lo tanto, el mayor rendimiento ofrecido por la sofisticada, pero costosa, tecnología nueva debe ir acompañada por una mayor fiabilidad para equilibrar la ecuación costo versus beneficio.

Por lo tanto, el problema se manifiesta en el área de mantenimiento, a medida que comienza a aumentar las detenciones no programadas de equipos, causando que la planta industrial minera resulte afectada dejando de producir.

Es por lo anterior, que se propone resolver el problema, mediante un modelo de sistema de gestión de mantenimiento centrado en confiabilidad, que mantenga al sistema productivo supervigilado, logrando predecir cuándo se podría presentar alguna anomalía, y de esta forma realizar una detención programada para corregirla. En consecuencia, el resultado es una mayor disponibilidad y confiabilidad tanto de los equipos como de la planta en su totalidad.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Diseñar un modelo de gestión de mantenimiento centrado en confiabilidad de la gran minería, que permita mejorar la disponibilidad de equipos en la operación mina.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Establecer un método que sirva de instrumento en la búsqueda y evaluación de escenarios que pueden representar un impacto adverso en los procesos, sistemas y equipos de una planta industrial.
2. Identificar los escenarios de mayores riesgos para los cuales es necesario establecer acciones tendientes a minimizar los mismos.
3. Plantear soluciones, mediante herramientas de RCM, a problemas de alto riesgo detectados y proponer un sistema de mantenimiento que mejore la confiabilidad del área.
4. Establecer indicadores de gestión de mantenimiento enfocados a monitorear la evolución del modelo del mantenimiento propuesto.
5. Realizar una evaluación del beneficio económico para el sistema de mantenimiento propuesto.

## **1.4 Alcances y limitaciones**

Dentro de las limitaciones del presente estudio se pueden mencionar los siguientes ítems:

- No se hace un estudio relacionado con confiabilidad de todas las áreas de la gran minería del cobre, solo se considera el área seca, pero se asume que se puede extrapolar a todas las demás áreas.
- La investigación se centra en una minera en particular en este caso Compañía Minera Zaldívar (CMZ), por lo cual no se considera la realidad de otras mineras de características similares con las cuales se podrían comparar los resultados para obtener datos estadísticos que puedan ampliar el universo del estudio. Aunque se asume que se puede aplicar a cualquier minera de gran producción de cobre, debido a que todas poseen un área seca y sus procesos son muy similares.

## **1.5 Resultados esperados**

El presente estudio pretende presentar una propuesta valida que se fundamenta en el diseño de un modelo de gestión que permita la optimización de los procesos en el área seca de la Compañía Minera Zaldívar que permita:

- Determinar prioridades de reparación
- Detectar fallas reiteradas de los equipos
- Manejar una información clara y oportuna

La herramienta principal para diseñar el modelo de gestión basado en confiabilidad para desarrollar de modo sustentable la mantención del área seca de CMZ es el mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM).

A partir de lo anterior, se espera lograr resultados el cual permite mayor rentabilidad a través del incremento en disponibilidad operativa, además de generar un desarrollo perdurable mediante un mantenimiento basado en confiabilidad que de soporte al área seca en mejorar y estimar la vida útil de las piezas y equipos de CMZ.

## 1.6 Metodología

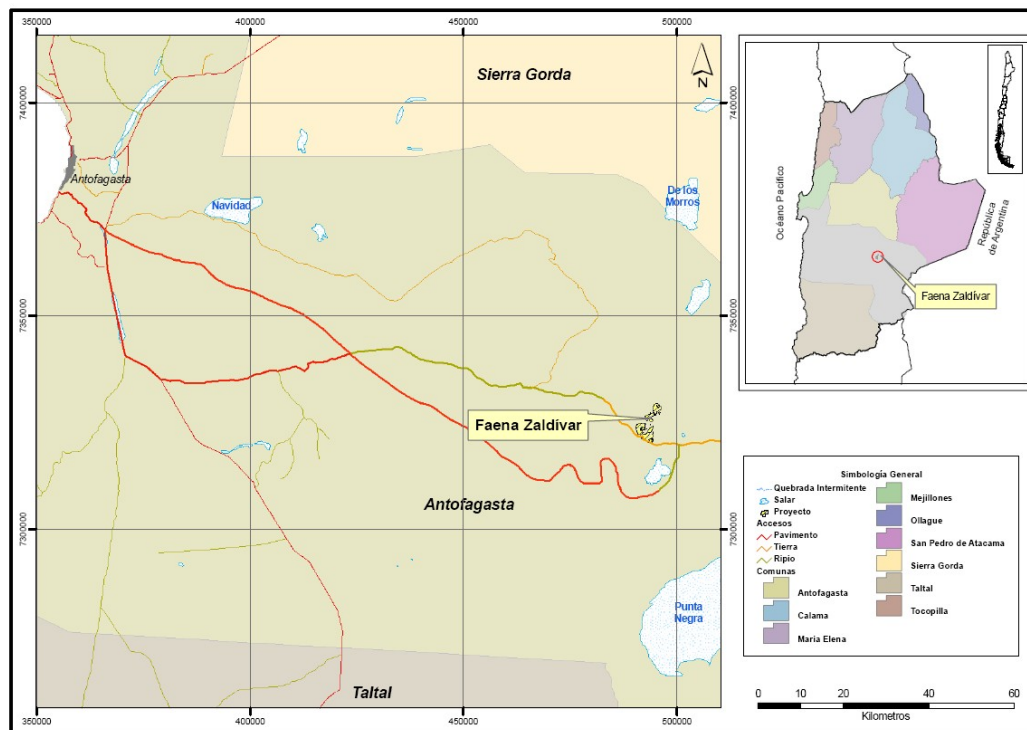
- Recopilación de información de la teoría en modelos de gestión en confiabilidad de procesos.
- Análisis situacional de los procesos en el área seca y definición de puntos críticos.
- Desarrollar el diseño de un modelo de gestión y una metodología basada en implementación, identificando los procedimientos con el fin de estandarizarlos y definir las posibles mejoras. El modelo de gestión de mantenimiento se desarrolla considerando las siguientes fases:
  - Listado y codificación de equipos.
  - Determinación de fallos funcionales y técnicos para equipos críticos.
  - Determinación de los modos de Fallo.
  - Análisis de la gravedad de los fallos.
  - Determinación de las medidas preventivas.
  - Obtención del plan de mantenimiento y agrupación de medidas preventivas.
- Evaluación de la factibilidad técnica y económica del modelo de gestión de mantenimiento propuesto.

## CAPÍTULO II: ANTECEDENTES DE LA EMPRESA

### 2.1 Ubicación

El yacimiento cuprífero de Barrick Zaldívar se encuentra ubicado en la precordillera de la Región de Antofagasta, a una altura de 3.300 msnm, a 175 kilómetros al sudeste de la ciudad de Antofagasta, y aproximadamente a 1.400 kilómetros al norte de la ciudad de Santiago de Chile. (Barrick Gold Corporation, 2011)

Se accede al complejo minero industrial de la faena Zaldívar, vía terrestre, desde la ciudad de Antofagasta por un camino pavimentado. La Figura 2.1 representa geográficamente su localización. La Figura 2.2 muestra vista panorámica del yacimiento.



Fuente: Barrick Chile

**Figura 2.1 Localización Mina Zaldívar, Región de Antofagasta, Chile**



**Figura 2.2 Vista Panorámica Mina Zaldívar, Región de Antofagasta, Chile**

## **2.2 Superficie**

La superficie de obras de la faena Zaldívar comprende aproximadamente 162 ha, la cual se distribuye del siguiente modo (Barrick Gold Corporation, 2011):

- 37 ha corresponden a la ampliación de la pila de lixiviación secundaria de ripios.
- 18 ha corresponden a piscinas de proceso.
- 6 ha corresponden al sitio de disposición de Residuos Sólidos Domésticos (RSD) y Residuos Sólidos Industriales No Peligrosos (RISES NP).
- 1 ha corresponde a instalaciones auxiliares.

Todas las superficies antes señaladas son aproximadas, se encuentran ubicadas al interior de la faena Zaldívar y representan, en conjunto, aproximadamente un 15% de la superficie original de obras del Proyecto Zaldívar. (Barrick Gold Corporation, 2011)

### 2.3 Historia y antecedentes

La Compañía Minera Zaldívar (CMZ), en su construcción requirió una inversión de US\$ 600 millones, e inició sus operaciones en agosto de 1994, obteniendo la primera producción de cátodos de alta pureza el 7 de junio de 1995 con una capacidad de producción inicial de 125.000 toneladas. La producción de cátodos representa el 98% de la producción de cobre fino total, siendo el resto, concentrado del mineral, el cual se vende en fundiciones locales en Chile. (Barrick Gold Corporation, 2011)

En 2011, Zaldívar produjo 292 millones de libras de cobre a un costo de caja total de US\$1,50 la libra. Las reservas mineras probadas y probables al 31 de diciembre de 2011 eran 6,6 mil millones de libras. (Barrick Gold Corporation, 2011)

En 2012, la compañía minera Zaldívar produjo 289 millones de libras de cobre a costos de efectivo US\$1,62 por libra. (Barrick Gold Corporation, 2012)

Compañía Minera Zaldívar debe su nombre a la estación ferroviaria localizada en el cerro Zaldívar, llamado así en honor al ingeniero Adolfo Zaldívar Reyes (1875-1936), precursor del ferrocarril Antofagasta (Chile)-Salta (Argentina). (Barrick Gold Corporation, 2011)

En marzo de 1998, la marca "Zaldívar" fue registrada en la Bolsa de Metales de Londres (LME) y certificada como cátodos de cobre tipo A. Luego, a fines de 2003, se obtuvo el mismo registro en la Bolsa de Metales de Nueva York (COMEX). Desde ese año el Sistema de Gestión Ambiental está certificado bajo el estándar internacional ISO 14001:1996 y fue re-certificado bajo la misma norma según la versión 2004 en el año 2006 y 2010, con una validez hasta el año 2013. Lo anterior como resultado de una participación rigurosa y comprometida de toda la organización. Lo que refleja el compromiso adquirido por Barrick Zaldívar en la protección del entorno en que realiza su operación minera. (Barrick Gold Corporation, 2011)

En febrero del año 2009, Barrick Zaldívar obtuvo la certificación de la Norma Internacional ISO 9001:2000 enmarcado en su compromiso con la gestión de la calidad, cuyo alcance abarca el proceso de Comercialización, Producción (mediante los procesos de lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención) y la Administración de Ventas de cátodos de cobre calidad LME. (Barrick Gold Corporation, 2011)

El compromiso con el cuidado del medio ambiente, de nuestros trabajadores y de las generaciones actuales y futuras se vio reconocido con la obtención, en abril de 2004, del premio Fundación PRO humana RSÉtica por la gestión integral de Responsabilidad Social. Este reconocimiento fue otorgado por el Gobierno de Chile, la Sociedad de Fomento Fabril SOFOFA, y la Fundación PRO humana. (Barrick Gold Corporation, 2011)

## **2.4 Proceso de producción**

En la mina Zaldívar, se utiliza el método de explotación a rajo abierto. Los bancos de la mina tienen una altura de 15 metros y sus ángulos generales de talud varían entre los 38 y 53 grados. Las rampas de transporte del rajo han sido diseñadas con un ancho de 30 metros, de modo de permitir la circulación de vehículos de gran tonelaje. (Barrick Gold Corporation, 2014)

Una vez ejecutada la tronadura, el material extraído es cargado en camiones y, dependiendo de su ley, se envía al botadero de estéril (acopio para material sin ley), al Dump Leach (botadero para material de baja ley que se somete a lixiviación sin pasar por chancado), o al proceso de chancado primario (material de alta ley, donde comienza el proceso de extracción del cobre). Área del problema del estudio de la memoria. (Barrick Gold Corporation, 2014)

### **2.4.1 Planta de chancado**

El mineral extraído se transporta en camiones de 250 toneladas a una tolva de alimentación del chancador primario, a una tasa de aproximadamente 60 mil toneladas por día. Este mineral de alta ley alimenta a un chancador primario giratorio. (Barrick Gold Corporation, 2014)

El material que sale desde este chancador es enviado a los chancadores secundarios, desde donde a través de cintas transportadoras se envía hacia el área de stock pile, para luego pasar al área de pre-harneo y chancador terciario. Desde aquí, de acuerdo a su tamaño o granulometría, se selecciona el material que será derivado a pilas de lixiviación o al proceso de flotación (Ver figura 2.3). (Barrick Gold Corporation, 2014)



Fuente: CMZ

**Figura 2.3 Chancador Primario - Área Seca CMZ**

### **2.4.2 Flotación y relaves**

El material fino de bajo tamaño es enviado a las celdas de flotación, donde se mezcla con agua, cal, colectores y espumantes. Esta mezcla se agita y produce burbujas que llevan a la superficie las partículas de cobre adheridas a ellas; para luego pasar a los espesadores y por un filtro que extrae el exceso de humedad, constituyéndose en concentrado de cobre. (Barrick Gold Corporation, 2014)

El material que queda de este proceso (cola o relaves) se transporta por gravedad a través de una tubería de 4 kilómetros hasta el depósito de relaves, donde se produce la evaporación de agua, quedando finalmente sólo material sólido. (Barrick Gold Corporation, 2014)

### **2.4.3 Apilado y lixiviación**

El mineral chancado se envía por correas transportadoras hacia el área de apilamiento, donde es depositado en una pila de 2.100 metros de largo por 650 metros de ancho y una altura de 9 metros, para luego ser irrigado por goteo con una solución de ácido sulfúrico al 4%. Posteriormente, la solución ácida es percolada. (Barrick Gold Corporation, 2014)

El cobre de los minerales sulfurados se recupera por lixiviación bioquímica, utilizando bacterias naturales del mineral. La solución obtenida se lleva a una piscina (PLS) y de allí, por gravedad, hasta la planta de extracción por solventes. (Barrick Gold Corporation, 2014)

Una vez lixiviado el material, se retira de la pila mediante un sistema de roto-pala y es depositado en el área de pilas de ripios, donde permanecerá hasta el cierre de la faena. (Barrick Gold Corporation, 2014)

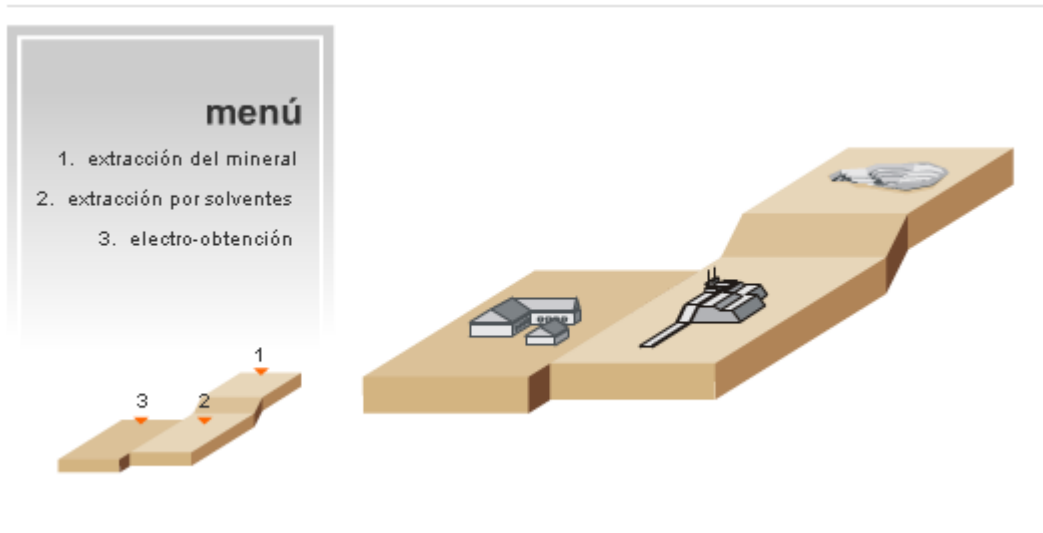
### **2.4.4 Extracción por solventes (SX) y electro - obtención**

En esta etapa del proceso, y luego de pasar por tanques y filtros, el cobre es transferido desde el área de lixiviación a una solución purificada denominada electrolito, que luego pasa a la etapa siguiente de electro-obtención. (Barrick Gold Corporation, 2014)

El electrolito es cargado en celdas de la planta de electro-obtención, donde la corriente eléctrica que circula entre las placas de ánodos y cátodos induce al cobre a depositarse en los cátodos, obteniéndose cobre de alta pureza. (Barrick Gold Corporation, 2014)

Una vez fuera de la planta, los cátodos son transportados vía ferroviaria hacia el puerto de Antofagasta, desde donde son enviados a los destinos finales correspondientes. (Barrick Gold Corporation, 2014)

Resumiendo los puntos anteriores, se describe a través del siguiente esquema el proceso en base a una simulación de la figura 2.4.



Fuente: Página Minería, Cadena de valor minera.

**Figura 2.4 Proceso de Producción CMZ**

## 2.5 Capacidad de producción

Compañía Minera Zaldívar tiene actualmente una capacidad de producción de 125.000 toneladas de cobre. El 98% de la producción total corresponde a cátodos de cobre fino mientras que el resto es concentrado del mineral proveniente de un proceso de flotación, el cual se vende a fundiciones locales en Chile. (Barrick Gold Corporation, 2011)

## 2.6 Definición de las áreas funcionales área seca CMZ

### Departamento de mantenimiento

Sus funciones son gestionar el mantenimiento preventivo, correctivo y proactivo de todas las plantas de producción; hacer gestión de proyectos dentro y fuera de la planta; y gestión de Mantenimiento de la planta. El área seca de CMZ, comprende las subáreas de Chancado y Apilamiento que comprenden el transporte del material en cintas transportadoras que comprenden más de 120 equipos. La figura 2.5 muestra el área de Arenado y Chancado.



Fuente: Barrick - Chile

**Figura 2.5 Arenado y Chancado Área Seca CMZ**

### Función de las áreas funcionales del mantenimiento del Área Seca

- **Confiabilidad**

Sus funciones son: Gestionar el mantenimiento basado en la confiabilidad RCM; implementar planes de análisis de causa raíz de los problemas RCM; desarrollar análisis basados en Riesgos e inspección; gestionar las Actividades de Proyectos de implementación de planes de mantenimiento; planificación de utilización de las herramientas de IT efectivamente; liderar los proyectos de Revisión Estratégica de Mantenimiento (MSR): Personal, Recursos, Tecnología y Procesos.

– **Calidad**

Sus principales funciones son: establecer los lineamientos para el Sistema de Calidad del proyecto; ejecución del Plan de Calidad; verificar el cumplimiento de los estándares de Calidad establecidos en el departamento de mantenimiento del área; gestionar y supervisar la información de control de calidad de los proveedores de equipos y materiales.

– **Ingeniería en Planificación**

La principal tarea de la unidad es mantener el correcto funcionamiento de los equipos e instalaciones, gestionar la planificación y programación de trabajos de mantenimiento, además de elaborar y controlar el presupuesto de su área.

– **Seguridad y medioambiente**

Sus funciones consisten en: supervisar el cumplimiento de todas las leyes y normas de seguridad y salud ocupacional; ejecutar acciones orientadas a prevenir, detectar, corregir y eliminar incidentes, accidentes y/o enfermedades ocupacionales en el área seca; realizar inspecciones permanentes para identificar peligros y evaluar los riesgos, proponiendo y gestionando la implementación de las medidas correctivas necesarias; mantener y controlar los stocks, así como la vigencia de materiales de seguridad para la operación (equipos de protección personal, equipos de protección colectiva, herramientas de seguridad, equipos de lucha contra incendio, equipos de emergencia, material de primeros auxilios, otros); coordinar los controles médicos y cuidado de la salud para los trabajadores, así como primeros auxilios y cuidado médico de emergencia en caso de lesiones relacionadas al trabajo; elaborar los documentos relacionados con Seguridad y Salud ocupacional manteniéndolos actualizados; investigar y reportar los incidentes y accidentes de seguridad & salud ocupacional para el cumplimiento con los organismos de fiscalización. Actualizar y reportar las estadísticas de incidentes y accidentes de seguridad & salud ocupacional.

## CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

### 3.1 Generalidades

Desde el principio de la humanidad, hasta finales del siglo XVII, las funciones de preservación y mantenimiento no tuvieron un gran desarrollo debido a la menor importancia que tenía la máquina con respecto a la mano de obra. La conservación que se proporcionaba era solo mantenimiento correctivo, ya que las máquinas solo se reparaban en caso de paro o falla importante. Sin embargo, con la llegada de la Revolución Industrial, en siglo XVIII, se implementan nuevas maquinarias en los diversos procesos productivos, cambiando así, la forma de producción en el mundo. Conforme las máquinas se fueron haciendo más complejas, los procesos, antes realizados por trabajadores, comienzan a ser automatizados por estas máquinas, las cuales y debido a su normal deterioro, presentan fallas durante su ejecución provocando la detención de la producción. Por lo tanto, la necesidad de reparar estas máquinas trajo consigo nuevos desafíos, generándose así nuevos conceptos tales como, competitividad de costos, eficiencia en la producción, disponibilidad en los equipos y otros. (Pistarelli, 2010)

En este período, el concepto de mantenimiento aparece como una forma de solución al problema, ya que la constante utilización de las máquinas y sistemas genera un desgaste, que posteriormente ocasiona fallas. (Pistarelli, 2010)

### 3.2 Definición de mantenimiento

Según la Federación Europea de Sociedad Nacionales de Mantenimiento (*European Federation of National Maintenance Societies*) mantenimiento es definido como: “*Todas las acciones que tienen como objetivo, mantener un artículo o restaurarlo a un estado en el cual pueda llevar a cabo alguna función requerida. Estas acciones incluyen la combinación de las acciones técnicas y administrativas correspondientes*”.

También en la literatura se encuentra la siguiente definición de mantenimiento: “*Conjunto de acciones destinadas a mantener o reacondicionar un componente, equipo o sistema, en un estado en el cual sus funciones pueden ser cumplidas. Entendiendo como función cualquier actividad que un componente, equipo o sistema desempeña, bajo el punto de vista operacional*”. (Mesa, Ortiz, & Pinzón, 2006)

### 3.2.1 Objetivos del mantenimiento

Si se considera la definición moderna de mantenimiento, se identifica que el principal objetivo es asegurar la disponibilidad de la función de los equipos e instalaciones, de tal modo que permita atender a un proceso de producción o de servicio con calidad, confiabilidad, seguridad, preservación del medio ambiente y costo adecuado. (Mesa, Ortiz, & Pinzón, 2006)

Por lo tanto, el diseño y la implementación de cualquier tipo de sistema de mantenimiento deben estar enmarcado dentro de un objetivo en particular que servirá de directriz para regir su funcionamiento eficaz. (Pistarelli, 2010) Estos objetivos son:

- a) Optimización de la disponibilidad del equipo productivo.
- b) Disminución de los costos de mantenimiento.
- c) Optimización de los recursos humanos.
- d) Maximización de la vida útil de la máquina.
- e) Conseguir estos objetivos a un costo razonable.

Disponer de un adecuado sistema de mantenimiento permite a las empresas alcanzar un mayor grado de confiabilidad en el servicio que ofrecen. Alcanzar los objetivos anteriormente detallados permitirá eficazmente (Pistarelli, 2010):

- a) Prevenir detenciones inútiles de las líneas de producción.
- b) Reducir la gravedad de las fallas no detectadas a tiempo.
- c) Prevenir, reducir, y si es posible, restaurar las fallas sobre las máquinas y sistemas de producción en el menor tiempo posible.
- d) Evitar accidentes.
- e) Aumentar la seguridad de los trabajadores y los clientes.
- f) Extender la vida útil de las maquinarias y los sistemas de producción.

### 3.2.2 Tipos de mantenimiento

Para diseñar un plan de mantenimiento que fortalezca la capacidad de organización y la toma de decisiones, es de vital importancia considerar los 4 tipos de mantenimiento que permitirán que las intervenciones efectuadas por el personal sean eficaces y eficientes. (Pistarelli, 2010)

- **Mantenimiento Correctivo:** Es el conjunto de tareas destinadas a corregir los defectos observados en los equipamientos o instalaciones y que son comunicados al departamento de mantenimiento por los usuarios estos. Es la forma más básica de mantenimiento, ya que consiste en localizar daños o defectos para, posteriormente, corregirlos o repararlos. (Pistarelli, 2010)
- **Mantenimiento Preventivo:** Este tipo de mantenimiento tiene por objetivo conservar los equipos o instalaciones a través de un grupo de tareas planificadas que se ejecutan periódicamente para encontrar y corregir los problemas menores antes que de éstos provoquen fallas. Las tareas del mantenimiento preventivo incluyen acciones como cambio de piezas desgastadas, cambio de aceites y/o lubricantes, etc. (Pistarelli, 2010)
- **Mantenimiento Predictivo:** Se basa principalmente en determinar permanentemente el estado y operatividad de las instalaciones a través del conocimiento de los valores de determinadas variables, representativas de tal estado y operatividad. Este tipo de mantenimiento permite determinar en qué momento de la producción se puede programar una intervención sin perjudicar el proceso productivo. Es el tipo de mantenimiento más tecnológico, pues requiere de medios técnicos avanzados, y en ocasiones, de fuertes conocimientos matemáticos, físicos y/o técnicos. (Pistarelli, 2010)
- **Mantenimiento Proactivo:** Este tipo de mantenimiento eleva los tipos de mantenimiento anteriormente detallados hacia la dimensión del análisis de causalidad. A diferencia del mantenimiento predictivo que determina en qué medida algún elemento de la máquina puede fallar, el mantenimiento proactivo, también conocido como fiabilidad de máquina busca analizar la causa raíz de la repetitividad de la avería, resolviendo aspectos técnicos de las mismas. (Pistarelli, 2010)

### **3.3 El mantenimiento y su evolución durante el siglo xx**

Actualmente, las empresas industriales tienen la necesidad de mantener en continua operación sus sistemas de producción, ya que la globalización de la información, las herramientas informáticas complejas y la gran cantidad de productos ofrecidos por diversas empresas han provocado en las industrias una constante competitividad por hacer más disponibles sus servicios y/o productos. Es por esta razón, que el concepto de *disponibilidad* se convierte en una herramienta vital a la hora de planificar y producir. (Pistarelli, 2010)

A continuación se describen los hechos históricos que han generado las tres generaciones que han experimentado el mantenimiento:

#### **3.3.1 Primera generación**

Esta generación se sitúa hasta el período previo a la Segunda Guerra Mundial, cuando las industrias eran altamente mecanizadas. En este periodo, las reparaciones que se producían en las máquinas y líneas de producción eran de tipo correctivo ya que la maquinaria era más bien sencilla y sobredimensionada para los trabajos para los cuales había sido diseñada. Es por esta razón que los equipos utilizados en este periodo no necesitaban mayores intervenciones, sólo del tipo limpieza y lubricaciones. (Pistarelli, 2010)

#### **3.3.2 Segunda generación**

La Segunda Generación comprende los periodos de la Segunda Guerra Mundial, donde el proceso de fabricación dio un vuelco significativo debido a la imperante necesidad de contar con el armamento necesario para la batalla. Esto provocó un aceleramiento en el desarrollo de industrialización y automatización en los procesos de fabricación, ya que las empresas no contaban con la mano de obra masculina. Además, en este período la Industria Aeronáutica desarrolló las Turbinas de Propulsión a Chorro y el Programa Espacial, lo que generó una necesidad por parte de las empresas industriales, de aumentar el grado de confiabilidad en los equipos con los que contaba. (Pistarelli, 2010)

En la época de los 70, el uso de herramientas y plataformas informáticas se comienza a expandir rápidamente, generando así un cambio significativo en la toma de decisiones influenciadas principalmente por la información útil que proporcionaban estas herramientas informáticas. (Pistarelli, 2010)

### 3.3.3 Tercera generación

En los principios de la década de los 80, los conceptos de “Disponibilidad, Fiabilidad y Costes” no son sólo el eje de atención de las empresas, ya que se agregan además aspectos relacionados con la seguridad, normativas, leyes, medio ambiente y calidad en los servicios de mantenimiento, confiabilidad operacional, técnicas de optimización de procesos, etc. Luego, surgen normas aceptadas mundialmente, como las ISO9000, ISO14000 que contribuyeron a nuevos avances en sistemas de producción. El concepto de Análisis de Costo del Ciclo de Vida de los activos se convierte en un aspecto fundamental para tomar decisiones en cuanto a la adquisición de nuevos productos. Es decir, no sólo se considerarían los costes iniciales de los activos, sino además se centraría la atención en hacer que los costos financieros, los costos de operación, de mantenimientos y reemplazos fuesen los menores posibles.

Finalmente, durante la Tercera Generación se busca utilizar métodos de medición e intervención en los equipos que sean más prolijos para asegurar la eficacia de las líneas de producción de manera temprana y no sólo cuando sea necesario. (Pistarelli, 2010)

Resumiendo los puntos anteriores se tiene:

**Tabla 3.1 Mantenimiento y su Evolución**

<p><b>Primera Generación (1950)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reparación en caso de Avería</li> <li>- Lubricaciones</li> <li>- Limpiezas</li> <li>- Cambio de Piezas</li> </ul>
<p><b>Segunda Generación (1970)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor Disponibilidad</li> <li>- Mayor Vida útil de los equipos</li> <li>- Costos más bajos</li> <li>- Revisiones clínicas</li> </ul>
<p><b>Tercera Generaciones (&lt;1980)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Confiabilidad Operacional</li> <li>- Monitoreo Constante</li> <li>- Diseños de Confiabilidad y Mantención</li> <li>- Sistemas expertos</li> <li>- Análisis de Causa – Efecto</li> <li>- Mejor calidad de los productos</li> <li>- Mayor duración de los equipos</li> </ul>

Fuente: GALAN, M., Organización y Gestión del Mantenimiento 2002.

### 3.4 Indicadores en la gestión de mantenimiento

Las variables de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, forman parte de los indicadores más relevantes en la gestión del mantenimiento, las cuales se relacionan con en el desempeño de los sistemas o equipos de producción (Mesa, Ortiz, & Pinzón, 2006). A continuación se muestran las definiciones de las variables de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad y la forma de medir cada una de estas.

**Confiabilidad:** La confiabilidad puede ser definida como la “confianza” que se tiene de que un componente, equipo o sistema desempeñe su función básica, durante un período de tiempo preestablecido, bajo condiciones estándares de operación. Otra definición importante de confiabilidad es; la probabilidad de que un ítem pueda desempeñar su función requerida durante un intervalo de tiempo establecido y bajo condiciones de uso definidas. (Mesa, Ortiz, & Pinzón, 2006)

La confiabilidad de un equipo o sistema puede ser medida a través de la expresión:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Donde:

$R(t)$ : Confiabilidad de un equipo en un tiempo dado.

$e$ : Constante Neperiana ( $e = 2,303 \dots$ )

$\lambda$ : Tasa de fallas (número total de fallas por período de operación)

$t$ : Tiempo

La confiabilidad es la probabilidad de que no ocurra una falla de determinado tipo, para una misión definida y con un nivel de confianza dado. (Mesa, Ortiz, & Pinzón, 2006)

**Disponibilidad:** En general, con el término disponibilidad se pretende indicar la capacidad de algo para ser utilizado cuando se necesita. Esto es, en definitiva, el objetivo principal del mantenimiento, por lo que si se encuentra la forma de medir la disponibilidad de los distintos elementos (dispositivos, equipos, sistemas, etc.) que componen la instalación en estudio, se tendrá una medida del rendimiento del mantenimiento realizado. (Gómez F. , 1998)

Se define la disponibilidad, y se denota por  $D(t)$ , como la probabilidad de estar en uso un dispositivo, equipo o sistema en un instante de tiempo dado. En la práctica, la disponibilidad se expresa como el porcentaje de tiempo en que el sistema está listo para operar

o producir, esto en sistemas que operan continuamente. (Gómez F. , 1998)

Matemáticamente la disponibilidad  $D(t)$ , se puede definir como la relación entre el tiempo en que el equipo o instalación quedó disponible para producir y el tiempo total de reparación (MTTR, por sus siglas en inglés, *Mean Time To Repair*). (Mesa, Ortiz, & Pinzón, 2006)

$$D(t) = \frac{\sum \text{tiempos disponibles para la producción}}{\sum \text{tiempos disponibles para la producción} + \sum \text{tiempos en mantenimiento}}$$

Ó

$$D(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

El MTTR o tiempo medio de reparación, depende en general de:

- La facilidad del equipo o sistema para realizarle mantenimiento.
- La capacitación profesional de quien hace la intervención.
- De las características de la organización y la planificación del mantenimiento.

**Mantenibilidad:** “La mantenibilidad se puede definir como la expectativa que se tiene de que un equipo o sistema pueda ser colocado en condiciones de operación dentro de un periodo de tiempo establecido, cuando la acción de mantenimiento es ejecutada de acuerdo con procedimientos prescritos” (Mesa, Ortiz, & Pinzón, 2006)

También la mantenibilidad puede ser definida en términos probabilísticos como “la probabilidad de reestablecer las condiciones específicas de funcionamiento de un sistema, en límites de tiempo deseados, cuando el mantenimiento es realizado en las condiciones y medios predefinidos”. O simplemente “la probabilidad de que un equipo que presenta una falla sea reparado en un determinado tiempo  $t$ ”. (Mesa, Ortiz, & Pinzón, 2006).

Una expresión matemática de la mantenibilidad, puede ser definida de forma análoga a la confiabilidad y la fórmula para estimarla se presenta a continuación:

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$$

Donde:

$M(t)$ : es la función de mantenibilidad, que representa la probabilidad de que la reparación comience en el tiempo  $t=0$  y sea concluida satisfactoriamente en el tiempo  $t$ .

$e$ : Constante Neperiana ( $e = 2,303 \dots$ )

$\mu$ : Tasa de reparaciones o número total de reparaciones efectuadas con relación al total de horas de reparación del equipo.

$t$ : Tiempo previsto de reparación

### 3.4.1 Relación entre disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad

Para aumentar la producción en una planta, es indispensable que las tres disciplinas disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad se relacionen entre sí, de tal manera que (Mesa, Ortiz, & Pinzón, 2006):

Si se desea aumentar la disponibilidad en una planta, sistema o equipo, se debe:

- Aumentar la confiabilidad, expresada por el MTBF.
- Reducir el tiempo empleado en la reparación, expresado por el MTTR.
- Aumentar el MTBF y reducir el MTTR simultáneamente.

Como la tasa de fallas  $\lambda$  expresa la relación entre el número de fallas y el tiempo total de operación del sistema o equipo, se puede expresar el MTBF como el inverso de la tasa de fallas  $\lambda$ , así que:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} = \frac{\textit{Tiempo total de operación}}{\textit{Número de fallas}}$$

De forma análoga a la definición de tasa de fallas, se define la tasa de reparaciones  $\mu$ , por:

$$\mu = \frac{\textit{Número de reparaciones indicadas}}{\textit{Tiempo total de reparación de la unidad}}$$

Consecuentemente, el MTTR se puede definir también como el inverso de la tasa de reparaciones, así.

$$MTTR = \frac{1}{\mu}$$

### 3.4.2 Medición de disponibilidad en sistemas configurados en serie y paralelo

En los equipos o sistemas complejos, la disponibilidad dependerá de la disponibilidad de cada equipo que conforme el sistema, de acuerdo con las configuraciones básicas serie y paralelo. (Arques, 2009)

Un sistema *configurado en serie* estará operativo únicamente cuando todos los componentes que lo conforman estén operativos, por lo tanto, matemáticamente la disponibilidad de un sistema en serie se puede estimar multiplicando la disponibilidad de cada equipo perteneciente a la configuración. La fórmula matemática de cálculo se presenta a continuación (Arques, 2009):

$$D_s = \prod_i D_i$$

Donde:

$D_s$ : Corresponde a la disponibilidad del sistema

$D_i$ : Corresponde a la disponibilidad individual de cada equipo o componente  $i$ .

Un sistema configurado en *paralelo* no será operativo y por tanto no estará disponible, cuando estén indisponibles simultáneamente todos los componentes que lo forman, es decir, matemáticamente queda determinado por la siguiente expresión (Arques, 2009):

$$D_s = 1 - \prod_i (1 - D_i)$$

Donde:

$D_s$ : Corresponde a la disponibilidad del sistema

$D_i$ : Corresponde a la disponibilidad individual de cada equipo o componente  $i$ .

El concepto de sistema en paralelo puede aplicarse no solo para calcular la disponibilidad de un equipo complejo en función de la disponibilidad de cada uno de sus componentes, sino que puede aplicarse también para garantizar la disponibilidad de una función cuando esta sea ejecutada por uno o varios equipos independientes, lo que resulta altamente útil para determinar el número de equipos que deberían instalarse.

### **3.5 Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)**

El mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés, *Reliability Centred Maintenance*) es un proceso usado para determinar sistemática y científicamente qué se debe hacer para asegurar que los activos físicos continúen haciendo lo que sus usuarios desean que hagan. Ampliamente reconocido por los profesionales de mantenimiento como la forma más “costo-eficaz” de desarrollar estrategias de mantenimiento de clase mundial, RCM lleva a mejoras rápidas, sostenidas y sustanciales en la disponibilidad y confiabilidad de planta, calidad de producto, seguridad e integridad ambiental. (Moubray, 2004)

El RCM pone énfasis tanto en las consecuencias de las fallas como en las características técnicas de las mismas, mediante la integración y atención. (Rojas, 2010)

Integración: revisión de las fallas operacionales con la evaluación de aspectos de seguridad y amenazas al medio ambiente, esto hace que la seguridad y el medio ambiente sean tenidos en cuenta a la hora de tomar decisiones en materia de mantenimiento. (Rojas, 2010)

Atención: en las tareas del mantenimiento que mayor incidencia tienen en el funcionamiento y desempeño de las instalaciones, garantizando que la inversión en mantenimiento se utiliza donde más beneficio va a reportar. (Rojas, 2010)

#### **3.5.1 Evolución del RCM**

En el transcurso de los años, el mantenimiento ha recibido significantes aportes provenientes del campo de la estadística y de la teoría de la confiabilidad. En la Tabla 3.2 se muestra la evolución al nuevo sistema de mantenimiento centrado en la confiabilidad.

**Tabla 3.2 Acciones del mantenimiento tradiciones y acciones con RCM**

<b>ACCIONES MANTENIMIENTO</b>	<b>ACCIONES CON RCM</b>
Mantenimiento para conservar los equipos en buen estado	Mantenimiento para conservar las funciones de los activos físicos
Mantenimiento rutinario para prevenir la falla	Mantenimiento rutinario para evitar, reducir o eliminar las consecuencias.
El objetivo del mantenimiento era optimizar la disponibilidad de la planta a un costo fijo	Su objetivo no es solo optimizar la disponibilidad de la planta, sino también en aumentar la seguridad, la integridad ambiental, la calidad de los productos y el servicio al cliente
La mayoría de los equipos tienden a fallar a medida que envejecen	Se presentan modelos de fallas de los equipos determinados por curvas de probabilidad de falla contra vida útil.
Los tres tipos de mantenimiento convencional son: predictivo, preventivo y correctivo	Con la nueva estrategia de mantenimiento se adiciona el tipo detectivo.

Fuente: ARIZA RINCÓN, Albert Jair. Aplicación de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) a equipos de minería a cielo abierto tomando como piloto la flota de taladros de voladura. 2008, 68 p.

### **3.5.2 Preguntas que formula el RCM**

El proceso sistemático del RCM formula siete preguntas acerca del activo o sistema que se intenta revisar (Moubray, 2004):

1. ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al colectivo en su actual contexto operacional?
2. ¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?
3. ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?
4. ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
5. ¿En qué sentido es importante cada falla?
6. ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?
7. ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

### **3.5.3 Fases de Desarrollo del RCM**

El desarrollo del RCM está compuesto por seis fases (Moubray, 2004), las cuales se muestran a continuación:

Fase 1: Listado y codificación de equipos

Fase 2: Determinación de fallos funcionales y técnicos

Fase 3: Determinación de los modelos de fallas

Fase 4: Análisis de la gravedad de los fallos (Análisis de Criticidad)

Fase 5: Determinación de las medidas preventivas

Fase 6: Obtención del plan de mantenimiento y agrupación de las medidas preventivas

#### **Fase 1: Listado y codificación de equipos**

El primer problema que se plantea al intentar realizar un análisis de fallas según la metodología de RCM es elaborar una lista ordenada de los equipos según el alcance establecido para el mismo. Esta lista no debe ser una simple lista en la que se enlisten los equipos y maquinaria sino que debe ser una lista estructurada en la que se establezcan las relaciones de dependencia de cada uno de los ítems con los restantes. (Moubray, 2004)

#### **Fase 2: Determinación de fallas funcionales y técnicas**

Una falla es la incapacidad de un ítem para cumplir alguna de sus funciones. Si se realiza correctamente el listado de funciones, es muy fácil determinar las fallas: se tendrá una posible falla por cada función que tenga el ítem (sistema, subsistema o equipo) y no se cumpla. (Moubray, 2004)

Puede ser conveniente hacer una distinción entre fallas funcionales y fallas técnicas. Se define como falla funcional aquella falla que impide al sistema en su conjunto cumplir su función principal. Naturalmente, son los más importantes. (Moubray, 2004)

Las fallas técnicas afectan tanto a sistemas como a subsistemas o equipos. Una falla técnica es aquel que, no impidiendo al sistema cumplir su función, supone un funcionamiento anormal de una parte de este. Estas fallas, aunque de una importancia menor que las fallas funcionales, suponen funcionamientos anormales que pueden tener como consecuencia una degradación acelerada del equipo y acabar convirtiéndose en fallas funcionales del sistema. (Moubray, 2004)

### **Fase 3: Determinación de los modelos de falla**

Una vez determinadas todas las fallas que pueden presentar un sistema, un subsistema o uno de los equipos significativos que lo componen, deben estudiarse los modos de falla. Se podrá definir el modo de falla como la causa primaria de una falla, o como las circunstancias que acompañan una falla concreta. (Moubray, 2004)

Cada falla, funcional o técnica, puede presentar, múltiples modos de falla. Cada modo de falla puede tener a su vez múltiples causas, y estas a su vez otras causas, hasta llegar a lo que se denomina las causas raíz. (Moubray, 2004)

### **Fase 4: Análisis de la gravedad de las fallas, criticidad**

El siguiente paso es determinar los efectos de cada modo de falla y, una vez determinados, clasificarlos según la gravedad de las consecuencias. (Moubray, 2004)

La primera pregunta a responder en cada modo de fallo es: ¿Qué pasa si ocurre? Una sencilla explicación de lo que sucederá será suficiente. A partir de esta explicación, estaremos en condiciones de valorar sus consecuencias para la seguridad y el medio ambiente, para la producción y para el mantenimiento. (Moubray, 2004)

Se consideran tres posibles casos: que la falla sea crítica, que la falla sea importante o que sea tolerable. (Moubray, 2004)

En lo referente a la seguridad y al impacto medioambiental de la falla, se considera que la falla es crítica, si existen ciertas posibilidades de que pueda ocurrir, y ocasionar un accidente grave, bien para la seguridad de las personas o bien para el medioambiente. Se considera que es importante si, aunque las consecuencias para la seguridad y el medioambiente fueran graves, la probabilidad de que ocurra el fallo es baja. Por último, se considera que la falla es tolerable si tiene poca influencia en estos dos aspectos. (Moubray, 2004)

En cuanto a la producción, podemos decir que una falla es crítica si supone una parada de planta, una disminución del rendimiento o de la capacidad productiva, y además, existe cierta probabilidad de que la falla pudiera ocurrir. Si la posibilidad es muy baja, aunque pueda suponer una parada o afecte a la potencia o al rendimiento, la falla debe ser considerada como importante. Y por último, la falla será tolerable si no afecta a la producción, o lo hace de modo despreciable. (Moubray, 2004)

Desde el punto de vista del mantenimiento, si el costo de la reparación (de la suma de la falla más otras fallas que pudiera ocasionar) supera una cantidad determinada, la falla será crítica. Será importante si está en un rango inferior y será tolerable por debajo de cierta cantidad. (Moubray, 2004)

### **Fase 5: Determinación de medidas preventivas**

Determinados los modos de falla del sistema que se analiza y clasificados estos modos de falla según su criticidad, el siguiente paso es determinar las medidas preventivas que permiten evitar la falla y minimizar sus efectos. Desde luego, este es el punto fundamental de un estudio RCM. (Moubray, 2004)

Las medidas preventivas que se pueden tomar son de cinco tipos: tareas de mantenimiento, mejoras, formación del personal, modificación de instrucciones de operación y modificación de instrucciones de mantenimiento. Es aquí donde se ve la enorme potencia del análisis de fallas: no solo se obtiene un conjunto de tareas de mantenimiento que evitaban estas fallas, sino que además se obtendrán todo un conjunto de otras medidas, como un listado de modificaciones, un plan de formación, una lista de procedimientos de operación necesarios. Y todo ello, con la garantía de que tendrán un efecto muy importante en la mejora de resultados de una instalación. (Moubray, 2004)

### **Fase 6: Obtención del plan de mantenimiento y agrupación de medidas preventivas**

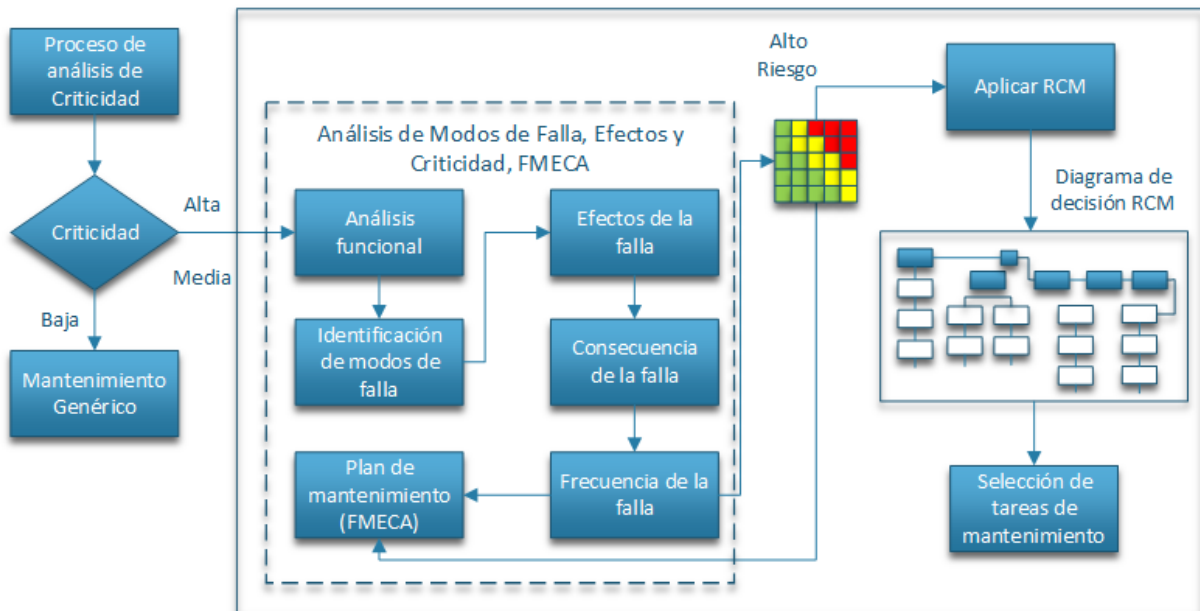
Determinadas las medidas preventivas para evitar los fallos potenciales de un sistema, el siguiente paso es agrupar estas medidas por tipos (tareas de mantenimiento, mejoras, procedimientos de operación, procedimientos de mantenimiento y formación), lo que luego facilitara su implementación. (Moubray, 2004)

El resultado de esta agrupación es:

- **Plan de Mantenimiento:** El plan de mantenimiento lo componen el conjunto de tareas de mantenimiento resultante del análisis de fallos. (Moubray, 2004)
- **Lista de mejoras técnicas a implementar:** Tras el estudio, se tendrá una lista de mejoras y modificaciones que son convenientes realizar en la instalación. Estas mejoras estarán condicionadas a la disponibilidad de recursos de la planta. (Moubray, 2004)

- **Capacitación de personal:** Las actividades de formación determinadas estarán divididas normalmente en formación para personal de mantenimiento y formación para personal de operación. En algunos casos, es posible que se sugiera formación para contratistas, en tareas en que estos están involucrados. (Moubray, 2004)
- **Lista de Procedimientos de operación y mantenimiento a modificar:** Se habrá generado una lista de procedimientos a elaborar o a modificar que tienen como objetivo evitar fallos o minimizar sus efectos. Habrá un tipo especial de procedimientos, que serán los que hagan referencia a medidas provisionales en caso de falla. (Moubray, 2004)

El diagrama metodológico del modelo de gestión de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) es mostrado en la siguiente figura N° 3.1:



**Figura 3.1** Proceso de un modelo de gestión de mantenimiento aplicando RCM

### 3.6 Confiabilidad operacional

La Confiabilidad Operacional como estrategia fundamental en la Gestión de Activos, se entiende como el desarrollo de una serie de procesos que buscan mejorar continuamente, de forma sistémica y sistemática, sus herramientas de diagnóstico, metodologías de análisis y tecnologías de mantenimiento para optimizar la planeación, ejecución y control de la producción industrial. La Confiabilidad Operacional contribuye a mejorar la capacidad total de organización (procesos, tecnología, talento), para lograr eficazmente su propósito, dentro de sus límites de diseño y bajo un contexto operacional específico. (Espinosa, 2010)

Para que un Sistema Operacional funcione de forma correcta, se necesita el análisis de cuatro parámetros operativos: Confiabilidad de Procesos, Confiabilidad en la Mantenibilidad de los equipos, Confiabilidad de los equipos en los que se debe trabajar y finalmente, Confiabilidad Humana. (Espinosa, 2010). Estos cuatro elementos se muestran en la siguiente figura 3.2.



**Figura 3.2 Parámetros de la Confiabilidad Operacional**

### **3.6.1 Beneficios de la confiabilidad operacional**

Dentro de los beneficios que se pueden obtener utilizando un Sistema Operacional centrado en la Confiabilidad, se pueden apreciar (García, 2005):

- a) Aumento en la utilidad debido a la continuidad de la producción
- b) Incremento en la Disponibilidad de los activos en las instalaciones.
- c) Mejor calidad en los procesos y servicios en el análisis de procedimientos.
- d) Mejor posicionamiento de la industria a nivel global, debido al uso de mejores estrategias de mantenimiento.
- e) Optimización del tiempo y la frecuencia de las paradas planificadas y no planificadas.
- f) Detección temprana de averías y optimización en las acciones de mantenimiento.
- g) Reducción de los conflictos al basar los análisis en hechos y no en supuestos.

### **3.6.2 Aplicación de la confiabilidad operacional**

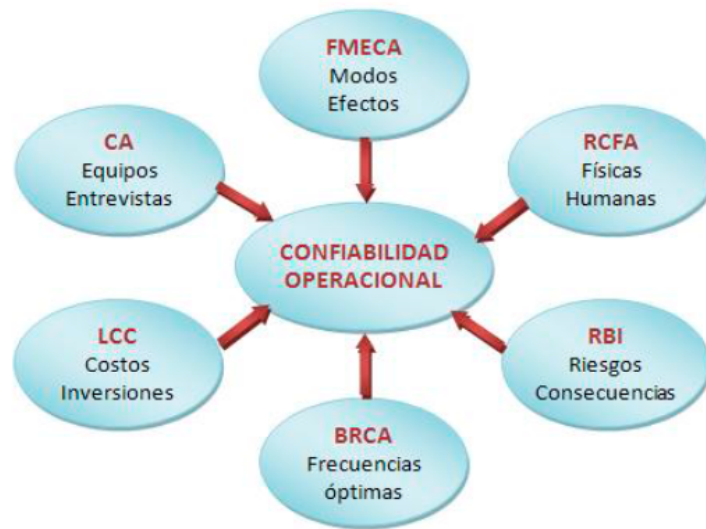
Los casos en los que las estrategias de Confiabilidad Operacional pueden ser aplicadas en las industrias son (Espinosa, 2010):

- a) En la confección de planes y programas de mantenimiento, inspección de equipos e instalaciones industriales.
- b) En la búsqueda de soluciones a problemas recurrentes en los activos físicos y que afectan tanto a los costos, como en la efectividad de las operaciones.
- c) En la determinación de las tareas que permitan minimizar los riesgos en las diferentes áreas, tales como en los procesos, equipos, instalaciones y medio ambiente.
- d) En el establecimiento de procedimientos operacionales y prácticas de trabajo seguro.
- e) En la determinación de alcance y frecuencias optima en paradas de planta.

### 3.6.3 Herramientas de la confiabilidad operacional

La Confiabilidad es un método de análisis que requiere estar sustentada en una serie de herramientas que permiten evaluar el comportamiento de la instrumentaria de una forma sistemática con el objetivo de establecer el nivel de operatividad, el costo del riesgo y todas las acciones de mitigación que se requieren, para asegurar su integridad y continuidad operacional. (Espinosa, 2010)

La Confiabilidad utiliza múltiples herramientas para diseñar planes estratégicos para alcanzar la excelencia en las actividades de mantenimiento. A continuación se presentan las más utilizadas (ver figura 3.3):



**Figura 3.3 Herramientas de Confiabilidad Operacional**

A partir de la figura 3.3 se tiene:

- **Análisis de Criticidad (CA).** Es una técnica que permite jerarquizar sistemas, equipos e instalaciones, en función de su impacto global, con el fin de facilitar la toma de decisiones. (Espinosa, 2010)
- **Análisis de Modos y efectos de Falla y Criticidad (FMECA).** Es una metodología que permite determinar los modos de falla de los componentes de un sistema, el impacto y la frecuencia con que se presentan. (Espinosa, 2010)

- **Análisis Causa Raíz (RCFA).** Es una técnica sistemática que se aplica con el objetivo de determinar las causas que originan las fallas, sus impactos y frecuencias de aparición, para poder mitigarlas o eliminarlas. (Espinosa, 2010)
- **Inspección Basada en Riesgos (RBI).** Es una técnica que permite definir la probabilidad de falla de un equipo o sistema, y las consecuencias que las fallas pueden generar sobre la gente, el ambiente y los procesos. (Espinosa, 2010)
- **Análisis Costo Riesgo Beneficio (BRCA).** Es una metodología que permite establecer una combinación óptima entre los costos de hacer una actividad y los logros o beneficios que la actividad genera, considerando el riesgo que involucra la realización o no de tal actividad. (Espinosa, 2010)
- **Costo del Ciclo de Vida (LCC).** El análisis LCC es una metodología que permite elegir entre opciones de inversión o acciones de incremento de la confiabilidad con base en su efecto en el costo total del ciclo de vida de un activo nuevo o en servicio. (Espinosa, 2010)

Entre los análisis más usados y frecuentes corresponden a Análisis de Criticidad (CA), FMECA y Análisis Causa Raíz (RCFA).

### 3.7 Análisis de criticidad (CA)

El análisis de criticidad es una metodología que permite establecer la prioridad de procesos, sistemas y equipos, creando una estructura que facilita que la toma de decisiones sea acertada y efectiva, además de direccionar los recursos en áreas donde sea más relevante y se necesite mejorar la confiabilidad operacional. (Gardella, 2006)

El objetivo de este análisis es establecer un método que sirva de instrumento de ayuda en la determinación de la jerarquía de los procesos, de los sistemas y de los equipos de una planta compleja, permitiendo subdividir los elementos en secciones que puedan ser manejadas de manera controlada y auditable. (Gardella, 2006)

El análisis de criticidad aplica en cualquier conjunto de procesos, plantas, sistemas, equipos y/o componentes que requieran ser jerarquizados en función de su impacto en el proceso o negocio donde formen parte. Sus áreas comunes de aplicación se orientan a establecer programas de implantación y prioridades en los siguientes campos. (Gardella, 2006)

- Mantenimiento
- Inspección
- Materiales
- Disponibilidad de planta
- Persona

Matemáticamente la criticidad para cada sistema o equipo puede ser estimada de la siguiente forma (Huerta, 2001):

$$\textbf{Criticidad} = \textbf{Frecuencia de falla} \times \textbf{Consecuencia}$$

Donde la frecuencia de falla está relacionada al número de eventos o fallas que presenta el sistema o equipo evaluado y, la consecuencia está asociada con: el impacto en la producción, costos de reparación, impacto en seguridad y medio ambiente (Huerta, 2001).

Dado lo anterior, los siguientes criterios se pueden establecer fundamentales para realizar un análisis de criticidad:

- Seguridad personal
- Medio ambiente
- Producción
- Costos de reparación
- Tiempo promedio para reparar
- Frecuencia de falla

Por lo tanto la consecuencia se puede estimar de la siguiente forma:

$$\textbf{Consecuencia} = \textbf{a} + \textbf{b}$$

$$\textbf{a} = \textbf{Costo reparación} + \textbf{Impacto seguridad personal} + \textbf{Impacto ambiental}$$

$$\textbf{b} = \textbf{Impacto en l a producción} \times \textbf{MTTR}$$

Por último, la lista prioritaria resulta de estimar para cada equipo o sistema el nivel de criticidad, y luego ordenar los resultados desde mayor a menor según la criticidad estimada para cada equipo o sistema. Los resultados, se pueden representar en un gráfico de barras, y observar tres zonas: Alta, mediana y baja criticidad. Lo que permitirá concentrarse en mejorar el mantenimiento de equipos o sistemas en las zonas que resulte con alta criticidad. (Huerta, 2001).

### 3.8 Análisis de modo, efecto y criticidad de fallas (FMECA)

El análisis de modo, efecto y criticidad de fallas (FMECA), es parte de la metodología RCM, el cual permite determinar todos los fallos que pueden surgir en el funcionamiento de un activo, así como su impacto en seguridad y medio ambiente, calidad, producción y mantenimiento. Posibilita asimismo una valoración de cada uno de estos fallos y cuantificarlos con un número que agrupa dicha valoración, llamado Número de Prioridad de Riesgo (NPR). (Gardella, 2006)

Así, el objetivo de un FMECA es identificar las formas como podrían ocurrir fallas (modos de falla) y las consecuencias de las fallas en el rendimiento del equipo (efecto de falla) y las consecuencias sobre el objetivo del equipo (asignación de gravedad). (Espinosa, 2010)

El número de prioridad de riesgo (NPR) lo componen tres elementos:

**Gravedad:** Define la gravedad de los efectos ocurridos si sucede el fallo en la máquina o instalación de estudio. (Gardella, 2006)

**Frecuencia de fallos:** Número de sucesos ocurridos en un intervalo de tiempo. (Gardella, 2006)

**Detectabilidad:** Mayor o menor facilidad de detectar una causa de fallo según recursos humanos y técnicos disponibles. (Gardella, 2006)

El NPR se obtiene para cada modo de fallo, como el producto entre la gravedad, frecuencia de fallos y detectabilidad. La siguiente expresión matemática estima el NPR: (Gardella, 2006):

$$NPR = Gravedad \times Frecuencia\ de\ fallo \propto Detectabilidad$$

La utilidad de estimar el índice NPR consiste en alertar en menor o mayor medida al analista a reforzar los métodos de mantenimiento. Cada componente del NPR se puede ponderar con una escala cuantitativa del 1 al 10 según su importancia; por lo tanto, con esa escala de ponderación, el NPR podría tomar valores entre 1 hasta 1.000. (Gardella, 2006)

**Análisis funcional:** el análisis funcional es necesario para poder ingresar al proceso de evaluación de los modos de falla, ya que se requiere conocer e identificar cuáles son aquellas funciones que el usuario espera o desea que su activo desempeñe. Se requiere identificar tanto

la función primaria como las secundarias. (Aguilar-Otero, Torres-Arcique, & Magaña-Jiménez, 2010)

**Función del activo:** se define como el desempeño esperado de un equipo o herramienta para cumplir con un propósito específico.

**Funciones primarias:** es el propósito fundamental del activo, para lo que fue concebido, es decir, para lo que se necesita y lo que es capaz.

**Funciones secundarias:** son las que soportan el cumplimiento de las funciones primarias, entre ellas, integridad ambiental y estructural, seguridad, control, confort, apariencia y dispositivos de protección.

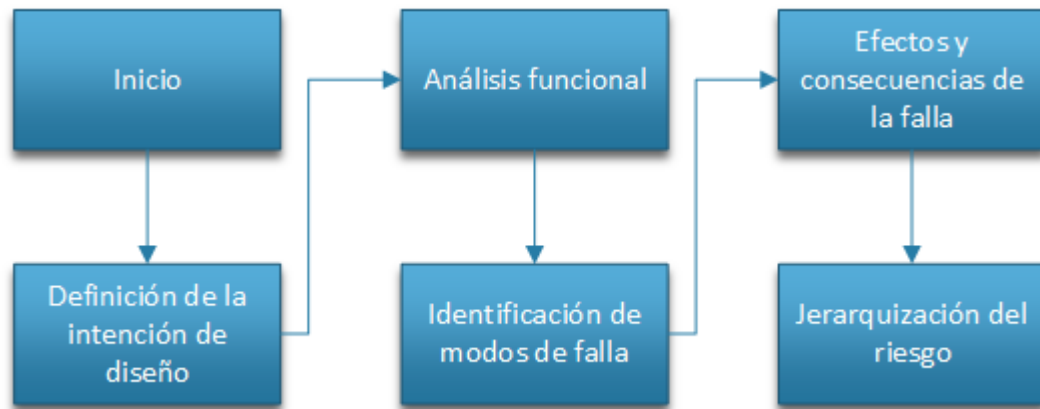
**Falla funcional:** se define como el incumplimiento de una función, esta puede ser total o parcial. La falla funcional total es aquella en la que se evidencia una imposibilidad absoluta de cumplir la función principal del activo mientras que en la falla funcional parcial la función se cumple pero no de forma total.

**Modo de falla:** se puede definir un modo de falla como la forma en la que un activo pierde la capacidad de realizar su función, o en otras palabras, la forma en que un activo falla. Para el diseño de un plan de mantenimiento, a cada modo de falla le corresponderá una tarea de mantenimiento para mitigar o prevenir el modo de falla. (Aguilar-Otero, Torres-Arcique, & Magaña-Jiménez, 2010)

**Efectos de falla:** los efectos de la falla se refiere a la forma en que se manifiesta la falla, es decir, como se ve perturbado el sistema ante la falla del equipo o activo, ya sea local o en otra parte del sistema, estas manifestaciones pueden ser: aumento o disminución de nivel, mayor o menor temperatura, activación de señales, alarmas o dispositivos de seguridad, entre otras; similarmente, se considera también la sintomatología de la falla, ruido, aumento de vibración, etc. (Aguilar-Otero, Torres-Arcique, & Magaña-Jiménez, 2010)

**Consecuencias de la falla:** se relaciona con los impactos derivados de la falla en los diversos receptores de interés. Se considera las consecuencias a la seguridad de las personas, medio ambiente y producción. (Aguilar-Otero, Torres-Arcique, & Magaña-Jiménez, 2010)

El proceso del FMECA, presenta un procedimiento que puede ser modificado de acuerdo con las necesidades operacionales de cada proyecto y de los objetivos del equipo. El procedimiento se resume en la figura 3.4:



**Figura 3.4 Diagrama de la metodología de análisis de modos de falla y sus efectos**

### 3.8.1 Objetivo de análisis de fallos

El análisis de fallos es un examen sistemático que se realiza para detectar y determinar las causas que han provocado fallas dentro de una máquina o línea de producción y, posteriormente, utilizar esta información para mejorar la confiabilidad de la máquina. Para un análisis de fallos, se pone mayor énfasis a aquellas fallas más repetitivas, ya que pueden generar grandes costos en el caso que la producción deba detenerse. Para poder evitar estas detenciones, es necesario tomar medidas preventivas que faciliten la determinación de las causas que generan averías y, de esta forma, proponer medidas que las eviten. (Pistarelli, 2010)

El análisis y el estudio de las fallas que ocurren en las máquinas o líneas de producción, permiten obtener resultados favorables en el área de mantenimiento, ya que facilitan la búsqueda de soluciones para que las fallas no vuelvan a ocurrir. Si al cambiar la pieza de un equipo que ha fallado no se estudian las reales causas del colapso, es altamente probable que la falla se vuelva a presentar, ya que sólo se trabajó en la consecuencia y no sobre la causa que la produjo. (Pistarelli, 2010)

### **3.8.2 Datos que se deben recopilar al estudiar un fallo**

Cuando se estudia una avería, es de vital importancia recopilar todos los datos disponibles posibles. Entre ellos, siempre deben considerarse los siguientes: (Pistarelli, 2010)

- Relato específico sobre lo que se hizo antes, durante y después de una avería. Esto incluye la hora que se produjo la avería, los operarios que manejaban el equipo al momento de ocurrir la falla y las ejecuciones que se llevaron a cabo en todo momento.
- Obtención de todas las condiciones ambientales y externas a la máquina tales como: temperatura exterior, humedad, condiciones de limpieza del equipo, temperatura del agua de refrigeración, humedad del aire comprimido, y en general, las condiciones de cualquier suministro eléctrico que la máquina o equipo necesite para funcionar.
- Informe de los últimos mantenimientos preventivos realizados en el equipo, detallando cualquier anomalía encontrada.
- Registro de otros fallos que ha tenido el equipo en un periodo determinado. En algunos casos será necesario remontarse a varios años atrás, en otros, bastará con detallar los fallos ocurridos en el último año. Será de vital importancia realizar un registro de los fallos iguales al que se estudia para analizar la frecuencia con que ocurren.
- Detalle de todas las condiciones internas en las que operaba el equipo. Datos como la temperatura y presión a que trabajaba el equipo, caudal que suministraba y el valor de cualquier variable que se pueda medir será de vital importancia para el análisis de la falla.

Con la obtención y análisis de los datos anteriores, entonces se puede proceder a determinar cuáles serían las posibles causas que generaron las fallas. (Pistarelli, 2010)

### 3.8.3 Causas de los fallos

Las causas de los fallos en máquinas y líneas de producción están generalmente divididas en 4 características:

- a) Por un fallo en el material
- b) Por un error humano en el personal de operación
- c) Por un error humano en el personal de mantenimiento
- d) Por condiciones externas anómalas

Existen ocasiones en las cuales un fallo es producido por más de una de estas causas. Esto complica el análisis del fallo, ya que se hace más difícil determinar la causa principal de éste a diferencia de aquellas que tienen una menor influencia en el desarrollo del fallo. (Pistarelli, 2010)

#### 3.8.3.1 Fallos en el material

Se considera que se ha producido un fallo de material o en una pieza cuando, en condiciones normales de funcionamiento, una determinada pieza queda imposibilitada para prestar su servicio (Pistarelli, 2010). Los fallos en el material se pueden presentar de múltiples formas:

- **Por desgaste:** El desgaste se produce en determinadas piezas que pierden sus cualidades con el uso. Este desgaste se evidencia en la pérdida de una pequeña porción de su material, por ejemplo, los cojinetes antifricción (Pistarelli, 2010).
- **Por rotura:** Se produce cuando una determinada pieza sobrepasa su límite elástico por la constante fuerza de compresión o estiramiento aplicada, como en el caso del hundimiento de un puente, por ejemplo. Si existe o no deformación durante el proceso de rotura, éstas se pueden clasificar en dúctiles o frágiles (Pistarelli, 2010).
- **Por fatiga:** La fatiga es el proceso de cambio estructural permanente, progresivo y localizado que ocurre en un material sujeto a tensiones y deformaciones variables en algún punto o puntos y que produce grietas o la fractura completa tras un número suficiente de fluctuaciones (Pistarelli, 2010).

Se puede encontrar también que los fallos están relacionados con errores en el diseño del material. El infra dimensionamiento por errores de cálculo, el no considerar situaciones

específicas en las que las piezas puedan estar sometidas a condiciones de operación más exigentes que lo normal, la mala decisión de optar por materiales sustancialmente más económicos y el desconocimiento de la forma de operación de la existencia de determinados productos para una determinada aplicación son las causas más habituales que determinan si un fallo de material causará un fallo de pieza. (Pistarelli, 2010)

### **3.8.3.2 Error humano del personal de producción**

Un error del personal de producción también puede generar una avería o falla en las máquinas o líneas de producción. Este error, a su vez, puede originarse en:

- Error de interpretación de un indicador por parte de un operario durante la ejecución normal del equipo, que provoca la incorrecta toma de decisiones (Pistarelli, 2010).
- Error en procedimiento ante una avería menor en la máquina o sistema de producción que podría provocar una avería de mayor envergadura (Pistarelli, 2010).
- Condiciones físicas y psicológicas del operador que podrían provocar la toma de decisiones incorrectas. Por ejemplo, cansancio, jornadas laborales extensas, problemas familiares, depresión, desmotivación, trastornos del sueño, etc. (Pistarelli, 2010)
- Falta de formación profesional en el área, tales como falta de conocimiento en la manipulación de instrumentos, falta de conocimiento en procedimientos, falta de experiencia utilizando ese tipo de máquinas, etc. (Pistarelli, 2010)

### **3.8.3.3 Error humano del personal de mantenimiento**

Una parte importante de las fallas, detenciones de producción, disminución en el rendimiento de los equipos que se producen en una máquina, instalación o sistema de producción está causado por el propio personal de mantenimiento, encargado de prevenir y evitar este tipo de problemas (Pistarelli, 2010). Entre los errores más habituales del personal de mantenimiento podemos destacar los siguientes:

- Errores en observación de los parámetros inspeccionados.
- Reutilización de materiales que ya han perdido su valor y calidad.

- Utilización de repuestos no apropiados, ya sea porque no son originales, o porque el repuesto no ha sido comprobado antes de ser utilizado.
- Utilización de herramientas no adecuadas al momento de intervenir en una falla.

Al igual que el caso anterior, las condiciones físicas y psicológicas, enfermedades, falta de formación técnica y falta de implementación pueden repercutir significativamente en los errores humanos producidos por el personal de mantenimiento (Pistarelli, 2010).

#### **3.8.3.4 Condiciones externas anómalas**

Los fallos en los equipos de operación también pueden ser provocados cuando las condiciones externas, a las cuales son sometidas ciertas maquinarias, son diferentes para las cuales fueron diseñadas. Por ejemplo, equipos expuestos a temperaturas, niveles de humedad, corrosión, presiones, agua de alimentación, niveles de refrigeración, capacidad eléctrica, niveles de suciedad, entre otros, para los cuales no fueron diseñados. Esto provoca fallos generalizados en los equipos que trae como consecuencia la disminución de la eficiencia en la operación de éstos. (Pistarelli, 2010)

En ocasiones, variadas razones pueden provocar una avería en las maquinarias o líneas de producción, como fue expuesto con anterioridad. Es por esta razón que la rápida y oportuna detección de cuál o cuáles son los factores que están ocasionando las fallas permitirá lograr resultados significativos, duraderos y definitivos que permitan lograr la correcta operación de los sistemas de producción. (Pistarelli, 2010)

### 3.8.4 Medidas preventivas para adoptar en caso de fallo

Dependiendo del motivo que provoque algún fallo, las medidas preventivas para adoptar pueden ser las siguientes:

#### 3.8.4.1 Prevención para fallos en el material

- Si el fallo de una pieza determinada se ha producido por *desgaste*, será necesario entonces buscar métodos para reducir el desgaste de la pieza, con una mejor lubricación. Por otra parte, también se puede rediseñar la pieza o una parte de la máquina, utilizando otros materiales que extiendan el periodo de funcionamiento sin presentar fallos. (Pistarelli, 2010)
- Si el fallo de una pieza determinada se ha producido debido a la *corrosión*, será necesario aplicar capas protectoras o dispositivos que reduzcan esta corrosión. Será necesario además, evitar los medios corrosivos (evitar la humedad, corregir el pH o las características redox del medio). (Pistarelli, 2010)
- Si el fallo se produce por *fatiga del material*, se pueden encontrar la siguientes soluciones:
  - Reducir las grietas y fisuras en las superficies de los materiales provocadas en el proceso de mecanización, puliendo las superficies de los materiales. (Pistarelli, 2010)
  - Dependiendo de la función que cumplan las piezas, se pueden realizar tratamientos superficiales tales como la nitruración o el granallado, que endurecen las capas superficiales de las piezas. (Pistarelli, 2010)
  - Reducir la energía y/o frecuencia de las tensiones cíclicas a las que estén sometidas las piezas. (Pistarelli, 2010)
  - Modificar el diseño de la pieza, de manera que se reduzcan aquellos puntos de concentración de tensiones, suavizando curvas, evitando aristas, etc. (Pistarelli, 2010)

- Si el fallo se produce por dilatación, será necesario modificar la instalación para que estas dilataciones y contracciones del material se produzcan sin problema. (Pistarelli, 2010)
- Si finalmente se determina que no es posible corregir la causa que provoca el fallo, se deberá cambiar el material, el diseño de la pieza, o las características de la pieza por otra que logre desempeñarse de mejor manera en las condiciones reales de trabajo (ya sean normales o esporádicas). (Pistarelli, 2010)

#### **3.8.4.2 Prevención para error humano del personal de producción**

El trabajo del personal de producción también será de vital importancia a la hora de evitar que se produzcan fallos y averías en las maquinarias. Los operadores de producción influyen significativamente en el correcto desempeño de la línea de trabajo, por lo que detectar los inconvenientes que se puedan generar en la producción, será de gran utilidad, para reducir futuras fallas. (Pistarelli, 2010)

Otra medida preventiva para adoptar en caso de fallo tiene relación con la modificación de las máquinas a través de mecanismos sencillos que reducen a cero la posibilidad de cometer un error por parte del personal de producción que se encuentre operando algún tipo de sistema. Esto inhabilitaría físicamente la correcta ejecución de la maquinaria si no se efectúa el procedimiento correcto. (Pistarelli, 2010)

#### **3.8.4.3 Prevención para error humano del personal de mantenimiento**

Para evitar fallos ocasionados por el personal de mantenimientos se deben tomar las mismas medidas que en el caso anterior con respecto a la capacitación y la motivación. Si los problemas de este tipo permanecen (personal desmotivado y poco capacitado) aun cuando la empresa hizo todos los esfuerzos necesarios por revertir la situación, entonces la empresa deberá tomar las medidas necesarias que busquen el bienestar, confortabilidad y satisfacción de todos sus trabajadores al momento de realizar sus funciones. (Pistarelli, 2010)

La forma más eficaz de evitar los errores por el personal de mantenimiento es la utilización de procedimientos de trabajo que especifiquen de forma detallada cada una de las tareas necesarias para la ejecución de una operación. Estos procedimientos deben contener entre sus tareas, las medidas y reglajes necesarios a realizar en el equipo. (Pistarelli, 2010)

#### **3.8.4.4 Prevención para condiciones externas anómalas**

Si se ha determinado que la avería o fallo en la máquina ha sido producido por condiciones externas anómalas, la solución que se deberá adoptar será la de modificar dichas condiciones externas, de modo que se adapten a los requerimientos del equipo. No siempre esta solución es viable, debido a los altos costos que implica este tipo de modificaciones. Para estos casos, la solución deberá enfocarse en disminuir los efectos nocivos que estén afectando. (Pistarelli, 2010)

#### **3.8.4.5 El stock de repuestos**

Existen ocasiones en las cuales el fallo de alguna maquinaria provoca una detención en la producción, generando así elevados costos para la empresa. Deberá tomarse las medidas necesarias para que esto no ocurra o para que el impacto sea el menor posible en cuanto a la producción y a los costos asociados. (Pistarelli, 2010)

Al contar con cierto stock de repuestos, se puede registrar las fallas que se han producido con más frecuencia. Esto permite contar con información sobre tendencias y futuras posibilidades de que vuelva a ocurrir un fallo en alguna máquina o línea de producción. (Pistarelli, 2010)

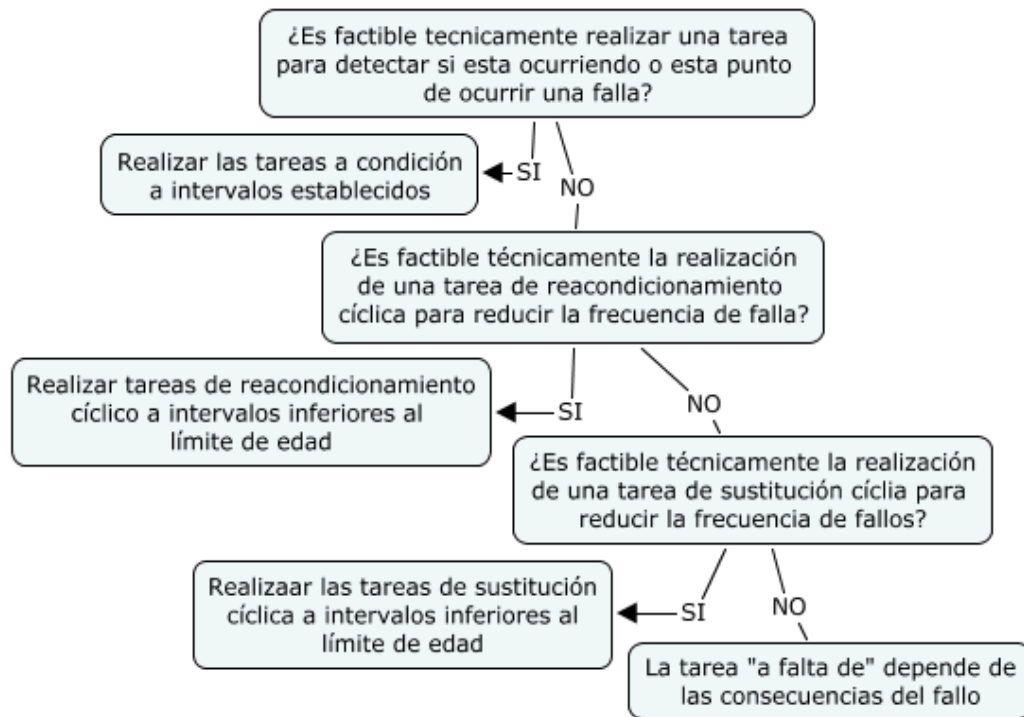
### **3.9 Tareas de mantenimiento**

Las tareas de mantenimiento se inician antes de que ocurran la falla, abarca tanto el mantenimiento preventivo como el predictivo y para RCM significan reacondicionamiento cíclico, sustitución cíclica y tareas a condición. (Ariza, 2008)

Para la planeación de estas tareas de mantenimiento es necesario relacionar la vida del activo con el nivel de esfuerzos al cual están sometidos los equipos, de acuerdo al patrón de falla que el activo presente. Si una tarea de mantenimiento es técnicamente factible o no, depende de las características técnicas del modo de falla y no de lo económico, puesto que este último hace parte del proceso de evaluación de las consecuencias (Ariza, 2008).

- a) **Tareas de reacondicionamiento cíclico:** se refiere a reconstruir un componente o realizar una importante reparación a un conjunto o ensamble completo antes del límite de su vida útil, independiente de su condición en ese momento y su frecuencia está relacionada por el tiempo en que empezó a evidenciar muestras de un aumento rápido en la probabilidad de fallas. Para planificar estas tareas se requiere el conocimiento de un historial del activo, en caso contrario, es prácticamente imposible realizar este tipo de tareas de mantenimiento, sin embargo en caso de equipos susceptibles a fallas que impliquen costos muy elevados debe someterse el equipo a programas de investigación de su vida útil para establecer un patrón de fallas y determinar los beneficios posibles que podría alcanzarse con las tareas de reacondicionamiento cíclico. (Ariza, 2008)
- b) **Tareas de sustitución cíclica:** radica en cambiar un componente o elemento antes del límite de su vida útil independiente de su condición en ese momento. Se asumen que al reemplazar la pieza que alcanzó su vida útil será restaurada su capacidad inicial. La frecuencia de las tareas de sustitución cíclica está definida por la vida útil para la cual la pieza o componente muestra un rápido aumento en la probabilidad condicional de fallar. (Ariza, 2008)
- c) **Tareas a condición:** son fallas que no se relacionan con la vida útil del componente. Por lo tanto no es posible programar tareas de reacondicionamiento o sustitución cíclica. Para ello RCM emplea un recurso adicional que se fundamenta en prevenir los incrementos de los esfuerzos asociados a los activos como prioridad frente a las modificaciones que puedan hacerse al activo mismo. Para realizar este tipo de inspección RCM contempla cuatro categorías bajo las cuales es posible, determinar la fallas potencial, las técnicas son las siguientes (Ariza, 2008):
- Técnicas de monitoreo de condición
  - Técnicas basadas en variaciones en la calidad del producto (control estadístico de procesos)
  - Técnicas de monitoreo de los efectos primarios
  - Técnicas de inspección basada en los sentidos humanos

En la Figura 3.5 se resume el proceso de selección de las tareas de mantenimiento.



**Figura 3.5 Proceso de selección de Tareas de Mantenimiento**

## CAPÍTULO IV: DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

A continuación se exponen los pasos que describen el diseño de la solución de acuerdo a la problemática descrita en capítulo uno, los conceptos teóricos y a los objetivos planteados.

### 4.1 Modelo de gestión

Las herramientas escogidas para diseñar el modelo de gestión, basado en confiabilidad para desarrollar de modo sustentable la mantención del área seca de la compañía son:

- a) RCM
- b) Análisis Económico

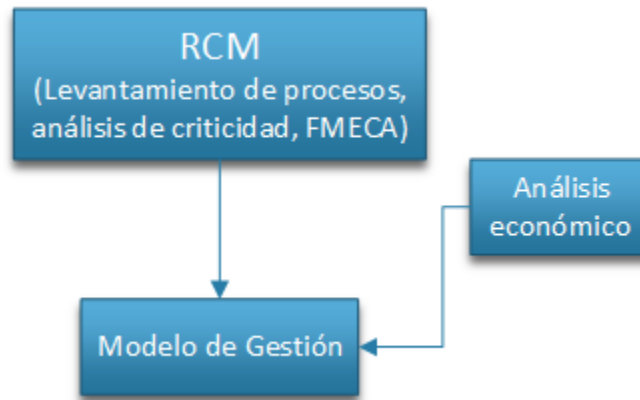
A continuación se explica la finalidad de incluir estas herramientas en el modelo de gestión a utilizar y como se relacionan entre sí para otorgar las directrices y los lineamientos que permitan lograr los objetivos preestablecidos.

Se realiza un levantamiento de procesos y una aplicación de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), dando soluciones a los problemas de detenciones no programadas de equipos industriales en el área operación mina, mediante dos herramientas de RCM.

Se comienza con un análisis de criticidad, con una doble finalidad: determinar cuáles son los equipos más críticos para el proceso de producción del área seca y proporcionar un registro, que permita alimentar la base de datos del sistema de Planificación de Recursos Empresariales, de la minera, o ERP (por sus siglas en inglés, *Enterprise Resource Planning*), con los datos técnicos de los componentes principales de los activos analizados, luego se efectúa un análisis de modo, efecto y criticidad de fallas (FMECA) que permite definir cuáles son las máquinas o componentes de las mismas que representan mayor riesgo para el proceso, el medioambiente y las personas en caso de fallar, así como también poder determinar qué tipo de mantenimiento se puede implementar y mediante qué clase de técnicas se puede reducir dicho riesgo.

Por último se hace una evaluación económica, con el objetivo de determinar el impacto económico, que trae consigo aumentar la disponibilidad de sistemas o equipos, por medio de la aplicación de herramientas de RCM.

A continuación, en la figura 4.1 se ofrece un esquema que describe el modelo de gestión planteado.



**Figura 4.1 Modelo de gestión centrado en RCM Área Seca.**

## **4.2 Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)**

En esta etapa del modelo se efectúa un RCM. En primer lugar se realiza un levantamiento de procesos; en segundo lugar un análisis de criticidad; y en tercer lugar un análisis de modo, efecto y criticidad de fallas.

### **4.2.1 Levantamiento de procesos**

Se efectúa un levantamiento de los procesos para obtener la visión global de la situación actual de la empresa, desde lo particular hasta lo general, permitiendo así su análisis y comprensión.

### **4.2.2 RCM**

El mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) se compone de varias herramientas, en este modelo solo se ocupan dos: el análisis de criticidad y el análisis de modo, efecto y criticidad de fallas.

El análisis de criticidad se efectúa para determinar cuáles son los equipos más críticos del área en estudio, con el fin de facilitar la toma de decisiones y orientar los esfuerzos y recursos a los sectores donde sea más importante mejorar la confiabilidad operacional.

El análisis de modo, efecto y criticidad de fallas (FMECA) permite ver cuáles son los componentes más críticos que interfieren en el proceso y determinar que técnicas utilizar para mitigar el riesgo.

Ambas herramientas del RCM tienen como fin aumentar la confiabilidad del área, mediante el incremento de disponibilidad de la planta, lo que deriva en mayores ingresos o menores pérdidas para la organización. Para ello se debe definir cuál es el tipo de mantenimiento que se va a aplicar, para evaluar en la última parte del modelo si es o no factible de implementar.

### **4.3 Análisis económico**

Este es el último paso del modelo y consiste en evaluar la factibilidad económica de implementación del tipo de mantenimiento escogido, para ello se realiza un análisis del impacto económico, que resulta al aumentar la disponibilidad de los equipos que componen un sistema del área seca de la empresa minera en estudio.

## **CAPÍTULO V: EVALUACIÓN DE LA SOLUCIÓN**

En esta etapa del modelo se evalúan técnicamente los aspectos internos de la organización, además se describe el proceso en el cual participa el área a estudiar, a fin de entender dónde pueden suscitarse potenciales puntos críticos a mejorar.

Con el fin de determinar los equipos con mayor riesgo operacional se utilizan dos herramientas de RCM (análisis de criticidad y análisis de modo, efecto y criticidad de fallas).

### **5.1 Levantamiento de procesos**

El proceso de producción se define de la siguiente manera:

La mineralización principal del yacimiento se presenta en un horizonte de óxidos y sulfuros que sobre yacen a la mineralización primaria de baja ley.

Para llevar a cabo sus operaciones Zaldívar cuenta con instalaciones industriales que incluyen: la mina, áreas para botadero de estéril, lixiviación en botadero de baja ley (Dump leach), lixiviación en pilas, planta de extracción por solvente y electro - obtención (SX-EW), planta de flotación, depósitos de relaves, planta de osmosis inversa, campamentos de construcción y operaciones e instalaciones auxiliares ubicadas en su recinto minero-industrial. También posee un área de captación de aguas subterráneas que se ubica en el sector denominado Negrillar, cuenca hidrográfica arréica tributaria del Salar de Atacama, ubicada al nororiente de las instalaciones minero-industriales y una cañería de aducción de agua de 96 kilómetros desde el campo de pozos de producción de Negrillar hasta las instalaciones de Zaldívar. (Barrick Gold Corporation, 2012)

Según Compañía Minera Zaldívar la secuencia del proceso productivo es el siguiente:

### **5.1.1 Extracción de mineral**

En primer lugar, partiendo desde la mina, este proceso es a rajo abierto con bancos de 15 metros de altura; con un ritmo de producción de 205.000 toneladas día de las cuales 54.000 toneladas día son transportadas directamente al Chancador principal o primario; en este sector CMZ cuenta con varios puntos de explotación a cargo del departamento de geomecánica y geología, los cuales son los encargados de asegurar la continuidad operacional realizando sondajes para definir y ubicar los yacimientos y la ley que el mineral tendrá. (Barrick Gold Corporation, 2012)

El mineral es transportado al buzón principal de chancado por medio de 10 camiones de alto tonelaje, de 240 toneladas de capacidad de carga, que transportan el mineral al punto de iniciación del chancado, este subproceso está controlado desde una sala de monitoreo que tiene la función de fiscalizar la velocidad de carguío, velocidad de traslado de los camiones y coordinar la descarga de los vehículos de alto tonelaje al buzón de descarga, con el objetivo de evitar accidentes. El perfil de los profesionales que integran esta área son principalmente; Ingenieros civiles y ejecución de minas, geólogos para el área de planificación y ejecución de perforación y tronadura, luego tenemos el equipo de mantenimiento con ingenieros civiles (planificación), ingenieros de ejecución en terreno (jefes de turno) y los técnicos especializados.

Además se encuentran los operadores de camión de alto tonelaje (técnicos especializados) y los ingenieros de sala control encargados del monitoreo del transporte de los camiones para optimizar los tiempos de traslado.

Los destinos del material transportado dependen de la ley del mineral extraído: el mineral de alta ley es llevado directamente al chancador primario o bien al stock de éste; el mineral con menor ley se transporta a un botadero para su lixiviación, proceso denominado Dump Leach; y el material estéril es transportado a botaderos.

### **5.1.2 Chancado del mineral**

Luego del vaciado del camión en el buzón principal el chancador primario, se comienza con la reducción de tamaño a las piedras (mineral) reduciendo desde alrededor de 80 centímetros a 30 centímetros el tamaño de la piedra. (Barrick Gold Corporation, 2012)

Para optimizar la producción se instalan en el circuito harneros, que tienen como función principal clasificar el mineral en tamaño, por medio de mallas de distinta medida, esto permite al material que ya está en un volumen adecuado pasar entre las mallas directamente a una correa

transportadora instalada en el fondo del buzón, el resto que todavía está sobre tamaño vuelve por una correa de retorno al chancador principal.

Posteriormente se lleva por medio de correas transportadoras hacia los chancadores secundarios, los cuales reducen la piedra a un diámetro aproximado de diez centímetros y finalmente a los chancadores terciarios, los que reducen el mineral a un calibre de alrededor de 10 mm de diámetro, tamaño ideal para el lixiviado en la pila. El producto del chancado secundario se envía por una correa transportadora elevada hacia el stock pile. Esta estructura tiene una capacidad de 23.000 toneladas de carga viva y una autonomía operacional (Ver figura 5.1).

Los profesionales de esta área son principalmente, ingenieros metalúrgicos, ingenieros mecánicos y técnicos mecánicos especializados.



Fuente: Barrick Zaldívar

**Figura 5.1 Stock Pile CMZ**

### 5.1.3 Pilas de lixiviación

Luego de reducido el tamaño del producto (alrededor de 10 mm), se realiza el armado de las pilas de lixiviación, las cuales tienen dimensiones de 2.100 metros de largo, 650 metros de ancho y 9 metros de altura, en las cuales se instalan tuberías plásticas en la parte superior con aspersores y se procede a regar con solución acida (ácido sulfúrico) a una razón de 51 litros/metro cuadrado para la extracción del cobre, en este sector existe un alto potencial de riesgo de falla debido a que los equipos en el área están en contacto directo con la solución, además la oxidación, corrosión y fatiga de material es muy acelerada y poco controlada siendo altamente impredecible el saber cómo y cuándo un equipo fallará, lo complicado en esta área es que el regadío de la pila permite sacar el PLS o solución rica de cobre para alimentar la planta de cátodos, por lo que es un subproceso absolutamente necesario. (Barrick Gold Corporation, 2012)

La interacción de las personas que trabajan en el área con el ácido sulfúrico, que en algunos sectores alcanza a un grado de 98% de pureza, representa otro factor de riesgo operacional significativo, por lo que el área es una de las más críticas, no solo para CMZ, sino que para toda compañía minera que realice procesos productivos similares.

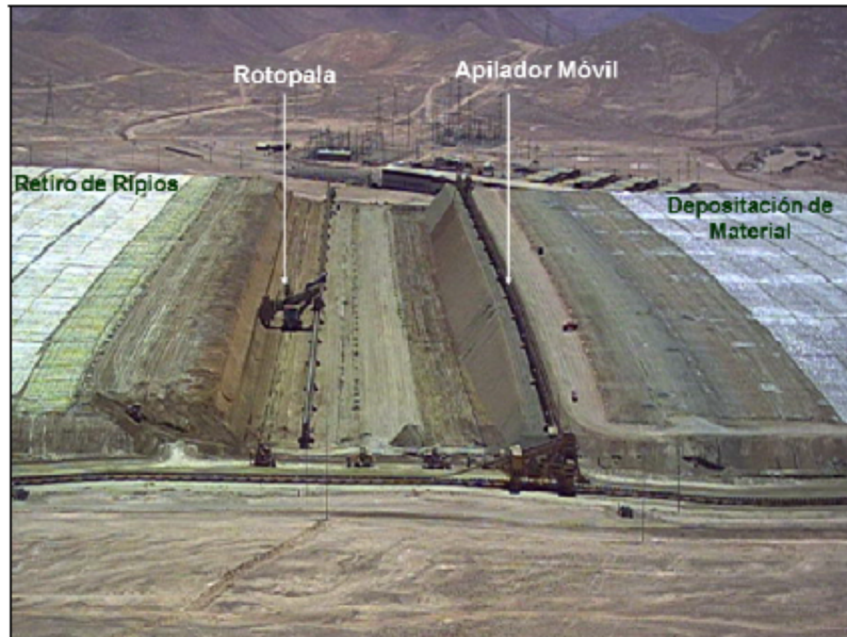
Los residuos de las pilas de lixiviación se dejan en el sector denominado botadero de ripios para una posible reutilización en el futuro, con respecto a lo correspondiente a la planta de flotación esto se canaliza a través de ductos hacia el tranque de relaves.

La pila de lixiviación se localiza en un área de pendientes suaves, en cuya base se ha instalado una carpeta impermeable de HDPE, que está apoyada en un suelo libre de piedras y compactado en húmedo.

El personal a cargo de esta área son los ingenieros de procesos (metalurgistas), jefes de turno (ingenieros de ejecución), el personal de mantención ingenieros civiles y ejecución mecánicos además de los técnicos.

También se encuentra el personal de laboratorio, quienes son los encargados de tomar las muestras de cada pila para ver la tendencia de la liberación de la pila (cuan rica en cobre será la solución de la pila).

En la Figura 5.2 se muestra el emplazamiento de la pila dinámica y la operación de retiro de ripios.



Fuente: Barrick Zaldívar

**Figura 5.2 Pila Dinámica, Apilador Móvil y Rotopala CMZ**

#### 5.1.4 Flotación y Relaves

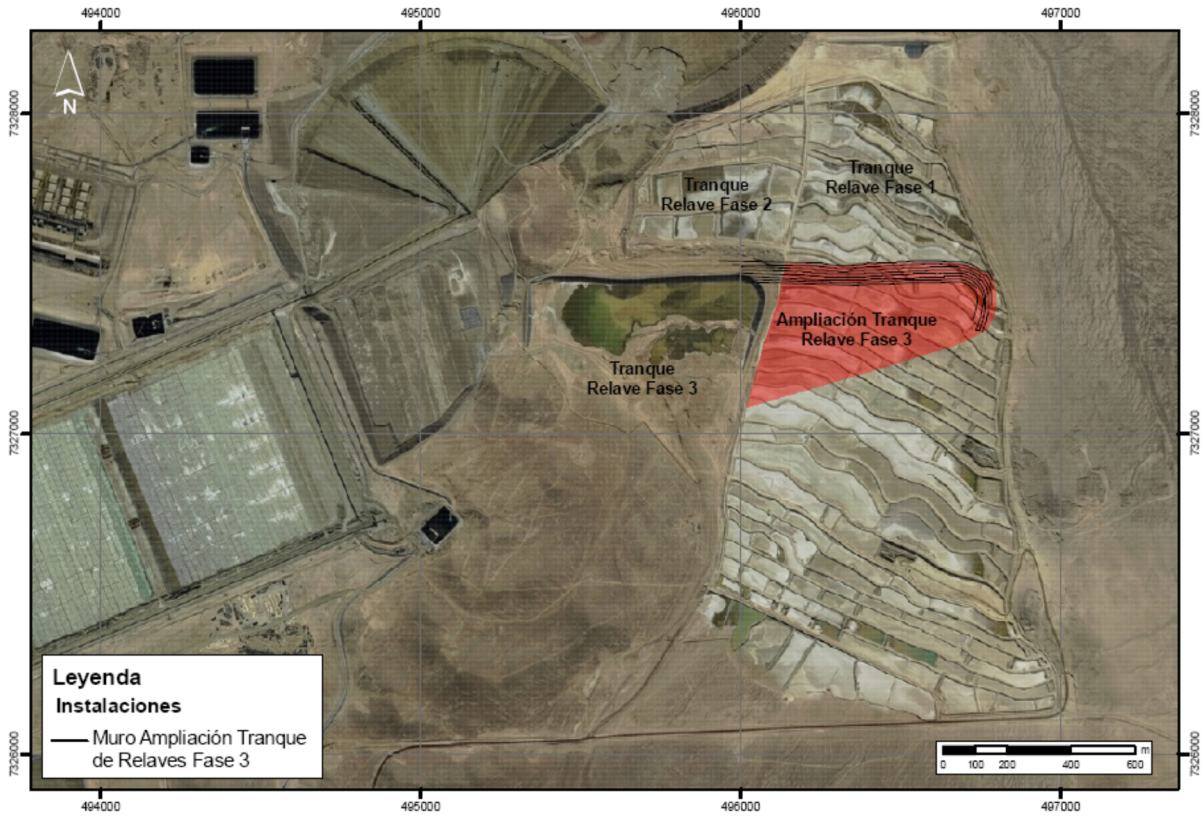
El material de tamaño fino es enviado a las celdas de flotación; en donde por medio de un proceso físico-químico se separan los metales sulfurados (cobre) de los otros minerales y para lo cual se necesita realizar una mezcla con agua cal y espumantes, esta mezcla se agita hasta darle el tiempo suficiente de residencia para producir burbujas que llevan a la superficie las partículas de cobre adheridas a ellas, para luego pasar a los espesadores y a un filtro que extrae el exceso de humedad constituyendo finalmente el concentrado de cobre. La flotación consta de tres etapas principales, las cuales son: (Barrick Gold Corporation, 2012)

**Fase sólida:** Corresponde a las materias que se quiere separar, en este caso nuestro material a separar es el cobre que está inserto en la roca o mineral.

**Fase líquida:** Es la fase en la cual se realizan todas estas separaciones ya mencionadas.

**Fase Gaseosa:** Se refiere al aire inyectado en la pulpa para poder formar burbujas que son los centros a los se adhieren las partículas sólidas.

El personal de esta área está formado principalmente por ingenieros y técnicos en metalurgia encargados de controlar el proceso. Por parte de mantención están los ingenieros mecánicos y técnicos especializados.



Fuente: Barrick Zaldívar

**Figura 5.3 Tranque de Relaves CMZ**

### **5.1.5 Extracción por solventes y electro-obtención**

En esta parte del proceso y luego de pasar por tanques y filtros la solución de cobre es transportada hacia la planta, esta nueva solución purificada es denominada electrolito, que luego pasa a la siguiente etapa, denominada electro-obtención.

El electrolito es cargado en celdas de la planta de electro-obtención donde la corriente eléctrica alterna de baja intensidad que circula entre las placas de ánodos y cátodos induce al cobre a depositarse en los cátodos, obteniéndose cobre de alta pureza. (Barrick Gold Corporation, 2012)

Este proceso depende directamente de la entrega de flujo por parte de las pilas de lixiviación por lo tanto mientras más optimizado y controlado este el proceso en armado y retiro de pilas de lixiviación mayor será la producción de cátodos.

La electro-obtención es particularmente interesante en el proceso de producción de cobre, ya que prácticamente todo el cobre de uso industrial a nivel mundial requiere un grado de pureza establecido por los estándares de cobre electrolítico.

El personal de esta área lo constituyen ingenieros y técnicos metalúrgicos, cuya preocupación principal es la operación de la planta, acá toma gran relevancia dentro del personal de mantención, el apoyo del personal eléctrico debido al consumo de electricidad y como este influye en la estabilidad de la planta.

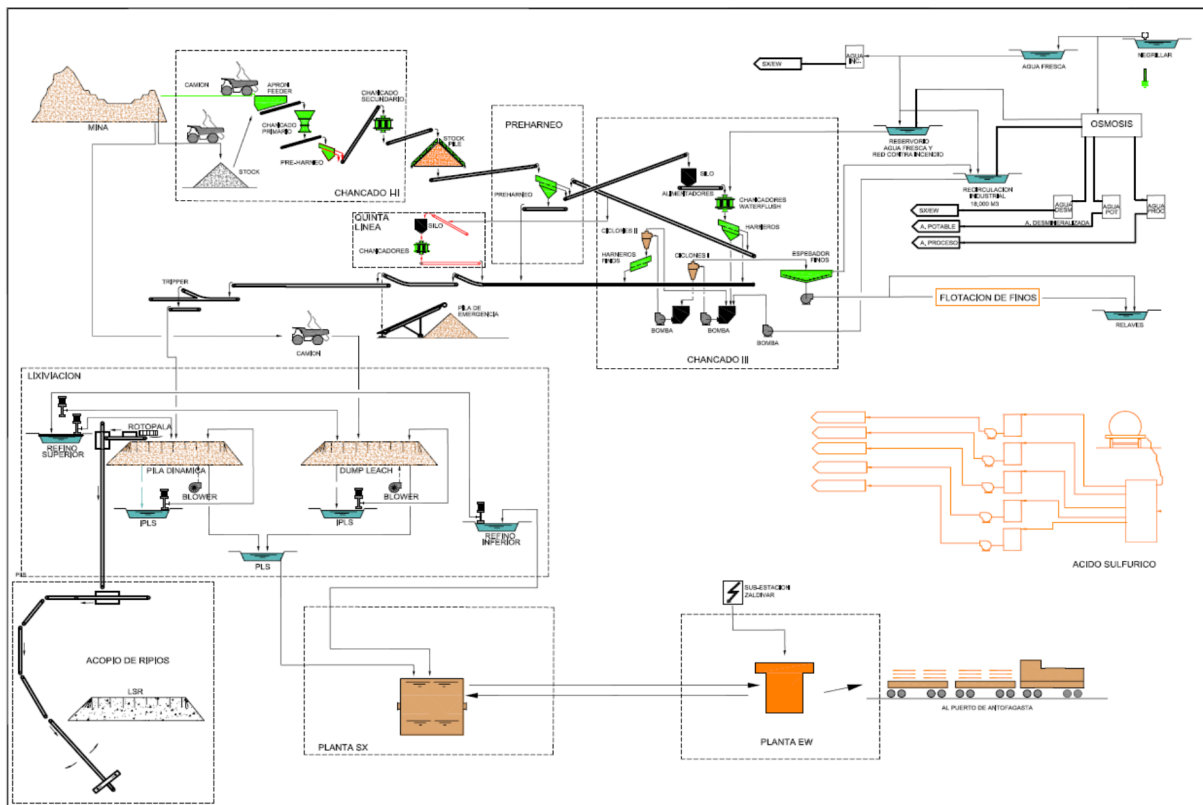
Resumiendo los puntos anteriores, la figura 5.7 se presenta las instalaciones sobre el levantamiento de procesos correspondientes a Obras de Actualización y Obras de Ampliación de CMZ.



### 5.1.6 Diagrama de flujo del proceso productivo

A continuación, en la figura 5.5 se ofrece un diagrama de flujo de la línea de procesamiento de minerales de CMZ, donde se describe la situación base, entendiendo por tal el conjunto de aquellas obras y actividades bajo estándares internacionales que cuentan con la aprobación ambiental del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) en conformidad a la legislación vigente en Chile, donde se pueden observar los subprocesos que conducen a la fabricación del cátodo de cobre como producto final. (Barrick Gold Corporation, 2012)

Para efectos de la descripción de la situación base, se seguirá el criterio de la línea de procesamiento de minerales.



Fuente: Manual de sistema de gestión ambiental Barrick Zaldívar  
**Figura 5.5 Diagrama de Flujo de Proceso Productivo CMZ**

## 5.2 Análisis de criticidad

Debido al gran número de equipos que operan en el área seca de minera Zaldívar, es necesario establecer hacia qué equipos se deben dirigir todos los esfuerzos y metodologías de mantenimiento para atender las áreas o subsistemas más críticos. En esta sección se explica cómo se realiza el análisis de criticidad propuesto, las ventajas que se obtienen y como se aplica al caso de estudio.

### 5.2.1 Identificación de los equipos a estudiar

El área seca de la compañía minera Zaldívar se divide en 3 subáreas principales: subárea de chancado 1ro y 2rio; subárea de chancado 3rio y subárea de Apilado, las cuales cuentan con un total de 28 Cintas transportadoras con un total de 38 unidades motrices y alrededor de 120 equipos principales y auxiliares funcionando actualmente. Dentro de estos equipos, fueron seleccionados los más importantes dentro del proceso de producción, ya que realizar el estudio de criticidad a los casi 120 equipos, es muy extenso. Estos fueron escogidos bajo el criterio de los supervisores jefes del área seca de CMZ, basado en estudios de la empresa y registros de mantenimiento correspondiente a ingenieros de producción y mantenimiento mecánico. Los equipos incluidos dentro del Análisis de Criticidad, están divididos por sub-áreas, como lo muestra la tabla 5.2:

**Tabla 5.1 Identificación de Equipos por Áreas**

<b>SUBÁREA CHANCADO PRIMARIO</b>	
<b>Chancador Primario</b>	<b>Correa Transportadora CT-02</b>
<b>Chancado Secundario1</b>	<b>Correa Transportadora CT-03</b>
<b>Chancado Secundario 2</b>	<b>Correa Transportadora CT-04</b>
<b>Pica-roca</b>	<b>Correa Transportadora CT-05</b>
<b>Apron Feeder</b>	<b>Correa Transportadora CT-06</b>
<b>Harneros</b>	<b>Correa Transportadora CT-07</b>
<b>Bombas 1rio</b>	<b>Correa Transportadora CT-08</b>
<b>Sopladores 1rio</b>	<b>Correa Transportadora CT-105</b>
<b>Correa Transportadora CT-01</b>	<b>Correa Transportadora CT-106</b>

<b>SUBÁREA CHANCADO Terciario</b>	
<b>Chancador 5001</b>	<b>Chancador 2B</b>
<b>Chancador 6001</b>	<b>Correa Transportadora CT-14 A</b>
<b>Harneros 3rio</b>	<b>Correa Transportadora CT-14 B</b>
<b>Bombas Centrifugas</b>	<b>Correa Transportadora CT-15 A</b>
<b>Sopladores 3rio</b>	<b>Correa Transportadora CT-15 B</b>
<b>Chancador 1A</b>	<b>Correa Transportadora CT-26</b>
<b>Chancador 1B</b>	<b>Correa Transportadora CT-27</b>
<b>Chancador 2A</b>	<b>Correa Transportadora CT-40</b>
<b>SUBÁREA APILADO</b>	
<b>Correa Transportadora CT-32</b>	<b>Correa Transportadora CT-201</b>
<b>Correa Transportadora CT-34</b>	<b>Correa Transportadora CT-202</b>
<b>Correa Transportadora CT-200</b>	

Fuente: Barrick – Zaldívar

### 5.2.2 Selección del personal a entrevistar

La elaboración del estudio de Análisis de Criticidad se realizó a partir de un formato de encuesta que permite recoger la información de parte de los ingenieros, técnicos y operarios de la Planta, ya que no se ha implementado aun, un programa de mantenimiento que permita recolectar este tipo de información. El personal seleccionado para contestar las encuestas:

- Administrador de contratos de CMZ.
- Ingeniero de producción área seca.
- Ingeniero planificación área seca.
- Jefe de mantenimiento mecánico.
- Jefe de operaciones del área.
- 3 mecánicos del área.
- 3 operadores del área.

A todas las personas involucradas en el estudio se les realiza una presentación completa

del tema donde se explica la metodología, los alcances y la importancia de los resultados.

### 5.2.3 Recolección de datos para análisis de criticidad

La ecuación de criticidad para el estudio se presenta en la figura 5.6. (Huerta, 2001)

**Criticidad = frecuencia de falla × consecuencia**  
Consecuencia = a+b  
a = costo reparación+ impacto seguridad personal+ impacto ambiental  
b = impacto en la producción × Tiempo promedio para reparar MTTR.

**Figura 5.6 Ecuación de criticidad.**

El formato de la encuesta que se entregó al personal del área seca, se muestra en la tabla 5.2. Esta encuesta está compuesta por 6 preguntas. Cada pregunta tiene una serie de respuestas con una ponderación diferente, esta ponderación se presenta en la tabla 5.3 y le asigna un valor específico a cada parámetro dependiendo de las características del equipo a evaluar.

Esta encuesta, formará parte del programa de gestión y mantenimiento operacional de CMZ, el cual se validó por parte del equipo de ingenieros y supervisores del área seca de CMZ. Una vez realizada la encuesta, las respuestas se clasifican en una hoja de cálculo, donde se obtiene el valor de criticidad para cada equipo por cada una de las personas entrevistadas y finalmente se realiza un promedio con los resultados obtenidos para determinar la criticidad final de cada equipo.

**Tabla 5.2 Formato encuesta análisis de criticidad**

NOMBRE/CARGO: _____		SUBÁREA O SECCIÓN: _____	
EQUIPO: _____		FECHA: _____	
<b>1. FRECUENCIA DE FALLA (TODO TIPO DE FALLA).</b>		<b>2. TIEMPO PROMEDIO PARA REPARAR. MTTR.</b>	
	No más de 1 por año		Menos de 1 hora
	Entre 2 y 15 por año		Entre 1 y 2 horas
	Entre 16 y 30 por año		Entre 2 y 3 horas
	Entre 31 y 50 por año		Entre 3 y 4 horas
	Más de 50 por año ( Más de una parada semanal )		Más de 4 horas
<b>3. IMPACTO SOBRE LA PRODUCCIÓN</b>		<b>4. COSTO DE REPARACIÓN(MILLONES DE PESOS)</b>	
	No afecta la producción		
	25% de impacto		Menos de 3 millones
	50% de impacto		Entre 3 y 15 millones
	75% de impacto		Entre 15 y 35 millones
	La afecta totalmente		Más de 35 millones
<b>5. IMPACTO AMBIENTAL</b>			
	No origina ningún impacto ambiental		
	Contaminación ambiental moderada, el impacto se manifiesta en un espacio reducido dentro de la planta		
	Contaminación ambiental grave, rebasa los límites de la planta		
	Contaminación ambiental catastrófica, incumplimiento de normas, quejas de la comunidad		
<b>6. IMPACTO EN SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL</b>			
	No origina heridas ni lesiones; primeros auxilios		
	Atención médica; Puede ocasionar lesiones o heridas leves sin incapacidad; efectos a la salud reversibles		
	Hospitalización; Puede ocasionar lesiones o heridas graves con incapacidad parcial o total temporal		
	Una o más fatalidades; Lesionados graves con daños irreversibles; Incapacidad parcial o total permanentes		

Fuente: PDVSA E & P Occidente 2002

**Tabla 5.3 Ponderaciones de los parámetros del análisis de criticidad**

<b>1. FRECUENCIA DE FALLA ( Todo tipo de falla )</b>	<b>Puntaje</b>
No más de 1 por año	1
Entre 2 y 15 por año	2
Entre 16 y 30 por año	3
Entre 31 y 50 por año	4
Más de 50 por año (Más de una parada semanal)	5
<b>2. TIEMPO PROMEDIO PARA REPARAR ( MTTR )</b>	<b>Puntaje</b>
Menos de 0,5 hora	1
Entre 0,5 y 2 horas	2
Entre 2 y 3,5 horas	3
Entre 3,5 y 5 horas	4
Más de 5 horas	5
<b>3. IMPACTO SOBRE LA PRODUCCIÓN (Por el número de fallas al año)</b>	<b>Puntaje</b>
No afecta la producción	0,05 F
25% de impacto	0,3 F
50% de impacto	0,5 F
75% de impacto	0,8 F
La afecta totalmente	1 F
<b>4. COSTOS DE REPARACIÓN</b>	<b>Puntaje</b>
Menos de 3 millones de pesos	3
Entre 3 y 15 millones de pesos	5
Entre 15 y 35 millones de pesos	10
Más de 35 millones de pesos	25
<b>5. IMPACTO AMBIENTAL</b>	<b>Puntaje</b>
No origina ningún impacto ambiental	0
Contaminación ambiental moderada, el impacto se manifiesta en un espacio reducido dentro de la planta	5
Contaminación ambiental grave, rebasa los límites de la planta	10
Contaminación ambiental catastrófica, incumplimiento de normas, quejas de la comunidad	25
<b>6. IMPACTO EN SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL</b>	<b>Puntaje</b>
No origina heridas ni lesiones; primeros auxilios	0
Atención médica; Puede ocasionar lesiones o heridas leves sin incapacidad; efectos a la salud reversibles	5
Hospitalización; Puede ocasionar lesiones o heridas graves con incapacidad parcial o total temporal	10
Una o más fatalidades; Lesionados graves con daños irreversibles; Incapacidad parcial o total permanentes	25

Fuente: PDVSA E &amp; P Occidente 2002.

Los criterios o parámetros que se utilizaron para la elaboración de las encuestas, las tablas de ponderación y el cálculo de los valores de criticidad de los sistemas fueron los siguientes:

**Frecuencia de Fallas:** Representa las veces que falla cualquier componente del sistema que produzca la pérdida de su función, es decir, que implique una parada, en un periodo determinado, para este caso un año. (Huerta, 2001)

**Tiempo Promedio para Reparar (MTTR):** Es el tiempo promedio por día empleado para reparar la falla, se considera desde que el equipo pierde su función hasta que esté disponible para cumplirla nuevamente (Huerta, 2001). El MTTR, mide la efectividad que se tiene para restituir la unidad o unidades del sistema en estudio a condiciones óptimas de operación.

**Impacto en la Producción:** Representa la producción porcentualmente aproximada que se deja de obtener (por día), debido a fallas ocurridas (diferimiento de la producción) (Huerta, 2001). Se define como la consecuencia inmediata de la ocurrencia de la falla, que puede representar un paro total o parcial de los equipos del sistema estudiado y al mismo tiempo el paro del proceso productivo de la unidad.

**Costo de Reparación:** Se refiere al costo promedio por falla requerido para restituir el equipo a condiciones óptimas de funcionamiento, incluye labor, materiales y transporte. (Huerta, 2001)

**Impacto en la Seguridad Personal:** Representa la posibilidad de que sucedan eventos no deseados que ocasionen daños a equipos e instalaciones y en los cuales alguna persona pueda o no resultar lesionada. (Huerta, 2001)

**Impacto Ambiental:** Representa la posibilidad de que sucedan eventos no deseados que ocasionen daños a equipos e instalaciones produciendo la violación de cualquier regulación ambiental, además de daños a otras instalaciones.

### 5.2.4 Verificación y análisis de datos

Los resultados obtenidos fueron mostrados al personal entrevistado y fueron inspeccionados con total aceptación. Es importante señalar que este formato de encuesta es validado por el equipo de profesionales (supervisores, ingenieros, técnicos y operadores) que forman parte del área seca y con aprobación de la gerencia CMZ y forma parte de un instrumento de medición que se adaptó para tales fines.

### 5.2.5 Resultados del análisis de criticidad

El primer paso para obtener los resultados del Análisis de Criticidad es establecer los puntajes de los parámetros dependiendo de las respuestas de las personas entrevistadas. Un ejemplo es el mostrado en la tabla 5.4, donde se muestran las respuestas hechas por el Ingeniero planificador del área seca con sus respectivos puntajes para la CT-200.

**Tabla 5.4 Respuestas y ponderación ingeniero planificador para CT-200**

PARÁMETRO	RESPUESTA	PUNTAJE
Frecuencia de falla	Más de 50 por año	5
MTTR	Entre 3,5 y 5 horas	4
Impacto en la producción	La afecta totalmente	1 x 56
Costos de reparación	Entre 15 y 35 millones de pesos	10
Impacto ambiental	Contaminación ambiental moderada, el impacto se manifiesta en un espacio reducido dentro de la planta	5
Impacto salud personal	Hospitalización; Puede ocasionar lesiones o heridas graves con incapacidad parcial o total temporal	25

Fuente: Catastro análisis de criticidad CMZ

Luego se realizó un promedio de los puntajes correspondientes a cada una de las personas entrevistadas para cada equipo. Este promedio se ingresó a una hoja de cálculo para obtener la criticidad, como se observa en la tabla 5.5.

**Tabla 5.5 Puntajes finales CT-200**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>PUNTAJE FINAL</b>
Frecuencia de falla	5,00
Tiempo promedio para reparar	4,00
Impacto en la producción	56,00
Costos de reparación	10,00
Impacto ambiental	5,00
Impacto en seguridad personal	16,67

Fuente: Catastro análisis de criticidad CMZ

Mediante la fórmula de criticidad de la figura 5.6 se calculó la criticidad para cada equipo seleccionado, a continuación se muestra un ejemplo de la criticidad para el ejemplo de la CT-200 que se aprecia en la figura 5.7.

<p><b>CT-200</b></p> <p>CRITICIDAD = <math>[5] \times [(10+5+16,67)+ (56,00 \times 4)]</math></p> <p>CRITICIDAD = 1.278,33</p>
--

Fuente: Catastro análisis de criticidad CMZ

**Figura 5.7 Criticidad numérica CT-200**

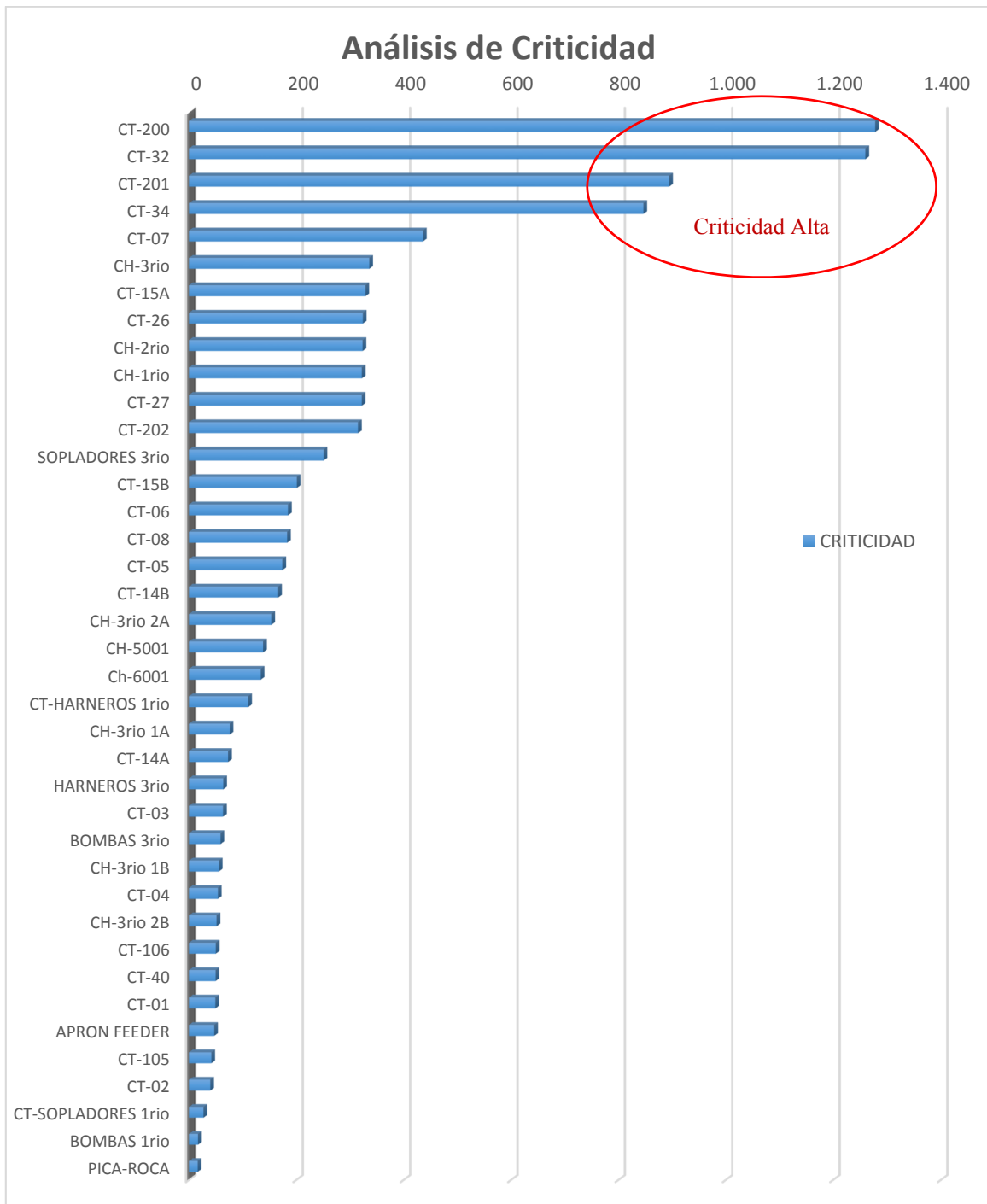
Este procedimiento se realiza para cada equipo incluido dentro del estudio de criticidad. En la tabla 5.6 se observa las ponderaciones para cada una de las respuestas contestadas por el personal para la unidad motriz de la CT-200, al final se promedian para incluirlas dentro de la ecuación de criticidad.

**Tabla 5.6 Ponderaciones de las respuestas CT-200**

<b>COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)</b>							
<b>RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD</b>			<b>PROMEDIOS CT-200</b>				
<b>PERSONA ENTREVISTADA</b>	<b>1. FREC. DE FALLAS</b>	<b>2.MTTR</b>	<b>3. IMPACTO EN PRODUCCIÓN (Impacto x *N° de fallas)</b>		<b>4. COSTO DE REPARACIÓN</b>	<b>5. IMPACTO AMBIENTAL</b>	<b>6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL</b>
			<b>Impacto</b>	<b>N° de fallas</b>			
Administrador de contratos CMZ	5	4	1	56	10	5	25
Ingeniero de producción	5	4	1	56	10	5	25
Ingeniero planificador	5	4	1	56	10	5	25
Jefe Mantenimiento mecánico	5	4	1	56	10	5	25
Jefe Operaciones	5	4	1	56	10	5	10
Mecánico clase A	5	4	1	56	10	5	10
Mecánico clase B	5	4	1	56	10	5	10
Operario 1	5	4	1	56	10	5	10
Operario 2	5	4	1	56	10	5	10
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>5,00</b>	<b>4,00</b>	<b>56,00</b>		<b>10,00</b>	<b>5,00</b>	<b>16,67</b>
* El número de fallas que afectaron el funcionamiento normal de la cinta transportadora 200 en el año 2012 es de 56 fallas, este número fue identificado gracias a las órdenes de trabajo presentadas a la oficina de mantenimiento del área seca.							

Fuente: Elaboración por antecedentes CMZ

La figura 5.8 muestra los resultados del estudio de Análisis de Criticidad para los equipos del área seca, por medio de una gráfica de barras agrupadas donde se pueden observar los equipos más críticos de cada subárea vs la criticidad numérica.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 5.8 Resultados del Análisis de Criticidad en el área seca**

Así mismo la tabla 5.7 muestra los resultados ponderados del análisis de criticidad de los equipos del área seca, donde se puede observar que los que presentan mayor criticidad son equipos pertenecientes al sub-área de apilado. Los resultados de las encuestas aplicadas se presentan en el Apéndice A.

**Tabla 5.7 Resultados ponderados del análisis de criticidad en el área seca**

Prioridad	Equipo	Puntaje frecuencia de fallas	Puntaje MTTR	Puntaje impacto en producción	Puntaje costo de reparación	Puntaje impacto ambiental	Puntaje impacto salud y seguridad personal	Criticidad
1	CT-200	5,00	4,00	56,00	10,00	5,00	16,67	1.278,33
2	CT-32	5,00	4,00	53,00	10,00	5,00	25,00	1.260,00
3	CT-201	4,00	4,00	48,00	10,00	5,00	16,67	894,67
4	CT-34	4,00	4,00	45,00	10,00	5,00	16,67	846,67
5	CT-07	4,00	3,00	28,00	10,00	5,00	10,00	436,00
6	CH-3rio	4,00	3,00	21,33	7,22	5,00	7,78	336,00
7	CT-15A	4,00	4,00	15,00	10,00	5,00	7,22	328,89
8	CT-26	3,00	3,00	27,67	10,00	5,00	10,00	324,00
9	CH-2rio	4,00	3,00	20,67	7,22	5,00	6,67	323,56
10	CH-1rio	3,00	4,00	22,40	6,67	5,00	6,11	322,13
11	CT-27	3,00	3,00	27,44	10,00	5,00	10,00	322,00
12	CT-202	3,00	4,00	20,00	10,00	5,00	10,00	315,00
13	SOPLADO RES 3rio	3,00	5,00	12,50	6,11	5,00	10,00	250,83
14	CT-15B	3,00	4,00	10,50	10,00	5,00	10,00	201,00
15	CT-06	3,00	3,00	14,40	8,33	5,00	5,00	184,60
16	CT-08	3,00	3,00	14,40	7,78	5,00	5,00	182,93
17	CT-05	3,00	3,00	13,60	7,22	5,00	5,00	174,07
18	CT-14B	3,00	4,00	9,00	7,22	5,00	7,22	166,33
19	CH-3rio 2A	3,00	5,00	6,90	6,67	5,00	5,00	153,50
20	CH-5001	3,00	3,00	8,50	8,89	5,00	6,67	138,17
21	Ch-6001	3,00	3,00	8,00	8,89	5,00	6,67	133,67
22	CT-HARNERO S 1rio	2,00	3,00	11,20	10,00	5,00	6,67	110,53
23	CH-3rio 1A	2,00	5,00	3,60	10,00	5,00	5,00	76,00
24	CT-14A	2,00	3,00	5,50	7,78	5,00	7,22	73,00
25	HARNERO S 3rio	2,00	3,00	4,00	10,00	5,00	5,00	64,00
26	CT-03	2,00	3,00	5,60	5,00	5,00	5,00	63,60
27	BOMBAS 3rio	3,00	4,00	1,15	10,00	0,00	5,00	58,80

Prioridad	Equipo	Puntaje frecuencia de fallas	Puntaje MTTR	Puntaje impacto en producción	Puntaje costo de reparación	Puntaje impacto ambiental	Puntaje impacto salud y seguridad personal	Criticidad
28	CH-3rio 1B	2,00	4,00	2,40	7,78	5,00	5,56	55,87
29	CT-04	2,00	3,00	4,00	5,00	5,00	5,00	54,00
30	CH-3rio 2B	2,00	4,00	2,70	5,00	5,00	5,00	51,60
31	CT-106	3,00	2,00	0,85	5,00	5,00	5,00	50,10
32	CT-40	2,00	3,00	1,80	7,22	6,11	6,11	49,69
33	CT-01	2,00	3,00	3,20	5,00	5,00	5,00	49,20
34	APRON FEEDER	2,00	2,00	4,00	3,89	5,00	6,67	47,11
35	CT-105	2,00	2,00	2,40	6,11	5,00	5,00	41,82
36	CT-02	2,00	2,00	1,60	6,67	5,00	5,00	39,73
37	CT-SOPLADORES Irio	2,00	1,00	0,60	3,00	5,00	5,00	27,20
38	BOMBAS Irio	2,00	1,00	0,50	3,00	0,00	5,00	17,00
39	PICA-ROCA	1,00	2,00	0,30	3,00	5,00	7,78	16,38

(\*) Resultados de las encuestas aplicadas se presentan en el Apéndice A.

Fuente: Catastro de criticidad CMZ

Como resultado final del Análisis de Criticidad, se puede establecer cuatro equipos que presentan alta criticidad, por lo tanto, forman parte del estudio de Análisis de Modos y Efectos de Falla, estos equipos son:

- Cinta Transportadora – 32
- Cinta Transportadora – 34
- Cinta Transportadora – 200
- Cinta Transportadora – 201

### **5.3 Análisis de modo, efecto y criticidad de fallas (FMECA)**

En esta sección se expone el desarrollo de un Análisis de Modos y Efectos de Falla para los cuatro equipos más críticos obtenidos en el análisis de criticidad anterior, la definición de las funciones del equipo, las fallas funcionales para cada una de estas funciones, los modos de falla que producen estas fallas y los efectos asociados a estas fallas. Este estudio permite identificar las fallas potenciales de diseño y proceso antes de que estas ocurran, para facilitar la elaboración de un plan de mantenimiento preventivo.

#### **5.3.1 Fuentes de información para el FMECA**

Al considerar donde obtener la información necesaria para desarrollar un Análisis de Modos Efectos y Criticidad de Fallas (FMECA) completo, se debe recordar ser proactivos, esto significa que debe darse tanto énfasis en lo que podría ocurrir como en lo que ha ocurrido. Las fuentes de información más utilizadas se describen a continuación: El fabricante/proveedor del equipo, listas genéricas de modos de falla, otros usuarios de la máquina, registros de antecedentes técnicos y las personas que operan y mantienen el equipo.

#### **5.3.2 Verificación y análisis de datos**

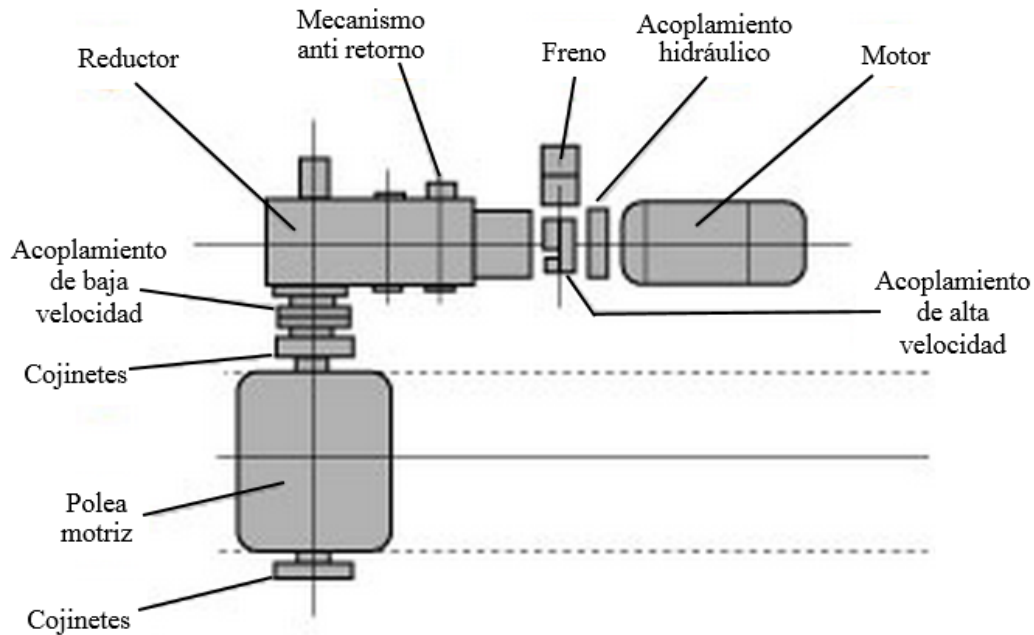
Obtenidos los cuatro equipos de mayor criticidad, se realizará el contexto operacional de los mismos determinando los sistemas y subsistemas en los cuales se dividen los cuatro equipos más críticos del subárea de apilado y que son analizados en este estudio para establecer los niveles del estudio de FMECA.

Luego se realiza un estudio preliminar del funcionamiento de cada sistema máquina y sus componentes, mediante esquemas y datos técnicos con el fin de tener información para realizar el FMEA, FEMCA y el FMECA con NPR mitigado.

### 5.3.3 Análisis funcional de sistemas en cintas transportadoras

Existen dos niveles de desagregación en la definición general de las cintas transportadoras: Un esquema funcional y esquema físico. A continuación se describen en general los sistemas y subsistemas de las cintas transportadoras utilizadas en minería (Gómez M. , 2013):

**Sistema motriz:** Sub-sistema de las cintas transportadoras cuya función primaria es aportar energía mecánica a la polea motriz (de forma directa) y, por ende, a la banda, al resto del sistema de transmisión y al material fragmentado (de forma indirecta). Los equipos y componentes del sistema motriz se identifican en la siguiente figura 5.9 y se describen a continuación (Codelco Educa, 2014):



**Figura 5.9 Componentes del sistema motriz de CT**

- **Motor:** Equipo eléctrico que tiene la función de suministrar torque a la polea motriz mediante la conversión de energía eléctrica en mecánica (energía mecánica rotacional).
- **Reductor:** Equipo que tiene la función de multiplicar el torque del eje del motor eléctrico, mediante engranajes, proporcionando al eje de la polea motriz el torque requerido. En este proceso, la velocidad angular del eje del motor eléctrico disminuye.

Además, los reductores disponen de un sistema de lubricación, con la finalidad de reducir el roce entre engranajes y refrigerarlos.

- **Acoplamientos:** Componentes que reducen tanto las vibraciones como las sobrecargas, que permiten el arranque progresivo, y que separan mecánicamente al eje de la polea motriz del eje de salida del reductor (acoplamiento de baja velocidad) como al eje de entrada del reductor del eje del motor eléctrico (acoplamientos de alta velocidad e hidráulico).
- **Mecanismo anti-retorno:** Equipo que retiene el material fragmentado, impidiendo que regrese. Este equipo solo se utiliza en cintas transportadoras con pendiente ascendente.
- **Freno:** Equipo que detiene el movimiento de la cinta transportadora mediante la conversión de energía cinética en energía calórica. El freno de disco corresponde al tipo de freno más usado. Este tipo de freno, se compone de un disco de freno en el equipo o componente a detener, de dos pastillas de freno, y un sistema hidráulico (cuando se activa el freno de disco, el sistema hidráulico acciona las pastillas de freno sobre el disco de freno, produciéndose en consecuencia, la detención de la cinta transportadora).

**Sistema de transmisión:** Sub-sistema de las cintas transportadoras cuya función primaria es girar de forma solidaria con la banda (con bajo deslizamiento entre sus componentes y la banda y con mínimo roce entre sus ejes). En general, presenta los siguientes componentes:

- **Poleas:** Cilindros o tambores de acero que giran solidariamente con la banda y contribuyen a su tensado, respecto a su función, se distinguen los siguientes tipos:
  - **Polea motriz:** Polea que entrega energía mecánica a la banda a partir del torque proporcionado por el motor eléctrico.
  - **Polea de cola:** Polea que permite el retorno de la banda (función estructural).
  - **Poleas de inflexión:** Poleas que aumentan el área de contacto entre la banda y las otras poleas mencionadas, contribuyendo a mejorar su tensado.
- **Polines:** Cilindros o rodillos de acero, de menor diámetro en comparación a las poleas, que giran solidariamente con la banda y que contribuyen tanto a su limpieza como a su centrado. Se distinguen los siguiente tipos:
  - **Polines de carga:** Durante el trayecto de ida, los polines de carga sostienen a la banda (de forma directa) y al material transportado (indirecta); curvando transversalmente la banda, con la finalidad de evitar derrames.

- **Polines de retorno:** Durante el trayecto de vuelta, los polines de retorno sostienen a la banda y pueden estar recubiertos de goma, con el propósito de limpiar la banda.
- **Polines de impacto:** Los polines de impacto amortiguan los golpes provenientes de la descarga de material fragmentado a la banda, por medio de recubrimientos de gomas con discos. También desempeña las mismas funciones de los polines de carga.
- **Polines centradores:** Los polines centradores alinean la banda ante diversas perturbaciones, y se usan en el trayecto de ida como en el de vuelta.

**Banda:** Sub-sistema de las cintas transportadoras que tiene como función primaria soportar y trasladar al material fragmentado (con bajo deslizamiento entre la banda y material). Además, debe ser flexible (tanto de forma longitudinal, para el avance y retorno de la banda como de forma transversal, para ser curvada por los polines) y resistente a la tensión aplicada por las poleas y el sistema de tensión. Las partes de la banda, desde el punto de vista de su construcción, se describen a continuación:

- **Carcasa:** Tejido de algodón, poliéster, o poliamida que puede incluir cables de acero y que principalmente proporcionan resistencia a la tensión y agentes externos como la humedad y temperatura.
- **Recubrimiento:** Cubierta de goma de la carcasa que proporciona resistencia al desgaste y a los golpes.
- **Empalmes:** Uniones vulcanizadas entre diferentes segmentos de la banda.

**Estructura:** Sub-sistema de las cintas transportadoras que tiene como función principal soportar al material fragmentado. En general, presenta los siguientes componentes:

- **Chute de traspaso:** embudo que sostiene y conduce al material fragmentado, reduciendo la energía cinética en las transferencias entre otras cintas transportadoras.
- **Soporte:** perfiles metálicos angulares o tubulares, fijados a torres estructurales, que sostienen a los polines, a las poleas, a la banda, y al material fragmentado.

En la figura 5.10 se muestran los subsistemas y componentes de las cintas transportadoras.

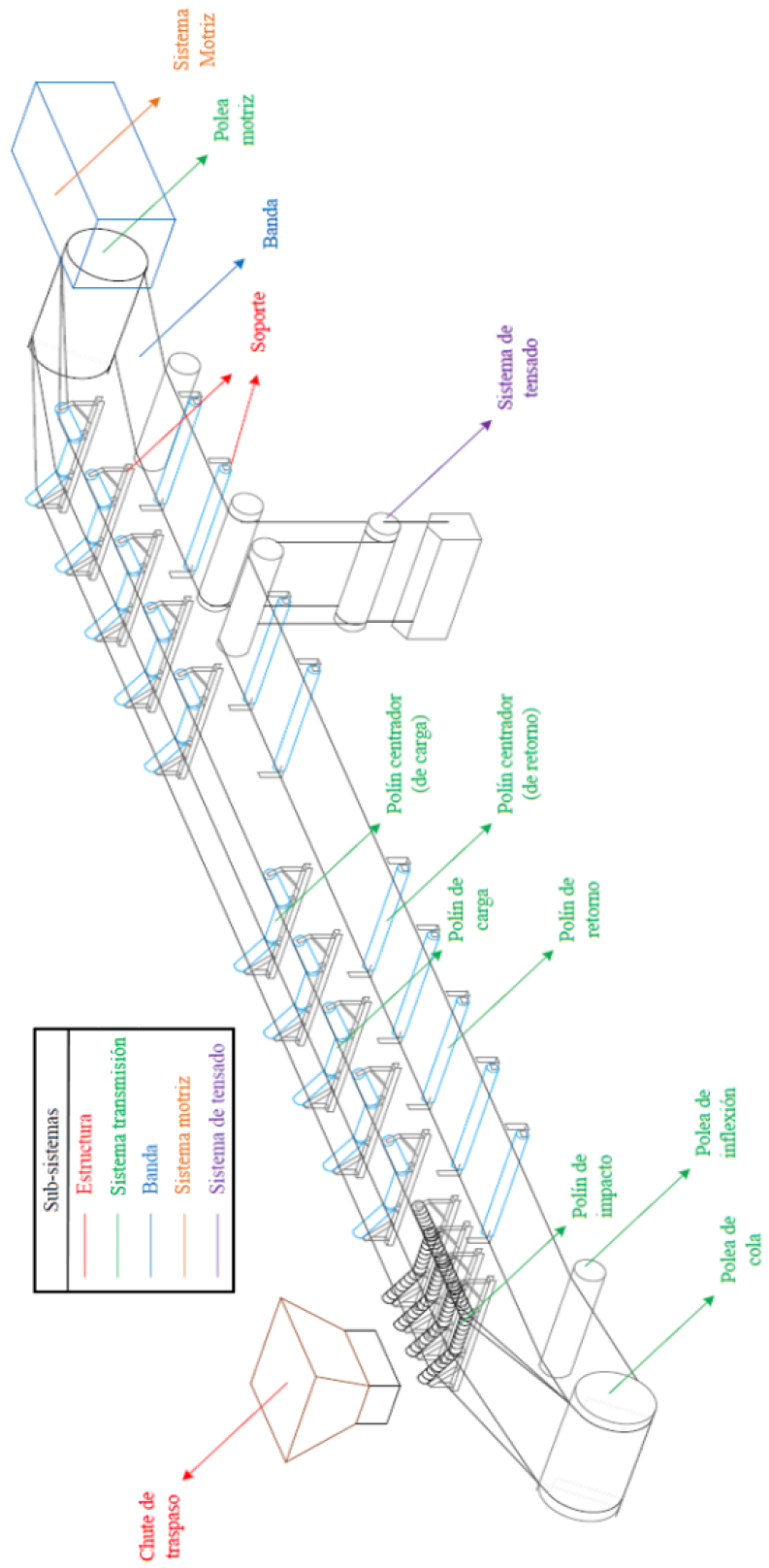


Figura 5.10 Sub Sistemas de las Cintas Transportadoras

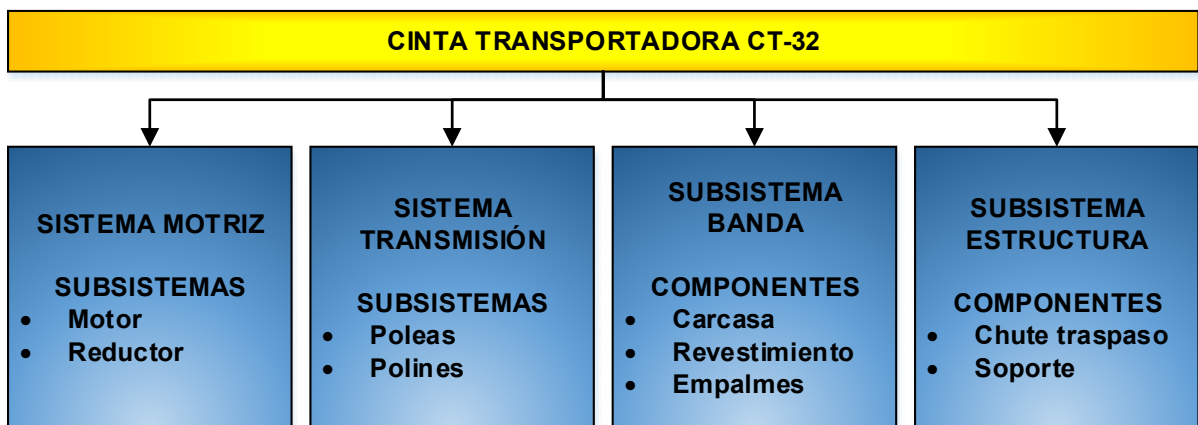
### 5.3.4 Contexto Operacional CT- 32

La Cinta transportadora N° 32 es la primera cinta del subárea de Apilado, recibe la carga de la CT-27 que es la última cinta transportadora del subárea de Chancado terciario, la disposición de las cintas de apilado son en serie y es una sola línea, por lo tanto, su disposición operacional es crítica.

Cuenta con una unidad motriz, compuesta de un conjunto motor-reductor, el motor es alimentado con corriente trifásica y transmite su potencia al reductor, el cual a su vez, transmite el giro y el torque a la polea motriz de la cinta. Todo el conjunto motriz se ubica en la parte posterior (cola) de la cinta, el material es transportado de forma ascendente de cola a cabeza por la banda y seis poleas en total. A la altura de la polea de cabeza se ingresa ácido sulfúrico al material en un porcentaje de pureza del orden del 98%, dicho material acidulado cae posteriormente hacia la cinta transportadora N° 34 a través de un buzón que descarga.

Mide 3,1 kilómetros y está soportada sobre polines de carga y de retorno, los cuales están montados sobre una estructura metálica que va anclada al piso.

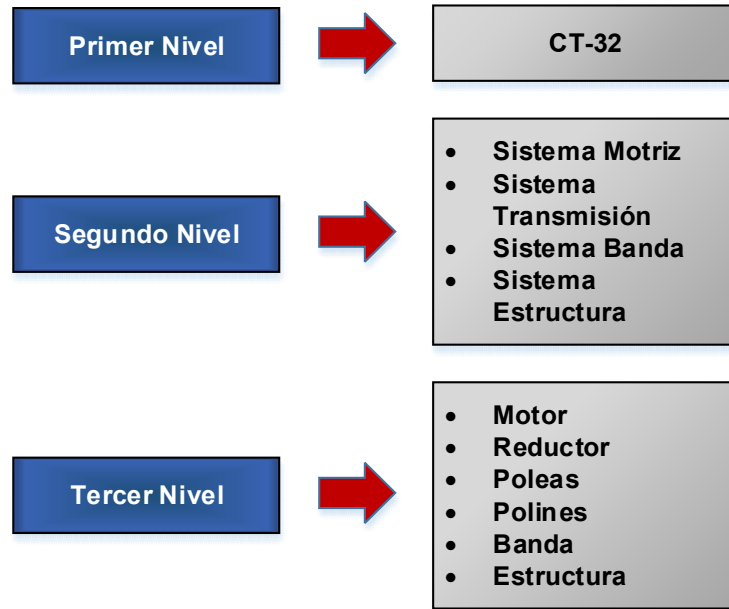
La CT-32 está programada para un trabajo continuo, 24 horas por día, solo se detiene en paradas programadas del subárea o por fallas inesperadas. En la figura 5.11 se presenta un esquema de sistemas y subsistemas en los cuales se divide la CT-32.



Fuente: CMZ

**Figura 5.11 Sistemas y subsistemas de la CT-32**

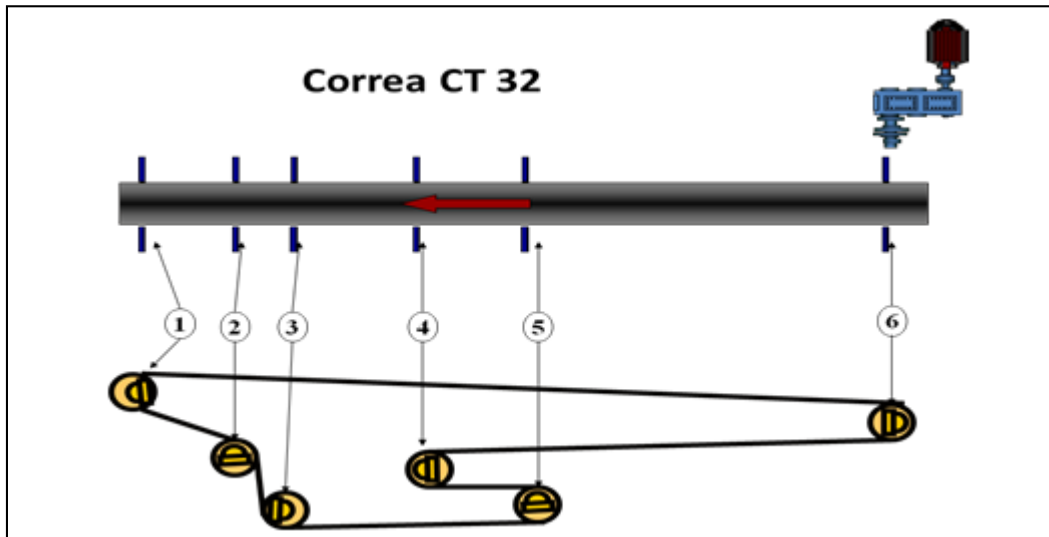
En la figura 5.12 se observan los niveles de estudio para el Análisis de Modos y Efectos de Falla en CT-32.



Fuente: CMZ

**Figura 5.12 Niveles de estudio FMEA CT-32**

En la figura 5.13 se representa un diagrama esquemático del equipo CT-32.



Fuente: Catastro de Maquinaria CMZ

**Figura 5.13 Esquema CT-32**

En la tabla 5.8 se muestra la ficha técnica del Motor-Reductor del equipo CT-32.

**Tabla 5.8 Ficha Técnica Motor-Reductor CT-32**

<b>SISTEMA MOTRIZ CT-32 (Descansos Metalados)</b>				
Modelo (ABB)	AMK500L6A BSH			
Potencia	1610	HP	1200,577	KW
Velocidad de Giro	988			RPM
Descanso Lado Acoplamiento	EFZLQ 11-125T			
Descanso Lado Libre	EFZLB 14-140			
<b>REDUCTOR CT-32</b>				
Modelo	437-604-002			
Potencia	1609,22623	HP	1200	KW
Velocidad de Giro Input	980			RPM
Velocidad de Giro Output	55,5			RPM

Fuente: Catastro Maquinaria CMZ

En la tabla 5.9 se muestra la ficha técnica de las poleas del equipo CT-32.

**Tabla 5.9 Ficha Técnica Poleas CT-32**

<b>N° Polea</b>	<b>N° Descanso Pillow block</b>	<b>Rodamiento N°</b>	<b>Manguito N°</b>	<b>Obturación N°</b>	<b>N° Sap Rodam.</b>	<b>Ubicación en Bodega</b>
1	SDAF160KAT	23160K	H3160.1015	TSG.1015	3400	P1-R02-04D
2	SDAF160KAT	23160K	H3160.1015	TSG.1015	3400	P1-R02-04D
3	SDAF160KAT	23160K	H3160.1015	TA.1015	3400	P1-R02-04D
4	SAF048	23048K	H3048.815	LER 175	3359	IN-03-E
5	SDAF160KAT	23160K	H3160.1015	TA.1015	3400	P1-R02-04D
6	SAF048	23048K	H3048.815	LER 175	3359	IN-03-E

Fuente: Catastro Maquinaria CMZ

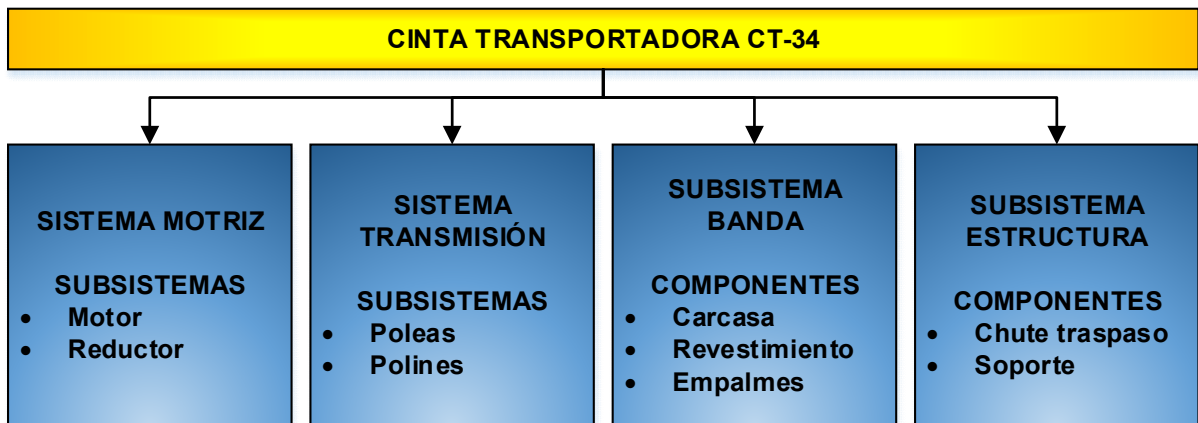
### 5.3.5 Contexto Operacional CT- 34

La Cinta transportadora N° 34 es la segunda cinta del subárea de Apilado, recibe la carga de la CT-32 que es la primera cinta transportadora del subárea de apilado.

Cuenta con una unidad motriz, compuesta de un conjunto motor-reductor, el motor es alimentado con corriente trifásica y transmite su potencia al reductor, el cual a su vez, transmite el giro y el torque a la polea motriz de la cinta. Todo el conjunto motriz se ubica en la parte anterior (cabeza) de la cinta, el material es transportado de forma ascendente de cola a cabeza por la banda y ocho poleas en total. Esta cinta transportadora empalma con la CT-201 y transfiere su carga a dicha cinta a través de otra cinta, de tamaño menor, la CT-200. En la cabeza de la CT-34 existe un buzón por el cual descarga a la culata de la CT-200 de forma perpendicular.

Mide 2,3 kilómetros y está soportada sobre polines de carga y de retorno, los cuales están montados sobre una estructura metálica que va anclada al piso.

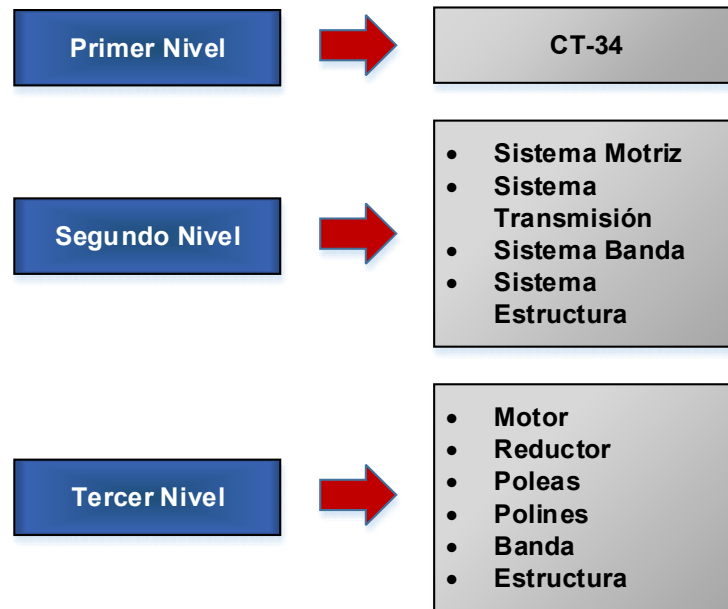
La CT-34 está programada para un trabajo continuo, 24 horas por día, solo se detiene en paradas programadas del subárea o por fallas inesperadas. En la figura 5.14 se presenta un esquema de sistemas y subsistemas en los cuales se divide la CT-34.



Fuente: CMZ

**Figura 5.14 Sistemas y subsistemas de la CT-34**

El estudio de Análisis de Modos y Efectos de Falla, que se realizó a la CT-34, fue un estudio de tercer nivel, como se muestra en la figura 5.15.

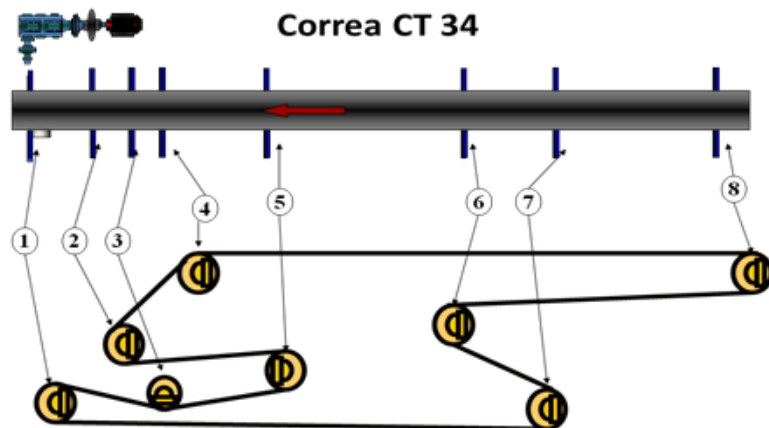


Fuente: CMZ

**Figura 5.15 Niveles de estudio FMEA CT-34**

### Ficha técnica CT-34

En la figura 5.16 se muestra el esquema de la CT-34.



Fuente: Catastro Maquinaria CMZ

**Figura 5.16 Esquema CT-34**

En la tabla 5.10 se muestra la ficha técnica del Motor-Reductor del equipo CT-34.

**Tabla 5.10 Ficha técnica Motor-Reductor CT-34**

<i>MOTOR CT-34</i>				
Marca	ABB			
Potencia	2600	HP	1938,82	KW
Velocidad de Giro	980			RPM
Rod. Lado Acoplamiento	23044CCK/W33 C3			
Rod. Lado Libre	NU232 C3			
<i>REDUCTOR CT-34</i>				
Modelo	480-011-024			
Potencia	1609,22623	HP	1200	KW
Velocidad de Giro Input	980			RPM
Velocidad de Giro Output	70,5			RPM

Fuente: Catastro Maquinaria CMZ

En la tabla 5.11 se muestra la ficha técnica de las poleas del equipo CT-34.

**Tabla 5.11 Ficha técnica Poleas CT-34**

<i>N° Polea</i>	<i>N° Descanso o Pillow block</i>	<i>Rodamiento N°</i>	<i>Manguito N°</i>	<i>Obturación N°</i>	<i>N° Sap Rodam.</i>	<i>Ubicación en Bodega</i>
1	SAF 536	22236K -- 22236CCK/W33	SNW36-607 SNW 36X6,7/16	LER 148	3349	IN-03-E
2	SAF 536	22236K -- 22236CCK/W33	SNW36-607 SNW 36X6,7/16	LER 148	3349	IN-03-E
3	SAF 536	22236K -- 22236CCK/W33	SNW36-607 SNW 36X6,7/16	LER 148	3349	IN-03-E
4	SAF 526	22226K -- 22226EK	SNW26-407 SNW 26X4,7/16	LER 117	3345	IN-03-C

<b>N° Polea</b>	<b>N° Descanso o Pillow block</b>	<b>Rodamiento N°</b>	<b>Manguito N°</b>	<b>Obturación N°</b>	<b>N° Sap Rodam.</b>	<b>Ubicación en Bodega</b>
5	SAF 526	22226K -- 22226EK	SNW26-407 SNW 26X4,7/16	LER 117	3345	IN-03-C
6	SAF 526	22226K -- 22226EK	SNW26-407 SNW 26X4,7/16	LER 117	3345	IN-03-C
7	SAF 526	22226K -- 22226EK	SNW26-407 SNW 26X4,7/16	LER 117	3345	IN-03-C
8	SAF 536	22236K -- 22236CCK/W33	SNW36-607 SNW 36X6,7/16	LER 148	3349	IN-03-E

Fuente: Catastro Maquinaria CMZ

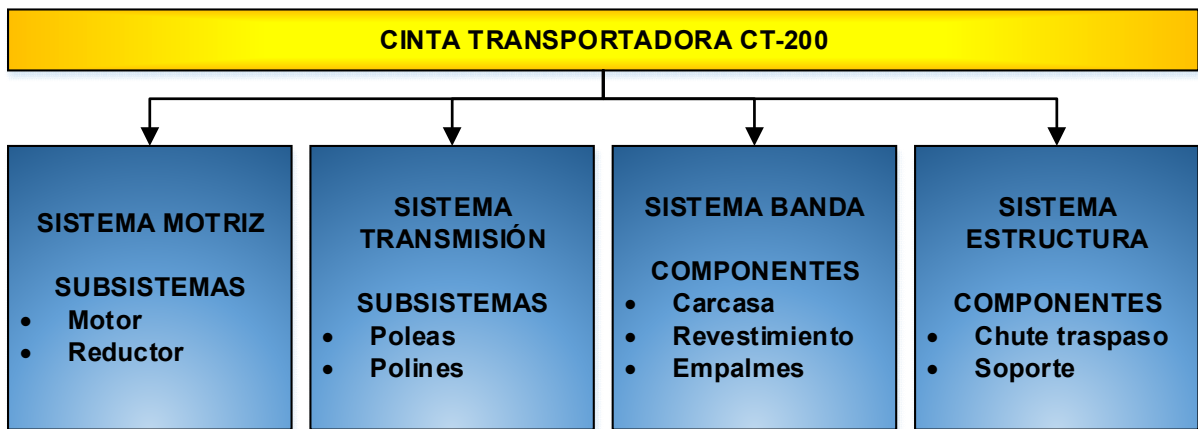
### 5.3.6 Contexto Operacional CT- 200

La Cinta transportadora N° 200 es la tercera cinta del sub área de Apilado, recibe la carga de la CT-34 que es la segunda cinta transportadora del sub área de apilado.

Cuenta con una unidad motriz, compuesta de un conjunto motor-reductor, el motor es alimentado con corriente trifásica y transmite su potencia al reductor, el cual a su vez, transmite el giro y el torque a la polea motriz de la cinta. Todo el conjunto motriz se ubica en la parte posterior (cola) de la cinta, el material es transportado de cola a cabeza por la banda y dos poleas en total. Esta cinta transportadora transfiere su carga a la culata de la CT-201, mediante un buzón de descarga.

Mide 50 metros y está soportada sobre polines de carga y de retorno, los cuales están montados sobre una estructura metálica que va anclada al equipo móvil Tripper Senner, el cual permite que la CT-201 se mueva paralelamente a través de la CT-34, permitiendo que el apilador forme la pila de lixiviación.

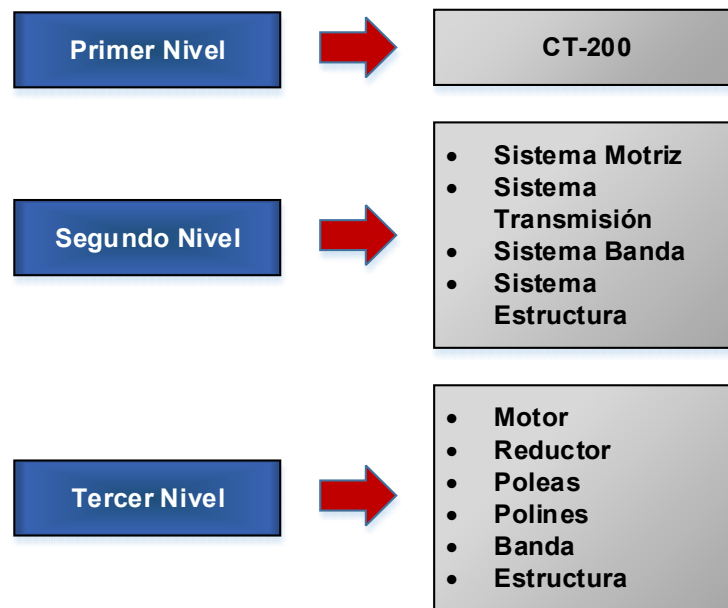
La CT-200 está programada para un trabajo continuo, 24 horas por día. En la figura 5.17 se presenta un esquema de sistemas y subsistemas en los cuales se divide la CT-200.



Fuente: CMZ

Figura 5.17 Sistemas y subsistemas de la CT-200

El estudio de Análisis de Modos y Efectos de Falla, que se realizó a la CT-200, fue un estudio de tercer nivel, como se muestra en la figura 5.18.

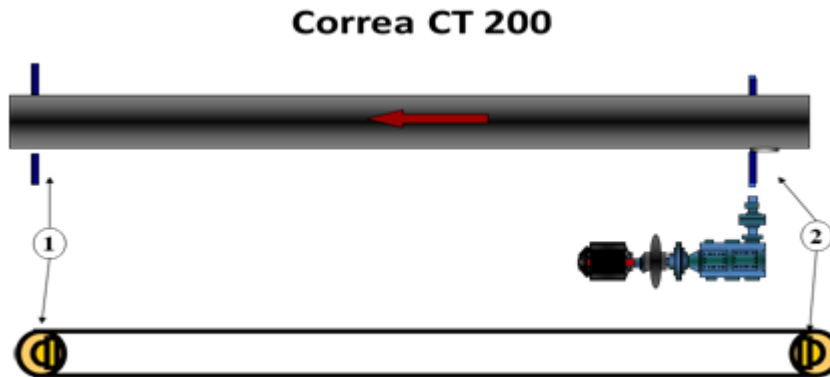


Fuente: CMZ

Figura 5.18 Niveles estudio FMEA CT-200.

### Ficha Técnica CT-200

En la figura 5.19 se muestra el esquema de la CT-200:



Fuente: Catastro Maquinaria CMZ

**Figura 5.19 Esquema CT-200**

En la tabla 5.12 se muestra la ficha técnica del Motor-Reductor del equipo CT-200.

**Tabla 5.12 Ficha técnica motor-reductor CT-200**

<i>SISTEMA MOTRIZ CT-200 (Descansos Metalados)</i>				
Modelo (ABB)	AMK500L6A BSH			
Potencia	1610	HP	1200,577	KW
Velocidad de Giro	988			RPM
Descanso Lado Acoplamiento	EFZLQ 11-125T			
Descanso Lado Libre	EFZLB 14-140			
<b>REDUCTOR CT-200</b>				
Modelo	498-409-002			
Potencia	1609,22623	HP	1200	KW
Velocidad de Giro Input	980			RPM
Velocidad de Giro Output	55,5			RPM

Fuente: Catastro Maquinaria CMZ

En la tabla 5.13 se muestra la ficha técnica de las poleas del equipo CT-200.

**Tabla 5.13 Ficha técnica poleas CT-200**

<i>N° Polea</i>	<i>N° Descanso o Pillow block</i>	<i>Rodamiento N°</i>	<i>Manguito N°</i>	<i>Obturación N°</i>	<i>N° Sap Rodam.</i>	<i>Ubicación en Bodega</i>
1	DODGE 532	22232 CCK/W33	SNW 32X5.7/16	LER 130	3347	IN-03-D
2	DODGE 526	22226 CCK/W33	SNW 26X4.7/16	LER 117	3345	IN-03-C

Fuente: Catastro Maquinaria CMZ

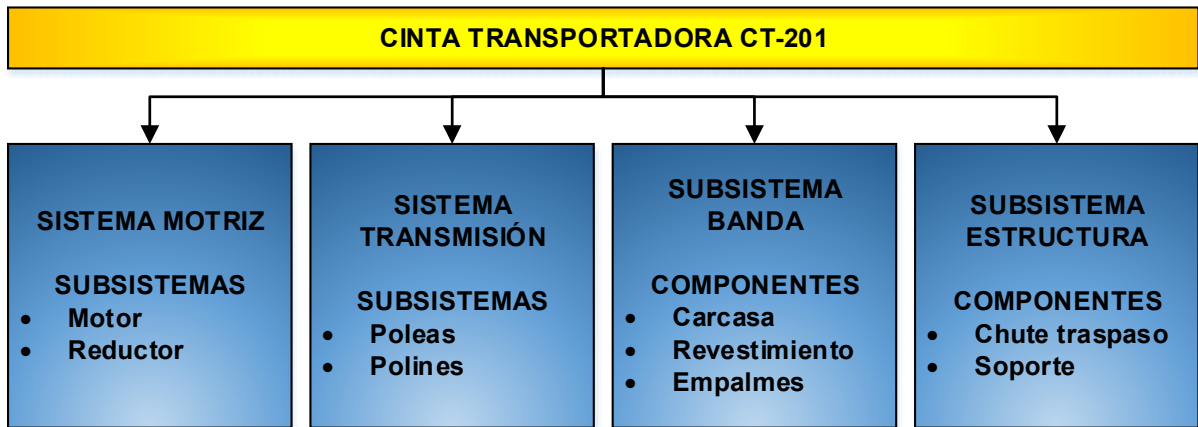
### 5.3.7 Contexto Operacional CT- 201

La Cinta transportadora N° 201 es la cuarta cinta del subárea de Apilado, recibe la carga de la CT-200 que es la tercera cinta transportadora del subárea de apilado.

Cuenta con una unidad motriz, compuesta de un conjunto motor-reductor, el motor es alimentado con corriente trifásica y transmite su potencia al reductor, el cual a su vez, transmite el giro y el torque a la polea motriz de la cinta. Todo el conjunto motriz se ubica en la parte posterior (cola) de la cinta, el material es transportado de cola a cabeza por la banda y diez poleas en total. Esta cinta transportadora transfiere su carga mediante un buzón de descarga a la culata de la CT-202, última cinta del subárea, encargada de apilar el material en la torta de lixiviación.

Mide 1,4 kilómetros y está soportada sobre polines de carga y de retorno, los cuales están montados sobre una estructura metálica dinámica, la cual se desplaza mediante orugas para formar la pila de lixiviación.

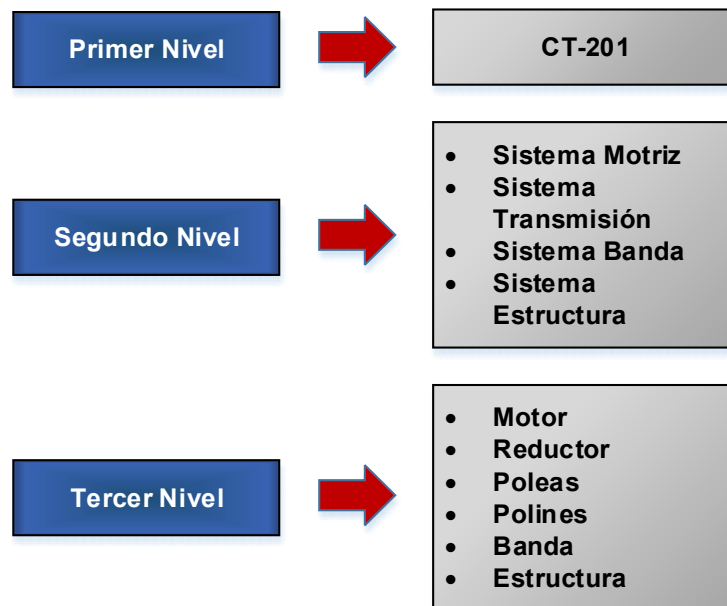
La CT-201 está programada para un trabajo continuo, 24 horas por día, solo se detiene en paradas programadas del subárea o por fallas inesperadas. En la figura 5.20 se presenta un esquema de sistemas y subsistemas en los cuales se divide la CT-201.



Fuente: CMZ

Figura 5.20 Sistemas y subsistemas de la CT-201

El estudio de Análisis de Modos y Efectos de Falla, que se realizó a la CT-201, fue un estudio de tercer nivel, como se muestra en la figura 5.21.

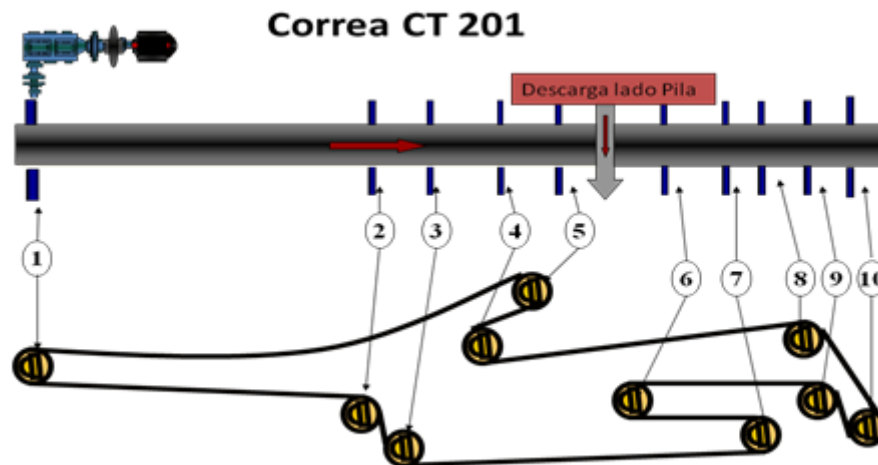


Fuente: CMZ

Figura 5.21 Niveles estudio FMEA CT-201

## Ficha Técnica CT-201

En la figura 5.22 se muestra el esquema de la CT-201:



Fuente: Catastro Maquinaria CMZ

**Figura 5.22 Esquema CT-201**

En la tabla 5.14 se muestra la ficha técnica del Motor-Reductor del equipo CT-201.

**Tabla 5.14 Ficha técnica Motor-Reductor CT-201**

<i>MOTOR ABB CT-201</i>				
Modelo	AMK500L6A BSH			
Potencia	2682,043717	HP	2000	KW
Velocidad de Giro	991			RPM
Descanso Lado Acoplamiento	23044CCKC3			
Descanso Lado Libre	NU232-C3			
<i>REDUCTOR FLENDER CT-201</i>				
Modelo	480-011-023			
Potencia	2413,839346	HP	1800	KW
Velocidad de Giro Input	1000			RPM
Velocidad de Giro Output	71,5			RPM

Fuente: Catastro Maquinaria CMZ

En la tabla 5.15 se muestra la ficha técnica de las poleas del equipo CT-201.

**Tabla 5.15 Ficha técnica poleas CT-201**

<b>N° Polea</b>	<b>N° Descanso o Pillow block</b>	<b>Rodamiento N°</b>	<b>Manguito N°</b>	<b>Obturación N°</b>	<b>N° Sap Rodam.</b>	<b>Ubicación en Bodega</b>
1	DODGE 538	22238 CCK/W33	SNW 38X6.15/16	LER 155	8455	IQ-01-D
2	DODGE 532	22232 CCK/W33	SNW 32X5.7/16	LER 130	3347	IN-03-D
3	DODGE 538	22238 CCK/W33	SNW 38X6.15/16	LER 155	8455	IQ-01-D
4	DODGE 538	22238 CCK/W33	SNW 38X6.15/16	LER 155	8455	IQ-01-D
5	DODGE 526	22226 CCK/W33	SNW 26X4.7/16	LER 117	3345	IN-03-C
6	DODGE 528	22228 CCK/W33	SNW 28X4.15/16	LER 122	3346	IP-03-D
7	DODGE 526	22226 CCK/W33	SNW 26X4.7/16	LER 117	3345	IN-03-C
8	DODGE 532	22232 CCK/W33	SNW 32X5.7/16	LER 130	3347	IN-03-D
9	DODGE 532	22232 CCK/W33	SNW 32X5.7/16	LER 130	3347	IN-03-D
10	DODGE 538	22238 CCK/W33	SNW 38X6.15/16	LER 155	8455	IQ-01-D

Fuente: Catastro Maquinaria CMZ

### 5.3.8 Desarrollo del análisis de modo y efecto de fallas para las cintas transportadoras

La información necesaria para determinar los sistemas, subsistemas, componentes y modos de falla se obtuvieron de los fabricantes y proveedores de los equipos y componentes; listas genéricas de modos de fallas; otros usuarios de los mismas máquinas; registros de antecedentes técnicos y de las personas que operan y mantienen los equipos.

#### 5.3.8.1 Identificación de modos de fallas

**Falla de Motor:** El modo de falla que generalmente presentan los motores eléctricos es el desgaste de rodamientos. Doblado, fisura y desbalanceo para el eje.

**Falla de Reductor:** Los modos de falla que presentan los reductores son: el desgaste, las grietas, pérdidas mecánicas en los dientes y espacio excesivo entre dientes de contacto, para el caso de engranajes; el desgaste y el espacio excesivo entre elementos rodantes y pistas, para los rodamientos; el doblamiento, pérdidas mecánicas en chaveta, el desbalance y el desalineamiento en el caso de los ejes. También, fuga de aceite y acumulación de suciedad en filtros y rejillas, para el sistema de lubricación.

**Falla de Poleas:** Los modos de falla que presentan las poleas son: desgaste del revestimiento, falla en pista externa e interna y falla en el canastillo en caso de los rodamientos.

**Falla de Polines:** Los modos de falla que presentan los polines son: desgaste superficial, des alineamiento y trabamiento de elementos rodantes en rodamientos; soltura mecánica y deformación de la carcasa.

**Falla de Banda:** Los modos de falla que presenta la banda son: corte longitudinal y transversal.

**Falla de Estructura:** El modo de falla que se presenta generalmente es la rotura del chute o embudo.

### 5.3.8.2 Identificación de efectos de los modos fallas

**Motor:** El efecto del desgaste de rodamientos es el aumento de vibraciones, especialmente en los reductores. Esto puede influir en los modos de falla de reductores.

**Reductor:** El efecto de los modos de falla de reductores y sus sistemas de lubricación es el aumento de vibraciones especialmente en la polea motriz. Esto puede generar desgaste en el recubrimiento de las poleas motrices y, por ende, en la banda, en la estructura y en el motor eléctrico.

**Poleas:** El efecto de los modos de falla de rodamientos es el aumento de las vibraciones lo que influye en el desgaste de la banda y, en el caso de la polea motriz afectar en los modos de fallas del reductor y el motor.

**Polines:** El efecto falla de rodamientos es el sobrecalentamiento contribuyendo al desgaste natural de la banda. (Equipo Minero, 2009)

**Banda:** El efecto de los modos de falla de banda es el impacto de objetos metálicos externos como de fragmentos de mineral grueso en polines, poleas y, eventualmente, en la estructura.

La falla de uno solo de los componentes puede causar la detención de la cinta transportadora y pérdida de producción.

En general, se identifican 83 modos de fallas para los subsistemas y componentes de la CT-32, los cuales se indican en la tabla 5.16, la cual representa un ejemplo de los cuatro análisis de modos de fallas realizados en el presente estudio.

**Tabla 5.16 Modos de fallas del sistema CT-32**

<b>Equipo</b>	<b>Componente</b>	<b>Modo de Falla</b>
<b>Motor</b>	Barras	Perdidas Dieléctricas
		Perdidas de Resistencia de Contacto
		Aumento de Resistencia
		Sobrecarga
		Conexiones flojas
		Desbalance de Carga
	Desconector	Perdidas Dieléctricas
		Perdidas de Resistencia de Contacto
		Aumento de Resistencia
		Sobrecarga
		Conexiones flojas
		Desbalance de Carga
	Conductores	Perdidas Dieléctricas
		Perdidas de Resistencia de Contacto
		Aumento de Resistencia
		Sobrecarga
		Conexiones flojas
		Desbalance de Carga
	Estator	Cortocircuitos entre espiras
		Círculo Abierto
		Desplazamiento o Distorsión
		Recalentamiento general en el conductor
		Arcos entre Devanados
		Arcos entre espiras
		Arcos entre Devanados y tierra
		Sobrecarga
		Laminaciones entre cortocircuitos
		Cortocircuitos entre espiras
		Conexiones flojas
		Rotor
	Roce rotor	
	No redondo	
	Barras rotas	
Espiras en cortocircuito		
Barras sueltas		
Anillos externos agrietados		
Desbalanceado		
Excéntrico		

<b>Equipo</b>	<b>Componente</b>	<b>Modo de Falla</b>	
	Acoplamiento	Desalineamiento	
		Desbalanceo	
		Soltura mecánica	
	Eje	Doblado	
		Fisura	
		Desbalanceo	
		Soltura mecánica	
		Desalineamiento	
	Rodamientos	Picadura o desgaste en elementos rodantes	
		Soltura mecánica	
		Falla pista externa	
		Falla pista interna	
		Falla en el canastillo	
	Carcaza	Soltura mecánica	
		Deformación	
<b>Reductor</b>	Acoplamiento	Desalineamiento	
		Desbalanceo	
		Soltura mecánica	
	Engranajes	Engranajes dientes rotos, desastillados	
		Desalineamiento entre engranes	
		Backlash excesivo	
		Engranajes excéntricos	
		Engranajes dientes desgastados	
	Eje de entrada	Doblado	
		Fisura	
		Desbalanceo	
		Soltura mecánica	
		Desalineamiento	
	Rodamientos	Picadura o desgaste en elementos rodantes	
		Soltura mecánica	
		Falla pista externa	
		Falla pista interna	
		Falla elementos rodantes	
		Falla en el canastillo	
	Carcaza	Soltura mecánica	
		Deformación	
	<b>Poleas</b>	Rodamientos	Picadura o desgaste en elementos rodantes
			Soltura mecánica
			Falla pista externa

<b>Equipo</b>	<b>Componente</b>	<b>Modo de Falla</b>
		Falla pista interna
		Falla en el canastillo
	Descansos	Desalineamiento eje
		Desbalanceo
		Falla de ajuste
Recubrimiento	Desgaste	
<b>Polines</b>	Rodamientos	Picadura o desgaste en elementos rodantes
		Soltura mecánica
		Falla pista externa
		Falla pista interna
		Falla en el canastillo
	Descansos	Desalineamiento eje
		Desbalanceo
		Falla de ajuste
	Recubrimiento	Desgaste
	<b>Banda</b>	Carcasa
Recubrimiento		Desgaste
		Corte transversal y/o longitudinal
Empalmes		Cortes

Fuente: CMZ

### 5.3.10 Desarrollo del análisis de criticidad, efecto y modos de fallas

El Análisis de Modo, Efecto y Criticidad de Fallas (FMECA) no es más que una extensión del FMEA, pero que a diferencia de este último, es cuantitativo y no cualitativo. Es una herramienta que permite relacionar las frecuencias de fallas, detectabilidad y gravedad de cada modo de falla, por cada componente que integra un subsistema, con el fin de obtener un Número de Prioridad de Riesgo (NPR), el cual es directamente proporcional a cada una de estas variables.

La información necesaria para cuantificar las frecuencias de fallas, detectabilidad y gravedad se obtuvieron de los registros de antecedentes técnicos, de las personas que operan y mantienen los equipos, y de datos estadísticos proporcionados por los departamentos de mantenimiento, prevención de riesgos y medioambiente. Las tablas 5.17, 5.18, 5.19 y 5.20, presentan las ponderaciones utilizadas para evaluar la severidad de efectos, frecuencia de falla, gravedad y detectabilidad respectivamente.

**Tabla 5.17 Ponderación de severidad de efectos en un proceso FMEA**

<b>Efecto</b>	<b>Criterios Severidad</b>	<b>Puntaje</b>
Detención total	El modo de falla causa la interrupción del 100% de la cadena de producción. El producto es inoperable con pérdida de función primaria.	4
Peligro Mayor	El modo de falla causa la interrupción del 75% de la cadena de producción. El producto es inoperable con pérdida de función primaria.	3
Peligro Moderado	El modo de falla causa la interrupción del 50% de la cadena de producción. El producto es inoperable con pérdida de función primaria.	2
Peligro Menor	El modo de falla causa la interrupción del 25% de la cadena de producción. El producto es inoperable con pérdida de función primaria.	1
Ninguno	El modo de fallo no tiene ningún efecto.	0
Criterios de la evaluación y sistema de graduación sugeridos para la severidad de efectos en un proceso de FMEA.		

Fuente: Libro Mantenimiento Centrado en Confiabilidad

**Tabla 5.18 Ponderación de Frecuencia para FMEA**

<b>Frecuencia de fallas</b>	<b>Puntaje</b>
Muy alta; Más de 50 por año (Más de una parada semanal)	10
Alta; Entre 31 y 50 por año	8
Media; Entre 16 y 30 por año	6
Baja; Entre 2 y 15 por año	4
Muy Baja; No más de 1 por año	2

Fuente: Libro Mantenimiento Centrado en Confiabilidad

**Tabla 5.19 Ponderación de la gravedad del efecto para FMEA**

<b>GRAVEDAD</b>		
<b>Categoría</b>	<b>S: IMPACTO EN SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL</b>	<b>Puntaje</b>
Catastrófico	Una o más fatalidades; Lesionados graves con daños irreversibles; Incapacidad parcial o total permanentes	10
Grave	Hospitalización; Puede ocasionar lesiones o heridas graves con incapacidad parcial o total temporal	7
Moderado	Atención médica; Puede ocasionar lesiones o heridas leves sin incapacidad; efectos a la salud reversibles	3
Menor	Sin lesiones; primeros auxilios	1
<b>Categoría</b>	<b>C: COSTOS DE REPARACIÓN</b>	<b>Puntaje</b>
Muy Alto	Más de 35 millones de pesos	10
Alto	Entre 15 y 35 millones de pesos	8
Medio	Entre 3 y 15 millones de pesos	5
Menor	Menos de 3 millones de pesos	3
<b>Categoría</b>	<b>P: IMPACTO SOBRE LA PRODUCCIÓN</b>	<b>Puntaje</b>
Muy Alto	Puede detener la producción por más de 48 horas	10
Alto	Puede detener la producción entre 24 y 48 horas	8
Medio	Puede detener la producción entre 8 y 24 horas	5
Bajo	Puede detener la producción entre 4 y 8 horas	3
Muy Bajo	Puede detener la producción por menos 4 horas	1
<b>Categoría</b>	<b>M: IMPACTO MEDIOAMBIENTAL</b>	<b>Puntaje</b>
Catastrófico	Contaminación ambiental alta, incumplimiento de normas, quejas de la comunidad	10
Grave	Contaminación ambiental grave, rebasa los límites de la planta	7
Moderado	Contaminación ambiental moderada, el impacto se manifiesta en un espacio reducido dentro de la planta	3
Menor	No origina ningún impacto ambiental; contingencia menor controlable	1

Fuente: Libro Mantenimiento Centrado en Confiabilidad

**Tabla 5.20 Ponderación para detectabilidad para FMEA**

<i><b>Detectabilidad</b></i>	<i><b>Criterios: Probabilidad de la detección por control de proceso</b></i>	<i><b>Puntaje</b></i>
Casi Imposible	Ninguno de los controles disponibles permiten detectar incidente Modo o causa	10
Muy Alejado	Los controles actuales tienen una probabilidad muy alejada de detectar modo o causa de fallo	9
Alejado	Los controles actuales tienen una probabilidad alejada de detectar modo o causa de fallo	8
Muy Bajo	Los controles actuales tienen una probabilidad muy baja de detectar modo o causa de fallo	7
Bajo	Los controles actuales tienen una probabilidad baja de detectar Modo o causa de fallo	6
Moderado	Los controles actuales tienen una probabilidad moderada de detectar modo o causa de fallo	5
Moderadamente Alto	Los controles actuales tienen una probabilidad moderadamente alta de detectar modo o causa de fallo	4
Alto	Los controles actuales tienen una alta probabilidad de detectar modo o causa de fallo	3
Muy Alto	Los controles actuales tienen una probabilidad muy alta de detectar modo o causa de fallo	2
Casi Seguro	Controles actuales detectan casi seguros al modo o a la causa de fallo. Los controles confiables de la detección se saben con procesos similares.	1

Fuente: Libro Mantenimiento Centrado en Confiabilidad

### 5.3.10.1 Datos para determinar el Número de Prioridad de Riesgo (NPR)

Las cuantificaciones del ítem de gravedad del FMECA se calcularon con la fórmula que se aprecia en la figura 5.23 y las tablas de ponderación para cada variable que se presentan en el punto precedente.

$$\mathbf{Gr = S \times 0,2 + C \times 0,2 + P \times 0,4 + M \times 0,2}$$

**Gr = Gravedad**

S = Seguridad y salud.  
C = Costos  
P = Producción  
M = Medioambiente

Fuente: CMZ

**Figura 5.23 Fórmula de criticidad**

El N° Prioritario de Riesgo (NPR) se calcula tal como se muestra en la figura 5.24.

$$\mathbf{NPR = FF \times D \times Gr}$$

**NPR = Número de Prioridad de Riesgo**

FF = Frecuencia de Falla  
D = Detectabilidad  
Gr = Gravedad

Fuente: CMZ

**Figura 5.24 Número de prioridad de riesgo**

La finalidad del FMECA es conocer la ponderación de cada factor que permite determinar el producto NPR asociado a cada modo de falla para luego poder mitigar el riesgo disminuyendo uno o más de los valores de las variables de frecuencia de fallas, detectabilidad y/o gravedad, y así poder reducir el NPR.

Los datos de frecuencias (cantidad de detenciones) y tiempos de detenciones no programadas, para los equipos críticos, fueron obtenidos del registro de CMZ entre 01-03-2012 y 30-11-2012, los cuales se muestran en la siguiente tabla N° 5.21:

**Tabla 5.21 Frecuencias y tiempos de detención no programados de los equipos críticos**

EQUIPO	COMPONENTES	FRECUENCIA DE FALLA [CANTIDAD]				TIEMPO DETENCIÓN MEDIO [HORAS]				TIEMPO DETENCIÓN TOTAL [HORAS]			
		CT-32	CT-34	CT-200	CT-201	CT-32	CT-34	CT-200	CT-201	CT-32	CT-34	CT-200	CT-201
		Motor	Barras	2	0	1	0	1,63	0,00	1,42	0,00	3,27	0,00
Motor	Desconector	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Motor	Conductores	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Motor	Estator	2	5	4	2	4,08	4,25	2,83	4,50	8,17	21,25	11,33	9,00
Motor	Rotor	4	6	3	5	5,77	5,25	4,45	5,42	23,07	31,50	13,35	27,08
Motor	Acoplamiento s	0	3	2	0	0,00	2,42	4,00	0,00	0,00	7,25	8,00	0,00
Motor	Eje	7	4	3	4	7,93	9,50	7,25	7,58	55,53	38,00	21,75	30,33
Motor	Rodamientos	3	2	5	2	7,58	6,12	6,60	7,87	22,75	12,23	33,00	15,73
Motor	Carcasa	1	2	3	1	1,08	0,58	1,27	0,90	1,08	1,17	3,80	0,90
Reductor	Acoplamiento s	2	3	5	3	1,87	2,23	1,58	2,38	3,73	6,70	7,92	7,15
Reductor	Engranés	5	3	6	4	4,37	3,83	5,45	6,17	21,83	11,50	32,70	24,67
Reductor	Eje	4	2	3	2	7,02	5,33	5,75	6,33	28,07	10,67	17,25	12,67
Reductor	Rodamientos	3	2	5	2	5,17	4,02	3,58	3,17	15,50	8,03	17,92	6,33
Reductor	Carcasa	1	0	1	2	0,58	0,00	1,25	1,00	0,58	0,00	1,25	2,00
Poleas	Rodamientos Polea Motriz	5	2	3	4	5,77	4,50	4,17	2,50	28,83	9,00	12,50	10,00
Poleas	Descansos Polea Motriz	3	1	3	2	1,42	1,13	1,23	0,87	4,25	1,13	3,70	1,73
Poleas	Revestimient o Polea Motriz	1	0	2	0	2,07	0,00	1,42	0,00	2,07	0,00	2,83	0,00
Poleas	Rodamientos Polea Retorno	1	1	3	2	2,62	3,17	3,83	2,17	2,62	3,17	11,50	4,33
Poleas	Descansos Polea Retorno	0	1	2	0	0,00	2,42	1,63	0,00	0,00	2,42	3,27	0,00
Poleas	Revestimient o Polea Retorno	0	0	2	1	0,00	0,00	1,22	1,50	0,00	0,00	2,43	1,50
Poleas	Rodamientos Polea Inflexión	3	4	0	6	3,08	3,58	0,00	2,83	9,25	14,33	0,00	17,00
Poleas	Descansos Polea Inflexión	2	1	0	3	1,08	1,33	0,00	1,50	2,17	1,33	0,00	4,50
Poleas	Revestimient o Polea Inflexión	1	1	0	0	2,43	2,20	0,00	0,00	2,43	2,20	0,00	0,00

EQUIPO	COMPONENTES	FRECUENCIA DE FALLA [CANTIDAD]				TIEMPO DETENCIÓN MEDIO [HORAS]				TIEMPO DETENCIÓN TOTAL [HORAS]			
		CT-32	CT-34	CT-200	CT-201	CT-32	CT-34	CT-200	CT-201	CT-32	CT-34	CT-200	CT-201
Polines	Rodamientos	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Polines	Descansos	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Polines	Revestimiento	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Banda	Recubrimiento	2	1	0	1	6,67	5,83	0,00	8,03	13,33	5,83	0,00	8,03
Banda	Carcasa	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Banda	Empalmes	1	1	0	2	5,43	4,40	0,00	5,08	5,43	4,40	0,00	10,17
<b>Total</b>		<b>53</b>	<b>45</b>	<b>56</b>	<b>48</b>	<b>77,65</b>	<b>72,10</b>	<b>58,93</b>	<b>69,80</b>	<b>253,9</b>	<b>192,1</b>	<b>205,9</b>	<b>193,1</b>

### 5.3.10.2 Resultados del análisis de modo, efecto y criticidad de fallas

A continuación se muestran los resultados obtenidos, al realizar el análisis de modo, efecto y criticidad de fallas, como también la estimación del número de prioridad de riesgos para cada modo de falla del equipo CT-32. Las tablas 5.22, 5.23 y 5.24 muestran los resultados para cada subsistema y componentes:

**Tabla 5.22 FMECA Subárea apilado CT-32 Subsistema Motor**

Componente	Modo de Falla	Frecuencia de Falla	Tareas Actuales	Detectabilidad	Severidad	Efectos	Gravedad					NPR
							S	C	P	M	Gr	
Barras	Perdidas Dieléctricas	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	7	3	3	1	3,4	136
	Perdidas de Resistencia de Contacto	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	7	3	3	1	3,4	136
	Aumento de Resistencia	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	10	3	3	1	4,0	160
	Sobrecarga	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	10	3	3	1	4,0	160
	Conexiones flojas	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	7	3	3	1	3,4	136
	Desbalance de Carga	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	7	3	3	1	3,4	136
Desconector	Perdidas Dieléctricas	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	7	3	5	1	4,2	168
	Perdidas de Resistencia de Contacto	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	7	3	5	1	4,2	168
	Aumento de Resistencia	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	10	3	5	1	4,8	192
	Sobrecarga	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	10	3	5	1	4,8	192
	Conexiones flojas	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	7	3	5	1	4,2	168
	Desbalance de Carga	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	7	3	5	1	4,2	168

Componente	Modo de Falla	Frecuencia de Falla	Tareas Actuales	Detectabilidad	Severidad	Efectos	Gravedad					NPR
							S	C	P	M	Gr	
Conductores	Perdidas Dieléctricas	2	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	7	3	8	1	5,4	108
	Perdidas de Resistencia de Contacto	2	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	7	3	8	1	5,4	108
	Aumento de Resistencia	2	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	10	3	8	1	6,0	120
	Sobrecarga	2	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	10	3	8	1	6,0	120
	Conexiones flojas	2	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	7	3	8	1	5,4	108
	Desbalance de Carga	2	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	7	3	8	1	5,4	108
Estator	Cortocircuitos entre espiras	4	Sin Tareas	10	4	Detención Maquina	7	3	8	1	5,4	216
	Circuito Abierto	4	Sin Tareas	10	4	Detención Maquina	10	3	8	1	6,0	240
	Desplazamiento o Distorsión	4	Sin Tareas	10	4	Detención Maquina	7	3	8	1	5,4	216
	Recalentamiento general en el conductor	4	Sin Tareas	10	4	Detención Maquina	7	3	8	1	5,4	216
	Arcos entre Devanados	4	Sin Tareas	10	4	Detención Maquina	10	3	8	1	6,0	240
	Arcos entre espiras	4	Sin Tareas	10	4	Detención Maquina	10	3	8	1	6,0	240
	Arcos entre Devanados y tierra	4	Sin Tareas	10	4	Detención Maquina	10	3	8	1	6,0	240
	Sobrecarga	4	Sin Tareas	10	4	Detención Maquina	10	3	8	1	6,0	240
	Laminaciones entre cortocircuitos	4	Sin Tareas	10	4	Detención Maquina	7	3	8	1	5,4	216
	Conexiones flojas	4	Sin Tareas	10	4	Detención Maquina	7	3	8	1	5,4	216
Rotor	Desalineamiento	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	10	1	5,4	216
	Roce rotor	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	5	1	3,4	136
	No redondo	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	5	1	3,4	136
	Barras rotas	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	7	3	10	1	6,2	248
	Espiras en cortocircuito	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	7	3	5	1	4,2	168
	Barras sueltas	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	7	3	5	1	4,2	168
	Anillos externos agrietados	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	5	1	3,4	136
	Desbalanceado	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	10	1	5,4	216
	Excéntrico	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	5	1	3,4	136
Acoplamiento	Desalineamiento	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	5	1	3,4	136
	Desbalanceo	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	5	1	3,4	136
	Soltura mecánica	4	Sin Tareas	10	2	Peligro Moderado	3	3	5	1	3,4	136
Eje	Doblado	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	5	10	1	5,8	232
	Fisura	4	Sin Tareas	10	4	Detención Maquina	3	5	10	1	5,8	232
	Desbalanceo	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	8	1	4,6	184
	Soltura mecánica	4	Sin Tareas	10	2	Peligro Moderado	3	3	3	1	2,6	104
	Desalineamiento	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	5	1	3,4	136

Componente	Modo de Falla	Frecuencia de Falla	Tareas Actuales	Detectabilidad	Severidad	Efectos	Gravedad					NPR
							S	C	P	M	Gr	
Rodamientos	Picadura o desgaste en elementos rodantes	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	5	10	1	5,8	232
	Soltura mecánica	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	5	10	1	5,8	232
	Falla pista externa	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	5	10	1	5,8	232
	Falla pista interna	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	5	10	1	5,8	232
	Falla en el canastillo	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	5	10	1	5,8	232
Carcasa	Soltura mecánica	2	Sin Tareas	10	2	Peligro Moderado	3	3	3	1	2,6	52
	Deformación	2	Sin Tareas	10	2	Peligro Moderado	3	3	3	1	2,6	52

Fuente: CMZ

**Tabla 5.23 FMECA Subárea apilado CT-32 Subsistema Reductor**

Componente	Modo de Falla	Frecuencia de Falla	Tareas Actuales	Detectabilidad	Severidad	Efectos	Gravedad					NPR
							S	C	P	M	Gr	
Acoplamiento	Desalineamiento	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	5	1	3,4	136
	Desbalanceo	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	5	1	3,4	136
	Soltura mecánica	4	Sin Tareas	10	2	Peligro Moderado	3	3	3	1	2,6	104
Engranajes	Engranajes dientes rotos, desastillados	4	Sin Tareas	10	4	Detención Maquina	3	5	10	1	5,8	232
	Desalineamiento entre engranes	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	8	1	4,6	184
	Backlash excesivo	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	8	1	4,6	184
	Engranajes excéntricos	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	8	1	4,6	184
	Engranajes dientes desgastados	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	8	1	4,6	184
Eje de entrada	Doblado	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	5	10	1	5,8	232
	Fisura	4	Sin Tareas	10	4	Detención Maquina	3	5	10	1	5,8	232
	Desbalanceo	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	8	1	4,6	184
	Soltura mecánica	4	Sin Tareas	10	2	Peligro Moderado	3	3	8	1	4,6	184
	Desalineamiento	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	8	1	4,6	184
Rodamientos	Picadura o desgaste en elementos rodantes	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	5	10	1	5,8	232
	Soltura mecánica	4	Sin Tareas	10	2	Peligro Moderado	3	3	10	1	5,4	216
	Falla pista externa	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	5	8	1	5,0	200
	Falla pista interna	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	5	8	1	5,0	200
	Falla elementos rodantes	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	5	8	1	5,0	200

Componente	Modo de Falla	Frecuencia de Falla	Tareas Actuales	Detectabilidad	Severidad	Efectos	Gravedad					NPR
							S	C	P	M	Gr	
	Falla en el canastillo	4	Sin Tareas	10	4	Detención Maquina	3	3	8	1	4,6	184
Carcasa	Soltura mecánica	2	Sin Tareas	10	2	Peligro Moderado	3	3	3	1	2,6	52
	Deformación	2	Sin Tareas	10	2	Peligro Moderado	3	3	3	1	2,6	52

Fuente: CMZ

Tabla 5.24 FMECA Subárea apilado CT-32 Subsistema Polea

Componente	Modo de Falla	Frecuencia de Falla	Tareas Actuales	Detectabilidad	Severidad	Efectos	Gravedad					NPR
							S	C	P	M	Gr	
Polea motriz	Falla en rodamiento pista externa	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	5	10	1	5,8	232
	Falla en rodamiento pista interna	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	5	10	1	5,8	232
	Falla en rodamiento en el canastillo	4	Sin Tareas	10	4	Detención Maquina	3	5	10	1	5,8	232
	Desalineamiento eje de descansos	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	5	1	3,4	136
	Desbalanceo de descansos	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	5	1	3,4	136
	Falla de ajuste de descansos	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	5	1	3,4	136
	Desgaste superficial del recubrimiento	2	Sin Tareas	10	1	Peligro Menor	3	3	5	1	3,4	68
Polea de cola	Falla en rodamiento pista externa	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	5	8	1	5,0	200
	Falla en rodamiento pista interna	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	5	8	1	5,0	200
	Falla en rodamiento en el canastillo	4	Sin Tareas	10	4	Detención Maquina	3	5	8	1	5,0	200
	Desalineamiento eje de descansos	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	5	1	3,4	136
	Desbalanceo de descansos	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	5	1	3,4	136
	Falla de ajuste de descansos	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	5	1	3,4	136
	Desgaste superficial del recubrimiento	2	Sin Tareas	10	1	Peligro Menor	3	3	5	1	3,4	68
Poleas de inflexión	Falla en rodamiento pista externa	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	5	8	1	5,0	200
	Falla en rodamiento pista interna	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	5	8	1	5,0	200
	Falla en rodamiento en el canastillo	4	Sin Tareas	10	4	Detención Maquina	3	5	8	1	5,0	200
	Desalineamiento eje de descansos	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	5	1	3,4	136
	Desbalanceo de descansos	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	5	1	3,4	136
	Falla de ajuste de descansos	4	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	3	5	1	3,4	136

Componente	Modo de Falla	Frecuencia de Falla	Tareas Actuales	Detectabilidad	Severidad	Efectos	Gravedad					NPR
							S	C	P	M	Gr	
	Desgaste superficial del recubrimiento	2	Sin Tareas	10	1	Peligro Menor	3	3	5	1	3,4	68

Fuente: CMZ

**Tabla 5.25 FMECA Subárea apilado CT-32 Subsistema Polines**

Componente	Modo de Falla	Frecuencia de Falla	Tareas Actuales	Detectabilidad	Severidad	Efectos	Gravedad					NPR
							S	C	P	M	Gr	
Polines de carga	Desgaste superficial del recubrimiento	10	Inspección	6	3	Peligro Mayor	3	8	5	1	4,4	264
	Trabamiento de rodamientos	10	Inspección	6	3	Peligro Mayor	3	8	5	1	4,4	264
Polines de retorno	Desgaste superficial del recubrimiento	10	Inspección	6	3	Peligro Mayor	3	8	5	1	4,4	264
	Trabamiento de rodamientos	10	Inspección	6	3	Peligro Mayor	3	8	5	1	4,4	264
Polines de impacto	Desgaste superficial del recubrimiento	10	Inspección	6	3	Peligro Mayor	3	8	5	1	4,4	264
	Trabamiento de rodamientos	10	Inspección	6	3	Peligro Mayor	3	8	5	1	4,4	264

Fuente: CMZ

**Tabla 5.26 FMECA Subárea apilado CT-32 Subsistema Banda**

Componente	Modo de Falla	Frecuencia de Falla	Tareas Actuales	Detectabilidad	Severidad	Efectos	Gravedad					NPR
							S	C	P	M	Gr	
Carcasa	Corte	2	Sin Tareas	10	3	Peligro Mayor	3	5	10	3	6,2	124
Recubrimiento	Desgaste	4	Sin Tareas	10	2	Peligro Moderado	3	5	5	1	3,8	152
	Corte longitudinal	4	Sin Tareas	10	4	Peligro Mayor	3	5	10	3	6,2	248
	Corte transversal	4	Sin Tareas	10	4	Peligro Mayor	3	5	10	3	6,2	248
Empalmes	Corte	4	Sin Tareas	10	4	Detención Maquina	3	5	10	3	6,2	248

Fuente: CMZ

### 5.3.11 Desarrollo del FMECA con NPR Mitigado

Una vez obtenidos los resultados del Análisis de Modo, Efecto y Criticidad de falla (FMECA) se determinó reducir el Número de Prioridad de Riesgo (NPR), disminuyendo el factor de detectabilidad, para ello se propuso la aplicación de técnicas predictivas que permiten aumentar el control de los modos de fallas con el fin de eliminarlos o reducirlos. Las técnicas a utilizar para controlar los modos y efectos de fallas son:

#### 5.3.11.1 Medidas de detección y aislación de modos de fallas

**Falla de Motor:** En general, las medidas de detección y aislación temprana de modos de fallas en rotor, rodamientos, ejes y acoplamientos se basan en medición de *vibraciones mecánicas* del motor y particularmente en la medición de corriente en el estator. (Gómez M. , 2013). Adicionalmente, para detectar y aislar los modos de fallas eléctricos en el estator, barras y conductores eléctricos se basan en la obtención de *imágenes infrarrojas o termografía*. (Equipo Minero, 2009)

**Falla de Reductor:** En general, las medidas de detección y aislación temprana de modos de fallas del reductor se basan en las mediciones de vibraciones mecánicas del reductor mediante acelerómetros. Instalando sensores de vibraciones mecánicas en la carcasa del reductor. El cual permite detectar modos de fallas en engranajes, rodamientos y ejes. (Gómez M. , 2013)

**Falla de Poleas:** En general, el método utilizado para detectar y aislar los modos de fallas de rodamientos y descansos (desgaste de rodamientos y des alineamiento de eje, entre otros) se basan en las mediciones de vibraciones mecánicas. Para aislar y detectar fallas de desgaste en los recubrimientos de las poleas se utilizan mediciones de ultrasonido, que miden los espesores de todos los elementos revestidos en goma. (Electro Industria, 2012)

**Falla de Polines:** En general, las medidas de detección y aislación temprana de modos de fallas de rodamientos de polines se basan en la obtención de imágenes infrarrojas o termografías. (Equipo Minero, 2009). Para detectar y asilar desgaste del recubrimiento se utiliza análisis de Ultrasonido.

**Falla de Banda:** En general, los esquemas de detección y aislación temprana de cortes longitudinales se sustentan en la captura de imágenes de la banda. La detección y aislación de cortes transversales se basan en métodos que capturan imágenes de rayos X de los cables de acero de la banda. (Gómez M. , 2013). La detección y aislación del desgaste de la banda se obtiene por medio de análisis de ultrasonido, al igual que en el caso de revestimiento de poleas

y polines. (Electro Industria, 2012)

Para resumir, se pueden implementar las siguientes medidas de detección de los modos de fallas en las cintas transportadoras.

- Análisis de Termografía (TG),
- Análisis de Ultrasonido (US),
- Análisis de Vibraciones Mecánicas (VM),
- Análisis de imágenes fotográficas y de rayos X.

### 5.3.11.2 Resultado de las Medidas de detección y aislación por modos de fallas

Como se aprecia en la tabla 5.27, del FMECA de la CT-32 con NPR mitigado, se reduce considerablemente el riesgo para cada modo de falla aplicando las técnicas predictivas no destructivas, en comparación a solo utilizar las técnicas preventivas y correctivas, que es lo que se realiza actualmente.

**Tabla 5.27 Subsistema Motor de CT-32 NPR Mitigado**

Componente	Modo de Falla	NPR	Acción para eliminar modo o mitigar efectos	Gravedad				Frecuencia de Falla	Detectabilidad	NPR Mitigado
				S	C	P	M			
Barras	Perdidas Dieléctricas	136	Análisis (TG)	7	3	3	1	4	3	40,8
	Perdidas de Resistencia de Contacto	136	Análisis (TG)	7	3	3	1	4	3	40,8
	Aumento de Resistencia	160	Análisis (TG)	10	3	3	1	4	3	48,0
	Sobrecarga	160	Análisis (TG)	10	3	3	1	4	3	48,0
	Conexiones flojas	136	Análisis (TG)	7	3	3	1	4	3	40,8
	Desbalance de Carga	136	Análisis (TG)	7	3	3	1	4	3	40,8
Desconector	Perdidas Dieléctricas	168	Análisis (TG)	7	3	5	1	4	3	50,4
	Perdidas de Resistencia de Contacto	168	Análisis (TG)	7	3	5	1	4	3	50,4
	Aumento de Resistencia	192	Análisis (TG)	10	3	5	1	4	3	57,6
	Sobrecarga	192	Análisis (TG)	10	3	5	1	4	3	57,6
	Conexiones flojas	168	Análisis (TG)	7	3	5	1	4	3	50,4
	Desbalance de Carga	168	Análisis (TG)	7	3	5	1	4	3	50,4

Componente	Modo de Falla	NPR	Acción para eliminar modo o mitigar efectos	Gravedad				Frecuencia de Falla	Detectabilidad	NPR Mitigado
				S	C	P	M			
Conductores	Perdidas Dieléctricas	108	Análisis (TG)	7	3	8	1	2	3	32,4
	Perdidas de Resistencia de Contacto	108	Análisis (TG)	7	3	8	1	2	3	32,4
	Aumento de Resistencia	120	Análisis (TG)	10	3	8	1	2	3	36,0
	Sobrecarga	120	Análisis (TG)	10	3	8	1	2	3	36,0
	Conexiones flojas	108	Análisis (TG)	7	3	8	1	2	3	32,4
	Desbalance de Carga	108	Análisis (TG)	7	3	8	1	2	3	32,4
Estator	Cortocircuitos entre espiras	216	Análisis (TG)	7	3	8	1	4	3	64,8
	Circuito Abierto	240	Análisis (TG)	10	3	8	1	4	3	72,0
	Desplazamiento o Distorsión	216	Análisis (TG)	7	3	8	1	4	3	64,8
	Recalentamiento general en el conductor	216	Análisis (TG)	7	3	8	1	4	3	64,8
	Arcos entre Devanados	240	Análisis (TG)	10	3	8	1	4	3	72,0
	Arcos entre espiras	240	Análisis (TG)	10	3	8	1	4	3	72,0
	Arcos entre Devanados y tierra	240	Análisis (TG)	10	3	8	1	4	3	72,0
	Sobrecarga	240	Análisis (TG)	10	3	8	1	4	3	72,0
	Laminaciones entre cortocircuitos	216	Análisis (TG)	7	3	8	1	4	3	64,8
	Conexiones flojas	216	Análisis (TG)	7	3	8	1	4	3	64,8
Rotor	Desalineamiento	216	Análisis de (VM)	3	3	10	1	4	3	64,8
	Roce rotor	136	Análisis de (VM)	3	3	5	1	4	3	40,8
	No redondo	136	Análisis de (VM)	3	3	5	1	4	3	40,8
	Barras rotas	248	Análisis de (VM)	7	3	10	1	4	3	74,4
	Espiras en cortocircuito	168	Análisis de (VM)	7	3	5	1	4	3	50,4
	Barras sueltas	168	Análisis de (VM)	7	3	5	1	4	3	50,4
	Anillos externos agrietados	136	Análisis de (VM)	3	3	5	1	4	3	40,8
	Desbalanceado	216	Análisis de (VM)	3	3	10	1	4	3	64,8
	Excéntrico	136	Análisis de (VM)	3	3	5	1	4	3	40,8
Acoplamiento	Desalineamiento	136	Análisis de (VM)	3	3	5	1	4	3	40,8
	Desbalanceo	136	Análisis de (VM)	3	3	5	1	4	3	40,8
	Soltura mecánica	136	Análisis de (VM)	3	3	5	1	4	3	40,8
Eje	Doblado	232	Análisis de (VM)	3	5	10	1	4	3	69,6

Componente	Modo de Falla	NPR	Acción para eliminar modo o mitigar efectos	Gravedad				Frecuencia de Falla	Detectabilidad	NPR Mitigado
				S	C	P	M			
	Fisura	232	Análisis de (US)	3	5	10	1	4	3	69,6
	Desbalanceo	184	Análisis de (VM)	3	3	8	1	4	3	55,2
	Soltura mecánica	104	Análisis de (VM)	3	3	3	1	4	3	31,2
	Desalineamiento	136	Análisis de (VM)	3	3	5	1	4	3	40,8
Rodamientos	Picadura o desgaste en elementos rodantes	232	Análisis de (VM)	3	5	10	1	4	3	69,6
	Soltura mecánica	232	Análisis de (VM)	3	5	10	1	4	3	69,6
	Falla pista externa	232	Análisis de (VM)	3	5	10	1	4	3	69,6
	Falla pista interna	232	Análisis de (VM)	3	5	10	1	4	3	69,6
	Falla en el canastillo	232	Análisis de (VM)	3	5	10	1	4	3	69,6
Carcasa	Soltura mecánica	52	Análisis de (VM)	3	3	3	1	2	3	15,6
	Deformación	52	Análisis de (VM)	3	3	3	1	2	3	15,6

Fuente: CMZ

La tabla 5.28 muestra el análisis de modo, efecto y criticidad de falla (FMECA) con el número de prioridad de riesgo (NPR) mitigado para el sub-sistema reductor de la CT-32.

**Tabla 5.28 Sub-sistema Reductor de CT-32 NPR Mitigado**

Componente	Modo de Falla	NPR	Acción para eliminar modo o mitigar efectos	Gravedad				Frecuencia de Falla	Detectabilidad	NPR Mitigado
				S	C	P	M			
Acoplamiento	Desalineamiento	136	Análisis de (VM)	3	3	5	1	4	3	40,8
	Desbalanceo	136	Análisis de (VM)	3	3	5	1	4	3	40,8
	Soltura mecánica	104	Análisis de (VM)	3	3	3	1	4	3	31,2
Engranajes	Engranajes dientes rotos, desastillados	232	Análisis de (VM)	3	5	10	1	4	3	69,6
	Desalineamiento entre engranes	184	Análisis de (VM)	3	3	8	1	4	3	55,2
	Backlash excesivo	184	Análisis de (VM)	3	3	8	1	4	3	55,2
	Engranajes excéntricos	184	Análisis de (VM)	3	3	8	1	4	3	55,2
	Engranajes dientes desgastados	184	Análisis de (VM)	3	3	8	1	4	3	55,2

Componente	Modo de Falla	NPR	Acción para eliminar modo o mitigar efectos	Gravedad				Frecuencia de Falla	Detectabilidad	NPR Mitigado
				S	C	P	M			
Eje de entrada	Doblado	232	Análisis de (VM)	3	5	10	1	4	3	69,6
	Fisura	232	Análisis de (VM)	3	5	10	1	4	3	69,6
	Desbalanceo	184	Análisis de (VM)	3	3	8	1	4	3	55,2
	Soltura mecánica	184	Análisis de (VM)	3	3	8	1	4	3	55,2
	Desalineamiento	184	Análisis de (VM)	3	3	8	1	4	3	55,2
Rodamientos	Picadura o desgaste en elementos rodantes	232	Análisis de (VM)	3	5	10	1	4	3	69,6
	Soltura mecánica	216	Análisis de (VM)	3	3	10	1	4	3	64,8
	Falla pista externa	200	Análisis de (VM)	3	5	8	1	4	3	60,0
	Falla pista interna	200	Análisis de (VM)	3	5	8	1	4	3	60,0
	Falla elementos rodantes	200	Análisis de (VM)	3	5	8	1	4	3	60,0
	Falla en el canastillo	184	Análisis de (VM)	3	3	8	1	4	3	55,2
Carcasa	Soltura mecánica	52	Análisis de (VM)	3	3	3	1	2	3	15,6
	Deformación	52	Análisis de (VM)	3	3	3	1	2	3	15,6

Fuente: CMZ

La tabla 5.29 muestra el análisis de modo, efecto y criticidad de falla (FMECA) con el número de prioridad de riesgo (NPR) mitigado para el subsistema polea de la CT-32.

**Tabla 5.29 Sub-sistema Polea de CT-32 NPR Mitigado**

Componente	Modo de Falla	NPR	Acción para eliminar modo o mitigar efectos	Gravedad				Frecuencia de Falla	Detectabilidad	NPR Mitigado
				S	C	P	M			
Polea motriz	Falla en rodamiento pista externa	232	Análisis de (VM)	3	5	10	1	4	3	69,6
	Falla en rodamiento pista interna	232	Análisis de (VM)	3	5	10	1	4	3	69,6
	Falla en rodamiento en el canastillo	232	Análisis de (VM)	3	5	10	1	4	3	69,6
	Desalineamiento eje de descansos	136	Análisis de (VM)	3	3	5	1	4	3	40,8
	Desbalanceo de descansos	136	Análisis de (VM)	3	3	5	1	4	3	40,8
	Falla de ajuste de descansos	136	Análisis de (VM)	3	3	5	1	4	3	40,8

Componente	Modo de Falla	NPR	Acción para eliminar modo o mitigar efectos	Gravedad				Frecuencia de Falla	Detectabilidad	NPR Mitigado
				S	C	P	M			
	Desgaste superficial del recubrimiento	68	Análisis de (US)	3	3	5	1	2	3	20,4
Polea de cola	Falla en rodamiento pista externa	200	Análisis de (VM)	3	5	8	1	4	3	60,0
	Falla en rodamiento pista interna	200	Análisis de (VM)	3	5	8	1	4	3	60,0
	Falla en rodamiento en el canastillo	200	Análisis de (VM)	3	5	8	1	4	3	60,0
	Desalineamiento eje de descansos	136	Análisis de (VM)	3	3	5	1	4	3	40,8
	Desbalanceo de descansos	136	Análisis de (VM)	3	3	5	1	4	3	40,8
	Falla de ajuste de descansos	136	Análisis de (VM)	3	3	5	1	4	3	40,8
	Desgaste superficial del recubrimiento	68	Análisis de (US)	3	3	5	1	2	3	20,4
Poleas de inflexión	Falla en rodamiento pista externa	200	Análisis de (VM)	3	5	8	1	4	3	60,0
	Falla en rodamiento pista interna	200	Análisis de (VM)	3	5	8	1	4	3	60,0
	Falla en rodamiento en el canastillo	200	Análisis de (VM)	3	5	8	1	4	3	60,0
	Desalineamiento eje de descansos	136	Análisis de (VM)	3	3	5	1	4	3	40,8
	Desbalanceo de descansos	136	Análisis de (VM)	3	3	5	1	4	3	40,8
	Falla de ajuste de descansos	136	Análisis de (VM)	3	3	5	1	4	3	40,8
	Desgaste superficial del recubrimiento	68	Análisis de (US)	3	3	5	1	2	3	20,4

Fuente: CMZ

La tabla 5.30 muestra el análisis de modo, efecto y criticidad de falla (FMECA) con el número de prioridad de riesgo (NPR) mitigado para el subsistema polines de la CT-32.

**Tabla 5.30 Sub-sistema Polines de CT-32 NPR Mitigado**

Componente	Modo de Falla	NPR	Acción para eliminar modo o mitigar efectos	Gravedad				Frecuencia de Falla	Detectabilidad	NPR Mitigado
				S	C	P	M			
Polines de carga	Desgaste superficial del recubrimiento	264	Análisis de (US)	3	8	5	1	10	3	132,0
	Trabamiento de rodamientos	264	Análisis (TG)	3	8	5	1	10	3	132,0
Polines de retorno	Desgaste superficial del recubrimiento	264	Análisis de (US)	3	8	5	1	10	3	132,0
	Trabamiento de rodamientos	264	Análisis (TG)	3	8	5	1	10	3	132,0
Polines de impacto	Desgaste superficial del recubrimiento	264	Análisis de (US)	3	8	5	1	10	3	132,0
	Trabamiento de rodamientos	264	Análisis (TG)	3	8	5	1	10	3	132,0

Fuente: CMZ

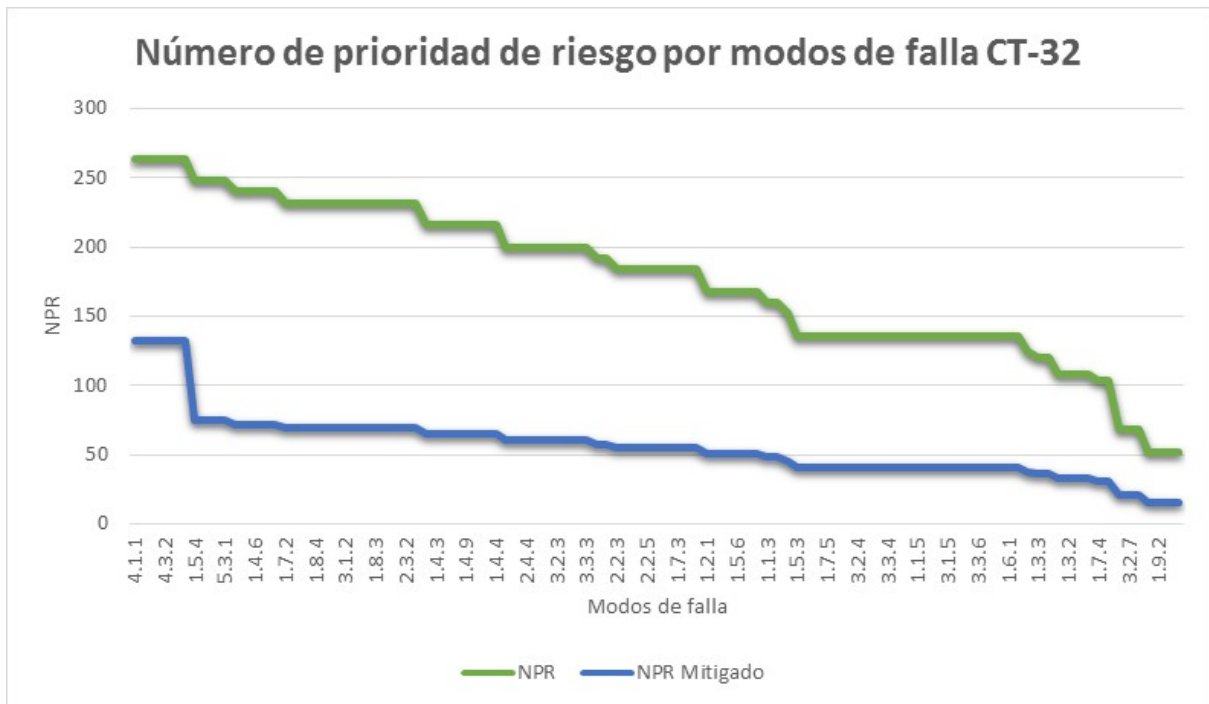
La tabla 5.31 muestra el análisis de modo, efecto y criticidad de falla (FMECA) con el número de prioridad de riesgo (NPR) mitigado para el subsistema banda de la CT-32.

**Tabla 5.31 Sub-sistema Banda de CT-32 NPR Mitigado**

Componente	Modo de Falla	NPR	Acción para eliminar modo o mitigar efectos	Gravedad				Frecuencia de Falla	Detectabilidad	NPR Mitigado
				S	C	P	M			
<b>Carcasa</b>	Corte	124	Análisis (TG)	3	5	10	3	2	3	37,2
<b>Recubrimiento</b>	Desgaste	152	Análisis de (US)	3	5	5	1	4	3	45,6
	Corte longitudinal	248	Análisis Imágenes	3	5	10	3	4	3	74,4
	Corte transversal	248	Análisis Imagen Rayos X	3	5	10	3	4	3	74,4
<b>Empalmes</b>	Corte	248	Análisis Imagen Rayos X	3	5	10	3	4	3	74,4

Fuente: CMZ

En la figura N° 5.25 se observa una comparación entre el NPR de la situación actual y el NPR para la situación propuesta de aumentar la detectabilidad de modos de fallos en la CT-32:



**Figura 5.25 Comparación entre NPR actual y el NPR mitigado**

El número de prioridad de riesgo para la mayoría de los modos de fallos, considerando la situación actual, supera considerablemente el nivel de riesgo de 100 puntos, obteniendo un máximo de 264 puntos para los modos de fallas de polines, debido prácticamente a la alta cantidad de polines que existen y por ende en la alta frecuencia de falla. En el caso de falla de polines, el área de mantenimiento realiza inspecciones preventivas y en caso de encontrar fallas, se reemplazan mediante una programación, por lo que no afecta a las detenciones no programadas. Sin embargo, se propone adicionar un mantenimiento predictivo, mediante análisis de imágenes infrarrojas y ultrasonido, para controlar la gran cantidad de polines instalados y conocer el funcionamiento de estos, ya que se podría escoger trabajar con el proveedor del tipo de polines que entregue mejor desempeño en cuanto a las temperaturas de operación cuando la cinta transportadora funcione normalmente.

Con el aumento de la detectabilidad en el resto de los modos de fallas, su nivel de riesgo disminuye a un número inferior a 100. Por lo tanto, al reducir el riesgo de fallas en los componentes de los equipos más críticos del área seca, se aumenta: la disponibilidad de la planta, la producción, la productividad, se mejora la confiabilidad; se disminuyen costos asociados a paradas no programadas y pérdida de producción para toda la mina, debido a que la línea de producción del subárea de apilado está dispuesta en serie, una detención de cualquier cinta del sector implica una parada general del proceso productivo de la mina.

Para aplicar las técnicas predictivas se requiere tener una unidad predictiva, en la figura 5.26 se observa el ciclo predictivo que se recomienda implementar.



**Figura 5.26** Ciclo predictivo

## 5.4 Indicadores de gestión de mantenimiento propuestos

Los indicadores de mantenimientos propuestos enfocados a monitorear la evolución de las mejoras propuestas a través del modelo de gestión de mantenimiento centrado en confiabilidad, son los siguientes:

<b>Indicador:</b> Tiempo promedio para reparar	<b>Sigla:</b> MTTR (horas)
<b>Mide:</b> La efectividad en restituir un equipo a condiciones óptimas, durante un periodo determinado.	
<b>Fórmula:</b>	
$MTTR = \frac{\textit{Tiempo total de reparacion de l aunidad}}{\textit{Número de reparaciones indicadas}}$	

<b>Indicador:</b> Tiempo promedio entre fallas	<b>Sigla:</b> MTBF (horas)
<b>Mide:</b> La seguridad que un equipo funcione correctamente durante un tiempo hasta la llegada del evento falla.	
<b>Fórmula:</b>	
$MTBF = \frac{\textit{Tiempo total de operación}}{\textit{Número de fal las}}$	

<b>Indicador:</b> Disponibilidad	<b>Sigla:</b> D (%)
<b>Mide:</b> La proporción de tiempo total que un equipo o sistema está apto para cumplir su función.	
<b>Fórmula:</b>	
$D(t) = \frac{\sum \textit{tiempos disponibl espara l aproducción}}{\sum \textit{tiempos disponibl espara l aproducción} + \sum \textit{tiempos en mantenimiento}}$	
$D(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$	

## 5.5 Análisis del beneficio económico de la implementación de RCM

En esta sección, se realiza una evaluación del beneficio económico que resultaría de aplicar un mantenimiento centrado en confiabilidad, a los cuatro equipos categorizados como críticos conforme a los resultados del análisis de criticidad.

Para ello se considera la disponibilidad actual de cada equipo crítico y la disponibilidad total del sub área de apilado, al cual pertenecen los equipos.

Se contempla una evaluación de la nueva disponibilidad para tres escenarios posibles a implementar en la gestión de mantenimiento, realizando la evaluación económica a la alternativa que resulte en la mayor disponibilidad posible, los escenarios a analizar son los siguientes:

Escenario N° 1: Aumentar en un 30% el tiempo medio entre fallas (MTBF)

Escenario N° 2: Disminuir en un 30% el tiempo medio para reparar (MTTR)

Escenario N° 3: Simultáneamente aumentar en un 30% el MTBF y disminuir en un 30% el MTTR.

La disponibilidad actual para la sub área de apilado es de un 87,58%, la que resulta de multiplicar las disponibilidades de cada equipo que compone el sub área, debido a que estos equipos están instalados según una configuración en serie. La estimación de la disponibilidad individual para cada equipo es la siguiente:

Disponibilidad CT-200: 96,82%

Disponibilidad CT-32: 96,08%

Disponibilidad CT-201: 97,02%

Disponibilidad CT-34: 97,04%

Los datos para calcular la disponibilidad del sub área de apilado se muestra en la siguiente tabla N° 5.32:

**Tabla 5.32 Datos para estimar la disponibilidad equipos críticos del sub área de apilado**

Sistema	Periodo de operación [Horas]	Tiempo de detención [Horas]	Cantidad de Fallas	MTTR [Horas]	MTBF [Horas]	Disponibilidad
CT-200	6.480	205,92	56	3,68	112,04	96,82%
CT-32	6.480	253,97	53	4,79	117,47	96,08%
CT-201	6.480	193,13	48	4,02	130,98	97,02%
CT-34	6.480	192,12	45	4,27	139,73	97,04%

**Resultados al simular el escenario N° 1**

Debido al aumento de un 30% en MTBF, la nueva disponibilidad estimada para el sub área de apilado es de un 90,27%, lo que representa un aumento de un 2,69% en la disponibilidad del sub sistema respecto a la situación actual.

La siguiente tabla N° 5.33 muestra los resultados de la disponibilidad individual para cada equipo crítico del sub área de apilado, considerando el aumento en el MTBF.

**Tabla 5.33 Disponibilidad equipos críticos del sub área de apilado aumentando el MTBF**

Sistema	Disponibilidad actual	MTTR [Horas]	MTBF con Aumento de 30% [Horas]	Nueva disponibilidad
CT-200	96,82%	3,68	145,65	97,54%
CT-32	96,08%	4,79	152,71	96,96%
CT-201	97,02%	4,02	170,27	97,69%
CT-34	97,04%	4,27	181,65	97,70%

### Resultados al simular el escenario N° 2

Debido a una disminución de un 30% en MTTR, la nueva disponibilidad estimada para el sub área de apilado es de un 91,09%, lo que representa un aumento de un 3,51% en la disponibilidad del sub sistema respecto a la situación actual.

La siguiente tabla N° 5.34 muestra los resultados de la disponibilidad individual para cada equipo crítico del sub área de apilado, considerando la disminución en el MTTR.

**Tabla 5.34 Disponibilidad equipos críticos del sub área de apilado disminuyendo el MTTR**

Sistema	Disponibilidad actual	MTTR con Disminución de 30% [Horas]	MTBF [Horas]	Nueva disponibilidad
CT-200	96,82%	2,57	112,04	97,75%
CT-32	96,08%	3,35	117,47	97,22%
CT-201	97,02%	2,82	130,98	97,89%
CT-34	97,04%	2,99	139,73	97,91%

### Resultados al simular el escenario N° 3

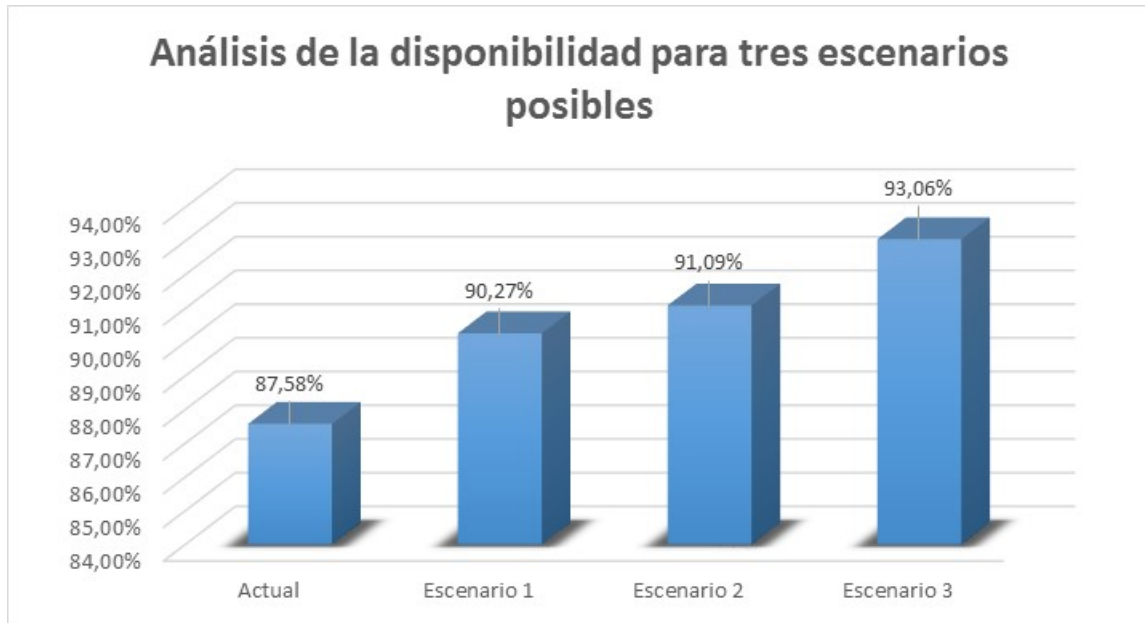
Considerando la simulación del escenario 3, se estima una nueva disponibilidad de un 93,06% para el subsistema de apilado, lo cual equivale a un aumento de un 5,48% en la disponibilidad del sub área de apilado respecto a la situación actual.

La siguiente tabla N° 5.35 muestra los resultados de la disponibilidad individual para cada equipo crítico del sub área de apilado, considerando la simulación de aumentar el MTBF y la disminución en el MTTR simultáneamente.

**Tabla 5.35 Disponibilidad equipos críticos del sub área de apilado aumentando el MTBF y disminuyendo el MTTR**

Sistema	Disponibilidad actual	MTTR con Disminución de 30% [Horas]	MTBF con Aumento de 30% [Horas]	Nueva disponibilidad
CT-200	96,82%	2,57	145,65	98,26%
CT-32	96,08%	3,35	152,71	97,85%
CT-201	97,02%	2,82	170,27	98,37%
CT-34	97,04%	2,99	181,65	98,38%

La figura N° 5.27 se representa la comparación entre la disponibilidad actual y la simulación de los tres escenarios propuestos para la gestión del mantenimiento.



**Figura 5.27 Comparación entre la disponibilidad actual y alternativas de mejoras para los equipos críticos del sub área de apilado**

El impacto en la disponibilidad de aplicar el escenario N° 1 o el escenario N° 2 es prácticamente el mismo.

Sin embargo, la evaluación del escenario que resulta con la disponibilidad más alta corresponde al escenario N° 3. Por lo tanto, la evaluación del beneficio económico considerará aumentar y disminuir simultáneamente los MTBF y MTTR.

### 5.5.1 Consecuencia económica

El siguiente análisis económico solo considera el beneficio al mejorar la disponibilidad en los equipos críticos del sub área de apilado. El análisis no considera la disponibilidad de la totalidad de áreas que componen el sistema de producción de la empresa en estudio, por lo que esta se asume constante.

La producción total de la empresa en el año 2012 fue de 289.026.026 Libras de cobre fino. (Barrick Gold Corporation, 2012)

El precio promedio realizado de venta de cobre en el año 2012, de la empresa en estudio, fue de 3,57 US\$ por libra de cobre fino. (Barrick Gold Corporation, 2012). Sin embargo, el precio promedio de venta para el año 2012, en el mercado internacional, fue de 3,61 US\$ por libra de cobre fino, según la Bolsa de Metales de Londres (LME). (COCHILCO, 2012)

#### Situación actual

Producción Anual:	289.026.026 Libras de cobre fino año 2012
Disponibilidad:	87,58%
Producción diaria:	904.157 Libras de cobre por día de producción en 2012

#### Nueva situación

Disponibilidad:	93,06%
Tiempo de operación:	339,65 días por año
Producción:	307.100.670 Libras de cobre fino por año
Aumento en la producción:	18.074.645 Libras de cobre fino por año
Precio de venta promedio:	3,57 USD por libra de cobre fino anual 2012
Valor venta adicional:	64.526.481 US\$ por año
Contribución:	35%

Aumento de la contribución: 22.584.268 US\$ por año

Considerando la propuesta de mantenimiento de aumentar el MTBF en un 30% y disminuir simultáneamente el MTTR en un 30%, para los equipos críticos, se puede observar lo siguiente:

- Debido al aumento estimado de la disponibilidad en cerca de un 5,48%, se estima un aumento en el nivel de producción anual, de aproximadamente 18 Millones de libras de cobre fino al año. Alcanzando un total de producción anual de 307,1 Millones de libras de cobre fino.
- El aumento en la disponibilidad causa un impacto en el total de ventas anuales, el cual aumenta en un 6,25%, lo que puede representar ingresos adicionales por ventas del orden de U\$64 Millones al año.
- Así mismo, considerando un margen de contribución de 35%, el aumento en las utilidades podría alcanzar el orden de U\$22,5 Millones por año.
- Queda demostrado que una mejora de la disponibilidad de los equipos puede traer consecuencias económicas favorables a las empresas, ya que aumenta considerablemente las utilidades.

# CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 6.1 Conclusiones

El método establecido que sirvió de instrumento para la búsqueda y evaluación de escenarios que pueden representar un impacto adverso en los procesos, sistemas y equipos de la planta industrial en estudio, se basó en un análisis de criticidad, que consiste en la obtención de datos cuantitativos y cualitativos relacionados con criterios de: frecuencias de fallas, tiempos medios para reparar, impacto en la producción, costo de reparación, impacto en la seguridad personal e impacto ambiental. En el cual, cada criterio presenta una serie de parámetros con una ponderación diferente y, por medio de una ecuación matemática, se obtiene el nivel de riesgo para cada sistema o equipo de la planta.

La identificación de los escenarios de mayores riesgos se realizó por medio del método de análisis de criticidad, el cual se aplicó a un conjunto de 39 sistemas o equipos pertenecientes a 3 sub áreas de la planta en estudio, estas áreas son las siguientes: sub área del chancado primario, sub área del chancado terciario y sub área de apilado. Los resultados del análisis de criticidad identificaron 4 sistemas de alto riesgo, los cuales pertenecen a la sub área de apilado, estos sistemas son: cinta transportadora CT-200, cinta transportadora CT-32, cinta transportadora CT-201 y cinta transportadora CT-34. Adicionalmente, debido a que la línea de producción del sub área de apilado está dispuesta en serie, una detención de cualquier cinta del sector, implica una parada general del proceso productivo de la mina, lo que revela la importancia del mantenimiento que necesitan los sistemas y equipos, de las cintas transportadoras resultantes del análisis de criticidad realizado.

El planteamiento de soluciones a los problemas de alto riesgo se logró mediante un análisis de modos, efectos y criticidad de fallas para las cintas transportadoras. Permitiendo encontrar modos de fallas en los componentes del motor eléctrico, reductor, poleas, polines y banda. En esta etapa también se evaluó el riesgo de los modos de falla identificados, mediante la estimación de un número de prioridad de riesgo para cada modo de falla de las cintas transportadoras, obteniendo como resultado que los mayores riesgos se encuentran en los modos de fallas de polines, motor y banda. Las soluciones planteadas para mitigar el riesgo consisten en realizar análisis de imágenes infrarrojas o termografía, análisis de ultrasonido, análisis de vibraciones mecánicas, análisis de imágenes fotográficas y de imágenes de rayos X, por lo que el sistema de mantenimiento propuesto se enfoca en detectar la ocurrencia de fallas mediante análisis predictivos, a los equipos con alta criticidad. Estas medidas preventivas, logran disminuir el riesgo de los modos de falla a niveles inferiores a 100 puntos en comparación con

la situación actual, donde el número de prioridad de riesgo supera los 150 puntos para el 70% de los modos de falla, llegando a un máximo de 264 puntos. Por lo tanto, al reducir el riesgo de fallas en los componentes de los equipos más críticos del área en estudio, se aumenta la disponibilidad de la planta, la producción, la productividad, se mejora la confiabilidad; se disminuyen costos asociados a paradas no programadas y pérdida de producción para toda la mina.

Se logra establecer indicadores de gestión de mantenimiento orientados a monitorear la evolución del modelo de mantenimiento propuesto, y estos corresponden a: disponibilidad, tiempos medios entre fallas (MTBF) y tiempos medios de reparación (MTTR) para el sub área de apilado, los cuales se pueden implementar en las demás áreas de la planta.

La evaluación del beneficio económico para el sistema de mantenimiento propuesto, se logró realizar mediante una simulación de la disponibilidad para tres escenarios posibles, que se lograría aplicando el modelo de mantenimiento centrado en confiabilidad, seleccionado aquel que entregó la mayor disponibilidad para los sistemas del sub área de apilado. Este consistió en evaluar la nueva producción que se lograría realizar considerando un aumento de un 30% en los tiempos medios entre falla (MTBF) y disminución simultanea de un 30% en los tiempos medios para reparar (MTTR). Con ello se logra aumentar la disponibilidad anual en un 5,48%, lo que implicaría un aumento en la producción de 18 millones de libras de cobre fino. De esta forma el nivel de venta podría aumentar en un 6,25%, equivalentes a ingresos adicionales por ventas del orden de US\$64 millones anuales. Por último, considerando un margen de contribución de un 35%, el aumento en las utilidades podría alcanzar a los US\$ 22,5 millones anuales. Quedando demostrado que una mejora en la disponibilidad de los equipos, puede traer consecuencias económicas favorables a las empresas, ya que aumentan considerablemente las utilidades.

## 6.2 Recomendaciones

- Se recomienda definir una estandarización en los procedimientos de mantenimiento por parte de los supervisores, ingenieros y operadores con respeto a evitar confusiones en los registros que se traduce en generar un diagnóstico certero, lo que dificulta la planificación, y sus correspondientes decisiones.
- Es necesario incrementar el número de personas encargadas de realizar actividades de mantenimiento, como también una mejor capacitación, con lo cual se lograrían respuestas más rápidas ante posibles eventualidades y una mejor y más eficiente mantención de los equipos e instalaciones de la empresa.
- Realizar reuniones periódicas entre el equipo de mantenimiento, supervisores, ingenieros, operarios y Jefe de Mantenimiento, con el fin de realizar un intercambio de ideas, en búsqueda de una mejora en la operación de los equipos sujetos a análisis.
- La empresa deberá invertir en la generación de un nuevo cargo dentro del organigrama de la empresa, el cual estará encargado exclusivamente del manejo y mantención de datos e información generada por el sistema de información, que aseguren un adecuado e eficiente funcionamiento de los sistemas de administración y un contacto coordinado en el equipo de mantenimiento del Área Seca , con lo cual se pretende identificar las fallas y posibles oportunidades de mejora y con ello incrementar los niveles de productividad de la empresa.
- Se recomienda replicar este estudio o uno de similares características, a las otras áreas de la empresa, especialmente a equipos con una alta carga de trabajo, dado que al ser un sistema de producción en línea, cualquier fallo presentado podría llegar a presentar repercusiones en el equipo que lo sucede, deteniendo por completo a la línea de producción.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar-Otero, J., Torres-Arcique, R., & Magaña-Jiménez, D. (2010). Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 25(1), 15-26. Recuperado el 1 de Septiembre de 2014, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48215094003>
- Ariza, A. (2008). *Aplicación de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) a equipos de minería a cielo abierto tomando como piloto la flota de taladros de voladura*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Obtenido de <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/5772/2/125498.pdf>
- Arques, J. (2009). *Ingeniería y gestión del mantenimiento en el sector ferroviario*. Madrid: Díaz de Santos.
- Barrick Gold Corporation. (2011). *Bienvenidos a Zaldívar Barrick Chile*. Obtenido de Información general: <http://barricklatam.com/zaldivar/>
- Barrick Gold Corporation. (2011). *Memoria Anual 2011*. Obtenido de Publicaciones: <http://barricklatam.com/memorias/barrick/2012-08-16/161803.html>
- Barrick Gold Corporation. (2012). *Manual Sistema de Gestión Ambiental*. Obtenido de <http://barricklatam.com/barrick/site/artic/20120710/asocfile/20120710131553/pambiental.pdf>
- Barrick Gold Corporation. (2012). *Memoria Anual 2012*. Obtenido de Publicaciones: <http://barricklatam.com/memorias/barrick/2012-08-16/161803.html>
- Barrick Gold Corporation. (23 de Junio de 2014). *Zaldívar Información General*. Obtenido de Proceso de producción: <http://barricklatam.com/proceso-de-produccion/barrick/2014-06-23/183553.html>
- COCHILCO. (2012). *Informe precio de los metales*. Obtenido de Anual: [http://www.cochilco.cl/estadisticas/grafico.asp?tipo\\_metal=1](http://www.cochilco.cl/estadisticas/grafico.asp?tipo_metal=1)
- COCHILCO. (2012). *Principales compañías mineras de cobre en Chile*. Obtenido de <http://www.cochilco.cl/atencion/guia-princ.asp>
- Codelco Educa. (15 de Diciembre de 2014). *Equipos de transporte*. Obtenido de [https://www.codelcoeduca.cl/procesos\\_productivos/escolares\\_extraccion\\_equipos\\_asociadostransporte.asp](https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/escolares_extraccion_equipos_asociadostransporte.asp)
- Duran, J. (10 de Octubre de 2011). *Confiabilidad.net*. Recuperado el 15 de Marzo de 2014, de La cultura de confiabilidad: <http://confiabilidad.net/articulos/caso-de-estudio-aplicacion-del-rcm-en-una-mina-de-cobre/>
- Electro Industria. (Marzo de 2012). *La radiografía digital: Herramientas para el mantenimiento de las correas transportadoras*. Obtenido de <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1797&srch=ultrasonido&act=4&tip=7>

- Equipo Minero. (29 de Septiembre de 2009). *Uso de Imagen Infrarroja (IR) para Diagnosticar Problemas en Transportadores y Chancadores*. Obtenido de [http://www.equipo-minero.com/contenidos/1115-uso-de-imagen-infrarroja-ir-para-diagnosticar-problemas-en-transportadores-y-chancadores-54138180.html#.VfCSYRF\\_Oko](http://www.equipo-minero.com/contenidos/1115-uso-de-imagen-infrarroja-ir-para-diagnosticar-problemas-en-transportadores-y-chancadores-54138180.html#.VfCSYRF_Oko)
- Espinosa, F. (2010). *Confiabilidad operacional de equipos: metodologías y herramientas*. Universidad de Talca. Talca: Universidad de Talca. Obtenido de <http://campuscurico.otalca.cl/~fespinos/>
- García, O. (1 de Junio de 2005). *El análisis cuaza raíz, estrategia de confiabilidad operacional*. Obtenido de Maestria en gerencia de mantenimiento: <http://equiposrotativos.galeon.com/Analisis.pdf>
- Gardella, M. (2006). *Mejora de metodología RCM a partir del AMFEC e implantación de mantenimiento preventivo y predictivo en plantas de procesos*. Valencia: Universidad politécnica de Valencia. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/9686/tesisUPV3387.pdf>
- Gómez, F. (1998). *Tecnología del mantenimiento industrial*. Murcia, España: Universidad de Murcia.
- Gómez, M. (2013). *Análisis de fallas en maquinaria minera*. Memoria para optar al título de ingeniero civil electricista, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Santiago.
- Huerta, R. (Septiembre de 2001). El análisis de criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional. *Club de mantenimiento*(6), 12-17.
- Mantenimiento mundial. (2012). *Problemas cotidiano en la gestión de mantenimiento*. Obtenido de <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/encuestas/problemas.asp>
- Mesa, D., Ortiz, Y., & Pinzón, M. (Mayo de 2006). La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento. *Scientia et Technica Año XII*(30), 155-160.
- Ministerio de minería. (1967). *Ley Chile*. Obtenido de Ley 16.624 de 1967: <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=28585&idVersion=1967-05-15>
- Moubray, J. (2004). *RCM Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*. Asheville, Estados Unidos: Aladon LLC.
- Pistarelli, A. (2010). *Manual de mantenimiento ingeniería, gestión y organización*. Buenos Aires.
- Rojas, R. (2010). *Plan para la implementación del mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) para plantas de concreto en proyectos del ICE*. Proyecto de graduación, Universidad para la cooperación internacional, San José. Obtenido de <http://www.uci.ac.cr/Biblioteca/Tesis/PFGMAP766.pdf>

## ANEXOS

### APÉNDICE A

#### A.1 Encuestas de Criticidad a Personal CMZ

En el presente anexo se presentan las tablas de encuestas efectuadas a personal de CMZ con el propósito de efectuar un análisis de criticidad tendiente a determinar cuáles son los equipos más críticos del Área Seca de la compañía.

**Tabla A1. Encuesta de criticidad chancador 1rio**

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)								
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CH-1rio					
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL	
			Impacto	N° de fallas				
Administrador de contratos CMZ	3	4	0,8	28	5	5	5	
Ingeniero de producción	3	4	0,8	28	5	5	5	
Ingeniero planificador	3	4	0,8	28	5	5	5	
Jefe Mantenimiento mecánico	3	4	0,8	28	5	5	5	
Jefe Operaciones	3	4	0,8	28	10	5	10	
Mecánico clase A	3	4	0,8	28	10	5	5	
Mecánico clase B	3	4	0,8	28	5	5	10	
Operario 1	3	4	0,8	28	5	5	5	
Operario 2	3	4	0,8	28	10	5	5	
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>3,00</b>	<b>4,00</b>	<b>22,40</b>		<b>6,67</b>	<b>5,00</b>	<b>6,11</b>	<b>322,13</b>

**Tabla A2. Encuesta de criticidad chancador 2rio**

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)								
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CH-2rio					
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL	
			Impacto	N° de fallas				
Administrador de contratos CMZ	4	3	0,8	31	5	5	5	
Ingeniero de producción	4	3	0,8	31	5	5	5	
Ingeniero planificador	4	3	0,8	31	5	5	5	
Jefe Mantenimiento mecánico	4	3	0,8	31	10	5	10	
Jefe Operaciones	4	3	0,8	31	10	5	10	
Mecánico clase A	4	3	0,5	31	10	5	5	
Mecánico clase B	4	3	0,5	31	5	5	10	
Operario 1	4	3	0,5	31	5	5	5	
Operario 2	4	3	0,5	31	10	5	5	
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>4,00</b>	<b>3,00</b>	<b>20,67</b>		<b>7,22</b>	<b>5,00</b>	<b>6,67</b>	<b>323,56</b>

Tabla A3. Encuesta de criticidad chancador 3rio

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CH-3rio				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL
			Impacto	N° de fallas			
Administrador de contratos CMZ	4	3	0,8	32	5	5	5
Ingeniero de producción	4	3	0,8	32	5	5	10
Ingeniero planificador	4	3	0,8	32	5	5	5
Jefe Mantenimiento mecánico	4	3	0,8	32	10	5	10
Jefe Operaciones	4	3	0,8	32	10	5	10
Mecánico clase A	4	3	0,5	32	10	5	5
Mecánico clase B	4	3	0,5	32	5	5	10
Operario 1	4	3	0,5	32	5	5	10
Operario 2	4	3	0,5	32	10	5	5
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>4,00</b>	<b>3,00</b>	<b>21,33</b>		<b>7,22</b>	<b>5,00</b>	<b>7,78</b>

CRITICIDAD  
(Frecuencia de Falla  
x Consecuencia)  
336,00

Tabla A4. Encuesta de criticidad equipo pica-roca

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS PICA-ROCA				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL
			Impacto	N° de fallas			
Administrador de contratos CMZ	1	2	0,3	1	3	5	5
Ingeniero de producción	1	2	0,3	1	3	5	10
Ingeniero planificador	1	2	0,3	1	3	5	5
Jefe Mantenimiento mecánico	1	2	0,3	1	3	5	10
Jefe Operaciones	1	2	0,3	1	3	5	10
Mecánico clase A	1	2	0,3	1	3	5	5
Mecánico clase B	1	2	0,3	1	3	5	10
Operario 1	1	2	0,3	1	3	5	10
Operario 2	1	2	0,3	1	3	5	5
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>1,00</b>	<b>2,00</b>	<b>0,30</b>		<b>3,00</b>	<b>5,00</b>	<b>7,78</b>

CRITICIDAD  
(Frecuencia de Falla  
x Consecuencia)  
16,38

Tabla A5. Encuesta de criticidad equipo apron feder

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS APRON FEEDER				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL
			Impacto	N° de fallas			
Administrador de contratos CMZ	2	2	0,8	5	5	5	5
Ingeniero de producción	2	2	0,8	5	5	5	10
Ingeniero planificador	2	2	0,8	5	5	5	5
Jefe Mantenimiento mecánico	2	2	0,8	5	5	5	5
Jefe Operaciones	2	2	0,8	5	3	5	5
Mecánico clase A	2	2	0,8	5	3	5	5
Mecánico clase B	2	2	0,8	5	3	5	10
Operario 1	2	2	0,8	5	3	5	10
Operario 2	2	2	0,8	5	3	5	5
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>4,00</b>		<b>3,89</b>	<b>5,00</b>	<b>6,67</b>

CRITICIDAD  
(Frecuencia de Falla  
x Consecuencia)  
47,11

Tabla A6. Encuesta de criticidad conjunto harneros chancado 1rio

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-HARNEROS 1rio				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL
			Impacto	N° de fallas			
Administrador de contratos CMZ	2	3	0,8	14	10	5	5
Ingeniero de producción	2	3	0,8	14	10	5	10
Ingeniero planificador	2	3	0,8	14	10	5	5
Jefe Mantenimiento mecánico	2	3	0,8	14	10	5	5
Jefe Operaciones	2	3	0,8	14	10	5	5
Mecánico clase A	2	3	0,8	14	10	5	5
Mecánico clase B	2	3	0,8	14	10	5	10
Operario 1	2	3	0,8	14	10	5	10
Operario 2	2	3	0,8	14	10	5	5
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>2,00</b>	<b>3,00</b>	<b>11,20</b>		<b>10,00</b>	<b>5,00</b>	<b>6,67</b>

CRITICIDAD  
(Frecuencia de Falla  
x Consecuencia)

110,53

Tabla A7. Encuesta de criticidad conjunto bombas chancado 1rio

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS BOMBAS 1rio				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL
			Impacto	N° de fallas			
Administrador de contratos CMZ	2	1	0,05	10	3	0	5
Ingeniero de producción	2	1	0,05	10	3	0	5
Ingeniero planificador	2	1	0,05	10	3	0	5
Jefe Mantenimiento mecánico	2	1	0,05	10	3	0	5
Jefe Operaciones	2	1	0,05	10	3	0	5
Mecánico clase A	2	1	0,05	10	3	0	5
Mecánico clase B	2	1	0,05	10	3	0	5
Operario 1	2	1	0,05	10	3	0	5
Operario 2	2	1	0,05	10	3	0	5
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,50</b>		<b>3,00</b>	<b>0,00</b>	<b>5,00</b>

CRITICIDAD  
(Frecuencia de Falla  
x Consecuencia)

17,00

Tabla A8. Encuesta de criticidad conjunto sopladores chancado 1rio

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-SOPLADORES 1rio				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL
			Impacto	N° de fallas			
Administrador de contratos CMZ	2	1	0,05	12	3	5	5
Ingeniero de producción	2	1	0,05	12	3	5	5
Ingeniero planificador	2	1	0,05	12	3	5	5
Jefe Mantenimiento mecánico	2	1	0,05	12	3	5	5
Jefe Operaciones	2	1	0,05	12	3	5	5
Mecánico clase A	2	1	0,05	12	3	5	5
Mecánico clase B	2	1	0,05	12	3	5	5
Operario 1	2	1	0,05	12	3	5	5
Operario 2	2	1	0,05	12	3	5	5
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,60</b>		<b>3,00</b>	<b>5,00</b>	<b>5,00</b>

CRITICIDAD  
(Frecuencia de Falla  
x Consecuencia)

27,20

Tabla A9. Encuesta de criticidad CT-01

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)								
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-01					
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL	
			Impacto	N° de fallas				
Administrador de contratos CMZ	2	3	0,8	4	5	5	5	
Ingeniero de producción	2	3	0,8	4	5	5	5	
Ingeniero planificador	2	3	0,8	4	5	5	5	
Jefe Mantenimiento mecánico	2	3	0,8	4	5	5	5	
Jefe Operaciones	2	3	0,8	4	5	5	5	
Mecánico clase A	2	3	0,8	4	5	5	5	
Mecánico clase B	2	3	0,8	4	5	5	5	
Operario 1	2	3	0,8	4	5	5	5	
Operario 2	2	3	0,8	4	5	5	5	
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>2,00</b>	<b>3,00</b>	<b>3,20</b>		<b>5,00</b>	<b>5,00</b>	<b>5,00</b>	<b>49,20</b>

CRITICIDAD  
(Frecuencia de Falla  
x Consecuencia)

Tabla A10. Encuesta de criticidad CT-02

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)								
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-02					
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL	
			Impacto	N° de fallas				
Administrador de contratos CMZ	2	2	0,8	2	10	5	5	
Ingeniero de producción	2	2	0,8	2	10	5	5	
Ingeniero planificador	2	2	0,8	2	10	5	5	
Jefe Mantenimiento mecánico	2	2	0,8	2	5	5	5	
Jefe Operaciones	2	2	0,8	2	5	5	5	
Mecánico clase A	2	2	0,8	2	5	5	5	
Mecánico clase B	2	2	0,8	2	5	5	5	
Operario 1	2	2	0,8	2	5	5	5	
Operario 2	2	2	0,8	2	5	5	5	
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>1,60</b>		<b>6,67</b>	<b>5,00</b>	<b>5,00</b>	<b>39,73</b>

CRITICIDAD  
(Frecuencia de Falla  
x Consecuencia)

Tabla A11. Encuesta de criticidad CT-03

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)								
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-03					
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL	
			Impacto	N° de fallas				
Administrador de contratos CMZ	2	3	0,8	7	5	5	5	
Ingeniero de producción	2	3	0,8	7	5	5	5	
Ingeniero planificador	2	3	0,8	7	5	5	5	
Jefe Mantenimiento mecánico	2	3	0,8	7	5	5	5	
Jefe Operaciones	2	3	0,8	7	5	5	5	
Mecánico clase A	2	3	0,8	7	5	5	5	
Mecánico clase B	2	3	0,8	7	5	5	5	
Operario 1	2	3	0,8	7	5	5	5	
Operario 2	2	3	0,8	7	5	5	5	
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>2,00</b>	<b>3,00</b>	<b>5,60</b>		<b>5,00</b>	<b>5,00</b>	<b>5,00</b>	<b>63,60</b>

CRITICIDAD  
(Frecuencia de Falla  
x Consecuencia)

Tabla A12. Encuesta de criticidad CT-04

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)								
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-04					
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL	
			Impacto	N° de fallas				
Administrador de contratos CMZ	2	3	0,8	5	5	5	5	
Ingeniero de producción	2	3	0,8	5	5	5	5	
Ingeniero planificador	2	3	0,8	5	5	5	5	
Jefe Mantenimiento mecánico	2	3	0,8	5	5	5	5	
Jefe Operaciones	2	3	0,8	5	5	5	5	
Mecánico clase A	2	3	0,8	5	5	5	5	
Mecánico clase B	2	3	0,8	5	5	5	5	
Operario 1	2	3	0,8	5	5	5	5	
Operario 2	2	3	0,8	5	5	5	5	
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>2,00</b>	<b>3,00</b>	<b>4,00</b>		<b>5,00</b>	<b>5,00</b>	<b>5,00</b>	<b>CRITICIDAD (Frecuencia de Falla x Consecuencia)</b> <b>54,00</b>

Tabla A13. Encuesta de criticidad CT-05

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)								
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-05					
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL	
			Impacto	N° de fallas				
Administrador de contratos CMZ	3	3	0,8	17	5	5	5	
Ingeniero de producción	3	3	0,8	17	10	5	5	
Ingeniero planificador	3	3	0,8	17	5	5	5	
Jefe Mantenimiento mecánico	3	3	0,8	17	10	5	5	
Jefe Operaciones	3	3	0,8	17	10	5	5	
Mecánico clase A	3	3	0,8	17	10	5	5	
Mecánico clase B	3	3	0,8	17	5	5	5	
Operario 1	3	3	0,8	17	5	5	5	
Operario 2	3	3	0,8	17	5	5	5	
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>13,60</b>		<b>7,22</b>	<b>5,00</b>	<b>5,00</b>	<b>CRITICIDAD (Frecuencia de Falla x Consecuencia)</b> <b>174,07</b>

Tabla A14. Encuesta de criticidad CT-06

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)								
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-06					
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL	
			Impacto	N° de fallas				
Administrador de contratos CMZ	3	3	0,8	18	10	5	5	
Ingeniero de producción	3	3	0,8	18	10	5	5	
Ingeniero planificador	3	3	0,8	18	10	5	5	
Jefe Mantenimiento mecánico	3	3	0,8	18	10	5	5	
Jefe Operaciones	3	3	0,8	18	10	5	5	
Mecánico clase A	3	3	0,8	18	5	5	5	
Mecánico clase B	3	3	0,8	18	10	5	5	
Operario 1	3	3	0,8	18	5	5	5	
Operario 2	3	3	0,8	18	5	5	5	
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>14,40</b>		<b>8,33</b>	<b>5,00</b>	<b>5,00</b>	<b>CRITICIDAD (Frecuencia de Falla x Consecuencia)</b> <b>184,60</b>

Tabla A15. Encuesta de criticidad CT-07

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-07				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL
			Impacto	N° de fallas			
Administrador de contratos CMZ	4	3	0,8	35	10	5	10
Ingeniero de producción	4	3	0,8	35	10	5	10
Ingeniero planificador	4	3	0,8	35	10	5	10
Jefe Mantenimiento mecánico	4	3	0,8	35	10	5	10
Jefe Operaciones	4	3	0,8	35	10	5	10
Mecánico clase A	4	3	0,8	35	10	5	10
Mecánico clase B	4	3	0,8	35	10	5	10
Operario 1	4	3	0,8	35	10	5	10
Operario 2	4	3	0,8	35	10	5	10
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>4,00</b>	<b>3,00</b>	<b>28,00</b>		<b>10,00</b>	<b>5,00</b>	<b>10,00</b>

**CRITICIDAD**  
(Frecuencia de Falla  
x Consecuencia)

**436,00**

Tabla A16. Encuesta de criticidad CT-08

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-08				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL
			Impacto	N° de fallas			
Administrador de contratos CMZ	3	3	0,8	18	10	5	5
Ingeniero de producción	3	3	0,8	18	5	5	5
Ingeniero planificador	3	3	0,8	18	5	5	5
Jefe Mantenimiento mecánico	3	3	0,8	18	10	5	5
Jefe Operaciones	3	3	0,8	18	5	5	5
Mecánico clase A	3	3	0,8	18	5	5	5
Mecánico clase B	3	3	0,8	18	10	5	5
Operario 1	3	3	0,8	18	10	5	5
Operario 2	3	3	0,8	18	10	5	5
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>14,40</b>		<b>7,78</b>	<b>5,00</b>	<b>5,00</b>

**CRITICIDAD**  
(Frecuencia de Falla  
x Consecuencia)

**182,93**

Tabla A17. Encuesta de criticidad CT-105

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-105				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL
			Impacto	N° de fallas			
Administrador de contratos CMZ	2	2	0,3	8	5	5	5
Ingeniero de producción	2	2	0,3	8	10	5	5
Ingeniero planificador	2	2	0,3	8	10	5	5
Jefe Mantenimiento mecánico	2	2	0,3	8	5	5	5
Jefe Operaciones	2	2	0,3	8	5	5	5
Mecánico clase A	2	2	0,3	8	5	5	5
Mecánico clase B	2	2	0,3	8	5	5	5
Operario 1	2	2	0,3	8	5	5	5
Operario 2	2	2	0,3	8	5	5	5
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,40</b>		<b>6,11</b>	<b>5,00</b>	<b>5,00</b>

**CRITICIDAD**  
(Frecuencia de Falla  
x Consecuencia)

**41,82**

Tabla A18. Encuesta de criticidad CT-106

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-106				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL
			Impacto	N° de fallas			
Administrador de contratos CMZ	3	2	0,05	17	5	5	5
Ingeniero de producción	3	2	0,05	17	5	5	5
Ingeniero planificador	3	2	0,05	17	5	5	5
Jefe Mantenimiento mecánico	3	2	0,05	17	5	5	5
Jefe Operaciones	3	2	0,05	17	5	5	5
Mecánico clase A	3	2	0,05	17	5	5	5
Mecánico clase B	3	2	0,05	17	5	5	5
Operario 1	3	2	0,05	17	5	5	5
Operario 2	3	2	0,05	17	5	5	5
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>0,85</b>		<b>5,00</b>	<b>5,00</b>	<b>5,00</b>

**CRITICIDAD**  
(Frecuencia de Falla x Consecuencia)  
**50,10**

Tabla A19. Encuesta de criticidad Chancador 5001

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CH-5001				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL
			Impacto	N° de fallas			
Administrador de contratos CMZ	3	3	0,5	17	10	5	5
Ingeniero de producción	3	3	0,5	17	10	5	5
Ingeniero planificador	3	3	0,5	17	10	5	5
Jefe Mantenimiento mecánico	3	3	0,5	17	10	5	10
Jefe Operaciones	3	3	0,5	17	10	5	10
Mecánico clase A	3	3	0,5	17	10	5	5
Mecánico clase B	3	3	0,5	17	5	5	10
Operario 1	3	3	0,5	17	5	5	5
Operario 2	3	3	0,5	17	10	5	5
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>8,50</b>		<b>8,89</b>	<b>5,00</b>	<b>6,67</b>

**CRITICIDAD**  
(Frecuencia de Falla x Consecuencia)  
**138,17**

Tabla A20. Encuesta de criticidad chancador 5002

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS Ch-6001				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL
			Impacto	N° de fallas			
Administrador de contratos CMZ	3	3	0,5	16	10	5	5
Ingeniero de producción	3	3	0,5	16	10	5	5
Ingeniero planificador	3	3	0,5	16	10	5	5
Jefe Mantenimiento mecánico	3	3	0,5	16	10	5	10
Jefe Operaciones	3	3	0,5	16	10	5	10
Mecánico clase A	3	3	0,5	16	10	5	5
Mecánico clase B	3	3	0,5	16	5	5	10
Operario 1	3	3	0,5	16	5	5	5
Operario 2	3	3	0,5	16	10	5	5
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>8,00</b>		<b>8,89</b>	<b>5,00</b>	<b>6,67</b>

**CRITICIDAD**  
(Frecuencia de Falla x Consecuencia)  
**133,67**

**Tabla A21. Encuesta de criticidad chancador 6001**

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)								
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS HARNEROS 3río					
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL	
			Impacto	N° de fallas				
Administrador de contratos CMZ	2	3	0,5	8	10	5	5	
Ingeniero de producción	2	3	0,5	8	10	5	5	
Ingeniero planificador	2	3	0,5	8	10	5	5	
Jefe Mantenimiento mecánico	2	3	0,5	8	10	5	5	
Jefe Operaciones	2	3	0,5	8	10	5	5	
Mecánico clase A	2	3	0,5	8	10	5	5	
Mecánico clase B	2	3	0,5	8	10	5	5	
Operario 1	2	3	0,5	8	10	5	5	
Operario 2	2	3	0,5	8	10	5	5	
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>2,00</b>	<b>3,00</b>	<b>4,00</b>		<b>10,00</b>	<b>5,00</b>	<b>5,00</b>	<b>CRITICIDAD (Frecuencia de Falla x Consecuencia)</b> <b>64,00</b>

**Tabla A22. Encuesta de criticidad conjunto bombas chancado 3río**

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)								
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS BOMBAS 3río					
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL	
			Impacto	N° de fallas				
Administrador de contratos CMZ	3	4	0,05	23	10	0	5	
Ingeniero de producción	3	4	0,05	23	10	0	5	
Ingeniero planificador	3	4	0,05	23	10	0	5	
Jefe Mantenimiento mecánico	3	4	0,05	23	10	0	5	
Jefe Operaciones	3	4	0,05	23	10	0	5	
Mecánico clase A	3	4	0,05	23	10	0	5	
Mecánico clase B	3	4	0,05	23	10	0	5	
Operario 1	3	4	0,05	23	10	0	5	
Operario 2	3	4	0,05	23	10	0	5	
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>3,00</b>	<b>4,00</b>	<b>1,15</b>		<b>10,00</b>	<b>0,00</b>	<b>5,00</b>	<b>CRITICIDAD (Frecuencia de Falla x Consecuencia)</b> <b>58,80</b>

**Tabla A23. Encuesta de criticidad conjunto sopladores chancado 3río**

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)								
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS SOPLADORES 3río					
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL	
			Impacto	N° de fallas				
Administrador de contratos CMZ	3	5	0,5	25	10	5	10	
Ingeniero de producción	3	5	0,5	25	5	5	10	
Ingeniero planificador	3	5	0,5	25	5	5	10	
Jefe Mantenimiento mecánico	3	5	0,5	25	10	5	10	
Jefe Operaciones	3	5	0,5	25	5	5	10	
Mecánico clase A	3	5	0,5	25	5	5	10	
Mecánico clase B	3	5	0,5	25	5	5	10	
Operario 1	3	5	0,5	25	5	5	10	
Operario 2	3	5	0,5	25	5	5	10	
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>3,00</b>	<b>5,00</b>	<b>12,50</b>		<b>6,11</b>	<b>5,00</b>	<b>10,00</b>	<b>CRITICIDAD (Frecuencia de Falla x Consecuencia)</b> <b>250,83</b>

Tabla A24. Encuesta de criticidad chancador 3rio 1ª

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)								
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CH-3rio 1A					
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *Nº de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD	
			Impacto	Nº de fallas			PERSONAL	
Administrador de contratos CMZ	2	5	0,3	12	10	5	5	
Ingeniero de producción	2	5	0,3	12	10	5	5	
Ingeniero planificador	2	5	0,3	12	10	5	5	
Jefe Mantenimiento mecánico	2	5	0,3	12	10	5	5	
Jefe Operaciones	2	5	0,3	12	10	5	5	
Mecánico clase A	2	5	0,3	12	10	5	5	
Mecánico clase B	2	5	0,3	12	10	5	5	
Operario 1	2	5	0,3	12	10	5	5	
Operario 2	2	5	0,3	12	10	5	5	
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>2,00</b>	<b>5,00</b>	<b>3,60</b>		<b>10,00</b>	<b>5,00</b>	<b>5,00</b>	<b>CRITICIDAD (Frecuencia de Falla x Consecuencia)</b> <b>76,00</b>

Tabla A25. Encuesta de criticidad chancador 3rio 1B

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)								
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CH-3rio 1B					
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *Nº de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD	
			Impacto	Nº de fallas			PERSONAL	
Administrador de contratos CMZ	2	4	0,3	8	10	5	10	
Ingeniero de producción	2	4	0,3	8	10	5	5	
Ingeniero planificador	2	4	0,3	8	10	5	5	
Jefe Mantenimiento mecánico	2	4	0,3	8	10	5	5	
Jefe Operaciones	2	4	0,3	8	10	5	5	
Mecánico clase A	2	4	0,3	8	5	5	5	
Mecánico clase B	2	4	0,3	8	5	5	5	
Operario 1	2	4	0,3	8	5	5	5	
Operario 2	2	4	0,3	8	5	5	5	
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>2,00</b>	<b>4,00</b>	<b>2,40</b>		<b>7,78</b>	<b>5,00</b>	<b>5,56</b>	<b>CRITICIDAD (Frecuencia de Falla x Consecuencia)</b> <b>55,87</b>

Tabla A26. Encuesta de criticidad chancador 3rio 2A

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)								
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CH-3rio 2A					
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *Nº de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD	
			Impacto	Nº de fallas			PERSONAL	
Administrador de contratos CMZ	3	5	0,3	23	10	5	5	
Ingeniero de producción	3	5	0,3	23	10	5	5	
Ingeniero planificador	3	5	0,3	23	5	5	5	
Jefe Mantenimiento mecánico	3	5	0,3	23	5	5	5	
Jefe Operaciones	3	5	0,3	23	5	5	5	
Mecánico clase A	3	5	0,3	23	5	5	5	
Mecánico clase B	3	5	0,3	23	5	5	5	
Operario 1	3	5	0,3	23	5	5	5	
Operario 2	3	5	0,3	23	10	5	5	
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>3,00</b>	<b>5,00</b>	<b>6,90</b>		<b>6,67</b>	<b>5,00</b>	<b>5,00</b>	<b>CRITICIDAD (Frecuencia de Falla x Consecuencia)</b> <b>153,50</b>

**Tabla A27. Encuesta de criticidad chancador 3rio 2B**

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CH-3rio 2B				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL
			Impacto	N° de fallas			
Administrador de contratos CMZ	2	4	0,3	9	5	5	5
Ingeniero de producción	2	4	0,3	9	5	5	5
Ingeniero planificador	2	4	0,3	9	5	5	5
Jefe Mantenimiento mecánico	2	4	0,3	9	5	5	5
Jefe Operaciones	2	4	0,3	9	5	5	5
Mecánico clase A	2	4	0,3	9	5	5	5
Mecánico clase B	2	4	0,3	9	5	5	5
Operario 1	2	4	0,3	9	5	5	5
Operario 2	2	4	0,3	9	5	5	5
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>2,00</b>	<b>4,00</b>	<b>2,70</b>		<b>5,00</b>	<b>5,00</b>	<b>5,00</b>

CRITICIDAD  
(Frecuencia de Falla  
x Consecuencia)

51,60

**Tabla A28. Encuesta de criticidad CT-14A**

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-14A				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL
			Impacto	N° de fallas			
Administrador de contratos CMZ	2	3	0,5	11	10	5	5
Ingeniero de producción	2	3	0,5	11	5	5	5
Ingeniero planificador	2	3	0,5	11	5	5	5
Jefe Mantenimiento mecánico	2	3	0,5	11	10	5	5
Jefe Operaciones	2	3	0,5	11	5	5	10
Mecánico clase A	2	3	0,5	11	5	5	10
Mecánico clase B	2	3	0,5	11	10	5	10
Operario 1	2	3	0,5	11	10	5	10
Operario 2	2	3	0,5	11	10	5	5
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>2,00</b>	<b>3,00</b>	<b>5,50</b>		<b>7,78</b>	<b>5,00</b>	<b>7,22</b>

CRITICIDAD  
(Frecuencia de Falla  
x Consecuencia)

73,00

**Tabla A29. Encuesta de criticidad CT-14B**

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-14B				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL
			Impacto	N° de fallas			
Administrador de contratos CMZ	3	4	0,5	18	10	5	5
Ingeniero de producción	3	4	0,5	18	10	5	5
Ingeniero planificador	3	4	0,5	18	10	5	5
Jefe Mantenimiento mecánico	3	4	0,5	18	10	5	5
Jefe Operaciones	3	4	0,5	18	5	5	10
Mecánico clase A	3	4	0,5	18	5	5	10
Mecánico clase B	3	4	0,5	18	5	5	10
Operario 1	3	4	0,5	18	5	5	10
Operario 2	3	4	0,5	18	5	5	5
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>3,00</b>	<b>4,00</b>	<b>9,00</b>		<b>7,22</b>	<b>5,00</b>	<b>7,22</b>

CRITICIDAD  
(Frecuencia de Falla  
x Consecuencia)

166,33

Tabla A30. Encuesta de criticidad CT-15A

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-15A				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD
			Impacto	N° de fallas			PERSONAL
Administrador de contratos CMZ	4	4	0,5	30	10	5	5
Ingeniero de producción	4	4	0,5	30	10	5	5
Ingeniero planificador	4	4	0,5	30	10	5	5
Jefe Mantenimiento mecánico	4	4	0,5	30	10	5	5
Jefe Operaciones	4	4	0,5	30	10	5	10
Mecánico clase A	4	4	0,5	30	10	5	10
Mecánico clase B	4	4	0,5	30	10	5	10
Operario 1	4	4	0,5	30	10	5	10
Operario 2	4	4	0,5	30	10	5	5
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>4,00</b>	<b>4,00</b>	<b>15,00</b>		<b>10,00</b>	<b>5,00</b>	<b>7,22</b>

**CRITICIDAD**  
(Frecuencia de Falla x Consecuencia)  
328,89

Tabla A31. Encuesta de criticidad CT-15B

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-15B				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD
			Impacto	N° de fallas			PERSONAL
Administrador de contratos CMZ	3	4	0,5	21	10	5	10
Ingeniero de producción	3	4	0,5	21	10	5	10
Ingeniero planificador	3	4	0,5	21	10	5	10
Jefe Mantenimiento mecánico	3	4	0,5	21	10	5	10
Jefe Operaciones	3	4	0,5	21	10	5	10
Mecánico clase A	3	4	0,5	21	10	5	10
Mecánico clase B	3	4	0,5	21	10	5	10
Operario 1	3	4	0,5	21	10	5	10
Operario 2	3	4	0,5	21	10	5	10
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>3,00</b>	<b>4,00</b>	<b>10,50</b>		<b>10,00</b>	<b>5,00</b>	<b>10,00</b>

**CRITICIDAD**  
(Frecuencia de Falla x Consecuencia)  
201,00

Tabla A32. Encuesta de criticidad CT-26

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-26				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD
			Impacto	N° de fallas			PERSONAL
Administrador de contratos CMZ	3	3	1	28	10	5	10
Ingeniero de producción	3	3	1	28	10	5	10
Ingeniero planificador	3	3	1	28	10	5	10
Jefe Mantenimiento mecánico	3	3	1	28	10	5	10
Jefe Operaciones	3	3	1	28	10	5	10
Mecánico clase A	3	3	1	28	10	5	10
Mecánico clase B	3	3	1	27	10	5	10
Operario 1	3	3	1	27	10	5	10
Operario 2	3	3	1	27	10	5	10
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>27,67</b>		<b>10,00</b>	<b>5,00</b>	<b>10,00</b>

**CRITICIDAD**  
(Frecuencia de Falla x Consecuencia)  
324,00

Tabla A33. Encuesta de criticidad CT-27

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-27				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL
			Impacto	N° de fallas			
Administrador de contratos CMZ	3	3	1	28	10	5	10
Ingeniero de producción	3	3	1	28	10	5	10
Ingeniero planificador	3	3	1	28	10	5	10
Jefe Mantenimiento mecánico	3	3	1	28	10	5	10
Jefe Operaciones	3	3	1	27	10	5	10
Mecánico clase A	3	3	1	27	10	5	10
Mecánico clase B	3	3	1	27	10	5	10
Operario 1	3	3	1	27	10	5	10
Operario 2	3	3	1	27	10	5	10
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>27,44</b>		<b>10,00</b>	<b>5,00</b>	<b>10,00</b>

**CRITICIDAD**  
(Frecuencia de Falla x Consecuencia)

**322,00**

Tabla A34. Encuesta de criticidad CT-40

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-40				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL
			Impacto	N° de fallas			
Administrador de contratos CMZ	2	3	0,3	6	10	5	5
Ingeniero de producción	2	3	0,3	6	10	5	5
Ingeniero planificador	2	3	0,3	6	10	5	5
Jefe Mantenimiento mecánico	2	3	0,3	6	10	5	5
Jefe Operaciones	2	3	0,3	6	5	5	5
Mecánico clase A	2	3	0,3	6	5	10	10
Mecánico clase B	2	3	0,3	6	5	10	10
Operario 1	2	3	0,3	6	5	5	5
Operario 2	2	3	0,3	6	5	5	5
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>2,00</b>	<b>3,00</b>	<b>1,80</b>		<b>7,22</b>	<b>6,11</b>	<b>6,11</b>

**CRITICIDAD**  
(Frecuencia de Falla x Consecuencia)

**49,69**

Tabla A35. Encuesta de criticidad CT-32

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-32				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCION (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL
			Impacto	N° de fallas			
Administrador de contratos CMZ	5	4	1	53	10	5	25
Ingeniero de producción	5	4	1	53	10	5	25
Ingeniero planificador	5	4	1	53	10	5	25
Jefe Mantenimiento mecánico	5	4	1	53	10	5	25
Jefe Operaciones	5	4	1	53	10	5	25
Mecánico clase A	5	4	1	53	10	5	25
Mecánico clase B	5	4	1	53	10	5	25
Operario 1	5	4	1	53	10	5	25
Operario 2	5	4	1	53	10	5	25
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>5,00</b>	<b>4,00</b>	<b>53,00</b>		<b>10,00</b>	<b>5,00</b>	<b>25,00</b>

**CRITICIDAD**  
(Frecuencia de Falla x Consecuencia)

**1260,00**

Tabla A36. Encuesta de criticidad CT-34

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-34				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FRECUENCIA DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCIÓN (Impacto x *Nº de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL
			Impacto	Nº de fallas			
Administrador de contratos CMZ	4	4	1	45	10	5	10
Ingeniero de producción	4	4	1	45	10	5	10
Ingeniero planificador	4	4	1	45	10	5	10
Jefe Mantenimiento mecánico	4	4	1	45	10	5	10
Jefe Operaciones	4	4	1	45	10	5	10
Mecánico clase A	4	4	1	45	10	5	25
Mecánico clase B	4	4	1	45	10	5	25
Operario 1	4	4	1	45	10	5	25
Operario 2	4	4	1	45	10	5	25
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>4,00</b>	<b>4,00</b>	<b>45,00</b>		<b>10,00</b>	<b>5,00</b>	<b>16,67</b>

**CRITICIDAD**  
(Frecuencia de Falla x Consecuencia)  
**846,67**

Tabla A37 Encuesta de criticidad CT-200

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-200				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FREC. DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCIÓN (Impacto x *Nº de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL
			Impacto	Nº de fallas			
Administrador de contratos CMZ	5	4	1	56	10	5	25
Ingeniero de producción	5	4	1	56	10	5	25
Ingeniero planificador	5	4	1	56	10	5	25
Jefe Mantenimiento mecánico	5	4	1	56	10	5	25
Jefe Operaciones	5	4	1	56	10	5	10
Mecánico clase A	5	4	1	56	10	5	10
Mecánico clase B	5	4	1	56	10	5	10
Operario 1	5	4	1	56	10	5	10
Operario 2	5	4	1	56	10	5	10
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>5,00</b>	<b>4,00</b>	<b>56,00</b>		<b>10,00</b>	<b>5,00</b>	<b>16,67</b>

**CRITICIDAD**  
(Frecuencia de Falla x Consecuencia)  
**1278,33**

Tabla A38. Encuesta de criticidad CT-201

COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)							
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-201				
PERSONA ENTREVISTADA	1. FREC. DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCIÓN (Impacto x *Nº de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL
			Impacto	Nº de fallas			
Administrador de contratos CMZ	4	4	1	48	10	5	25
Ingeniero de producción	4	4	1	48	10	5	25
Ingeniero planificador	4	4	1	48	10	5	25
Jefe Mantenimiento mecánico	4	4	1	48	10	5	25
Jefe Operaciones	4	4	1	48	10	5	10
Mecánico clase A	4	4	1	48	10	5	10
Mecánico clase B	4	4	1	48	10	5	10
Operario 1	4	4	1	48	10	5	10
Operario 2	4	4	1	48	10	5	10
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>4,00</b>	<b>4,00</b>	<b>48,00</b>		<b>10,00</b>	<b>5,00</b>	<b>16,67</b>

**CRITICIDAD**  
(Frecuencia de Falla x Consecuencia)  
**894,67**

Tabla A39. Encuesta de criticidad CT-202

COMPANÍA MINERA ZALDÍVAR (CMZ)								
RESULTADOS ANÁLISIS DE CRITICIDAD			PROMEDIOS CT-202					
PERSONA ENTREVISTADA	1. FREC. DE FALLAS	2.MTTR	3. IMPACTO EN PRODUCCIÓN (Impacto x *N° de fallas)		4. COSTO DE REPARACIÓN	5. IMPACTO AMBIENTAL	6. IMPACTO SALUD Y SEGURIDAD PERSONAL	
			Impacto	N° de fallas				
Administrador de contratos CMZ	3	4	1	20	10	5	10	
Ingeniero de producción	3	4	1	20	10	5	10	
Ingeniero planificador	3	4	1	20	10	5	10	
Jefe Mantenimiento mecánico	3	4	1	20	10	5	10	
Jefe Operaciones	3	4	1	20	10	5	10	
Mecánico clase A	3	4	1	20	10	5	10	
Mecánico clase B	3	4	1	20	10	5	10	
Operario 1	3	4	1	20	10	5	10	
Operario 2	3	4	1	20	10	5	10	
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>	<b>3,00</b>	<b>4,00</b>	<b>20,00</b>		<b>10,00</b>	<b>5,00</b>	<b>10,00</b>	<b>315,00</b>

CRITICIDAD  
(Frecuencia de Falla  
x Consecuencia)