

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

**“DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PARA UN  
MOLINO DE BOLAS DE LA EMPRESA COMPAÑÍA MINERA  
CERRO NEGRO S.A.”**

ALUMNO: IGNACIO A. ZAMORA RODRÍGUEZ

PROFESOR GUÍA: ORLANDO DURÁN ACEVEDO

PROFESOR CO-GUÍA: RIGOBERTO GUARDIA DÍAZ

QUILPUÉ, OCTUBRE 2018

## Resumen Ejecutivo

El objetivo principal del presente trabajo de título es el diseño de un plan de mantenimiento al Molino de Bolas G de Compañía Minera Cerro Negro S.A.

Actualmente el molino lleva 6 meses de operación y está posicionado como el equipo principal de la zona de molienda; procesando aproximadamente el 75% del mineral de sulfuro. Por otro lado, el equipo tiene una alta tasa de fallas y no cuenta con ningún plan de mantenimiento y repuestos; por lo que resulta altamente crítico en temas operacionales y económicos. Sumado a esto, en la empresa no existía ningún tipo de registros del equipo, manuales ni recomendaciones del fabricante.

En la primera etapa del plan de mantenimiento se llevó a cabo la recopilación de históricos de falla de un molino análogo, con objeto de extrapolar los datos al molino de la empresa. Luego, se realizó un análisis de falla y criticidad, a fin de poder definir los componentes críticos del equipo; fueron los siguientes:

- Piñón.
- Descansos Molino Alimentación – Descarga.
- Bomba de Lubricación (Baja Presión).
- Bomba de Levante (Alta Presión).
- Parrillas de Descarga.

Posteriormente, se aplicó el modelo de Weibull a los componentes críticos para determinar la tasa de falla, la curva de confiabilidad y el MTBF; parámetros sumamente relevantes para el desarrollo de la estrategia de mantenimiento.

En la segunda etapa, se llevó a cabo la propuesta del plan en base a los resultados obtenidos y al contexto operacional de la empresa, dando como resultado un mantenimiento preventivo en base a la condición. Posteriormente, se definieron frecuencias óptimas de inspección junto con listas de chequeo y reporte de fallas; actividades que permitirán realizar hallazgos en el equipo y, seguidamente, órdenes de trabajo de tipo preventivo.

En la tercera etapa se generó un plan de repuestos a través de un modelo que busca minimizar el costo global minimizando el costo de falla. El modelo se trabajó con resultados obtenidos en el análisis de confiabilidad.

Se estima que el posible ahorro alcanzado, aplicando las estrategias y políticas de mantenimiento propuestas en el plan, sería de un 52%, aproximadamente. Sin embargo, los resultados se obtienen a mediano y largo plazo, pues el proceso detrás de la estrategia de mantenimiento debe ir de la mano con la capacitación del personal mecánico de la empresa junto con un trabajo constante para poder normalizar el estado del equipo.

## **Dedicatoria**

*A todas y cada una de las personas que estuvieron conmigo en este arduo camino;  
especialmente a mis hijos, a mi novia, padres y hermano.*

## Agradecimientos

El camino universitario sin duda no es fácil, pues los altibajos presentes en el proceso no son pocos y para lograr superarlos se necesita de un real compromiso, dedicación, perseverancia y por sobretodo, apoyo; brindado, principalmente, por la familia, los amigos y profesores. Este apartado va dedicado a toda la gente que me dio la mano para subir esta larga, pero muy linda escalera universitaria.

En primer lugar, agradezco profundamente a mis padres, Eliana y Arturo, por entregarme los valores y principios que me rigen como persona; las guías y consejos que hoy me permiten estar acá; y por enseñarme el valor de las cosas y el esfuerzo que hay que poner en cada paso para poder llegar a la meta. Agradezco la absoluta confianza que tenían en mis capacidades, el apoyo, el cariño y el tremendo sacrificio realizado a lo largo de todos estos años. A mi hermano Manuel, por el cariño y consejos entregados, pero, sin lugar a dudas, por construir el primer peldaño de esta gran escala; siempre fuiste y serás mi ejemplo a seguir. Sin ustedes nada de esto hubiese sido posible.

Un agradecimiento muy especial a los grandes amores de mi vida, ustedes representan la real motivación para alcanzar el término de esta carrera; mis hijos Vicente y Antonia, y mi novia Bárbara; de quien estaré, siempre, eternamente agradecido por el esfuerzo, el apoyo, la entrega, el sacrificio, el cariño incondicional y el tan valioso tiempo entregado en este largo camino. Gracias por estar siempre estar presente.

Agradezco, muy sinceramente, a los amigos de MEC, por las tardes de estudio y las constantes batallas para sacar adelante los ramos, pero principalmente, por los buenos momentos. A la Escuela de Ingeniería Mecánica y cada una de las personas que la conforman, particularmente a los profesores por la tremenda labor que hacen y en especial a mis profesores guías, quienes me orientaron en este tan importante trabajo. Gracias por los conocimientos entregados, por las recomendaciones y la constante formación del criterio ingenieril.

Por último, gracias eternas a toda la gente que de alguna u otra forma han aportado en este tan importante logro personal, que, sin lugar a dudas, es uno de los más importantes en mi vida.

*“Caminante, no hay camino, se hace camino al andar”*

# Índice

Resumen Ejecutivo .....	iii
Dedicatoria.....	v
Agradecimientos .....	vi
Índice.....	vii
Índice de Figuras.....	xii
Índice de Tablas .....	xv
Nomenclatura.....	xix
Capítulo I: Introducción .....	22
1.1. Prefacio.....	22
1.2. Descripción del Problema.....	23
1.3. Objetivo General.....	24
1.4. Objetivos Específicos.....	24
Capítulo II: Marco Teórico.....	25
2.1. Introducción.....	25
2.1.1. Concepto de Mantenimiento.....	26
2.1.2. Misión del Mantenimiento dentro de una Empresa.....	27
2.1.3. Funciones Básicas del Mantenimiento.....	28
2.1.4. Historia del Mantenimiento y su Constante Evolución.....	29
2.1.5. Gestión del Mantenimiento.....	32
Capítulo III: Antecedentes Generales de la Empresa .....	75
3.1. Introducción.....	75
3.1.1. Ubicación Geográfica.....	77
3.1.2. Descripción de la Compañía.....	78
3.1.3. Descripción de la Planta.....	79
3.2. Listado y Función de Componentes Propios y Auxiliares del Molino G.....	90
3.2.1. Bombas de Levante (Alta Presión) y Lubricación (Baja Presión).....	90
3.2.2. Motor Síncrono y Excitatriz.....	91
3.2.3. Embrague.....	92
3.2.4. Sala de Media Tensión y Sala de Control.....	93
3.2.5. Partidor Suave/Giro lento Inching Drive.....	94

3.2.6.	Sistema de Lubricación Piñón – Corona.....	95
3.2.7.	Compresor.....	96
3.2.8.	Bombas de los Hidrociclones.....	97
3.2.9.	Hidrociclones.....	98
3.2.10.	Descansos Molino Alimentación – Descarga.....	99
3.2.11.	Manto Cilíndrico.....	100
3.2.12.	Piñón – Corona.....	101
Capítulo IV: Análisis de Falla, Criticidad y Confiabilidad.....		102
4.1.	Introducción.....	102
4.2.	Alcances.....	103
4.3.	Descripción del Equipo.....	104
4.3.1.	Identificación de los Sistemas Básicos Molino G.....	105
4.4.	Condiciones de Operación del Molino G.....	106
4.5.	Condiciones de Mantenimiento del Molino G.....	107
4.6.	Análisis de Falla y Criticidad del Equipo.....	109
4.6.1.	Diagrama Funcional de Bloques.....	109
4.6.2.	Análisis FMECA de Sistemas Básicos Molino G.....	110
4.6.3.	Análisis de Costo Global de Mantenimiento.....	110
4.6.4.	Análisis de Pareto a los Modos Correctivos.....	119
4.6.5.	Análisis de Jack Knife a los Modos Correctivos.....	125
4.6.6.	Comparación de Resultados y Elección de Modos Correctivos Críticos.....	129
4.7.	Reducción del Impacto Negativo al CGM de los Modos Correctivos Críticos.....	132
4.8.	Modelo de Confiabilidad.....	135
4.8.1.	Alcances.....	135
4.8.2.	Aplicación del Modelo de Weibull a los Modos Correctivos Críticos.....	135
4.8.2.1.	Cambio Piñón:.....	136
4.8.2.2.	Cambio de Descansos Molino Alimentación-Descarga:.....	143
4.8.2.3.	Cambio Bomba de Lubricación:.....	150
4.8.2.4.	Cambio Bomba de Levante:.....	158
4.8.2.5.	Cambio Parrillas de Descarga:.....	165
4.9.	Árboles de Falla de los Modos Correctivos Críticos.....	172
4.9.1.	Árbol de Falla Molino de Bolas G.....	172
4.9.2.	Árbol de Falla Piñón.....	173

4.9.3.	Árbol de Falla Descansos Molino Alimentación – Descarga. ....	174
4.9.4.	Árbol de Falla Sistema Lubricación. ....	175
4.9.4.1.	Árbol de Falla Sistema Lubricación Piñón – Corona. ....	176
4.9.4.2.	Árbol de Falla Sistema Lubricación Descansos – Bomba Lubricación. ....	177
4.9.4.3.	Árbol de Falla Sistema Lubricación Descansos – Bomba Levante. ....	178
4.9.5.	Árbol de Falla Sistema Descarga. ....	179
Capítulo V: Plan de Mantenimiento .....		180
5.1.	Introducción. ....	180
5.2.	Alcances. ....	180
5.3.	Recomendaciones Previas. ....	181
5.4.	Plan de Mantenimiento Propuesto para la Empresa. ....	185
5.4.1.	Frecuencia Óptima de Inspecciones con Detención de Equipo. ....	186
5.4.1.1.	Piñón. ....	186
5.4.1.2.	Descansos Molino Alimentación-Descarga. ....	189
5.4.1.3.	Bomba de Lubricación. ....	191
5.4.1.4.	Bomba de Levante. ....	193
5.4.1.5.	Parrillas de Descarga. ....	195
5.4.2.	Resumen Frecuencia Óptima de Inspecciones con Detención de Equipo. ....	197
5.4.3.	Frecuencia Óptima de Inspecciones sin Detención de Equipo. ....	198
5.4.3.1.	Piñón. ....	198
5.4.3.2.	Descansos Molino Alimentación-Descarga. ....	200
5.4.3.3.	Bomba de Lubricación. ....	202
5.4.3.4.	Bomba de Levante. ....	204
5.4.3.5.	Parrillas de Descarga. ....	206
5.4.4.	Resumen Frecuencia Óptima de Inspecciones sin Detención de Equipo. ....	209
5.4.5.	Check List de Actividades para los Modos Correctivos Críticos. ....	210
5.4.5.1.	Check List – Diario. ....	211
5.4.5.2.	Check List – Semanal. ....	214
5.4.5.3.	Check List – Mensual (Cada 840 horas). ....	215
5.4.5.4.	Check List – Bimensual (Cada 1680 horas). ....	217
5.4.5.5.	Check List – Trimestral (Cada 2520 horas). ....	218
5.4.5.6.	Check List – Semestral (Cada 5040 horas). ....	219
5.4.5.7.	Check List – Anual (Cada 10080 horas). ....	220



5.4.6.	Reporte de Fallas.....	221
5.4.7.	Check List de Mantenimiento para los Modos Correctivos Críticos. ....	222
5.4.7.1.	Check List de Mantenimiento Piñón. ....	223
5.4.7.2.	Check List de Mantenimiento Descanso Alimentación. ....	225
5.4.7.3.	Check List de Mantenimiento Descanso Descarga. ....	228
5.4.7.4.	Check List de Mantenimiento Bomba de Lubricación.....	231
5.4.7.5.	Check List de Mantenimiento Bomba Levante.....	232
5.4.7.6.	Check List de Mantenimiento Parrillas Descarga. ....	233
Capítulo VI: Plan de Repuestos .....		237
6.1.	Introducción.....	237
6.2.	Alcances.....	238
6.3.	Plan de Repuestos.....	238
6.3.1.	Cambio Piñón.....	238
6.3.2.	Cambio Descansos Molino Alimentación – Descarga.....	241
6.3.3.	Cambio Bomba Lubricación.....	244
6.3.4.	Cambio Bomba Levante.....	247
6.3.5.	Cambio Parrillas Descarga.....	250
Capítulo VII: Estudio del Impacto Económico.....		253
7.1.	Introducción.....	253
7.2.	Impacto Económico.....	254
Capítulo VIII: Conclusión.....		257
8.1.	Resultados.....	257
Referencias.....		259
Bibliografía .....		260
Anexos .....		262
Anexo A: Software de Confiabilidad e Inspecciones.....		262
Anexo B: Sistemas, Sub-Sistemas y Componentes del Molino G. ....		264
Anexo C: Análisis FMECA de Sistemas Básicos Molino G.....		266
Anexo C.1: Análisis FMECA de Sistema Manto Cilíndrico.....		267
Anexo C.2: Análisis FMECA de Sistema Piñón – Corona.....		268

Anexo C.3: Análisis FMECA de Sistema Giro lento. ....	269
Anexo C.4: Análisis FMECA de Sistema Lubricación. ....	270
Anexo C.5: Análisis FMECA de Sistema Motriz. ....	271
Anexo C.6: Análisis FMECA de Sistema Descansos Molino Alimentación – Descarga. ....	272
Anexo C.7: Análisis FMECA de Sistema Embrague. ....	273
Anexo C.8: Análisis FMECA de Sistema Alimentación. ....	274
Anexo C.9: Análisis FMECA de Sistema Descarga. ....	275
Anexo D: Check List y Calendarización de Actividades. ....	276
Anexo D.1: Check List Diario A. ....	276
Anexo D.2: Check List Diario B. ....	277
Anexo D.3: Check List Diario C. ....	278
Anexo D.4: Check List Diario D. ....	279
Anexo D.5: Check List Diario E. ....	280
Anexo D.6: Check List Diario F. ....	281
Anexo D.7: Check List Semanal. ....	282
Anexo D.8: Check List Mensual A. ....	283
Anexo D.9: Check List Mensual B. ....	284
Anexo D.10: Check List Bimensual (1680 hrs.). ....	285
Anexo D.11: Check List Trimestral (2520 hrs.). ....	286
Anexo D.12: Check List Semestral (5040 hrs.). ....	287
Anexo D.13: Check List Anual (10080 hrs.). ....	288
Anexo E.1: Calendarización Sistema Lubricación Descansos Molino. ....	289
Anexo E.2: Calendarización Sistema Lubricación Piñón – Corona. ....	290
Anexo E.3: Calendarización Sistema Descarga. ....	291
Anexo E.4: Calendarización Sistema Alimentación. ....	292
Anexo E.5: Calendarización Unidad Neumático. ....	293
Anexo E.6: Calendarización Sistema Piñón – Corona. ....	294
Anexo E.7: Calendarización Sistema Descansos Molino. ....	295
Anexo E.8: Calendarización Sistema Manto Cilíndrico. ....	296
Anexo E.9: Calendarización Reapriete Pernos Sistema. ....	297
Anexo F: Tabla A1 de Severidad Norma ISO 10816-3 Vibración Mecánica. ....	298
Anexo G: Reporte de Fallas. ....	299

## Índice de Figuras

Figura 1: Curva de la Bañera. ....	37
Figura 2: Tiempo Medio Entre Fallas. ....	39
Figura 3: Disponibilidad de un Sistema. ....	39
Figura 4: Simbología Operación Lógica AND. ....	44
Figura 5: Simbología Operación Lógica OR. ....	44
Figura 6: Ejemplos de Árboles de Falla. ....	45
Figura 7: Ejemplo Diagrama de Pareto. ....	47
Figura 8: Ejemplo Diagrama de Jack Knife. ....	51
Figura 9: Función de Densidad de Probabilidad Weibull para Distintos $\beta$ . ....	57
Figura 10: Ejemplo Regresión Lineal del Modo de Falla. ....	59
Figura 11: Curva de Confiabilidad de Weibull para Distintos $\beta$ . ....	63
Figura 12: Curva de Tasa de Fallas de Weibull para Distintos $\beta$ . ....	64
Figura 13: Dinámica de Pedidos. ....	72
Figura 14: Ubicación Geográfica de CMCN. ....	77
Figura 15: Diagrama de Flujo Chancado Primario. ....	80
Figura 16: Diagrama de Flujo Chancado Secundario. ....	81
Figura 17: Diagrama de Flujo Chancado Terciario Mineral de Óxido. ....	83
Figura 18: Diagrama de Flujo Chancado Terciario Mineral de Sulfuro. ....	84
Figura 19: Diagrama de Flujo Proceso de Molienda. ....	87
Figura 20: Diagrama de Flujo Proceso de Flotación. ....	88
Figura 21: Fotografía Bombas de Alta y Baja Presión. ....	90
Figura 22: Fotografía Motor Sincrónico. ....	91
Figura 23: Fotografía Embrague. ....	92
Figura 24: Fotografía Sala de Media Tensión y Sala de Control. ....	93
Figura 25: Fotografía Girolento Inching Drive. ....	94
Figura 26: Fotografía Inyectores. ....	95
Figura 27: Fotografía Bomba Hidráulica. ....	95
Figura 28: Fotografía Compresor. ....	96
Figura 29: Fotografía Bombas de los Hidrociclones Instaladas. ....	97
Figura 30: Fotografía Bombas de los Hidrociclones sin Instalar. ....	97

Figura 31: Fotografía Hidrociclones 1.....	98
Figura 32: Fotografía Hidrociclones 2.....	98
Figura 33: Fotografía Descansos Molino Alimentación-Descarga.....	99
Figura 34: Fotografía Manto Cilíndrico.....	100
Figura 35: Fotografía Piñón-Corona.....	101
Figura 36: Identificación de Sistemas Básicos Molino G.....	105
Figura 37: Diagrama Funcional de Bloques Molino G.....	109
Figura 38: Diagrama de Pareto CGM.....	120
Figura 39: Diagrama de Pareto Horas Detención.....	122
Figura 40: Diagrama de Pareto N° Detenciones.....	124
Figura 41: Diagrama de Jack Knife.....	127
Figura 42: Regresión Lineal Modo Correctivo Cambio Piñón.....	137
Figura 43: Confiabilidad de Modo Correctivo Cambio Piñón.....	139
Figura 44: Tasa de Fallas del Modo Correctivo Cambio Piñón.....	141
Figura 45: Regresión Lineal Modo Correctivo Cambio Descansos Molino.....	144
Figura 46: Confiabilidad del Modo Correctivo Cambio Descansos Molino.....	146
Figura 47: Tasa de Fallas del Modo Correctivo Cambio Descansos Molino.....	148
Figura 48: Regresión Lineal Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación.....	151
Figura 49: Regresión Lineal Modificada Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación.....	152
Figura 50: Confiabilidad del Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación.....	154
Figura 51: Tasa de Fallas del Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación.....	156
Figura 52: Regresión Lineal Modo Correctivo Cambio Bomba Levante.....	159
Figura 53: Confiabilidad del Modo Correctivo Cambio Bomba Levante.....	161
Figura 54: Tasa de Fallas del Modo Correctivo Cambio Bomba Levante.....	163
Figura 55: Regresión Lineal Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga.....	166
Figura 56: Confiabilidad del Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga.....	168
Figura 57: Tasa de Fallas del Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga.....	170
Figura 58: Árbol de Falla Molino de Bolas G.....	172
Figura 59: Árbol de Falla Piñón.....	173
Figura 60: Árbol de Falla Descansos Molino Alimentación-Descarga.....	174
Figura 61: Árbol de Falla Sistema Lubricación.....	175

Figura 62: Continuación Árbol de Falla Sistema Lubricación. ....	176
Figura 63: Continuación Árbol de Falla Sistema Lubricación. ....	177
Figura 64: Continuación Árbol de Falla Sistema Lubricación. ....	178
Figura 65: Árbol de Falla Sistema Descarga. ....	179
Figura 66: Dinámica de Pedidos del Modo Correctivo Cambio Piñón. ....	239
Figura 67: Dinámica de Pedidos del Modo Correctivo Cambio Descansos Molino. ....	242
Figura 68: Dinámica de Pedidos del Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación. ....	245
Figura 69: Dinámica de Pedidos del Modo Correctivo Cambio Bomba Levante. ....	248
Figura 70: Dinámica de Pedidos del Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga.....	251

## Índice de Tablas

Tabla 1: Evolución Histórica del Mantenimiento.....	31
Tabla 2: Ejemplo de Registro de Datos para Análisis Pareto.....	46
Tabla 3: Ejemplo de Tabla de Datos para Análisis de Pareto.....	46
Tabla 4: Ejemplo Tabla de Datos para Análisis de Jack Knife.....	49
Tabla 5: Ejemplo de Tabla FMECA Método Cualitativo.....	52
Tabla 6: Ejemplo de Tabla FMECA Método Cuantitativo.....	53
Tabla 7: Ejemplo Tabla de Datos para Modelo Weibull.....	58
Tabla 8: Ejemplo Tabla de Datos para Test Kolmogorov-Smirnov.....	61
Tabla 9: Tabla de Kolmogorov-Smirnov.....	62
Tabla 10: Antecedentes de la Compañía.....	79
Tabla 11: Características Principales del Equipo.....	106
Tabla 12: Frecuencia de Cambio Actual Molino G.....	107
Tabla 13: Frecuencia de Cambio Actual Molino de Las Cenizas.....	108
Tabla 14: Análisis de Costo Global de Mantenimiento.....	118
Tabla 15: Análisis de Pareto CGM a Modos Correctivos.....	119
Tabla 16: Análisis de Pareto Horas Detención a Modos Correctivos.....	121
Tabla 17: Análisis de Pareto N° Detenciones a Modos Correctivos.....	123
Tabla 18: Análisis de Jack Knife a Modos Correctivos.....	125
Tabla 19: Resultados Análisis de Pareto.....	129
Tabla 20: Reducción Impacto Negativo a CGM.....	134
Tabla 21: Datos para la Regresión Lineal Modo Correctivo Cambio Piñón.....	136
Tabla 22: Datos para Test de K-S para Modo Correctivo Cambio Piñón.....	138
Tabla 23: Datos para Curva de Confiabilidad Modo Correctivo Cambio Piñón.....	139
Tabla 24: Tasa de Fallas del Modo Correctivo Cambio Piñón.....	140
Tabla 25: Datos para la Regresión Lineal Modo Correctivo Cambio Descansos Molino.....	143
Tabla 26: Datos para el Test de K-S Modo Correctivo Cambio Descansos Molino.....	145
Tabla 27: Datos para la Curva de Confiabilidad Modo Correctivo Cambio Descansos Molino.....	146
Tabla 28: Tasa de Fallas del Modo Correctivo Cambio Descansos Molino.....	147
Tabla 29: Datos para Regresión Lineal Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación.....	150

Tabla 30: Datos Modificados para la Obtención de Parámetros de Weibull para Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación. ....	151
Tabla 31: Datos para el Test de K-S Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación. ....	153
Tabla 32: Datos para la Curva de Confiabilidad Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación. ....	154
Tabla 33: Tasa de Fallas del Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación. ....	155
Tabla 34: Datos para la Regresión Lineal Modo Correctivo Cambio Bomba Levante. ....	158
Tabla 35: Datos para el Test de K-S Modo Correctivo Cambio Bomba Levante. ....	160
Tabla 36: Datos para la Curva de Confiabilidad Modo Correctivo Cambio Bomba Levante. ...	161
Tabla 37: Tasa de Fallas del Modo Correctivo Cambio Bomba Levante. ....	162
Tabla 38: Datos para la Regresión Lineal Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga. ....	165
Tabla 39: Datos para el Test de K-S Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga. ....	167
Tabla 40: Datos para la Curva de Confiabilidad Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga. ....	168
Tabla 41: Tasa de Fallas del Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga. ....	169
Tabla 42: Parámetro de Forma según Modo Correctivo Crítico. ....	181
Tabla 43: Datos con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Piñón. ....	186
Tabla 44: Datos de Costos con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Piñón. ....	186
Tabla 45: Datos de Trabajadores con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Piñón .	187
Tabla 46: Datos con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Descansos Molino. ....	189
Tabla 47: Datos de Costos con Detención de Equipo para Modo Correctivo Cambio Descansos Molino. ....	189
Tabla 48: Datos de Trabajadores con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Descansos Molino. ....	189
Tabla 49: Datos con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación. ....	191
Tabla 50: Datos de Costos con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación. ....	191
Tabla 51: Datos de Trabajadores con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación. ....	191
Tabla 52: Datos con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Bomba Levante. ....	193

Tabla 53: Datos de Costos con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Bomba Levante. .....	193
Tabla 54: Datos de Trabajadores con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Bomba Levante.....	193
Tabla 55: Datos con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga. ....	195
Tabla 56: Datos de Costos con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga.....	195
Tabla 57: Datos de Trabajadores con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga.....	195
Tabla 58: Frecuencia Óptima de Inspección con Detención de Equipo según Modos Correctivos. .....	197
Tabla 59: Datos sin Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Piñón. ....	198
Tabla 60: Datos de Costos sin Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Piñón. ....	198
Tabla 61: Datos de Trabajadores sin Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Piñón. ..	199
Tabla 62: Datos sin Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Descansos Molino.....	200
Tabla 63: Datos de Costos sin Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Descansos Molino.....	200
Tabla 64: Datos de Trabajadores sin Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Descansos Molino.....	201
Tabla 65: Datos sin Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación. ....	202
Tabla 66: Datos de Costos sin Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación. ....	202
Tabla 67: Datos de Trabajadores sin Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación. ....	203
Tabla 68: Datos sin Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Bomba Levante.....	204
Tabla 69: Datos de Costos sin Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Bomba Levante. .....	204
Tabla 70: Datos de Trabajadores sin Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Bomba Levante.....	205
Tabla 71: Datos sin Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga. ....	206



Tabla 72: Datos de Costos sin Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga.....	206
Tabla 73: Datos de Trabajadores sin Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga.....	207
Tabla 74: Frecuencia Óptima de Inspección sin Detención de Equipo según Modos Correctivos. ....	209
Tabla 75: Parámetros de Gestión de Repuestos Modo Correctivo Cambio Piñón. ....	238
Tabla 76: Tiempos Modo Correctivo Cambio Piñón.....	239
Tabla 77: Parámetros de Gestión de Repuestos Modo Correctivo Cambio Descansos Molino.	241
Tabla 78: Tiempos Modo Correctivo Cambio Descansos Molino. ....	241
Tabla 79: Parámetros de Gestión de Repuestos Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación. ....	244
Tabla 80: Tiempos Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación. ....	244
Tabla 81: Parámetros de Gestión de Repuestos Modo Correctivo Cambio Bomba Levante. ...	247
Tabla 82: Tiempos Modo Correctivo Cambio Bomba Levante.....	247
Tabla 83: Parámetros de Gestión de Repuestos Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga	250
Tabla 84: Tiempos Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga. ....	250
Tabla 85: Análisis de CGM Modificado según Plan de Mantenimiento y Repuestos. ....	255
Tabla 86: Comparación entre Frecuencia de Inspecciones con Detención de Equipo. ....	255
Tabla 87: Resumen de Comparación Costos Totales. ....	256

## Nomenclatura

A: Disponibilidad

$C_{ad}$ : Costo de adquisición del repuesto.

$C_{almac}$ : Costo de almacenamiento.

$C_{elev.}$ : Costo de elevación.

$C_{energía}$ : Costo de energía.

$C_{falla}$ : Costo de falla.

$C_{fungible}$ : Costo de fungible.

$C_{gestión}$ : Costo gestión de compra.  
*compra*

$C_{inter}$ : Costo de intervención.

$C_{mano obra}$ : Costo de mano de obra.

$C_{mano obra}$ : Costo de mano de obra comprador.  
*comprador*

$C_{repuesto}$ : Costo de repuesto.

$C_{transp.}$ : Costo de transporte.

$C_{s-i}$ : Costo de sobre inversiones.

$CGM$ : Costo global de mantenimiento.

$C_{gi}$ : Costo global o total esperado de las inspecciones.

$C_{gr}$ : Costo global o total esperado del repuesto.

$C_{HH}$ : Costo hora-hombre.

$C_{i,i}$ : Costo de intervención de una inspección.

$C_{i,r}$ : Costo de intervención de una reparación.

$CMCN$ : Compañía Minera Cerro Negro.

*Ct*: Cinta transportadora.

*D*: Indisponibilidad.

*EOQ*: Cantidad económica de pedido (Economic Order Quantity).

*F(t)*: Función de distribución propuesta.

*F(i)*: Función de distribución verdadera obtenida con el método de rangos medianos.

*Ff*: Frecuencia de falla.

*FMECA*: Análisis de modos de falla, efectos y criticidad.

*k*: Constante de proporcionalidad.

*K – S*: Kolmogorov – Smirnov.

*L Ff*: Límite de frecuencia de falla.

*L TFS*: Límite de tiempo fuera de servicio.

*MDT*: Tiempo medio de fuera de servicio.

*MTBF*: Tiempo medio entre fallas.

*MTTF*: Tiempo medio para fallar.

*MTTI*: Tiempo medio para inspeccionar.

*MTTR*: Tiempo medio para reparar.

*n*: Tasa de inspecciones.

*n\**: Tasa de inspecciones óptima.

*P<sub>u</sub>*: Precio o costo del repuesto.

*PLC*: Controlador lógico programable.

*q*: Cantidad de pedido.

*q\**: Cantidad óptima de pedido.

*R*: Confiabilidad.

$T$ : Tiempo entre pedidos de repuestos.

$TBF$ : Tiempo entre fallas.

$TFS$ : Tiempo fuera de servicio.

$t_i$ : Tiempo de inspección.

$T_o$ : Tiempo en que el repuesto se encuentra disponible.

$t_r$ : Tiempo de reparación.

$Tr$ : Tiempo en que el repuesto no está disponible.

$\bar{x}_{indisp}$ : Promedio indisponibilidad.

$\bar{x}_{TBF}$ : Promedio de los tiempos entre falla.

$\alpha$ : Nivel de servicio.

$\bar{\alpha}$ : Nivel de servicio óptimo.

$\beta$ : Parámetro de forma de Weibull.

$\gamma$ : Parámetro de localización de Weibull.

$\eta$ : Parámetro de escala de Weibull.

$\iota$ : Tasa de interés.

$\lambda$ : Tasa de fallas.

$\sigma_{TBF}$ : Desviación standard de los tiempos entre falla.

$\Gamma$ : Función Gamma.

# Capítulo I: Introducción

## 1.1. Prefacio.

Compañía Minera Cerro Negro S.A. es una empresa dedicada netamente a la explotación y extracción de minerales. Actualmente, en el área de chancado cuentan con 4 equipos: en la zona primaria un chancador de mandíbula Dragón MP-125, en la zona secundaria un chancador excéntrico de cono Allis Chalmers y en la zona terciaria dos chancadores Sandvik H-4000. Por otro lado, en el área de molienda húmeda operan con 4 molinos de bolas, designados con las letras A, D, E y F; sin embargo, dejaron de utilizar los molinos A, D y F, debido a que se encuentran enfocados en mejorar sus procesos productivos con la optimización de variables, procesos y parámetros. Para ello, se incorporó a la empresa una nueva planta de molienda y flotación, la cual permitirá una mayor producción y tratamiento de mineral de cobre, a través de 6 bi-celdas de flotación y un nuevo molino de bolas, el cual fue designado con la letra G.

En la actualidad, la compañía aplica el mantenimiento correctivo y oportunista a la maquinaria existente dentro de esta, siendo para ellos un problema constante en temas productivos y económicos. De seguir en este escenario, la instalación de la nueva planta de molienda y flotación no tendría el impacto esperado, y el costo de adquisición no se justificaría.

Por lo tanto, el fin de este proyecto de título se basará en establecer métodos y formatos que la empresa deberá implementar al nuevo molino de bolas G, con el fin de evitar detenciones inesperadas, teniendo como resultado un incremento en la producción junto con la disminución de las pérdidas económicas.

A continuación, se procede al desarrollo y elaboración de un plan de mantenimiento para el molino G de la empresa Compañía Minera Cerro Negro S.A., estableciendo acciones y recomendaciones, con su debida metodología para su futura aplicación.

## **1.2. Descripción del Problema.**

El nuevo molino de bolas llega a la empresa el año 2013 desde Shanghái, China. El equipo es nuevo y no cuenta con ningún manual y recomendación del fabricante para el buen funcionamiento del molino. Desde ese año hasta el año 2015 se trabajó en toda la ingeniería de instalación y montaje para luego ponerlo en servicio; no tuvo buenos resultados. El equipo estuvo funcionando solo un mes debido a la falla de uno de los descansos de soporte del molino y, debido a los altos costos iniciales de instalación y montaje, la empresa tomó la decisión de no reparar el componente, postergando la puesta en marcha hasta febrero del presente año. El molino ha estado funcionando desde entonces y ya registra fallas mecánicas importantes, las cuales han provocado la total detención de la producción en la zona de molienda y flotación.

Junto a lo anteriormente expuesto, un problema que agrava aún más la situación es que, dentro de la empresa, las actividades relacionadas con mantenimiento están basadas netamente en el mantenimiento correctivo, provocando un problema sustantivo a nivel empresa en temas de producción, pues se ve afectada a causa de la gran cantidad de detenciones no planificadas junto con la gran cantidad de tiempos asociados a las reparaciones de las fallas y tiempos muertos producto de la mala estructura organizacional que posee la empresa.

Por lo tanto, esta situación que se vive a diario, conlleva dejar de lado el análisis y estudio de la causa raíz que origina las fallas, dando lugar a la solución del problema de manera provisoria, y por ende, al deterioro constante de la maquinaria; situación de la cual el nuevo molino de bolas no está exento.

### **1.3. Objetivo General.**

Diseñar un plan de mantenimiento al Molino de Bolas G de la Compañía Minera Cerro Negro S.A., con el cual se establecerán acciones, recomendaciones y metodologías para su futura aplicación en la empresa.

### **1.4. Objetivos Específicos.**

- Realizar un análisis y levantamiento de información técnica e histórica de los equipos y componentes que conforman al molino de bolas de la compañía, con el fin de identificar los sistemas y sub-sistemas.
- Realizar un análisis de modos de falla, efecto y criticidad al molino de bolas G. (FMECA).
- Realizar análisis de priorización como el diagrama de Pareto y Jack Knife identificando todos los componentes y la criticidad de cada uno, para luego poder determinar el componente más crítico según los criterios utilizados. Posteriormente, se compararán los resultados para llegar a la conclusión y resultados más certera.
- Realizar análisis utilizando el modelo de Weibull en los distintos componentes críticos seleccionados, para luego determinar parámetros como confiabilidad, tasa de fallas, MTBF.
- Realizar árboles de falla para los componentes críticos seleccionados.
- Diseñar un plan de mantenimiento al molino de bolas que se ajuste al contexto operacional de la empresa.
- Otorgar herramientas necesarias para que el personal que compone el área de mantenimiento pueda realizar registros de fallas, análisis y tareas propuestas por el plan.
- Realizar un estudio del impacto económico que generaría en la empresa la implementación del plan de mantenimiento y repuestos.

## Capítulo II: Marco Teórico

### 2.1. Introducción.

A mediados del siglo XX la gran mayoría de los países europeos y de norte américa tenían como objetivo, en sus industrias, que a partir de una inversión debían obtener como resultado la máxima rentabilidad. Este objetivo se vio afectado cuando las decisiones tomadas por los directorios de las empresas tenían directa relación con el cliente, debido a que éste se había convertido en un elemento importante dentro de la empresa, el cual exigía calidad en los servicios y productos otorgados.

Por tanto, este nuevo escenario suponía, para la empresa, una necesidad para poder mantenerse en el mercado y, por ende, mantener un lugar competitivo dentro de éste. Debido a esto surge la urgente necesidad de crear un nuevo departamento dentro de la empresa, el cual se responsabilice y asegure que la producción no será mermada por fallas y, obviamente, por detenciones de los equipos. En los inicios de esta nueva tendencia no se tomaba demasiada importancia al mantenimiento propiamente tal, hasta que lograron darse cuenta que uno de los gastos más grandes dentro de las empresas, ocupando el primer o segundo lugar dentro de los gastos más significativos, se debía a la falta de mantenimiento de los activos.

Después de eso las empresas decidieron darle mayor responsabilidad a este nuevo departamento, otorgándole responsabilidades como:

- Garantizar el continuo funcionamiento de los equipos.
- Reducir tiempos de paralización.
- Reparación de las fallas de los equipos en tiempo oportuno.
- No salir de los límites y estándares establecidos por control de calidad.



Todo activo que debe cumplir un proceso productivo está expuesto a deterioro, tanto por su constante utilización como por la agresividad del medio en el cual trabaja. Por lo mismo, a nivel general dentro de las industrias, hay una preocupación que va dirigida hacia la optimización de los activos, el aseguramiento de su calidad y de la productividad de la maquinaria; con el fin de poder aplacar este efecto. Por lo tanto, el hombre ha diseñado distintos tipos de mantenimientos, los cuales permiten que el activo alcance las condiciones óptimas de funcionamiento y además cumpla con la vida útil esperada (Tavares 2002).

### **2.1.1. Concepto de Mantenimiento.**

Según el Diccionario de la Real Academia Española de la lengua, se define semánticamente mantenimiento como:

1. m. Acción y efecto de mantener o mantenerse.
2. m. Conjunto de operaciones y cuidados necesarios para que instalaciones, edificios, industrias, etc., puedan seguir funcionando adecuadamente.

(Real Academia Española [RAE], 2018)

Por otro lado, según Terry Wireman (1998), el mantenimiento se considera como la administración de todos los activos que posee una compañía, basada en la maximización del rendimiento sobre inversión de activos.

En base a esto, mantenimiento puede considerarse como el trabajo que, gracias al conjunto de operaciones, de recursos humanos, recursos tecnológicos y recursos físicos: equipos, capital y terrenos; permiten obtener una disminución de las detenciones de una empresa y, de la misma forma, lograr un aumento en la producción de esta. Aumentando, también, la disponibilidad y confiabilidad de los equipos.

Entonces, se puede observar que el mantenimiento cumple una función de apoyo, la cual participa en las actividades que, obligadamente, deben estar dentro de una empresa si lo que se busca es una disminución del costo global de mantenimiento durante la vida estimada de los activos. Por otro lado, si la empresa busca optimizar esta función de apoyo, es necesario situarla en el marco de una función más global llamada función equipos. Esta última incluye todas las actividades que están relacionadas con los activos físicos de la empresa:

- Mantenimiento.
- Inversiones en productividad.
- Inversiones en renovación.
- Mejoras de equipos.
- Desarrollo de nuevo equipos.

Esta función será justificada si la empresa cuenta con un presupuesto para cada una de las funciones que la componen (Pascual, 2005).

### **2.1.2. Misión del Mantenimiento dentro de una Empresa.**

La misión está basada en mantener y mejorar los equipos e instalaciones productivas en forma continua y restablecerlos a las condiciones de funcionamiento predeterminadas. Todo esto con el fin de que cumplan con la vida útil esperada, otorgando también una mayor disponibilidad operacional y confiabilidad de los equipos, dando una mayor seguridad y bienestar en el trabajo. Gracias a esto se logra maximizar la productividad y eficiencia de una empresa y, por otro lado, disminuir los costos globales de mantención.

### **2.1.3. Funciones Básicas del Mantenimiento.**

Según Higgins (1994), las funciones básicas del mantenimiento pueden resumirse de la siguiente manera:

- Reparar: Consiste en dar una solución a la falla que impide el funcionamiento del equipo o maquinaria, de manera que se pueda restablecer su funcionamiento.
- Mantener: Está basado en realizar programas/actividades que eviten la falla del equipo y de esta forma mantenerlo en operación.
- Preservar: Consiste en la intervención de forma establecida a la máquina, equipo o instalación con el objetivo de prolongar la vida útil del activo físico.
- Mejorar: Consiste en realizar intervenciones específicas que permiten mejorar la operación de la máquina o instalación y, también, prolongar su vida útil.
- Proyectar: Se basa en la recolección de información y en la correcta interpretación de ésta, de manera que a futuro se puedan tomar acciones sensatas.

#### **2.1.4. Historia del Mantenimiento y su Constante Evolución.**

En los comienzos de la revolución industrial, los operarios eran quienes se encargaban de las reparaciones de los equipos. A medida que la tecnología iba avanzando, la maquinaria se iba volviendo cada vez más compleja y el tiempo de reparación aumentaba considerablemente, debido a esto comenzaron a desarrollarse los primeros departamentos de mantenimiento, los cuales tenían actividades diferentes a los operarios de producción. En este tiempo, las tareas del departamento de mantención eran netamente correctivas, en donde los funcionarios de mantenimiento se dedicaban a solucionar de forma provisoria las fallas de los equipos para luego ponerlos en funcionamiento.

Después de la Primera Guerra Mundial y, sobre todo, de la Segunda Guerra Mundial, aparece un nuevo concepto llamado “Fiabilidad”, en donde, los departamentos de mantenimiento no solo buscan encontrar y solucionar las fallas de los equipos, sino que también buscan prevenirlas, es decir, actuar para que estas no se produzcan.

Este nuevo objetivo re-direcciona al departamento de mantenimiento a crear una nueva entidad, personal cuya única función es estudiar qué tareas de mantenimiento deben realizarse para evitar las fallas. Por otro lado, el personal indirecto, que no está involucrado directamente en la realización de las tareas, aumenta, y con él los costes de mantenimiento, pero el objetivo del departamento es, también, aumentar y fiabilizar la producción, evitar las pérdidas por avería y sus costes asociados.

De este modo, aparecen prácticamente de forma sucesiva diversas estrategias de mantenimiento, cada una según las necesidades concretas de cada proceso industrial: el Mantenimiento Preventivo, el Mantenimiento Predictivo, el Mantenimiento Proactivo, la Gestión de Mantenimiento Asistida por Ordenador y el Mantenimiento Basado en Fiabilidad.

De forma paralela, en los años 80, se promueve la idea de volver al modelo inicial donde los operarios de producción se preocupaban de las tareas de mantención de los equipos, nada más que por temas económicos, pues se pensaba era más rentable, entonces, se desarrolla el TPM (Mantenimiento Productivo Total), en este tipo de mantenimiento alguna de las tareas realizadas por personal del departamento de mantención son ahora realizadas por operadores de producción; tareas son tales como: trabajos de limpieza, lubricación, ajustes, reaprietes de tornillos, etc. Con esto se pretende que el operario se involucre más en el cuidado de la máquina, siendo el objetivo último del TPM conseguir Cero Averías.

Como se puede comprobar, las distintas estrategias de mantenimiento han ido evolucionando constantemente a lo largo del último siglo según las carencias que se observaban en cada una de las estrategias de mantenimiento al aplicarlos a la situación “Industria Real”, de manera que unas estrategias engloban a otras, otras interactúan entre ellas, y todas se han ido adaptando a los nuevos usos de la industria.

Moubray (1991) mencionaba que se podía seguir el rastro de la evolución del mantenimiento a través de tres generaciones. Actualmente, con más estudio detrás, se mencionan cuatro generaciones en la evolución del concepto de mantenimiento:

- **1ª Generación:** Es considerada la generación más larga, desde la revolución industrial hasta después de la Segunda Guerra Mundial, aunque todavía impera en muchas industrias. El mantenimiento se ocupa solo de arreglar las averías. Se aplica el Mantenimiento Correctivo.
- **2ª Generación:** Entre la Segunda Guerra Mundial y finales de los años 70 se descubre la relación entre edad de los equipos y probabilidad de fallo. Se comienza a hacer sustituciones preventivas. Se aplica el Mantenimiento Preventivo.

- **3° Generación:** Surge a principio de los años 80. Se comienzan a realizar estudios causas-efectos para averiguar el origen de los problemas. Es el Mantenimiento Predictivo o detección precoz de síntomas incipientes para actuar antes de que las consecuencias sean inadmisibles. Se comienza a hacer partícipe al departamento de producción en las tareas de detección de fallos.
- **4° Generación:** Aparece a comienzos de los años 90. El mantenimiento se contempla como una parte del concepto de Calidad Total: “Mediante una adecuada gestión del mantenimiento es posible aumentar la disponibilidad al tiempo que se reducen los costos. Se identifica el mantenimiento como fuente de beneficios, frente al antiguo concepto de mantenimiento como “mal necesario”. La posibilidad de que una máquina falle y las consecuencias asociadas para la empresa es un riesgo que hay que gestionar, teniendo como objetivo la disponibilidad necesaria en cada caso al mínimo coste.

A continuación, en la Tabla 1 se muestra en resumen la evolución del mantenimiento,

<i>1° Generación</i>	<i>Reparar averías Mantenimiento correctivo</i>	<i>Desde 1820 - Hasta 1945</i>
<i>2° Generación</i>	<i>Relación entre probabilidad de fallo y edad Mantenimiento preventivo programado Sistemas de Planificación</i>	<i>Desde 1945 - Hasta 1980</i>
<i>3° Generación</i>	<i>Mantenimiento preventivo condicional Análisis causa-efecto Participación de producción (TPM)</i>	<i>Desde 1980 - Hasta 1990</i>
<i>4° Generación</i>	<i>Proceso de mantenimiento Calidad total Mantenimiento como fuente de beneficios Compromiso de todos los departamentos Mantenimiento basado en el riesgo (RBM)</i>	<i>1990+</i>

Tabla 1: Evolución Histórica del Mantenimiento – Fuente: Guardia, R. (2017).

### **2.1.5. Gestión del Mantenimiento.**

La gestión del mantenimiento abarca el conjunto de técnicas y métodos que tienen como finalidad conseguir una utilización óptima de los activos físicos de una empresa, manteniéndolos en el estado que requiere una producción eficiente con gastos mínimos. Entonces, la finalidad de esta política de mantenimiento busca que los equipos se mantengan operando con el menor número de fallas posibles.

#### **Estrategias del Mantenimiento.**

Para lograr el objetivo de la gestión del mantenimiento se llevan a cabo las siguientes tres medidas:

- 1. Reparación de los activos físicos una vez que se produce la falla:** A este punto se le denomina Mantenimiento Correctivo, y suele ser utilizado cuando el componente puede ser reparado y su falla no altera al sistema global. A continuación, se da una explicación más detallada de la estrategia.
  - **Mantenimiento Correctivo:** Esta actividad se caracteriza porque su realización ocurre después de haber ocurrido una falla, con el fin de corregirla, disminuir el daño, reparar el equipo y volverlo a su condición de funcionamiento normal. Este tipo de mantenimiento puede ser realizado en forma de emergencia, cuando se requiere poner el equipo en marcha de inmediato. O bien, puede ejecutarse más tarde en forma programada, solo en aquellos casos en que el equipo puede seguir operando después de la falla.

*Alguna de las ventajas que tiene este tipo de mantenimiento son:*

- Existe un máximo aprovechamiento de la vida útil de los equipos.
- El costo de implementación de este tipo de mantenimiento es mínimo.
- Es rentable en equipos que no detienen la producción de la empresa de forma directa.

*Alguna de las desventajas que tiene este tipo de mantenimiento son:*

- Hay una bajísima calidad en las reparaciones, debido al poco tiempo disponible para poder reparar las fallas.
- Las fallas ocurren de manera imprevista, por tanto, hay mermas importantes en la producción.
- Existe una alta probabilidad de que fallen elementos que sean difíciles de obtener, lo que implica contar con un stock de repuestos importantes.

**2. Mantener los equipos redundantes:** Este punto se aplica cuando la Confiabilidad del sistema, dentro de una empresa, se puede mejorar al tener tanto equipos como repuestos redundantes. Los cuales suelen llamarse sistemas en “Stand By” y en Paralelo.

**3. Mantenimiento de los equipos antes de que estos fallen:** El tercer punto se aplica cuando la meta dentro de una empresa es optimizar la frecuencia y tiempos de mantenimiento, con el fin de reducir costos globales de mantención. Objetivo que no puede ser alcanzado por el mantenimiento correctivo. A continuación, se da una explicación más detallada de la estrategia.



- **Mantenimiento Preventiva:** Esta mantención se realiza antes de que ocurra una falla, pues con la aplicación de este método se busca evitar que suceda, disminuir los efectos, limitar el desarrollo de la falla y disminuir el daño. Se caracteriza, además, porque este tipo de mantenciones tiene su contenido y fundamentos escritos en una pauta y lista de chequeos. La mantención preventiva suele estar programada y suele encontrarse en el Plan Maestro de Mantención y una de las características más importantes de este tipo de mantenimiento es la inspección que se realiza a los equipos, la cual puede ejecutarse a través de instrumentos sencillos y poco sensibles, o bien, con instrumentos complejos y de alta sensibilidad. Suelen, además, realizarse trabajos como ajustes, reparaciones, cambios o servicios que tiene como único fin alargar la vida útil de los componentes. La vida útil se puede obtener a través de un estudio de ingeniería en donde el tiempo de desarrollo de la falla y el tiempo medio entre fallas son los datos básicos necesarios.

Existen dos formas de aplicar el mantenimiento preventivo:

- a. **Mantenimiento Preventiva Sistemática:** Este tipo de mantenimiento se realiza en base a un programa de mantención previamente establecido. Para poder aplicarlo se requiere conocer la vida útil o duración del mecanismo, o bien, del elemento que se va a intervenir. Debido a que la frecuencia de las actividades a realizar tiene relación directa con la vida útil de los mecanismos o componentes. El trabajo se realiza porque se sabe que el elemento al cual se va a intervenir está en la recta final de su vida útil, y si no se hace, puede ocurrir una falla, disminución del rendimiento, o producir daños colaterales.

**b. Mantenimiento Preventiva Basada en la Condición o Condicional:** Este tipo de mantenimiento también se realiza en base a un programa de mantenimiento previamente establecido, con la diferencia que, en este, el plan se basa en un acontecimiento predeterminado.

*Alguna de las ventajas que tiene este tipo de mantenimiento son:*

- Hay tiempo para poder planificar un buen plan de mantenimiento.
- Aumenta, considerablemente, la vida útil de los equipos.
- Existe una importante disminución de las detenciones imprevistas en los equipos

*Alguna de las desventajas que tiene este tipo de mantenimiento son:*

- Aumenta el costo y disminuye la disponibilidad si no se elige correctamente la frecuencia de intervención de las acciones preventivas.
- Inicialmente hay un aumento considerable en el mantenimiento.
- El elemento deberá cambiarse, aunque se encuentre funcionando de forma óptima.

- **Mantenimiento Predictiva o Según Condición:** Este tipo de mantenimiento se aplica según un programa previamente establecido, el cual tiene como actividad principal la inspección de los equipos y componentes con equipos de alta sensibilidad. El objetivo de esta mantención es detectar, en una etapa prematura, el desarrollo de la falla, con el fin de que se pueda detectar la condición en la que se encuentra el equipo y, en base a esto, tomar medidas que eviten la continuación de la falla. Los instrumentos utilizados son analizadores de vibraciones, detectores de ultrasonido, termografía infrarroja, rayos X, líquidos penetrantes, etc.

*Alguna de las ventajas que tiene este tipo de mantenimiento son:*

- Debido a que las revisiones son en base a resultados y no a percepción, los equipos duran mucho más.
- Mas confiabilidad en el mantenimiento, pues al utilizar instrumentos y personal de mayor calidad, los resultados debiesen ser más exactos.
- Se requiere menos personal, por lo que genera una disminución en el costo de personal y en los procesos de contratación.

*Alguna de las desventajas que tiene este tipo de mantenimiento son:*

- Es importante contar con personal calificado para realizar las actividades predictivas, por lo que hay un mayor costo asociado.
- Se requieren equipos especiales y costosos.
- Costosa implementación.

### **Conceptos Básicos en la Gestión del Mantenimiento.**

En este apartado se introducen los conceptos más importantes en la Gestión del Mantenimiento (Meruane, 2011).

**Mantenimiento/Mantenibilidad:** Mantenimiento se define como el conjunto de acciones que, ejecutadas en un componente, lo restauran a un estado específico. Cuando a un componente se aplica mantención se considera que queda como “nuevo”.

La Mantenibilidad es la probabilidad de que se pueda restaurar la funcionalidad de un componente que posee falla en un tiempo determinado.

**Confiabilidad:** La confiabilidad,  $R$ , es la probabilidad de que un componente cumpla con los requerimientos de funcionalidad, bajo ciertas condiciones, para un intervalo de tiempo determinado. Cualitativamente, la confiabilidad es la capacidad que tiene un componente de permanecer funcional. En otras palabras, que no existan interrupciones (fallas) durante un periodo de tiempo.

**Tasa de Falla:** La tasa de falla,  $\lambda$ , se define como el número de fallas ocurridas en un tiempo determinado. La tasa de falla de un sistema pueda variar con el tiempo y uno de los gráficos más utilizados para explicar esa variación en la tasa de falla en componentes durante su vida útil es “La curva de la bañera”, que se muestra en la Figura 1.

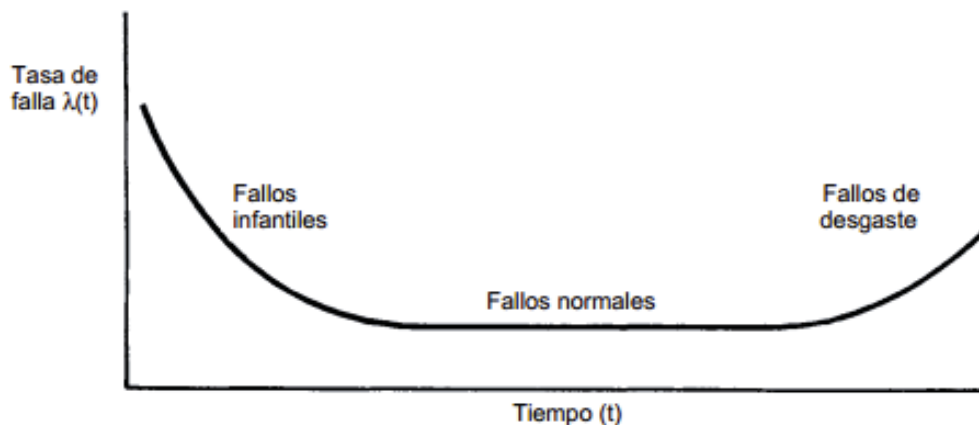


Figura 1: Curva de la Bañera - Fuente: Meruane, V. (2011).

- **En la primera parte de la curva**, en donde la tasa de falla va disminuyendo, ocurren las fallas infantiles o prematuras, que usualmente están relacionadas con procesos de manufactura y control de calidad (soldaduras, uniones, suciedad, grietas, impurezas, ajustes, montajes, posicionamientos incorrectos, alineamientos, desconocimiento del equipo, errores de diseño, desconocimiento del procedimiento, etc.).

- **En la segunda parte de la curva**, en donde la tasa de falla se mantiene constante, se denomina usualmente como fallos constantes o etapa de madurez. En esta etapa las fallas no se producen por causas relacionadas con el equipo, sino por factores externos, tales como mala operación del equipo, condiciones inadecuadas de operación, etc.
- **En la tercera parte de la curva**, en donde la tasa de fallas aumenta rápidamente, se describen las fallas de desgaste y se asume que el aumento de la tasa se produce debido a que los mecanismos de desgaste se aceleran. Suele ocurrir por el desgaste natural del equipo debido a que se encuentra en la fase última de su vida útil.

**Tiempo Medio Para Fallar (MTTF):** En un periodo de tiempo determinado, dentro de la vida de un activo físico, se entiende como el tiempo promedio que funcionará o estará disponible un equipo antes de fallar. Se define como la razón entre el tiempo total disponible y el número de fallas.

**Tiempo Medio Para Reparar (MTTR):** Se entiende como el tiempo que tarda un activo físico, el cual ha presentado falla, en volver a estar en condiciones de funcionalidad. Y se define como:

$$MTTR = \frac{\sum(Ffi * t_{r,i})}{\sum Ffi}$$

En donde,

- $t_{r,i}$  es el tiempo que demoran en reparar la falla  $i$ .
- $Ffi$  la frecuencia de fallas.

**Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF):** Se entiende como el tiempo promedio entre fallas de un sistema. Y puede obtenerse a través de la suma entre MTTF y MTTR, como se muestra en la Figura 2.

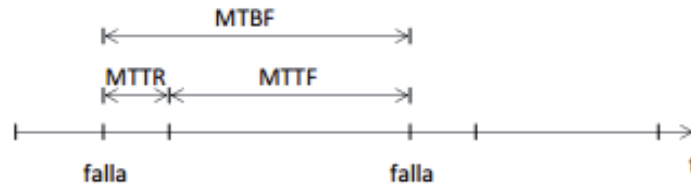


Figura 2: Tiempo Medio Entre Fallas - Fuente: Meruane, V. (2011).

**Tiempo Medio Fuera de Servicio (MDT):** Se entiende como el tiempo promedio en que un equipo se encuentra fuera de servicio producto de una falla. Para calcularlo se deben considerar todos los MTTR del componente.

**Disponibilidad:** La disponibilidad describe el tiempo total que un equipo se encuentra en condiciones de funcionalidad. Este parámetro está dado por la confiabilidad y la mantenibilidad. En la Figura 3, podemos ver un gráfico del tiempo en que un equipo se encuentra disponible (MTTF) y no disponible (MDT).

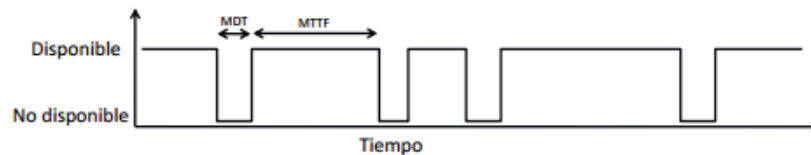


Figura 3: Disponibilidad de un Sistema - Fuente: Meruane, V. (2011).

La disponibilidad se define como:

$$A = \frac{MTTF}{MDT + MTTF}$$

## **Estructura de Costos en la Gestión del Mantenimiento.**

Una de las principales tareas de los encargados de administrar las funciones de mantenimiento consiste, principalmente, en minimizar los costos asociados a estas funciones.

A continuación, se explicará con mayor detalle cada uno de los costos.

**Costo Global de Mantenimiento (CGM):** Según la norma francesa (como se citó en Pascual, 2005) el CGM se define como la suma de cuatro componentes:

1. Costo de Intervención ( $C_{inter}$ ).
2. Costo de Falla ( $C_{falla}$ ).
3. Costo de Almacenamiento ( $C_{almac}$ ).
4. Costo de Sobre-Inversiones ( $C_{s-i}$ ).

Entonces,

$$CGM = C_{inter} + C_{falla} + C_{almac} + C_{s-i}$$

**1. Costo de Intervención ( $C_{inter}$ ):** Este costo incluye los gastos relacionados con mantenimientos correctivos y preventivos. Y está compuesto por:

- **Costo de la mano de obra interna o externa:** El costo de mano de obra interna se define como el tiempo gastado en la intervención por el costo hora-hombre. Por otro lado, el costo de mano de obra externa se puede obtener de la factura o por las hora-hombre requeridas en la intervención.

- **Costo de repuestos comprados para una intervención o repuestos de bodega:** Los repuestos que son comprados para la intervención se valoran de acuerdo a la factura del producto. Los costos de los repuestos que se encuentran en bodega deben ser valorados al precio actual en el mercado y no con el valor que ingresaron a bodega.
- **Costo de material fungible requerido para la intervención:** El costo del material fungible se valora según la cantidad de material que se utilice.

Entonces,

$$C_{inter} = C_{mano\ obra} + C_{repuesto} + C_{fungible}$$

**2. Costo de Falla ( $C_{falla}$ ):** Este costo corresponde a las pérdidas de utilidades, las cuales están relacionadas con factores como la no producción debido a la falla de un componente, a la merma de la calidad del producto, pérdida de materias primas, disminución de la tasa de producción, etc. Para el desarrollo del cálculo de costo de falla, se deben considerar tres escenarios posibles dentro de una empresa:

- **El volumen perdido de producción aún puede ser recuperado:** En este escenario el costo de falla corresponde a los gastos extras que se necesitan para poder recuperar la producción perdida.
- **El volumen perdido de producción no podrá ser recuperado:** Bajo este escenario el costo de falla está netamente relacionado a la pérdida de ingresos, menos los costos de materias primas y productos que no fueron utilizados en el tiempo en que la producción estuvo detenida.



- ***La producción no se detiene, pero la calidad del producto disminuye:*** Cuando la calidad del producto disminuye, el precio al cual este es vendido también disminuye. Por lo tanto, el costo de falla está relacionado con la pérdida de ingresos.
- 3. Costo de Almacenamiento ( $C_{almac}$ ):** Este costo está relacionado con los gastos incurridos en el financiamiento y manejo del inventario de repuestos, como también de los insumos que son necesarios para el mantenimiento. Los costos de almacenamiento incluyen lo siguiente:
- La mano de obra dedicada a la gestión y manejo del inventario en bodega.
  - El interés financiero del capital inmovilizado por el inventario.
  - Costo en seguros.
  - La depreciación comercial de los repuestos.
  - Los costos de explotación de edificios, tales como energía, seguridad y mantenimiento.
  - Amortización de sistemas adjuntos: montacargas, sistema informático, etc.
- 4. Costo de Sobre-Inversiones ( $C_{s-i}$ ):** Este costo está relacionado con los gastos incurridos en el diseño inicial de una planta. Cuando se inicia un proyecto se adquieren equipos que minimicen el costo global de mantenimiento durante su ciclo de vida y muchas veces, se compran equipos que tienen como inversión un costo muy alto, pero los costos de intervención y almacenamiento asociados a éste son mucho menores.

## **Análisis de Fallas y Criticidad.**

Antes de diseñar un plan o estrategia de mantenimiento de un equipo, es necesario conocer el funcionamiento de este, los fenómenos que provocan su degradación, las eventuales fallas y los componentes más críticos.

A continuación, se muestran con detalles las estrategias que se utilizarán en el presente trabajo de título.

**Diagramas de Bloques:** En un diagrama de bloques se representa de forma gráfica los diferentes procesos de un sistema. Además, se describe el sistema o equipo que se está analizando como un número de bloques funcionales, los cuales están conectados según el efecto que provoca cada falla de un bloque en la confiabilidad del sistema (Meruane, 2011).

Para la realización de un diagrama de bloques deben tenerse en cuenta las siguientes condiciones:

- La función de los bloques se debe identificar fácilmente.
- Cada bloque debe representar el mayor número posible de componentes. La idea es que el diagrama sea lo más sencillo posible.
- Cada bloque debe ser independiente, es decir, la falla de uno de los bloques no debe afectar la probabilidad de falla de otro bloque.
- Cada bloque debe tener un tipo de tecnología (eléctrico, mecánico o electromecánico).

**Árboles de Falla:** Es considerado un análisis deductivo en el que un estado no deseado o una falla, son analizados a través del álgebra Booleana. Este método de análisis es utilizado frecuentemente en campos de la ingeniería de confiabilidad, con objeto de comprender cómo pueden fallar los sistemas que conforman los equipos y para identificar las formas posibles de reducir los riesgos.

Un árbol de falla se construye con tres operaciones lógicas básicas (Meruane, 2011).:

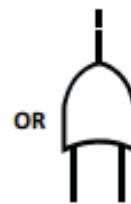
- **AND:** El evento de salida ocurre si y solo si todos los eventos de entrada ocurren.
- **OR:** El evento de salida ocurre si uno o más de los eventos de entrada ocurren.
- **Voting OR:** El evento de salida ocurre si n o más de los eventos de entrada ocurre.

Estas operaciones son representadas a través de dos símbolos, mostrados en las Figura 4 y 5, cada uno de los símbolos tiene entradas en la parte inferior y cada una de esas entradas representan fallas. Las salidas se ubican en la parte superior y representan la propagación de la falla.

En términos de probabilidad, la operación AND multiplica las probabilidades de falla y la operación OR las suma.



**Figura 4: Simbología  
Operación Lógica AND -  
Fuente: Meruane, V.  
(2011).**



**Figura 5: Simbología  
Operación Lógica OR -  
Fuente: Meruane, V.  
(2011).**

En la Figura 6, se muestran ejemplos de un árbol de fallas para el suministro de agua y otro para la protección de incendios. En ambos árboles los rectángulos representan un evento de falla y los círculos, los cuales siempre se ubican en la parte más baja de los árboles, representan eventos de falla primarios.

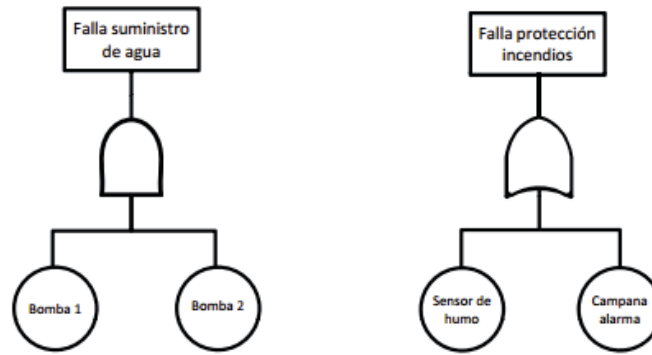


Figura 6: Ejemplos de Árboles de Falla - Fuente: Meruane, V. (2011).

**Análisis de Pareto:** Este análisis se denomina así por el economista y sociólogo italiano Wilfredo Pareto (1848-1923). Quien luego de hacer un estudio respecto de la riqueza de Italia se dio cuenta que el 20% de las personas controlaba el 80% de las riquezas. Esta lógica, de que los pocos poseen mucho y los muchos poseen poco ha sido aplicada en muchas situaciones y es conocido comúnmente como el principio de Pareto.

El rumano Joseph Moses Durán fue quien introdujo por primera vez el principio de Pareto en el área de control de calidad dentro de una empresa. Joseph decía que siempre eran unos pocos defectos los que causaban los mayores costos, es decir, el 20% de los problemas originaba el 80% de los costos.

Según Meruane (2011), para la construcción de este diagrama primero se debe recopilar información respecto a las fallas de un equipo y luego clasificar los datos en grupo, es decir, de acuerdo al tipo de falla, causa, efecto, etc. Posteriormente, a cada grupo se asocia un número de fallas, horas de detención y los costos totales asociados (para el cálculo de costos debe tomarse en cuenta la estructura de costos mencionada anteriormente).

Modo Falla	Nº Fallas	Hrs. Detención	Costos
1	2	17	100
2	8	22	30
3	9	2	19
4	12	5	4
5	4	8	80
6	2	3	65
7	7	3	12

**Tabla 2: Ejemplo de Registro de Datos para  
Análisis Pareto – Fuente: Propia.**

Luego, con los datos de la Tabla 2, se pueden construir distintos tipos de Diagramas de Pareto; según el criterio que se quiera analizar: costos, horas de detención o el número de fallas. Seguidamente, los datos seleccionados deben ordenarse de forma descendente, para luego calcular los porcentajes relativos y acumulados. Se muestra como ejemplo la Tabla 3:

Modo Falla	Hrs. Detenido	%Hrs. Detenido	%Hrs. Detenido Acumulado
2	22	36,7	36,7
1	17	28,3	65,0
5	8	13,3	78,3
4	5	8,3	86,7
6	3	5,0	91,7
7	3	5,0	96,7
3	2	3,3	100,0

**Tabla 3: Ejemplo de Tabla de Datos para Análisis de Pareto – Fuente: Propia.**

Finalmente, de forma gráfica, se deben representar los porcentajes relativos y acumulados en los ejes verticales y los tipos de falla o intervenciones correctivas en el eje horizontal, los cuales se obtuvieron en la Tabla 3. A continuación, en la Figura 7, se muestra el resultado:

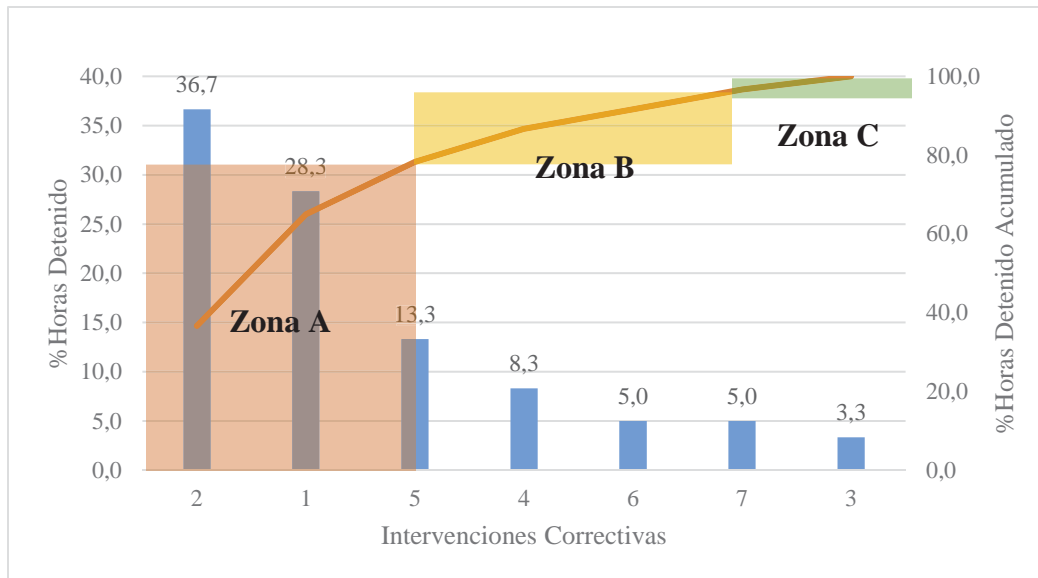


Figura 7: Ejemplo Diagrama de Pareto – Fuente: Propia.

Según el Gráfico, podemos ver que la curva se divide en tres zonas:

- **Zona A:** Esta es considerada la zona crítica del diagrama de Pareto. Aquí se muestran, aproximadamente, el 20% de las fallas que generan el 80% de las horas detenidas. Se debe dar prioridad a estas fallas.
- **Zona B:** En esta zona se encuentran concentrados aproximadamente el 15% de las horas, las cuales son producidas por el 30% a 40% de las fallas. Estas fallas tienen prioridad mediana.
- **Zona C:** Esta zona es considerada la de menor prioridad, puesto que solo se concentran el 5% de las horas, las cuales son producidas por el 50% de las fallas aproximadamente. Las fallas ubicadas en esta zona tienen una baja prioridad.

**Análisis de Jack Knife:** El método es considerado como una técnica de priorización, la cual se basa, principalmente, en los métodos de dispersión logarítmica; utilizando como base el TFS (tiempo fuera de servicio) o MTTR y la frecuencia de fallas del equipo o sistema. Jack Knife es utilizado, principalmente, para la clasificación de problemas que causan los tiempos de detención de los equipos y para poder clasificar los equipos de acuerdo a sus fallas.

Por otro lado, según las Técnicas de Priorización (como se citó en Pascual, 2005), Jack Knife es necesario realizarlo como complemento al análisis de Pareto si lo que se desea es encontrar los componentes críticos de un equipo, debido a que este último tiene las siguientes deficiencias:

- Los diagramas de Pareto basados en la no disponibilidad o en los costos de intervención, falla, almacenamiento y otros, no son capaces de discernir qué factor, ya sea frecuencia de fallas o TFS, es dominante.
- Los diagramas de Pareto se pueden realizar de diversas formas (CGM, Costos de intervención, downtime, TFS y tasa de fallas), dependiendo del criterio que se elija para analizar las fallas. Entonces, para tener una respuesta más certera y global, es necesario combinar estos criterios.
- Suelen ser incapaces de discernir entre eventos individuales con alto costo de falla y fallas frecuentes con costos reducidos unitarios, los cuales en conjunto afectan de forma importante la productividad y, por ende, los costos.
- Suele ser difícil realizar análisis de tendencia con los diagramas de Pareto, pues las posiciones relativas de los modos de falla pueden cambiar entre dos mediciones.

El diagrama de Jack Knife se divide en cuatro cuadrantes:

- **Cuadrante Superior Izquierdo (A):** Aquí se encuentran las fallas agudas, las cuales corresponden a aquellas que se encuentran bajo control, pero mantienen al equipo fuera de servicio por un tiempo muy prolongado.
- **Cuadrante Inferior Derecho (B):** En este cuadrante se encuentran ubicadas las fallas crónicas, es decir, aquellas que no están controladas debido a que su ocurrencia es muy frecuente, sin embargo, tienen un tiempo de reparación muy bajo.
- **Cuadrante Superior Derecho (C):** Las fallas ubicadas en este cuadrante son consideradas las más críticas, pues tienen características de ser crónicas y agudas, es decir, con un alto tiempo de reparación y con una ocurrencia muy alta.
- **Cuadrante Inferior Izquierdo (D):** Las fallas ubicadas en este cuadrante se encuentran bajo control, debido a que la frecuencia y el tiempo de reparación de estas fallas son bajos.

A continuación, se muestra la Tabla 4 (Durán, 2018). Necesaria para poder graficar el diagrama de Jack Knife:

Modo Falla	Cant. Fallas	Frecuencia Falla ( $1/ut$ )	MTTR (hr)	TFS ( $ut$ )	Indisp. ( $D$ )
1	2	0,17	300	0,417	0,069
2	2	0,17	100	0,139	0,023
3	4	0,33	10	0,014	0,005
4	3	0,25	8	0,011	0,003
5	2	0,17	12	0,017	0,003
6	3	0,25	4	0,006	0,001

**Tabla 4: Ejemplo Tabla de Datos para Análisis de Jack Knife – Fuente: Propia.**



Para construir la tabla, se debe tener en cuenta que:

- La frecuencia de fallas se obtiene de la siguiente manera:

$$Ff = \frac{\text{Cantidad Fallas}}{\text{Periodo [ut]}}$$

- El TFS se define como:

$$TFS = MTTR[ut]$$

Dónde: [ut] sería la unidad de tiempo del periodo que abarca el análisis (día, mes, año).

- Y la indisponibilidad se calcula como:

$$D = Ff * TFS$$

Los cuadrantes mencionados anteriormente, se obtienen a través de dos límites:

- **Límite TFS:** Se define como la razón entre la sumatoria del tiempo fuera de servicio que estuvo el equipo, producto de las reparaciones de las fallas, y el número de modos de falla.

$$L TFS = \frac{\sum TFS}{N^{\circ} \text{ Modos Falla}}$$

- **Límite Frecuencia Falla:** Se define como la razón entre la sumatoria de la frecuencia de las fallas y el número de modos de falla.

$$L Ff = \frac{\sum Ff}{N^{\circ} \text{ Modos Falla}}$$

Además, Jack Knife cuenta con una curva de iso-indisponibilidad promedio generada por los modos de falla del equipo. Se construye con dos puntos de la siguiente manera,

$$\text{Punto 1}_{[x,y]} = \left[ \text{mín}(Ff); \frac{\bar{x}_{Indisp.}}{\text{mín}(Ff)} \right]$$

$$\text{Punto 2}_{[x,y]} = \left[ \text{máx}(Ff); \frac{\bar{x}_{Indisp.}}{\text{máx}(Ff)} \right]$$

Finalmente, se grafican los datos mencionados, dando como resultado el gráfico mostrado en la Figura 8:

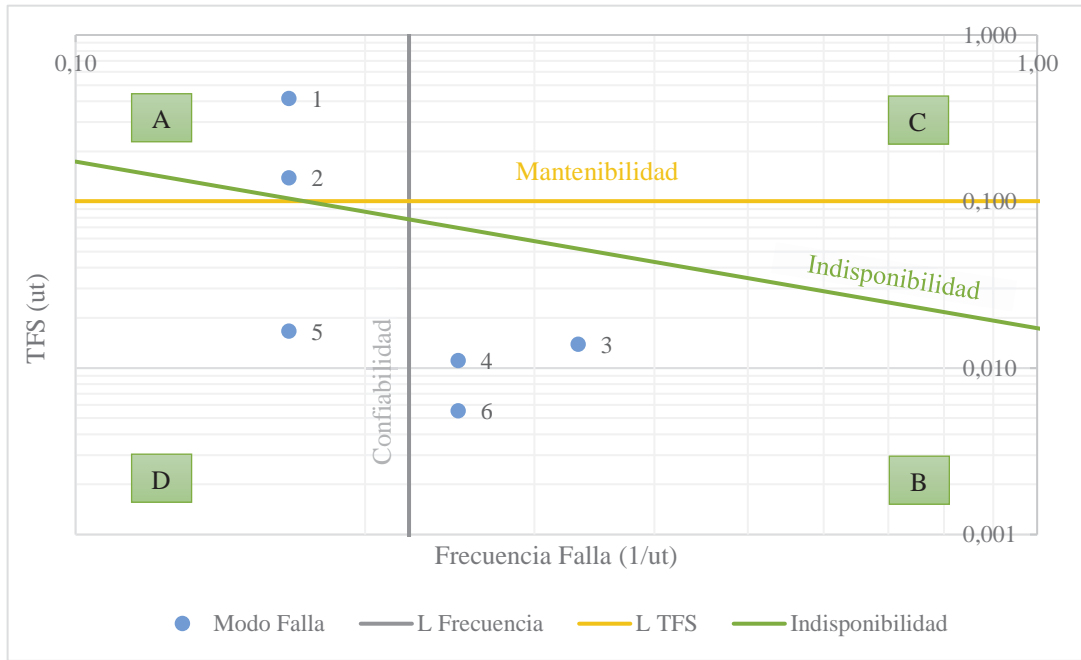


Figura 8: Ejemplo Diagrama de Jack Knife – Fuente: Propia.

Del gráfico, la curva verde representa la indisponibilidad promedio que generan en el equipo los distintos modos de falla, entonces, los modos que están por sobre esta curva generan mayor indisponibilidad que la D promedio, y en consecuencia son considerados los más críticos. La curva amarilla representa la línea media de mantenibilidad, la cual se obtuvo con el cálculo del Límite *TFS*; cualquier punto o modo de falla que se encuentre por encima de esta curva indica que requiere un tiempo de reparación mayor que el promedio, por lo tanto, afecta en gran medida la mantenibilidad del equipo y se consideran fallas agudas. Y la curva gris, representa la línea media de confiabilidad, la cual se obtuvo con el cálculo del Límite *Ff*; cualquier punto o modo de falla que sobrepase esta línea indica que tiene una frecuencia de falla mayor que el promedio afectando en gran medida a la confiabilidad del equipo, por tanto, se consideran fallas crónicas.





- I: Insignificante, el efecto sobre la confiabilidad, disponibilidad y la seguridad es mínimo.
- II: Menor, no afecta la seguridad, pero si la confiabilidad y disponibilidad.
- III: Mayor, no afecta la seguridad, pero la confiabilidad y disponibilidad de manera importante.
- IV: Crítica, la seguridad es afectada.

### **Modelos de Confiabilidad.**

Los modelos de confiabilidad están basados en distribuciones probabilísticas, las cuales describen, a través de funciones matemáticas, la probabilidad de que un evento se realice en el futuro. Son consideradas herramientas fundamentales para la prospectiva, debido a que se pueden diseñar acontecimientos o escenarios futuros a través de las tendencias actuales de los diversos fenómenos seleccionados para el estudio.

Dentro de las distribuciones probabilísticas, utilizadas en los modelos de confiabilidad, se encuentran algunas como: Distribución de Poisson, Distribución Geométrica, Distribución Gaussiana, Distribución Exponencial y Distribución de Weibull. Esta última, se seleccionará para la elaboración del modelo de confiabilidad.

**Distribución de Weibull:** La elección de este análisis se basa en que es la técnica más elegida para estimar una probabilidad basada en datos medidos o asumidos, debido a su versatilidad, facilidad de interpretación y la gran adaptabilidad que tiene respecto a una variedad de observaciones experimentales, las cuales pueden ser pequeños tamaños de muestra necesarios para convergir a parámetros precisos. Otra de las características que tiene este tipo de distribución es que puede ser utilizada en sistemas mecánicos, debido a su gran flexibilidad (Pascual, 2005).

La Distribución de Weibull fue descubierta por el ingeniero y matemático Waloddi Weibull, la cual fue anunciada por primera vez en un escrito el año 1951. Esta distribución consta de tres parámetros y suele ser bastante útil debido a la habilidad que tiene de simular un amplio rango de distribuciones, como las nombradas anteriormente.

La distribución de Weibull es la siguiente:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta}$$

Donde,

$t - \gamma \geq 0$ ;

$\beta$  es el parámetro de forma (adimensional);

$\eta$  es el parámetro de escala (en unidades de tiempo);

$\gamma$  es el parámetro de localización (en unidades de tiempo);

El parámetro de forma  $\beta$  es el indicador del mecanismo de falla y su valor nos indica en qué punto de la curva de la bañera se encuentra el componente analizado. A continuación, se muestra una clasificación más detallada de éste (Jara, 2014):

- Para  $0 < \beta < 1$  implica fallas prematuras o infantiles. Es decir, los equipos mecánicos o electrónicos comienzan con una alta tasa de fallas en el inicio de un diseño o proyecto debido

a problemas de ensambles, desconocimiento del equipo, desconocimiento operacional, problemas de alineamiento, entre otras. Finalmente, cuando se normaliza la situación, la tasa de fallas decrece con la edad

- Para  $\beta = 1$  implica fallas constantes y aleatorias. Es decir, los equipos se encuentran en una etapa de madurez donde las fallas se deben principalmente a errores de mantenimiento, errores humanos, fallas debido a condiciones climáticas adversas, entre otros.
- Para  $1 < \beta < 4$  implica falla por deterioro prematuro. Es decir, los equipos comienzan a fallar mucho antes de cumplir su ciclo de vida producto de bajos ciclos de fatiga, corrosión, erosión, mal utilización de los equipos, entre otros.
- Para  $\beta > 4$  implica falla por o deterioro rápido por edad de uso. Es decir, los equipos ya han cumplido su ciclo de vida y la tasa de falla comienza a aumentar de manera exponencial.

El parámetro de escala  $\eta$  es el indicador del tiempo o vida característica. Cuando hay un cambio de magnitud en este parámetro ocurre el mismo efecto en la distribución que un cambio de escala en la abscisa, es decir, para un mismo valor de  $\beta$  y  $\gamma$  en una distribución normal; si  $\eta$  incrementa la distribución se contrae y si  $\eta$  disminuye la distribución se expande. Además,  $\eta$  es definida como la edad en la cual el 63,2% de las unidades puede fallar.

$$F(t = \eta, \beta) = 1 - e^{-(t/\eta)^\beta} = 1 - e^{-(1)^\beta} = 0,632 = 63,2\%$$

El parámetro de localización  $\gamma$  es un indicador del tiempo en que comienza a desgastarse un equipo o componente, por lo que sirve para ubicar el inicio de la distribución a lo largo del eje x.

En la Figura 9 se muestra un ejemplo de la Distribución de Weibull para distintos valores del parámetro de forma  $\beta$ :

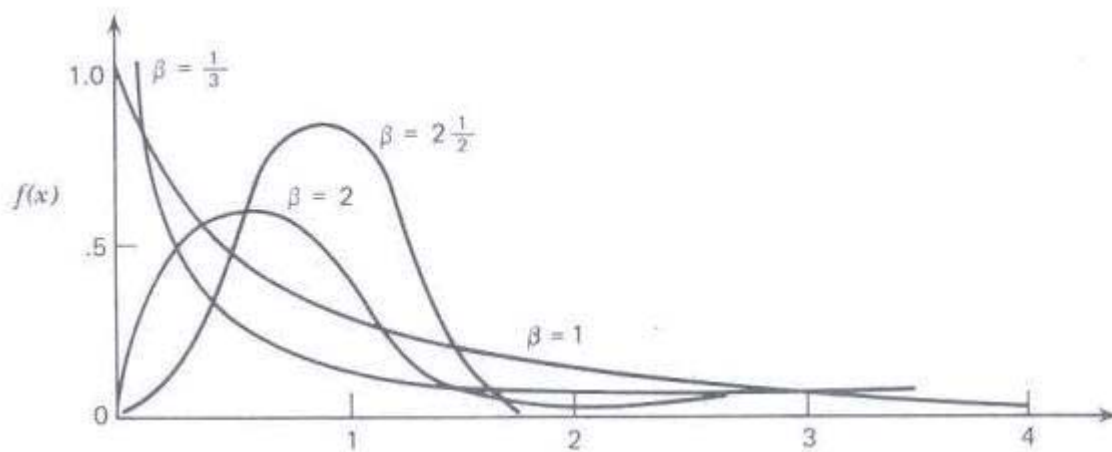


Figura 9: Función de Densidad de Probabilidad Weibull para Distintos  $\beta$  – Fuente: <http://reliabilityweb.com>.

**Determinación de los Parámetros a través del Método de los Mínimos Cuadrados:** El método de los mínimos cuadrados permite calcular los parámetros de forma y escala por medio de una regresión lineal, la cual se obtiene a través de la transformación doble logarítmica de la función de distribución acumulativa, método muy utilizado en ajustes de curvas. Para poder aplicarlo y obtener los parámetros de Weibull se debe obtener, de la hoja de vida del equipo o sistema a analizar, el tiempo entre fallas (TBF) de todas las fallas que existen, las cuales deberán ser asignadas a los sistemas, sub-sistemas o componentes del equipo a estudiar. Los tiempos entre fallas de las fallas de la hoja de vida deberán ser ordenadas de menor a mayor.



A continuación, en la Tabla 7, se muestran los datos necesarios para poder obtener la regresión lineal:

Nº Falla $i$	TBF	$F(i)$	$x_i$	$y_i$
1	670	0,11	6,51	-2,16
2	900	0,27	6,80	-1,18
3	1050	0,42	6,96	-0,60
4	1250	0,58	7,13	-0,15
5	1500	0,73	7,31	0,28
6	2000	0,89	7,60	0,79

**Tabla 7: Ejemplo Tabla de Datos para Modelo Weibull – Fuente: Propia.**

Se puede ver que la cantidad de datos es poca y puede que no sean representativos a la hora de modelar el comportamiento de la frecuencia de fallas. Por esta misma razón, según Pascual (2005) para minimizar el error en el modelamiento, se estimó la función de distribución  $F(i)$  con el método de los rangos medianos, el cual se utiliza cuando la población de datos es pequeña. El método se muestra a continuación:

$$F(i) = \frac{(i - 0,3)}{(\sum \text{Fallas} + 0,4)}$$

Los valores de la abscisa  $x_i$  y ordenada  $y_i$  se obtuvieron a través del método de los mínimos cuadrados, el método se muestra a continuación:

$$x_i = \ln(TBF)$$

$$y_i = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - F(i)}\right)\right)$$

Finalmente, para la obtención de la regresión lineal se deben graficar, de la Tabla 7, la columna  $x_i$  en el eje de la abscisa y la columna  $y_i$  en el eje de la ordenada, el resultado se observa en la Figura 10.

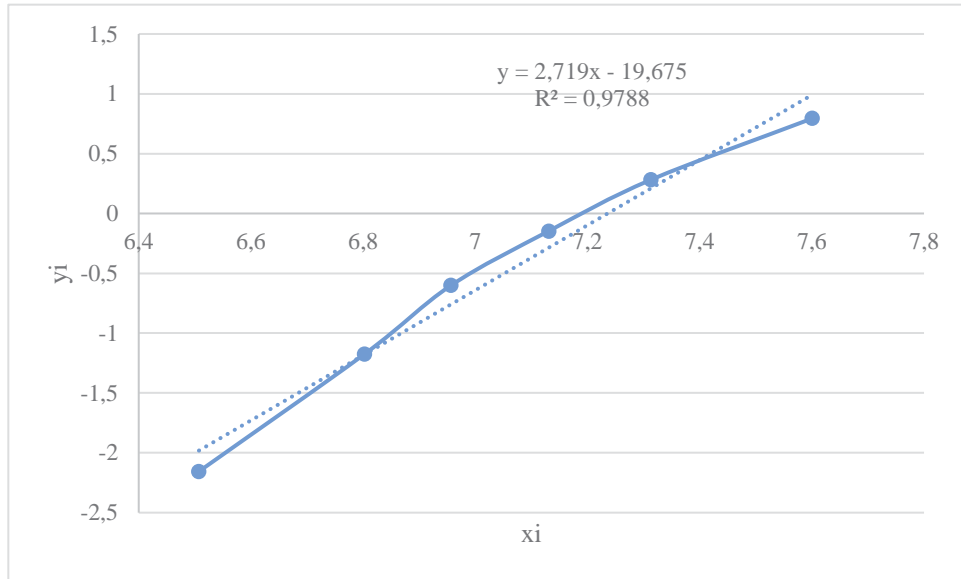


Figura 10: Ejemplo Regresión Lineal del Modo de Falla – Fuente: Propia.

Posteriormente, se obtiene la línea de tendencia de la curva y el error cuadrático.

Según Pascual (2005), el parámetro de localización se considera, como primera aproximación,  $\gamma = 0$ , para poder obtener los parámetro de forma y de escala.

Tenemos que la ecuación de la línea de tendencia es una línea recta, la cual tiene la forma:

$$y = ax - b$$

Donde,

La pendiente  $a$  representa el parámetro de forma  $\beta$ ;

Y  $b$  se utilizará posteriormente para obtener el parámetro de escala  $\eta$ ;

Posteriormente, para poder obtener el parámetro de escala  $\eta$  se debe hacer lo siguiente:

$$\eta = e^{\left(\frac{-b}{a}\right)}$$

Meruane (2011) menciona que, en el caso de que la regresión lineal no mostrara una línea recta como en el caso anterior, sino una curva similar a una asíntota vertical, la curva nos indicaría que el parámetro de localización sería  $\gamma \geq 0$ . Entonces, como el valor obtenido de los parámetros es estimado, el proceso se realiza de forma iterativa corrigiendo la escala de tiempo, de la siguiente forma:

$$t_{i+1} = t_i - y_i$$

En el caso que se obtenga una asíntota curvada en la otra dirección, nos indicaría que el parámetro de localización se encontraría entre 0 y el último  $\gamma$  seleccionado.

Finalmente, el valor de  $\gamma$  que más minimice el error cuadrático se tomará como el parámetro de localización. Y este nos indicaría el inicio de la distribución de Weibull a lo largo del eje x.

Posteriormente se procede a la obtención de los otros parámetros de Weibull.

**Comprobación del Modelo de Weibull a través del Test de Kolmogorov-Smirnov:** Para derivar la ley que describe la confiabilidad de los equipos, se toma un conjunto de observaciones y proponemos la hipótesis de que ellas obedecen alguna ley en particular, como por ejemplo la distribución de Weibull. Luego, se obtienen los parámetros asociados a dicha ley.

Para que exista confiabilidad en el proceso aplicado éste debe ser comprobado y, para ello, primero se debe aceptar que al imponer una ley se incurre en algunos errores y para poder minimizar aquello, se define como nivel de confianza  $\alpha$  a la probabilidad de que el modelo sea erróneo.

Entonces, para poder validar el modelo, se utilizará el test de Kolmogorov-Smirnov, el cual puede ser aplicado a cualquier número de observaciones y se basa en comparar la verdadera función de

distribución con la dada por la ley propuesta. Se utilizan los valores absolutos de las diferencias entre punto y punto (Pascual, 2005).

Entonces, para poder realizar la comprobación del modelo con el test de Kolmogorov-Smirnov se deben tener los datos que se encuentran en la Tabla 8:

N° Falla <i>i</i>	TBF	$F(i)$	$F(t)$	$D_{ni}$
1	670	0,11	0,119	0,009
2	900	0,27	0,24	0,03
3	1050	0,42	0,353	0,067
4	1250	0,58	0,518	0,062
5	1500	0,73	0,717	0,013
6	2000	0,89	0,948	0,058

**Tabla 8: Ejemplo Tabla de Datos para Test Kolmogorov-Smirnov – Fuente: Propia.**

La columna  $F(i)$  se obtiene a través del método de los rangos medianos, mismo método utilizado anteriormente para calcular la función de distribución,

$$F(i) = \frac{(i - 0,3)}{(\sum Fallas + 0,4)}$$

Pascual (2005), menciona que para obtener la columna  $F(t)$  se asume que la población de datos sigue una distribución Gaussiana, luego se obtiene la media y la desviación standard del tiempo entre fallas. Finalmente, para calcular  $F(t)$  se utiliza la función distribución normalizada de Excel.

$$F(t) = Distr. Norm. Estand \left( \frac{TBF_i - \bar{X}_{TBF}}{\sigma_{TBF}} \right)$$

Donde,

$TBF$  es el tiempo entre fallas de cada falla;

$\bar{X}_{TBF}$  es la media de los tiempos entre fallas;

$\sigma_{TBF}$  es la desviación standard de los tiempos entre fallas;

La columna  $D_{ni}$  se obtiene a través del valor absoluto de la diferencia entre  $F(i)$  y  $F(t)$ ,

$$D_{ni} = |F(i) - F(t)|$$

Luego, para finalizar el test, se debe comparar el mayor valor calculado del estadístico de contraste,  $D_{ni}$ , con el que se obtiene de la Tabla 9 de Kolmogorov-Smirnov para un determinado valor de confiabilidad  $\alpha$  y  $N^\circ$  de datos.

TAMAÑO DE MUESTRA	NIVEL DE SIGNIFICANCIA $\alpha$				
	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
n					
1	0.9	0.1	0.975	0.99	0.995
2	0.684	0.776	0.842	0.9	0.929
3	0.565	0.636	0.708	0.689	0.829
4	0.493	0.565	0.624	0.689	0.829
5	0.477	0.509	0.563	0.627	0.669
6	0.41	0.468	0.519	0.577	0.617
7	0.381	0.436	0.483	0.538	0.576
8	0.359	0.41	0.454	0.507	0.542
9	0.339	0.387	0.43	0.48	0.513
10	0.323	0.369	0.409	0.457	0.486
11	0.308	0.352	0.391	0.437	0.468
12	0.295	0.338	0.375	0.419	0.449
13	0.285	0.325	0.361	0.404	0.432
14	0.275	0.314	0.349	0.39	0.418
15	0.266	0.304	0.338	0.377	0.404
20	0.232	0.265	0.294	0.329	0.352
25	0.208	0.238	0.264	0.295	0.317
30	0.19	0.218	0.242	0.27	0.29
40	0.165	0.189	0.21	0.235	0.252
n grande	$1.07/n^{1/2}$	$1.22/n^{1/2}$	$1.36/n^{1/2}$	$1.52/n^{1/2}$	$1.63/n^{1/2}$

Tabla 9: Tabla de Kolmogorov-Smirnov – Fuente: <https://simulacionutp2016.wordpress.com>.

Entonces, para  $n$  datos y un determinado valor de confianza  $\alpha$ , se debe cumplir la siguiente relación para validar la hipótesis de que el modelo representa el comportamiento de las fallas:

$$D_{(n;\alpha)} > D_{ni \text{ máx tabla}}$$

En caso de no cumplir la relación, se rechaza la hipótesis.

**Confiabilidad de Weibull:** Considerando los tiempos entre fallas de la hoja de vida, los parámetros de Weibull calculados y la comprobación del modelo a través del test de Kolmogorov-Smirnov, se procede al cálculo de confiabilidad.

La confiabilidad de Weibull sigue la siguiente relación (Pascual, 2005):

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

A continuación, en la Figura 11, se muestra la tendencia que tiene esta curva para distintos valores del parámetro de forma  $\beta$ :

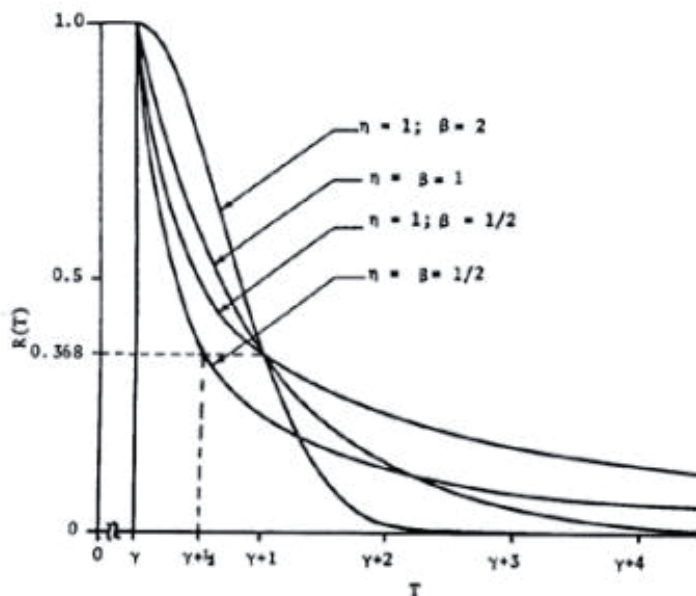


Figura 11: Curva de Confiabilidad de Weibull para Distintos  $\beta$  – Fuente: <https://eumed.net>

De la figura podemos ver que la función de confiabilidad en el eje “y” inicia en 1, debido a que todos los equipos, inicialmente, se encuentran en buenas condiciones con una confiabilidad de un 100% y conforme pasa el tiempo ésta va disminuyendo.

**Tasa de Fallas de Weibull:** Considerando los tiempos entre fallas de la hoja de vida, los parámetros de Weibull calculados y la comprobación del modelo a través del test de Kolmogorov-Smirnov, se procede al cálculo de la tasa de fallas.

La tasa de fallas de Weibull sigue la siguiente relación (Pascual, 2005):

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

A continuación, en la Figura 12, se muestra la tendencia que tiene esta curva para distintos valores del parámetro de forma  $\beta$ :

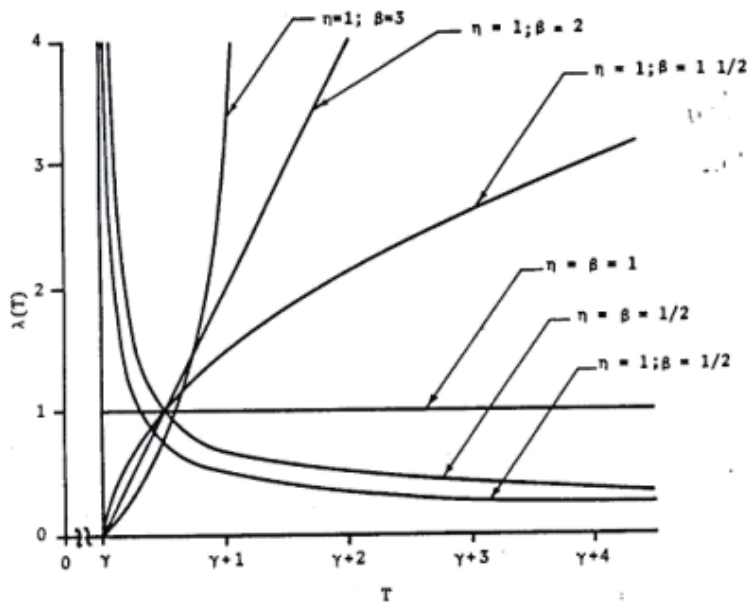


Figura 12: Curva de Tasa de Fallas de Weibull para Distintos  $\beta$  – Fuente: <https://eumed.net>

- La tasa de falla de Weibull para  $0 < \beta < 1$  se inicia en  $\infty$  cuando  $t = \gamma$ , después decrece monótonamente cuando  $t \rightarrow \infty$  y  $\lambda \rightarrow 0$ . Este comportamiento de la distribución de Weibull la hace viable para utilizarse en unidades que presentan fallas prematuras/infantiles.
- Para  $\beta = 1$  la función representa una tasa de fallas constante en la vida útil de los equipos o componentes.
- Para  $\beta > 1$  la tasa de fallas crece cuando  $t \rightarrow \infty$ , y se puede utilizar para representar las fallas por desgaste de los equipos o componentes.
- Para  $1 < \beta < 2$  la curva de la tasa de fallas es cóncava.
- Para  $\beta > 2$  la curva de la tasa de fallas se utiliza para modelar las fallas debido a la edad u obsolescencia.

**MTBF de Weibull:** Para la determinación del tiempo medio entre fallas (MTBF), se deben considerar los parámetros de Weibull obtenidos.

El MTBF sigue la siguiente relación (Pascual, 2005):

$$MTBF = \gamma + \eta \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

Donde,

$\Gamma$  representa la función Gamma utilizada en Excel.



## **Modelos de Costos.**

Los modelos de costos, asociados al desarrollo de un plan de mantenimiento, están fundamentados a través de funciones matemáticas que permiten optimizar la aplicación de actividades tales como la planificación de over hauls, selección de estrategias de mantenimiento, frecuencias de inspección a componentes de un sistema, reemplazos de equipos, gestión de repuestos, tamaños de cuadrillas y talleres, entre otras. La optimización tiene como objetivo disminuir los costos globales de mantenimiento.

De las actividades mencionadas la frecuencia de inspecciones a componentes del sistema y la gestión de repuestos serán aplicadas en el presente trabajo de título.

**Frecuencia de Inspecciones:** Según Meruane (2011), los modelos aplicados en este tipo de actividades permitirán definir los tiempos óptimos de inspección para los componentes que conforman un sistema, con el objetivo de poder determinar el estado en que estos se encuentran y, posteriormente, definir acciones preventivas en base a los resultados.

Para el establecimiento de la estrategia de inspección se considerarán dos escenarios posibles.

**1. Frecuencia de Inspección Óptima con Detención de Equipo:** Este escenario busca establecer el programa de inspecciones con detención de equipo que asegure una minimización del costo global en el largo plazo.

Se tomarán las siguientes consideraciones:

- Los equipos fallan en algún punto de su operación y la reparación de estos requieren mano de obra e insumos.
- Durante la reparación e inspección de los equipos la producción se ve afectada.

- Para minimizar el número de fallas es necesario implementar un programa de inspecciones, el cual tiene costos por utilización de materiales junto con la mano de obra, además de la pérdida de producción en el momento de la inspección.

**Construcción del Modelo:**

Se considera una tasa de fallas constante  $\lambda$ ,

$$\frac{1}{\lambda} = MTBF[\text{unidad tiempo}]$$

El tiempo requerido para realizar una inspección sigue una distribución exponencial con media,

$$\frac{1}{i} = MTTI[\text{unidad tiempo}]$$

En el momento en que ocurre una falla, el tiempo de reparación sigue una distribución exponencial con media,

$$\frac{1}{\mu} = MTTR[\text{unidad tiempo}]$$

Las pérdidas de producción debido a reparaciones por unidad de tiempo son,

$$C_{f,r} = (C_{falla} * t_r * N^{\circ}_{repar.}) \left[ \frac{\text{unidad monetaria}}{\text{unidad tiempo}} \right]$$

Las pérdidas de producción debido a inspecciones por unidad de tiempo son,

$$C_{f,i} = (C_{falla} * t_i * N^{\circ}_{inspecc.}) \left[ \frac{\text{unidad monetaria}}{\text{unidad tiempo}} \right]$$

El costo de falla total, asociado a reparaciones e inspecciones, sería el siguiente:

$$C_f = C_{f,r} + C_{f,i}$$

El costo de intervención generado por una inspección es,

$$C_{i,i} = N^{\circ}_{hombres} * C_{HH} * t_i * N^{\circ}_{inspecc.} \left[ \frac{\text{unidad monetaria}}{\text{unidad tiempo}} \right]$$

Donde:

$N^{\circ}_{hombres}$ : número de personas que ejecutan la inspección.

$C_{HH}$ : costo hora-hombre del personal encargado de la inspección.

$t_i$ : tiempo que demora la inspección.

$N^{\circ}_{inspecc.}$ : número de inspecciones realizadas en un periodo de tiempo.

El costo de intervención generado por una reparación es,

$$C_{i,r} = (N^{\circ}_{hombres} * C_{HH} * t_r * N^{\circ}_{repar.}) \left[ \frac{\text{unidad monetaria}}{\text{unidad tiempo}} \right]$$

Donde:

$N^{\circ}_{hombres}$ : número de personas que ejecutan la reparación.

$C_{HH}$ : costo hora-hombre del personal encargado de la reparación.

$t_r$ : tiempo que demora la reparación.

$N^{\circ}_{repar.}$ : número de reparaciones realizadas en un periodo de tiempo.

La tasa de falla  $\lambda$  es una función de  $n$ , la frecuencia de inspección (inspecciones/unidad de tiempo):

$$\lambda = \lambda(n)$$

- El efecto que tiene la realización de inspecciones es incrementar el *MTBF*, es decir, disminuir la tasa de fallas.

Por lo tanto, el objetivo es seleccionar una tasa de inspecciones  $n$  que minimice el costo global o total esperado por unidad de tiempo  $c_g(n)$ .

El costo total esperado por unidad de tiempo  $C_{gi}$  que se obtiene del equipo es una función del número de inspecciones,

$$C_{gi} = C_g(n) = C_{f,r} + C_{f,i} + C_{i,r} + C_{i,i} \left[ \frac{\text{unidad monetaria}}{\text{unidad tiempo}} \right]$$

Donde,

$$C_{gi} = C_{f,r} \frac{\lambda}{\mu} + C_{f,i} \frac{n}{i} + C_{i,r} \frac{\lambda}{\mu} + C_{i,i} \frac{n}{i} \left[ \frac{\text{unidad monetaria}}{\text{unidad tiempo}} \right]$$

Para encontrar el mínimo de inspecciones, el  $C_{gi}$  se deriva respecto a  $n$  y se iguala a 0,

$$\frac{dC_{gi}}{dn} = C_{f,r} \frac{\lambda'(n)}{\mu} + \frac{C_{f,i}}{i} + C_{i,r} \frac{\lambda'(n)}{\mu} + \frac{C_{i,i}}{i} = 0$$

Donde,

$$\lambda'(n) = -\frac{\mu}{i} \left( \frac{C_{f,i} + C_{i,i}}{C_{f,r} + C_{i,r}} \right)$$

Se asume que la tasa de falla varía linealmente con el número de inspecciones,

$$\lambda(n) = \frac{k}{n}$$

- Donde “ $k$ ” representa una constante de proporcionalidad, la cual puede ser interpretada como la tasa de fallas cuando se realiza una inspección por unidad de tiempo ( $n = 1$ ).

Se tiene que,

$$\frac{d\lambda(n)}{dn} = \lambda'(n) = -\frac{k}{n^2}$$

Entonces, la frecuencia óptima de inspecciones sería la siguiente,

$$n^* = \sqrt{k \frac{MTTR}{MTTI} \left( \frac{C_{f,r} + C_{i,r}}{C_{f,i} + C_{i,i}} \right)}$$

**2. Frecuencia de Inspección Óptima sin Detención de Equipo:** Este escenario busca establecer el programa de inspecciones sin detención de equipo que asegure una minimización del costo global en el largo plazo.

Se tomarán las siguientes consideraciones:

- Los equipos fallan en algún punto de su operación y la reparación de estos requieren mano de obra e insumos.
- Durante la reparación de los equipos la producción se ve afectada.
- Para minimizar el número de fallas es necesario implementar un programa de inspecciones, el cual tiene costos por utilización de materiales junto con la mano de obra, por otro lado, no habrá pérdidas de producción en el momento de la inspección.

***Construcción del Modelo:***

Este modelo sigue la misma estructura que en el caso anterior, con la excepción de que ahora no se tomará en cuenta la pérdida de producción ocasionada por las inspecciones.

Finalmente, la frecuencia óptima de inspecciones viene dada por la siguiente relación,

$$n^* = \sqrt{k \frac{MTTR}{MTTI} \left( \frac{C_{f,r} + C_{i,r}}{C_{i,i}} \right)}$$

**Gestión de Repuestos:** Los modelos aplicados en este tipo de actividades buscan optimizar la gestión de repuestos en una bodega, definir tiempos entre pedidos, niveles de seguridad y alarma; con objeto de minimizar los costos esperados y evitar detenciones innecesarias de los equipos por tiempos de entrega de los repuestos. Los modelos son los siguientes:

- Minimización del costo global sin demora en pedidos.
- Minimización del costo global con demora en pedidos.
- Minimización del costo global con costo de falla.
- Consideración de economías de escala.
- Nivel óptimo de alarmas.
- Consideración de compras agrupadas.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que, al tener los repuestos en bodega, se generan costos que están asociados al almacenamiento, costos de oportunidad de capital detenido, entre otros.

Dentro de los modelos mencionados se escogerá la “*Minimización del costo global con costo de falla*” como tarea a aplicar en el presente trabajo de título.

- **Minimización del Costo Global con Costo de Falla:** Este modelo estudia el caso en que se permite, dentro de una empresa, un periodo de tiempo que la bodega esté sin repuestos en stock. Si llegase a haber demanda de repuestos durante ese periodo, obligadamente se incurriría en un costo de falla por la detención de un equipo en espera de los repuestos. Por lo tanto, el objetivo es determinar el tamaño óptimo de los pedidos y la fracción de tiempo en que la bodega estará sin repuestos sin incurrir en un costo de falla.

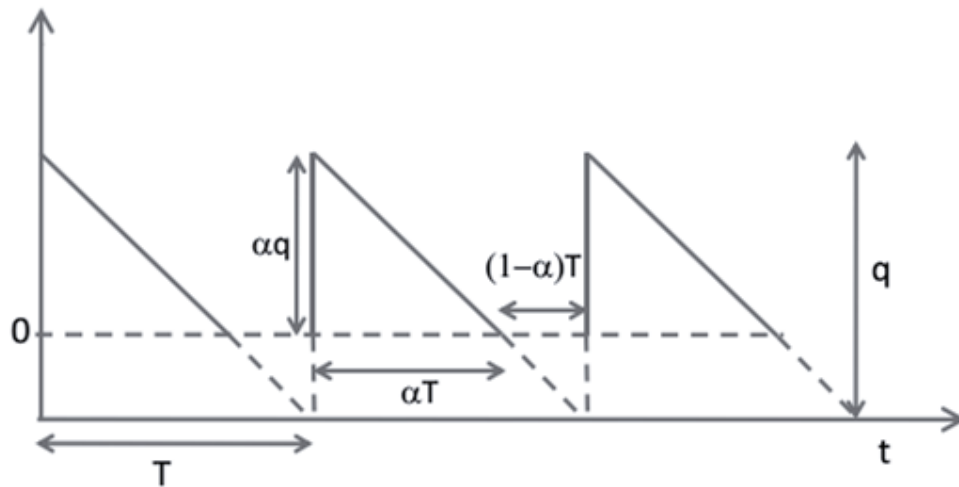


Figura 13: Dinámica de Pedidos – Fuente: Meruane, V. (2011).

### **Construcción del Modelo:**

Según Pascual (2005), los costos asociados a los repuestos son los siguientes:

- Se considera costo de falla ( $C_{falla}$ ) aquel que es generado por las pérdidas de producción, las cuales son causadas por la falta de un componente en bodega junto con los costos asociados a las acciones realizadas para compensar la falta de éste.
- El costo de adquisición ( $C_{ad}$ ) de un componente, corresponde al costo de cursar las órdenes de compra.
- El costo del repuesto ( $P_u$ ), corresponde al precio unitario del mismo.
- La tasa de interés aplicada a los componentes es  $\iota$ .

De la Figura 13, sea  $T$  el intervalo de pedido y  $q$  la cantidad de repuestos pedidos, consideramos lo siguiente:

- El parámetro  $\alpha$ , el cual fluctúa entre  $0 < \alpha < 1$ , indica el nivel de servicio en un intervalo de tiempo determinado, en otras palabras, es la probabilidad de no quedar sin stock en ningún momento sobre un intervalo específico de tiempo.
- El stock estuvo disponible en bodega en un tiempo  $To = \alpha T$ . El componente no ha estado disponible en bodega durante un tiempo  $Tr = (1 - \alpha)T$ .
- Los componentes solicitados en el instante  $Tr$  son consumidos tan pronto llegan en el instante  $T$ , debido a que se asume una tasa de consumo o demanda de componente constante.

$$\lambda = \frac{q}{T}$$

El costo global o total esperado por unidad de tiempo se define como:

$$C_{gr} = \text{Costo de los repuestos por unidad de tiempo} \\ + \text{Costo de adquisición por unidad de tiempo} \\ + \text{Costo de almacenamiento por unidad de tiempo} \\ + \text{Costo por pérdidas de producción por unidad de tiempo}$$

Donde,

Costo de los repuestos por unidad de tiempo es:

$$\lambda \cdot P_u$$

Costo de adquisición por unidad de tiempo es:

$$\frac{\lambda}{q} \cdot Cad$$

Costo de almacenamiento por unidad de tiempo es:

$$\frac{1}{2} \cdot \alpha^2 \cdot q \cdot P_u \cdot t$$



Costo por pérdidas de producción por unidad de tiempo es:

$$\frac{1}{2} \cdot (1 - \alpha)^2 \cdot q \cdot C_{falla}$$

Entonces, el costo total esperado por unidad de tiempo es:

$$C_{gr} = \lambda \cdot P_u + \frac{\lambda}{q} \cdot Cad + \frac{1}{2} \cdot \alpha^2 \cdot q \cdot P_u \cdot \iota + \frac{1}{2} \cdot (1 - \alpha)^2 \cdot q \cdot C_{falla}$$

Si derivamos con respecto a  $\alpha$  e igualamos a 0, se obtiene lo siguiente:

$$\alpha \cdot q \cdot P_u \cdot \iota - (1 - \alpha) \cdot q \cdot C_{falla} = 0$$

Despejando  $\alpha$ , se obtiene que el nivel de servicio óptimo está definido de la siguiente manera:

$$\bar{\alpha} = \frac{C_{falla}}{C_{falla} + P_u \cdot \iota}$$

Dado el valor de  $\bar{\alpha}$ , para encontrar el lote óptimo de pedido se deriva el costo total esperado con respecto a  $q$ :

$$-\lambda \cdot \frac{Cad}{q^2} + \frac{1}{2} \cdot \bar{\alpha}^2 \cdot P_u \cdot \iota + \frac{1}{2} \cdot (1 - \bar{\alpha})^2 \cdot C_{falla} = 0$$

Entonces,

$$q^2 = \frac{\lambda \cdot Cad}{\frac{1}{2} \cdot \bar{\alpha}^2 \cdot P_u \cdot \iota + \frac{1}{2} \cdot (1 - \bar{\alpha})^2 \cdot C_{falla}}$$

Sustituyendo el valor de  $\bar{\alpha}$  en la ecuación anterior, tenemos que la cantidad óptima de pedidos es:

$$q^* = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot Cad}{\bar{\alpha} \cdot P_u \cdot \iota}}$$

## **Capítulo III: Antecedentes Generales de la Empresa**

### **3.1. Introducción.**

El nombre de la empresa surge debido al color negro que adquiere el Cerro El Peñón, cuando éste es teñido por las sombras de las nubes que se posan encima. En Cerro Negro el primer yacimiento de mineral explotado fue Pirquitas, este yacimiento se descubrió el año 1860 y las exploraciones y excavaciones datan, aproximadamente, del año 1920. La sociedad Cerro Negro nace en el año 1942 con la participación de la Compañía Minera Punitaqui S.A y la Corporación de Fomento de Producción (CORFO). Y Cerro Negro pasó a ser una sociedad anónima con la participación de la Caja de Crédito y Fomento Minero, los aportadores de minas particulares y con los dos mencionados anteriormente.

En los años siguientes, y hasta 1975, la Empresa Nacional de Minería (ENAMI) instaló y mantuvo su planta regional en conjunto con un poder de compra de minerales, lo que significó una gran reactivación de la minería en la zona. En el año 1976 la empresa fue adquirida por la Sociedad Minera Trinidad y, posteriormente, vendida en 1981. Por otro lado, la empresa, debido a la gran recesión económica permaneció cerrada desde noviembre del año 1981 y, en el año 1983, fue abierta gracias a la participación y administración de Don Andrónico Luksic Abaroa. En esta administración se elevaron, considerablemente, los niveles de producción de sulfuros desde 25.000 toneladas a 49.000 toneladas por mes. Después de 13 años de explotación, el holding perteneciente el Grupo Luksic, Antofagasta Holding, considera que los niveles de producción dejan de cumplir con las expectativas, por lo que en noviembre de 1996 toman la decisión de cerrar el yacimiento. En este escenario, la administración de ese entonces, le plantea al Grupo Luksic la compra de Compañía Minera Cerro Negro. Desde ese entonces hasta hoy, la empresa se ha mantenido en operación.

Las operaciones de la Planta de Lixiviación comenzaron en el año 1997, y el producto final que obtenía era precipitado de cobre. Esta Planta operó solo hasta el 2002.

En el año 1999 se realiza la construcción de la Planta de Extracción de Solventes (SX) y la Planta de Sulfato de Cobre Pentahidratado. Esta última, le dio un plus al valor del precio del cobre, producto que fue comercializado en distintos mercados tanto nacional como internacional convirtiéndose, en el mayor productor de sulfato de cobre grado alimenticio del País. A comienzos del año 2001 se inicia la construcción de la Planta Electrowinning, la cual tiene una capacidad de producción de 60 [ton/mes] de cátodos de cobre. Actualmente esta planta produce 5.500 toneladas de cátodos al año.

### 3.1.1. Ubicación Geográfica.

Compañía Minera Cerro Negro se encuentra ubicada aproximadamente a unos 210 km al noroeste de Santiago, en la Hacienda Pitipeumo de la comuna de Cabildo, provincia de Petorca, quinta región de Valparaíso (Figura 14).

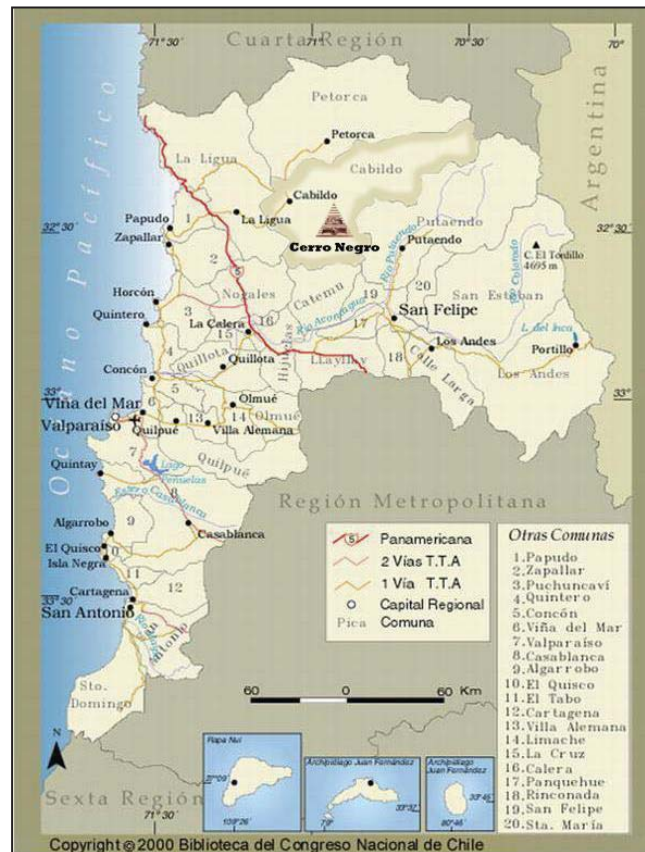


Figura 14: Ubicación Geográfica de CMCN – Fuente: <http://www.cerronegro.cl>.

### 3.1.2. Descripción de la Compañía.

En Compañía Minera Cerro Negro actualmente trabajan 343 personas, entre personal de mina, personal directo de la compañía, contratistas de operación y contratistas de servicios.

Compañía Minera Cerro Negro puede dividirse en tres grandes áreas:

- **Área Minera:** Aquí es donde se extrae el mineral de la mina a través de camiones de 20 [ton], y posteriormente es depositado en canchas designadas según las características del mineral. Por otro lado, aparte del mineral que es extraído de la mina, la compañía se encarga de comprar mineral a pequeños productores de la zona, el cual también es depositado en las canchas mencionadas anteriormente.
- **Área Óxidos:** En esta área el mineral de cobre oxidado es tratado a través de un proceso de aglomeración, lixiviación, extracción por solventes y electro obtención; finalmente se obtienen cátodos de cobre.
- **Área Sulfuros:** Esta área se encarga de que el mineral de cobre sulfurado sea tratado a través de la utilización de molinos de bolas, con el fin de reducir el tamaño del mineral. Posteriormente, el mineral es tratado por un circuito de flotación, espesado y filtro, con el fin de obtener finalmente concentrado de cobre.

A continuación, en la Tabla 10 se muestran los antecedentes de CMCN,

Nombre o Razón Social	Compañía Minera Cerro Negro
RUT	91.614.000-2
Domicilio	Hacienda Los Ángeles s/n Pitipeumo - Cabildo
Fono	33 2 71 39 00

**Tabla 10: Antecedentes de la Compañía – Fuente: Propia.**

### **3.1.3. Descripción de la Planta.**

#### **a. Descripción Planta de Chancado:**

En la minería el chancado tiene como objetivo triturar el material de gran tamaño que viene de los yacimientos de mineral. En Compañía Minera Cerro Negro poseen chancador primario, un chancador secundario y dos chancadores finos o terciarios. Además, tienen dos harneros antes de los chancadores finos, para poder separar y seleccionar el material fino del grueso.

En el proceso de chancado se tiene como objetivo triturar 500 [ton] de óxidos y sulfuros, alternando el tipo de mineral una vez acabada la campaña de chancado. Al finalizar cada campaña se realiza una limpieza y vaciado a los equipos chancadores, con objeto de evitar la mezcla de mineral.

En cualquier empresa minera hay plantas de chancado, las cuales se diferencian en el tipo de circuito que realizan, según la capacidad de chancado que desea realizar la empresa y también, por el tamaño granulométrico que se desea como producto final de chancado.

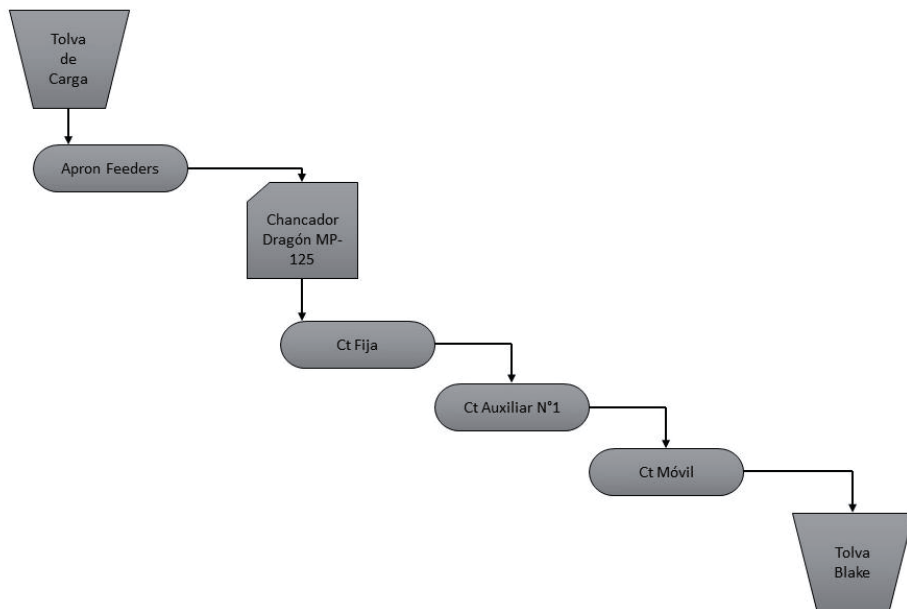
A continuación, se entregarán detalles de las tres áreas que conforman la planta de chancado de Cerro Negro junto con los respectivos diagramas de flujo<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Elaborados en conjunto con personal de CMCN.

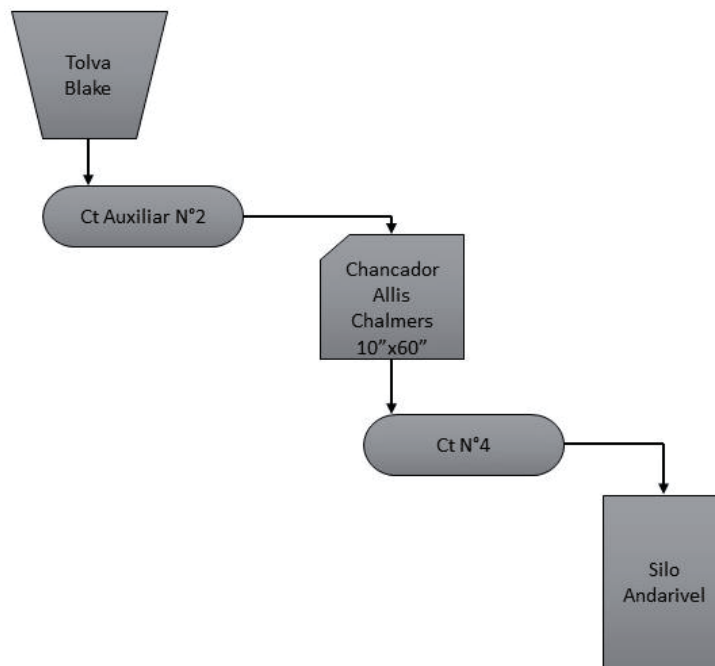
**Chancado Primario:** Tiene como objetivo reducir los trozos de rocas que provienen de los yacimientos de mineral, desde un tamaño máximo de 35” a un tamaño de 4” a 4,5”, los cuales se obtienen regulando el setting de salida del chancador primario.

En esta etapa de chancado se tiene un chancador tipo mandíbula Dragón MP-125 de 36”x48”. Este tiene una capacidad de  $250 \left[ \frac{ton}{hr} \right]$ . El mineral ingresa al chancador a través de camiones de 20 [ton], los cuales depositan las rocas de mineral a una tolva de alimentación que, con la ayuda de un brazo hidráulico, el mineral es empujado a un Apron Feeders, o bien, a un alimentador oruga; el cual lleva el material a la boca del chancador. Luego de que el material es chancado pasa a una Ct Fija, que lleva el mineral a otra Ct Auxiliar N°1, para finalmente pasar a una Ct Móvil que lleva el mineral a una Tolva Blake para luego depositarlo en el chancador secundario. A continuación, en la Figura 15, se muestra el diagrama de flujo del chancado primario.



**Figura 15: Diagrama de Flujo Chancado Primario – Fuente: Propia.**

**Chancado Secundario:** El mineral proveniente del proceso de chancado anterior es transportado a través de la Ct Auxiliar N°2 al chancador de cono Allis Chalmers Hidrocono 10’’x60’’ y desde éste se envía el mineral por medio de la Ct N°4 a un Silo Andarivel de 450 [ton] de capacidad. A continuación, en la Figura 16, se muestra el diagrama de flujo del chancado secundario.



**Figura 16: Diagrama de Flujo Chancado Secundario – Fuente: Propia.**



**Chancado Fino o Terciario:** Este chancado de mineral cuenta con dos circuitos, un circuito se encarga de chancar el óxido y el otro circuito el sulfuro. Ambos circuitos utilizan las mismas cintas transportadoras de alimentación, las cuales llevan el mineral a dos harneros vibratorios de doble bandeja: Harnero N°1 de  $150 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{hr}} \right]$  y Harnero N°2 de  $220 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{hr}} \right]$ . Los cuales alimentan dos chancadores Sandvik H-4000 con una capacidad de 80 [ton/hr] en circuito cerrado y  $180 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{hr}} \right]$  en circuito abierto.

El circuito de óxido y sulfuro en el chancado terciario es el siguiente:

- **Circuito Óxido:** En el circuito de óxido el mineral es alimentado por medio del Silo Andarivel, el cual alimenta la Ct N°6. Esta cinta dirige el mineral hacia el chute tipo pantalón, para luego distribuir el flujo a través de los extremos del chute; por uno de sus extremos se alimenta de forma directa el Harnero N°1 con aproximadamente el 20% del mineral y por el otro extremo se alimenta a través de la Ct N°3 al Harnero N°2, con aproximadamente el 80% del mineral. En el Harnero N°1 el mineral es clasificado enviándolo directamente a la Ct N°9 y el mineral con sobre tamaño pasa al chancador terciario. Luego, el mineral chancado es transportado por la Ct N°7 y Ct N°8 al chute tipo pantalón.

En el Harnero N°2 se clasifica el mineral enviándolo directamente a la Ct N°9 y el mineral con sobre tamaño es enviado al chancador terciario, para luego ir a la Ct N°2, la cual envía el mineral al mismo circuito que recorre el sobre mineral proveniente del Harnero N°1 hasta llegar nuevamente el chute tipo pantalón. Finalmente, el mineral clasificado por los dos harneros, después de pasar por la Ct N°9, pasa por la Ct N°10 llegando a un Stock Pile de

Óxido con capacidad para 2000 [ton]. A continuación, en la Figura 17, se muestra el diagrama de flujo del chancado terciario.

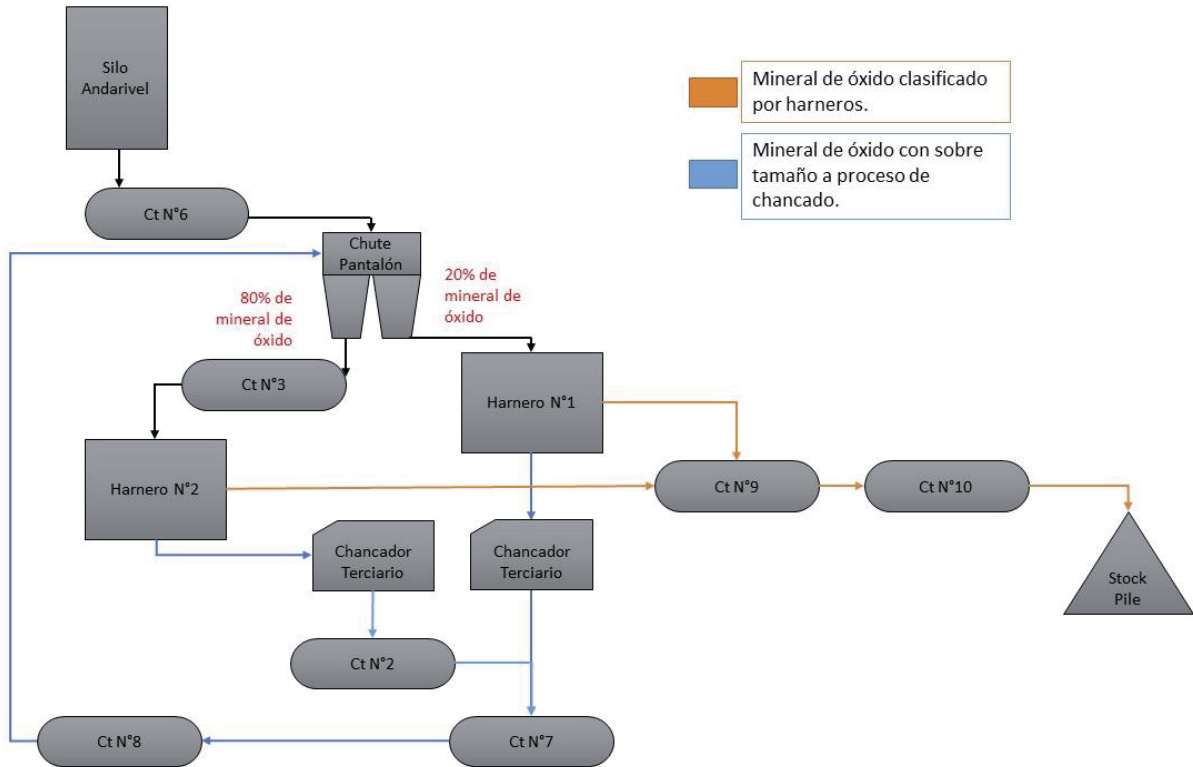


Figura 17: Diagrama de Flujo Chancado Terciario Mineral de Óxido – Fuente: Propia.

- **Circuito Sulfuro:** Para el chancado de sulfuro el mineral realiza exactamente el mismo circuito que sigue el mineral cuando se chanca Óxido. Con la diferencia que el mineral de Sulfuro, cuando llega a la Ct N°9, el mineral es enviado a la Ct N°11, Ct N°15 y Ct N°16, las cuales se encargan de alimentar el Silo N°1, Silo N°2, Silo N°3 y Silo N°4, los cuales tienen 400 [ton] de capacidad cada uno. Luego, el mineral almacenado en estos silos será utilizado en el proceso de molienda. A continuación, en la Figura 18, se muestra el diagrama de flujo del circuito de sulfuro.

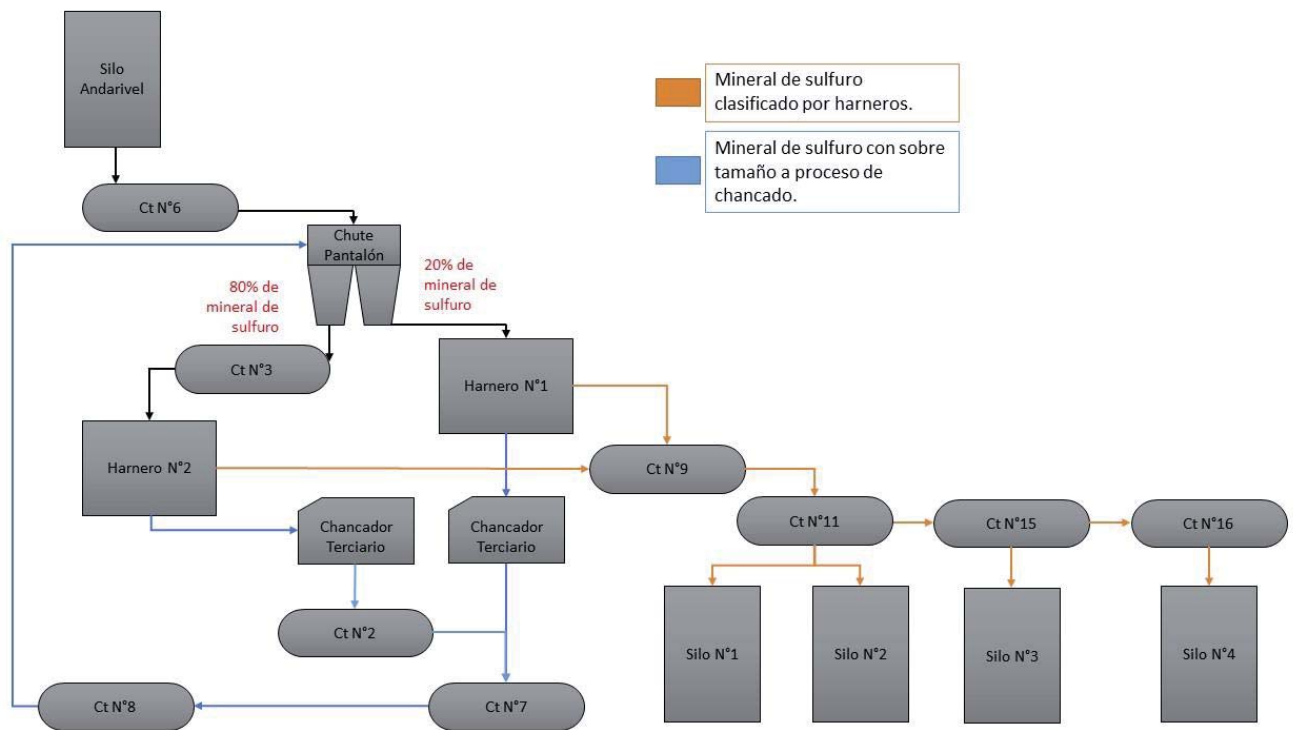


Figura 18: Diagrama de Flujo Chancado Terciario Mineral de Sulfuro – Fuente: Propia.

La planta de chancado cuenta con un sistema supresor de polvo, que es el siguiente:

**Sistema Supresor de Polvo:** En el proceso de chancado primario existe un sistema de supresión de polvo, el cual posee las siguientes partes: un sistema encargado de la presurización, el cual utiliza una bomba centrífuga marca Pedrollo modelo EPM-190 con caudal  $140 \left[ \frac{lt}{min} \right]$ ; nueve aspersores TeeJet modelo TP8010 de 3 [bar] con caudal de  $3,95 \left[ \frac{lt}{min} \right]$ . Los aspersores se ubican de la siguiente forma en el chancado primario: cuatro aspersores en la tolva de alimentación 1, dos aspersores en el Apron Feeders, un aspersor en la Ct Fija, en la Ct Auxiliar y la Ct Móvil, respectivamente.

El chancado secundario y terciario también cuenta con un sistema de supresión de polvo, éste está compuesto de la siguiente forma: un sistema de humectación, el cual está presurizado con una bomba centrífuga marca Durco 3"x2 1/2", caudal de  $1500 \left[ \frac{lt}{min} \right]$ , presión de 50 [psi]; siete aspersores TeeJet modelo TP8010 de 3 [bar] con  $3,95 \left[ \frac{lt}{min} \right]$ . Los aspersores en el chancado secundario se encuentran ubicados en la Ct Auxiliar N°2 y Ct N°4, mientras que en el chancado terciario los aspersores se ubican en la Ct N°2, Ct N°6, Ct N°7, Ct N°9 y Ct N°10.

A continuación, se entregarán detalles de las áreas que conforman la planta de chancado de Cerro Negro junto con los respectivos diagramas de flujo<sup>2</sup>.

#### **b. Descripción Planta Concentradora.**

La planta concentradora está compuesta por la Molienda, Flotación, Espesamiento - Filtro y Tranque de relaves.

**Molienda:** Este proceso es fundamental pues con él se obtiene una mayor área superficial del mineral de sulfuro, teniendo como objetivo la liberación de este. El 75% del mineral sulfurado, proveniente del proceso de chancado es almacenado en los Silos, del Silo N°1 se alimenta la Ct N°17; del Silo N°2 se alimenta la Ct N°19 y del Silo N°3 se alimenta la Ct N°20; luego Ct N°17 y N°19 alimentan la Ct N°18, y la Ct N°20 alimenta la Ct N°22. Por otro lado, la Ct N°18 también alimenta la Ct N°22, la cual alimenta la Ct N° 23 para luego dirigirse al proceso de molienda húmeda en el Molino de Bolas G.

El 25% del mineral de sulfuro restante pasa directamente del Silo N°4 al proceso de molienda húmeda del Molino de Bolas E, el cual, luego de ser procesado es bombeado al tacho de descarga del Molino G, para luego ser dirigido a la Planta de Flotación en conjunto con el mineral procesado por el Molino de Bolas G. El Molino E opera con una capacidad de 23 [ton] y el Molino de Bolas G con una capacidad de tratamiento de 50 [ton] aproximadamente. La etapa de molienda entrega una pulpa con 38% de sólidos y con una granulometría de aproximadamente 60% bajo 200 mallas Tyler. La pulpa, posteriormente, es enviada a la etapa de flotación.

---

<sup>2</sup> Elaborados en conjunto con personal de CMCN.

A continuación, en la Figura 19, se muestra el diagrama de flujo del proceso de molienda.

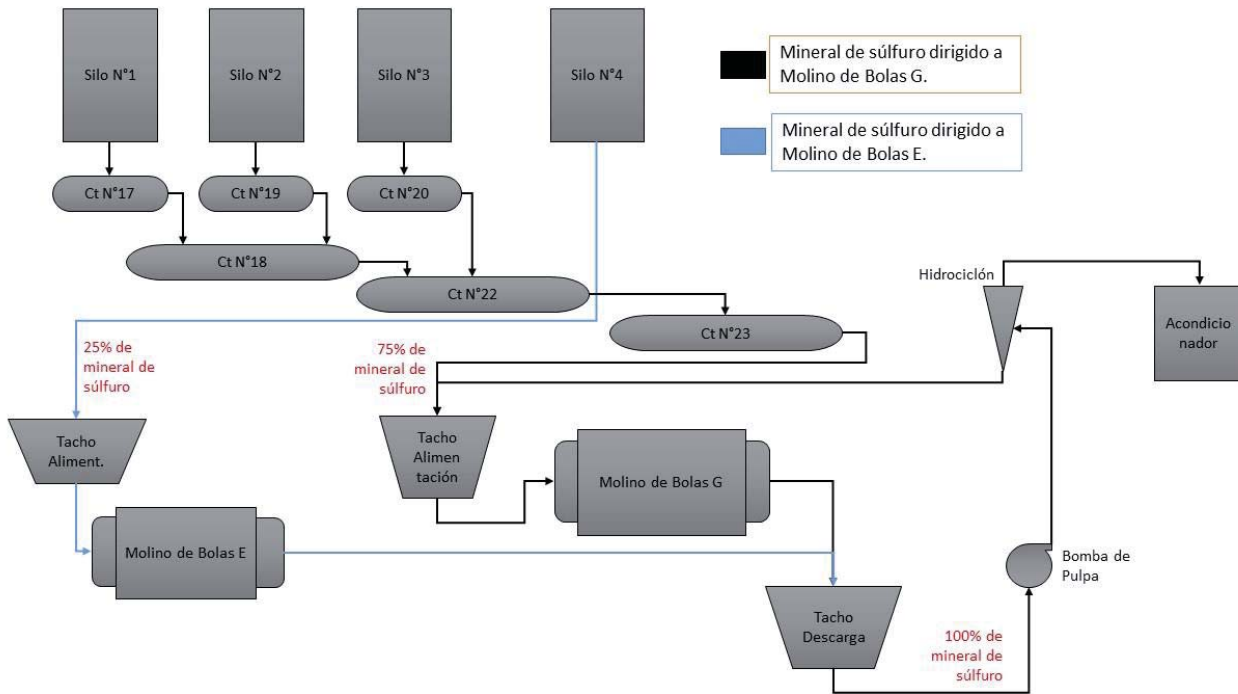


Figura 19: Diagrama de Flujo Proceso de Molienda – Fuente: Propia.

**Flotación:** El objetivo de este proceso es separar las especies de minerales a través de la adhesión selectiva de partículas minerales por medio de burbujas de aire. El circuito de flotación consta de 6 bi celdas de flotación, 3 celdas Rougher, 1 celda Scavenger y 2 celdas Cleaner. Este circuito es alimentado por medio de un acondicionador de 9 [m] de alto y 3,5 [m] de diámetro, el cual cumple la función de homogenizar el mineral con los reactivos colector 3477, xantato y espumante 1012. Cuando el acondicionador cumple el tiempo de residencia, la carga entra al circuito Rougher, circuito que consiste en 2 bi-celdas de 30 [m<sup>3</sup>] y una celda de 15 [m<sup>3</sup>]. Además, le son agregados los reactivos colector 3477, NaSH y espumante 1012. El concentrado que se obtiene de este circuito es enviado al cajón de concentrado primario y gracias a la acción de una pendiente y de la gravedad, el concentrado cae a la descarga del molino de remolienda. En la re-molienda el

concentrado es enviado, a través de una bomba centrífuga, al hidrociclón, que se encarga de seleccionar el material, el bajo tamaño es impulsado por una bomba centrífuga de re-molienda, que tiene un caudal de  $33 \left[ \frac{m^3}{hr} \right]$ , a la primera celda Cleaner. En el circuito Cleaner el concentrado de la primera celda pasa a la segunda celda Cleaner. El concentrado de la segunda celda Cleaner se considera concentrado final, y posteriormente, es enviado por pendiente al espesador.

Los relaves de las celdas Rougher son enviados al cajón de relave, el cual después es impulsado a través de una bomba centrífuga de capacidad  $290 \left[ \frac{m^3}{hr} \right]$  a los relaves.

Por otro lado, los relaves de las celdas Cleaner caen al cajón de recirculación, el cual es impulsado por medio de una bomba centrífuga de capacidad  $33 \left[ \frac{m^3}{hr} \right]$  a la celda Scavenger. En ésta última el relave es acondicionado con colector 3477, xantato y 1012. El concentrado de esta celda cae a la primera celda Cleaner y el relave de esta cae al cajón de relave, donde se combina con los relaves de las otras celdas.

A continuación, en la Figura 20, se muestra el diagrama de flujo del proceso de flotación.

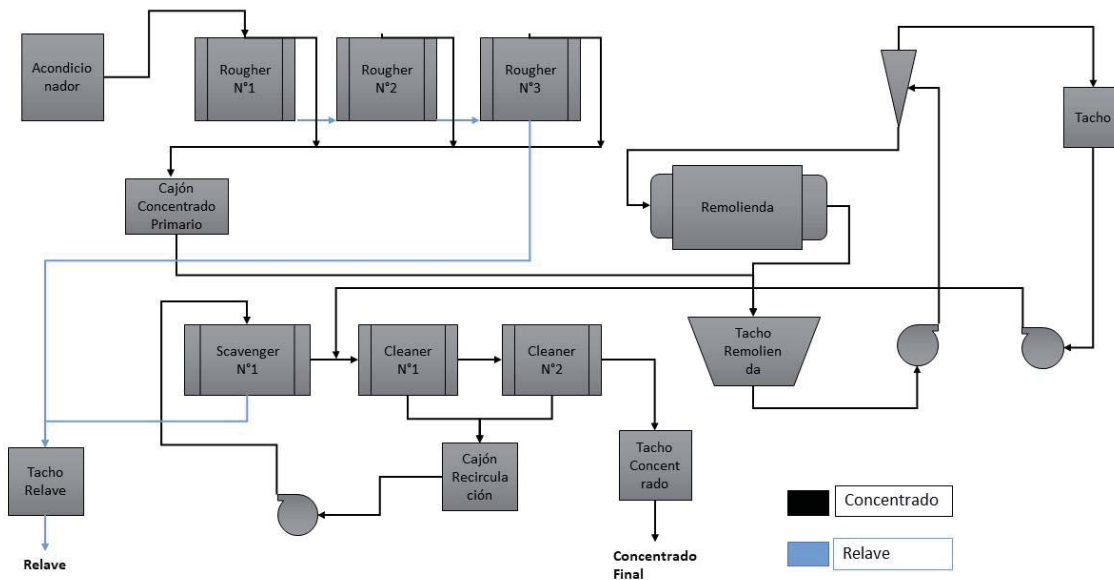


Figura 20: Diagrama de Flujo Proceso de Flotación – Fuente: Propia.

**Espesamiento y Filtración:** El material que se obtuvo en el proceso de flotación se envía al espesador, el cual cumple la función de disminuir el porcentaje de agua que tiene el concentrado. Esta etapa se cumple a través de un aspa en movimiento, además de la adhesión de floculante para poder acelerar el proceso. La capacidad de tratamiento del espesador es de 200 [ton]. El porcentaje de sólidos con el cual sale el concentrado del espesador es de aproximadamente 70%. Luego, este flujo es enviado a un filtro de prensa placa vertical marca Inco de 26 placas de dimensiones 1,2[m] x 1,2[m].

A través de un sistema neumático, el concentrado es secado hasta que alcance aproximadamente un 10% de humedad. Una vez acabado el filtrado, el concentrado se deposita en las canchas de concentrado final a través de unas compuertas, para finalmente esperar su carga y venta.

**Tranque de relaves:** Aquí se cumple la función de contener los relaves producidos por el circuito de flotación, en donde la fracción gruesa de relave es clasificada por una batería de hidrociclones y se deposita como el muro contenedor de la fracción fina.



### 3.2. Listado y Función de Componentes Propios y Auxiliares del Molino G.

Los componentes que conforman al Molino G son fundamentales para el correcto funcionamiento del molino y la planta concentradora. A continuación, se muestra el detalle de cada uno de ellos<sup>3</sup>.

#### 3.2.1. Bombas de Levante (Alta Presión) y Lubricación (Baja Presión).

Estas bombas, pertenecen al sistema de lubricación del Molino, y están encargadas de lubricar los descansos del molino (Figura 21). Las bombas de alta, caudal de  $2,5 \left[ \frac{lt}{min} \right]$  y presión de  $31,5 [MPa]$ , son utilizadas para lograr vencer la inercia a la que está sujeta el molino antes de la puesta en marcha, al vencer la inercia éste puede girar sin problemas sin dañar los descansos; esto se logra mediante la inyección de un lubricante entre el cilindro y el descanso. La bomba de alta es accionada por un motor eléctrico de  $2,2 [kW]$  modelo Y112M-6. Por otro lado, las bombas de baja, con un caudal de  $63 \left[ \frac{lt}{min} \right]$  y presión de  $0,4 [MPa]$ , están encargadas de lubricar los descansos del molino durante la operación. En la planta se encuentra habilitado un sistema de control local del banco de bombas, además hay un control remoto que se encuentra en la sala de control. La bomba de baja es accionada por un motor eléctrico de  $3 [kW]$  modelo Y100L2-4.



**Figura 21: Fotografía Bombas de Alta y Baja Presión – Fuente: CMCN.**

<sup>3</sup> Listado, fotografías y características técnicas entregadas por personal de CMCN.

### 3.2.2. Motor Síncronico y Excitatriz.

El motor síncronico está encargado de transformar la energía eléctrica en energía mecánica rotatoria (Figura 22). Su velocidad de giro es constante y depende de la frecuencia de la tensión de la red eléctrica a la que esté conectado y del número de pares de polos del motor.

La excitatriz cumple la función de otorgar la tensión y corriente necesaria para alimentar el motor síncrono y convertir a este en un electro imán con capacidad de regular la intensidad del campo magnético. En la sala de control está el control de la excitatriz, en donde se puede ver tanto el amperaje como el voltaje de este equipo, además del amperaje del estator.

La excitatriz se encuentra dentro del motor síncronico.



Figura 22: Fotografía Motor Síncronico – Fuente: CMCN.

### 3.2.3. Embrague.

Está encargado de acoplar el motor síncrono con el contraeje del sistema piñón-corona, para transmitirle el movimiento giratorio y de esta forma poder mover el Molino de Bolas.

Funciona gracias a un sistema neumático, el cual a través de zapatas transmite torque por medio de la fuerza de rozamiento.

El Embrague es de marca EATON Airflex (Figura 23).



Figura 23: Fotografía Embrague – Fuente: CMCN.

### 3.2.4. Sala de Media Tensión y Sala de Control.

En la sala de media tensión (ubicada en el 1<sup>er</sup> piso de los contenedores, Figura 24) están ubicadas las conexiones eléctricas de todos los equipos, además se encuentran cuatro PLC que controlan la secuencia lógica de los equipos, sus funciones están divididas en:

- Bombas, cintas, soplador y compresor.
- Agitadores celdas 30 [m<sup>3</sup>].
- Agitadores celdas 14 [m<sup>3</sup>].
- Molinos y componentes.

En sala de control (ubicada en el 2<sup>do</sup> piso de los contenedores, Figura 24) se encuentra el computador HMI, el cual tiene la programación de los equipos que participan en la planta nueva. Es aquí donde se puede controlar la velocidad de rotación [rpm] de las distintas bombas que están trabajando en este proceso. Además, se controla la partida y detención de todos los equipos.



Figura 24: Fotografía Sala de Media Tensión y Sala de Control – Fuente: CMCN.

### 3.2.5. Partidor Suave/Giro lento Inching Drive.

Este equipo cumple la función de que la puesta en marcha del Molino de Bolas se realice de forma “lenta” (Figura 25). Esta función se lleva a cabo cuando se desea girar el molino y ponerlo en una posición tal que permita el ingreso de algún operador al interior del molino a través de la tapa de registro, o cuando se desea probar algún componente del molino de manera suave.

Cuando se termina de utilizar este equipo, simplemente se desacopla el Inching Drive a través de la palanca de accionamiento, hecho esto, es posible lograr una partida de forma normal.

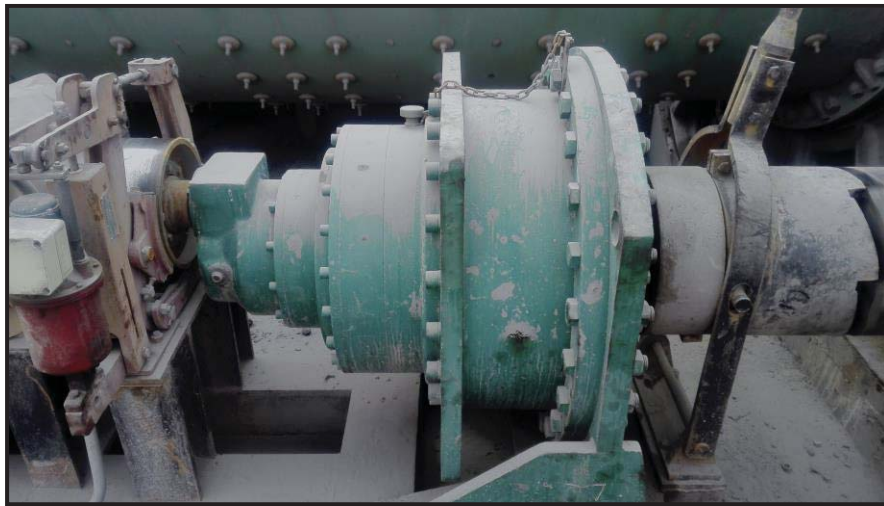


Figura 25: Fotografía Giro lento Inching Drive – Fuente: CMCN.



### 3.2.6. Sistema de Lubricación Piñón – Corona.

Este sistema cumple la función de lubricar la corona y el piñón del Molino de Bolas G, el cual a través de un compresor (caudal de  $0,17 \left[ \frac{m^3}{min} \right]$  y presión de  $0,7 [MPa]$ ) acciona una bomba modelo CB-B6 (caudal  $6 \left[ \frac{l}{min} \right]$  y presión de  $2,5 [MPa]$ ), la cual está conectada a cuatro inyectores SLS-II 4W (Figura 26 y 27). Los inyectores cada  $2 [hr]$  se mantienen rociando por  $30 [s]$  la corona del equipo. Este sistema utiliza una grasa Gadus OG 1600.

La cantidad de inyectores está relacionada con el largo de los dientes de la corona.

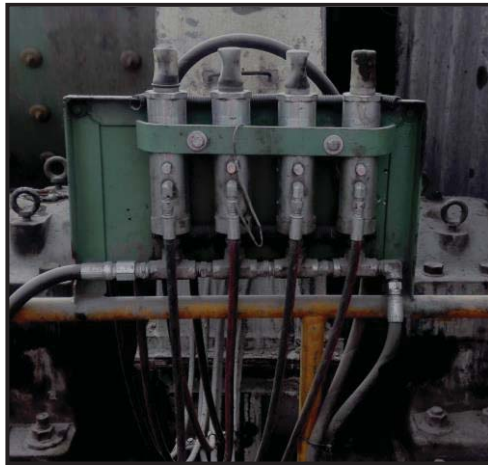


Figura 26: Fotografía Inyectores – Fuente: CMCN.



Figura 27: Fotografía Bomba Hidráulica – Fuente: CMCN.

### 3.2.7. Compresor.

La función de este equipo es ayudar a entregar la presión necesaria al sistema de lubricación Piñón-Corona y el Embrague. El equipo que se utiliza es un compresor Ingersoll Rand, el cual tiene una capacidad de  $40 \left[ \frac{ft^3}{min} \right]$  (Figura 28).

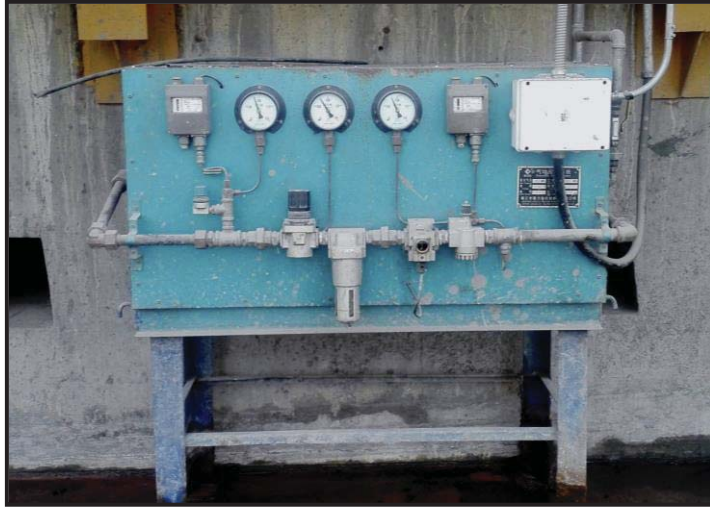


Figura 28: Fotografía Compresor – Fuente: CMCN.

### 3.2.8. Bombas de los Hidrociclones.

La función de estos equipos es impulsar el flujo de descarga del molino a una batería de seis hidrociclones donde dos de ellos se encuentran en stand by (Figura 29 y 30).



**Figura 29: Fotografía Bombas de los Hidrociclones Instaladas – Fuente: CMCN.**



**Figura 30: Fotografía Bombas de los Hidrociclones sin Instalar – Fuente: CMCN.**



### 3.2.9. Hidrociclones.

La función de estos equipos consta de clasificar el flujo proveniente de la descarga del molino. El material que tiene sobre tamaño pasa al circuito de re-molienda, cayendo nuevamente al estanque de alimentación del molino; el material que tiene el tamaño óptimo pasa al circuito de flotación (Figuras 31 y 32).



Figura 31: Fotografía Hidrociclones 1 – Fuente: CMCN.



Figura 32: Fotografía Hidrociclones 2 – Fuente: CMCN.

### 3.2.10. Descansos Molino Alimentación – Descarga.

Están formados por un soporte estructural y un cojinete de deslizamiento hidrostático de metal Babbit. La función de estos componentes consiste en soportar el peso del manto cilíndrico junto con toda la carga en su interior. Por otro lado, la superficie de lubricación que tienen los cojinetes, actúa amortiguando las oscilaciones, los golpes y ruidos, además de ser menos sensible a las vibraciones y a la penetración de polvo (Figura 33).



**Figura 33: Fotografía Descansos Molino Alimentación-Descarga –  
Fuente: CMCN.**

### 3.2.11. Manto Cilíndrico.

La función de este componente, aparte de contener carga en su interior, consiste en transmitirle movimiento a través de los lifters para poder moler la carga de mineral. El manto tiene las siguientes dimensiones, largo de 5,5 [m] y diámetro de 3,5 [m] (Figura 34).

Por otro lado, el volumen efectivo dentro del manto cilíndrico es de 55 [m<sup>3</sup>] y puede recibir como carga máxima de bolas 102 [ton].



Figura 34: Fotografía Manto Cilíndrico – Fuente: CMCN.

### 3.2.12. Piñón – Corona.

El piñón se encarga de transmitirle movimiento rotatorio a la corona y en consecuencia transmitirle movimiento al manto cilíndrico, debido a que la corona se encuentra apernada a éste último. El conjunto es helicoidal permitiendo una marcha mucho más suave y silenciosa. Por otro lado, el piñón está fabricado en acero forjado SAE 4340, el módulo es 28 [mm], número de dientes 25 y el ángulo de presión de 20°. La corona está fabricada en acero fundido, el módulo es 28 [mm], número de dientes 174 y el ángulo de presión de 20° (Figura 35).



Figura 35: Fotografía Piñón-Corona – Fuente: CMCN.

## **Capítulo IV: Análisis de Falla, Criticidad y Confiabilidad**

### **4.1. Introducción.**

En el presente trabajo de título, el equipo al cual se realizará el plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) es un Molino de Bolas *Shangai Minggong QMJ*, el cual realiza operaciones de molienda y conminución de mineral en la Compañía Minera Cerro Negro.

En primera instancia se realizará una descripción del equipo, el funcionamiento que éste tiene y los componentes principales que lo conforman. Posteriormente, se realizará un análisis FMECA y también se utilizarán los datos del historial de fallas del molino para realizar análisis de priorización como Pareto y Jack Knife, para poder determinar los componentes críticos del molino de bolas. Finalmente, se desarrollará el modelo de confiabilidad de Weibull a los componentes críticos seleccionados, con el fin de obtener parámetros como la confiabilidad, tasa de fallas y el MTBF, los cuales serán utilizados en el desarrollo del plan de mantenimiento.

Por otro lado, todos los cálculos realizados en este capítulo se llevaron a cabo gracias a la creación de un software de confiabilidad. La explicación del software se encuentra en el Anexo A.

## 4.2. Alcances.

El Molino *Shangai Minggong QMJ 12' x 18'* es un equipo nuevo, el cual no contaba con manuales y recomendaciones del fabricante para su correcta operación. Por otro lado, tampoco contaba con una hoja de vida, por lo que se buscaron datos de otro molino de bolas análogo en temas constructivos, dimensionales y operacionales. El equipo al cual corresponden los datos es un molino Dominion de dimensiones 13' x 18' de diámetro y largo, respectivamente. Además, cuenta con un sistema de transmisión piñón-corona y con un sistema de reducción giro lento, al igual que en Compañía Minera Cerro Negro.

El molino Dominion pertenece al Grupo Minero Las Cenizas, empresa ubicada en la ciudad de Cabildo, localizada en la provincia de Petorca, Región de Valparaíso, Chile.

Entonces, es con la hoja de vida de éste equipo que se realizarán los análisis mencionados, pues debido a las semejanzas señaladas anteriormente se supone que el comportamiento, esfuerzos y eventuales fallas de este equipo, serán similares a las del Molino G de la Compañía. Además, es importante mencionar que ambos molinos procesan el mismo tipo de mineral, por lo que el comportamiento se asemeja aún más.

Por otro lado, se realizó un desglose del equipo de Cerro Negro en sistemas, sub-sistemas y componentes. Posteriormente, de la hoja de vida del molino de Las Cenizas, se tomaron las fallas, fechas de ocurrencia y tipos de mantenimiento; para luego asociar esos datos con las divisiones hechas al Molino G.

El desglose del equipo en sistemas, sub-sistemas y componentes se encuentra en el Anexo B.



### 4.3. Descripción del Equipo.

Actualmente hay dos molinos operando de forma continua (E y G). Pese a esto, la ocurrencia de una falla y posterior detención del Molino de Bolas G, provocará que la meta de producción no pueda ser alcanzada; por un lado el molino principal procesa aproximadamente el 75% del mineral de sulfuro<sup>4</sup> y, por otro lado, el Molino E no tiene la capacidad para mantener funcionando la planta concentradora por sí solo. Entonces, es de suma urgencia mantener el Molino G en operación.

El funcionamiento del Molino G, consta de 9 sistemas básicos:

1. Manto Cilíndrico: Cumple la función de contener y mover el mineral con las bolas que están encargadas de la conminución del mineral.
2. Piñón-Corona: El Piñón se encarga de transmitir el movimiento rotatorio a la Corona, con el fin de transmitir el movimiento rotatorio al Manto Cilíndrico.
3. Girolento: Permite que el equipo pueda partir de una manera más suave, a través de un Inching Drive.
4. Lubricación: Se encarga de proveer de lubricante al equipo.
5. Motriz: Transforma la energía eléctrica en energía mecánica, con el fin de entregar el torque necesario para mover el equipo.
6. Descansos Molino Alimentación-Descarga: Cumple la función de sostener el Manto Cilíndrico y la carga contenida en este.
7. Embrague: Encargado de acoplar el conjunto Motriz con el conjunto Piñón-Corona para transmitir movimiento rotatorio.
8. Alimentación: Permite la entrada de carga al equipo.
9. Descarga: Permite la salida de la carga del equipo.

---

<sup>4</sup> Información entregada por Dpto. de Operaciones Plantas de Proceso y Relaves.

### 4.3.1. Identificación de los Sistemas Básicos Molino G.

En la Figura 36 se muestra un diagrama del molino de bolas G de la Compañía Minera Cerro Negro. La numeración corresponde a los sistemas antes descritos.

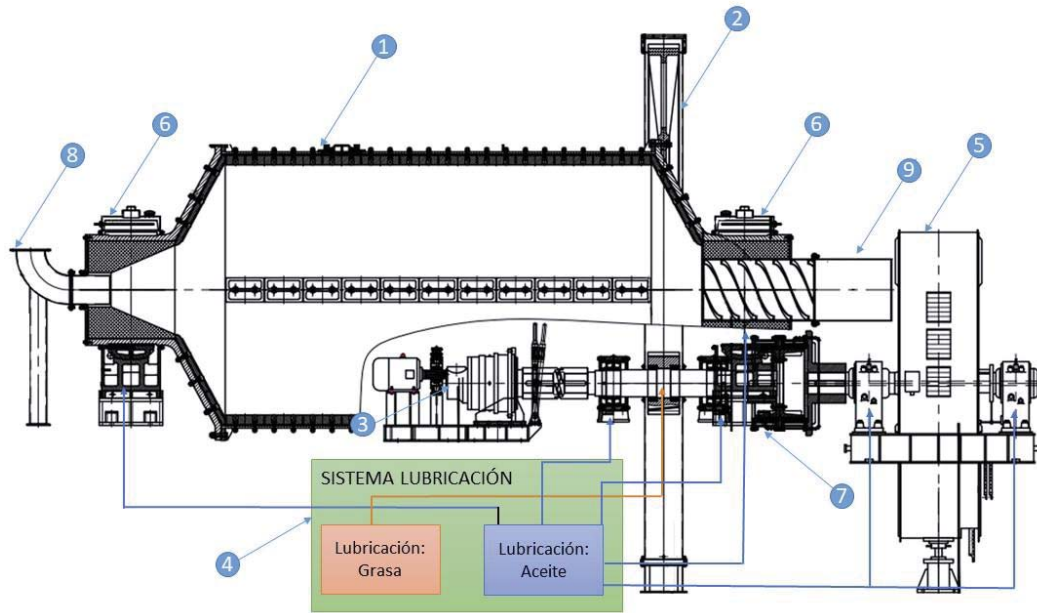


Figura 36: Identificación de Sistemas Básicos Molino G – Fuente: Propia.



#### 4.4. Condiciones de Operación del Molino G.

Según información entregada por el Departamento de Operaciones de Plantas de Proceso y Relaves, la capacidad nominal del equipo es de  $67 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{hr}} \right]$ , pero regularmente opera dentro de un rango de carga que va desde las 50 a  $55 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{hr}} \right]$ . Además, el molino se encarga de realizar actividades de conminución de mineral durante las 24 horas del día y en ocasiones se detiene solamente para actividades ligadas a mantenciones correctivas.

El equipo lleva en funcionamiento aproximadamente seis meses y aunque suele operar dentro del rango de carga mencionado anteriormente, ha habido ocasiones en que el flujo es mayor y se han presentado incidentes como: fallas internas en los revestimientos, levantadores/lifters, corte de pernos, fuga de material, desgaste en los descansos, problemas en la lubricación, etc.

Los datos principales del equipo se encuentran en la Tabla 11:

Marca	Shangai Minggong
Modelo	QMJ
Peso	170 [ton]
Largo	5,5 [m]
Diámetro Exterior	3,5 [m]
Capacidad Máxima de Diseño	67 [ton/hr]
Motor	Trifásico síncrono
Modelo Motor	TMDK1250-406
Potencia	1250 [kW]

Tabla 11: Características Principales del Equipo – Fuente: Propia.

#### 4.5. Condiciones de Mantenimiento del Molino G.

Según el Departamento de Mantenimiento de CMCN el equipo no cuenta con ningún plan de mantenimiento programado, ni tampoco con recomendaciones y manuales otorgados por el fabricante.

En la Tabla 12 se muestran los componentes que frecuentemente se les aplica un mantenimiento correctivo y el tipo de falla correspondiente, tomando en consideración los seis meses que lleva operando. Esta frecuencia de cambio actual se obtuvo de los escasos registros del molino de bolas de Compañía Minera Cerro Negro.

<b>Tipo de Mantención</b>	<b>Componente</b>	<b>Motivo de Cambio</b>
Mtto. Correctivo		
	Cambio de Aceite de Lubricación	Contaminación
	Cambio Bomba de Levante	Desgaste de Componentes
	Cambio de Spout/Boquilla Alimentación	Desgaste Excesivo
	Cambio Bomba de Lubricación	Desgaste de Componentes
	Cambio de Filtros de Lubricación	Desgaste Excesivo
	Cambio de Descansos Alimentación-Descarga	Desgaste Excesivo
	Cambio Sello Dinámico Alimentación	Desgaste Excesivo
	Reparación Cajón de Alimentación	Desgaste y Rotura
	Reparación Cajón de Descarga	Desgaste y Rotura

**Tabla 12: Frecuencia de Cambio Actual Molino G – Fuente: Propia.**

Por otro lado, la frecuencia de cambio correctiva de los componentes del molino de bolas del Grupo Minero Las Cenizas, la cual se muestra en la Tabla 13, se obtuvo de la hoja de vida del molino de Las Cenizas, la cual tiene data del 22 de enero del 2013 al 28 de mayo del 2018.

<b>Tipo de Mantención</b>	<b>Componente</b>	<b>Frecuencia de Cambio</b>
Mtto. Correctivo		
	Cambio de Revestimientos Manto	Desgaste Excesivo
	Cambio Piñón	Quiebre/desgaste Excesivo de Dientes
	Cambio de Inching Drive	Rotura de Componentes
	Cambio Motor Eléctrico	Rotura de Componentes
	Cambio de Aceite de Lubricación	Contaminación
	Cambio Bomba de Levante	Desgaste Componentes
	Cambio Tuberías Sistemas Lubricación	Contaminación/Tapada
	Cambio Grasa de Lubricación	Contaminación
	Cambio de Rodamientos Motor Eléctrico	Desgaste Excesivo
	Falla Retén Bomba de Lubricación	Desgaste Excesivo
	Cambio Bomba de Lubricación	Desgaste Componentes
	Cambio de Filtros de Lubricación	Desgaste Excesivo
	Cambio Descansos Alim./Dcrg.	Desgaste Excesivo
	Cambio Sello Dinámico Alimentación	Desgaste Excesivo
	Cambio Sello Estático Alimentación	Desgaste Excesivo
	Cambio Spout/Boquilla Alimentación	Desgaste Excesivo
	Reparación Cajón de Alimentación	Desgaste y Rotura
	Cambio de Parrillas Descarga	Desgaste Excesivo
	Cambio de Pernos Descarga	Corte, Corrosión e inicio grieta
	Reparación Cajón de Descarga	Desgaste y Rotura

**Tabla 13: Frecuencia de Cambio Actual Molino de Las Cenizas – Fuente: Propia.**

De las Tablas 12 y 13 podemos ver que el cambio correctivo de componentes entre empresas es similar, a pesar del corto tiempo que lleva operando el molino de Compañía Cerro Negro.

Es importante dejar en claro que se realizarán los análisis posteriores con la frecuencia de cambio correctiva del Grupo Minero Las Cenizas. Por otro lado, debido a que los tipos de falla no están bien categorizados, pues no explican en detalle lo que realmente ocurrió con el componente, se tomará la consideración de llamar a los modos de falla como **Modos Intervención Correctivo o Modo Correctivo** de aquí en adelante.

#### 4.6. Análisis de Falla y Criticidad del Equipo.

A continuación, se llevará a cabo el análisis de falla y criticidad al Molino de Bolas G para determinar los componentes críticos del equipo. Posteriormente, a los componentes seleccionados, se les aplicará el modelo de confiabilidad de Weibull.

##### 4.6.1. Diagrama Funcional de Bloques.

En la Figura 37 se muestra el diagrama funcional de bloques del Molino de Bolas G, en el cual se puede apreciar la división de alguno de los principales sistemas del equipo (mencionados anteriormente), además se muestran sus funciones y su interacción con el medio. Por otro lado, cualquier flecha que se vea interrumpida implica una eventual falla en el equipo.

Este diagrama se realizó con el fin de obtener un mayor conocimiento del equipo, las funciones de los distintos sistemas y componentes.

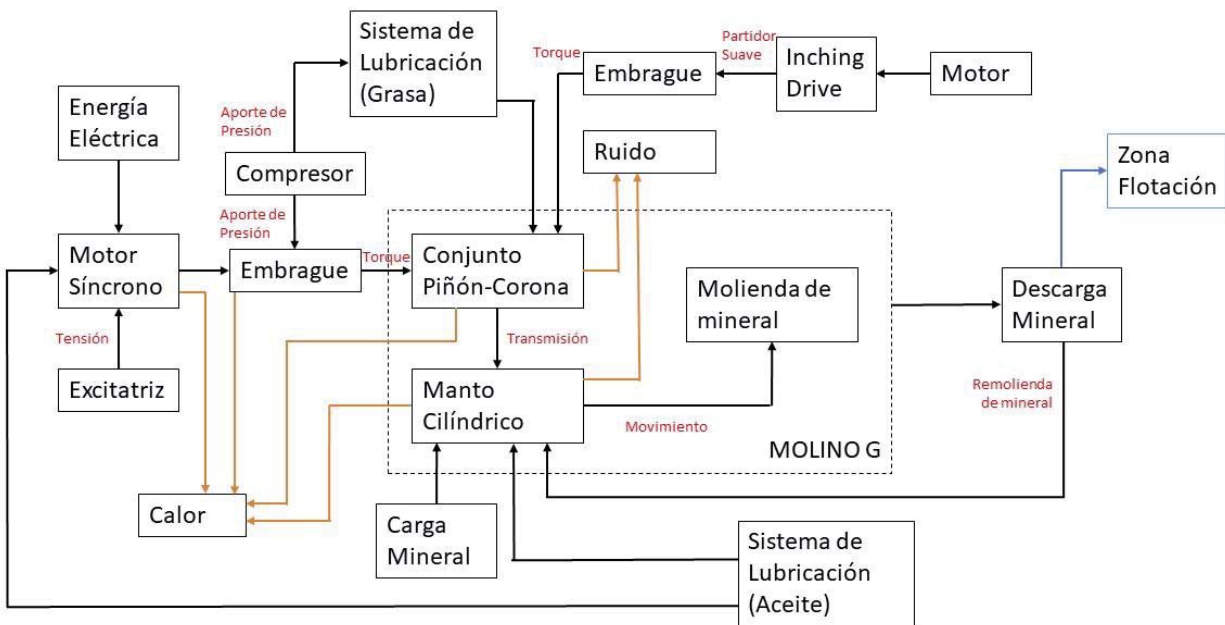


Figura 37: Diagrama Funcional de Bloques Molino G – Fuente: Propia.

#### **4.6.2. Análisis FMECA de Sistemas Básicos Molino G.**

En el siguiente apartado se llevará a cabo el análisis FMECA, el cual abarcará los 9 sistemas que conforman al molino de bolas. Además, para la correcta construcción del análisis se consultó con mecánicos, operadores y jefes de área de la Compañía.

Se tomará como base el modelo cualitativo, el cual busca identificar todas las posibles fallas de componentes que generen una detención del equipo, las consecuencias que traen tanto a nivel local como a nivel superior, la criticidad de las consecuencias, cómo es posible detectar estas fallas y, finalmente, qué acciones correctivas pueden tomarse contra la falla.

Este análisis sólo se llevará a cabo para identificar las fallas que provocan la detención del equipo, para la construcción de árboles de falla y la preparación de acciones preventivas. No se utilizará como un medio de priorización para los análisis de criticidad.

Los FMECA de cada uno de los sistemas se encuentra en el Anexo C.

#### **4.6.3. Análisis de Costo Global de Mantenimiento.**

Como se ha dicho anteriormente, Compañía Minera Cerro Negro no cuenta con un plan de mantenimiento para el equipo en cuestión y, a nivel empresa, resulta altamente crítico en temas productivos y económicos. Entonces, según lo mencionado y debido a que una de las principales tareas de los administradores del área de mantenimiento es minimizar los costos de mantención, como medida inicial se realizará un Análisis de Costo Global de Mantenimiento según los Modos Correctivos descritos en el historial. Posteriormente, los resultados obtenidos se utilizarán para el desarrollo de otros análisis.

**Cálculo Costo Global de Mantenimiento:** Se define según la siguiente ecuación,

$$CGM = C_{inter} + C_{falla} + C_{almac} + C_{s-i}$$

Para el cálculo del costo global de mantenimiento se tomarán las siguientes consideraciones,

- La bodega de la empresa solo cumple la función de gestionar órdenes de compra y de informar al área de mantenimiento que los equipos requeridos para la reparación ya se encuentran en faena. Por lo tanto, el Costo de Almacenamiento será reemplazado por el Costo de Gestión de Compra<sup>5</sup>.
- No se tomará en cuenta el costo de sobre-inversión debido a que no se está evaluando la opción de adquirir un nuevo equipo que reemplace al Molino de Bolas G, el cual, a futuro, minimice los costos globales de mantención.

Entonces,

$$CGM = C_{inter} + C_{falla} + C_{gesti3n\ compra}$$

**Cálculo Costo de Intervención:**

$$C_{inter} = C_{mano\ obra} + C_{repuesto} + C_{fungible}$$

Para el cálculo del costo de intervención se tomaron las siguientes consideraciones,

- En el caso de Cerro Negro, el costo de intervención incluye solo los gastos asociados a mantenciones correctivas, pues no cuentan con programas preventivos.
- La información respecto a los costos de repuestos fue obtenida a partir de las cotizaciones realizadas por el área de mantenimiento.
- Para el costo de los repuestos se considerará solo el costo técnico, es decir, solo el valor de la compra de la pieza al día de su utilización.

---

<sup>5</sup> Recomendación y asesoramiento de profesor guía.

- Para el costo de hora-hombre se tomará en cuenta solo el personal mecánico de la empresa, pues solo en ocasiones fortuitas se requiere de personal externo.
- Para poder realizar el cálculo de costo de mano de obra se tuvo que obtener información del costo hora-hombre promedio del personal mecánico de la empresa, el cual equivale a  $8,8 \left[ \frac{USD}{HH} \right]$ . Esta información fue otorgada por el jefe del área de Recursos Humanos de Cerro Negro.
- El costo de material fungible (electrodos de soldadura, discos de corte, llaves, silicona, empaquetaduras, entre otros) se despreciará debido a la magnitud de este frente a los demás costos.

Entonces,

$$C_{inter} = C_{mano\ obra} + C_{repuesto}$$

**Cálculo Costo de Falla:** Para el cálculo de costo de falla se tomará como escenario que el volumen perdido de producción no podrá ser recuperado (Pascual, 2005). Además, se tomará en cuenta la siguiente consideración,

- Para el costo de falla se considerarán solo los ingresos no percibidos producto de la detención del equipo. No se tomarán en cuenta los costos no percibidos de materias primas y productos no utilizados durante el tiempo en que la producción estuvo detenida, debido a la magnitud que tienen estos respecto a los costos generados por no producción. De esta forma, también, se está en un escenario mucho más conservador.

Entonces, con el jefe del área de Operaciones de Plantas de Proceso y Relaves se obtuvo el flujo de mineral y las toneladas de cobre fino y plata que ingresan al molino por hora de operación.

Además, se obtuvo la recuperación porcentual que se obtiene en el área de Flotación para el cobre, y la recuperación porcentual que se obtiene en Fundición Ventanas para la plata. Gracias a la información otorgada se pudo obtener lo siguiente:

El flujo de mineral total que ingresa al Molino de Bolas G y al Molino de Bolas E es alrededor de  $73 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{hr}} \right]$ , el cual contiene  $0,73 \text{ [tonCu]}$  aproximadamente. Y la recuperación en la zona de Flotación es del orden del 74%.

Entonces, el flujo de cobre fino que entra al molino es:

$$\text{Flujo } Cu_{\text{fino}} = 0,73 \left[ \frac{\text{tonCu}}{\text{hr}} \right]$$

Y considerando la recuperación de 74%, tenemos que el flujo de cobre fino que sale del molino es de:

$$\text{Flujo } Cu_{\text{fino}} = 0,73 * 0,74 = 0,54 \left[ \frac{\text{tonCu}}{\text{hr}} \right]$$

Por otro lado, considerando el valor de la libra de cobre, tenemos que el ingreso no percibido por hora detenida es:

$$\text{Valor}_{\text{libra cobre}} = 3,085 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{lb}} \right]$$

$$\text{Valor}_{\text{tonelada cobre}} = 3,085 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{lb}} \right] * \left[ \frac{\text{lb}}{0,0005\text{ton}} \right] = 6170 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{ton}} \right]$$

$$\text{Costo}_{\text{hora detenida1}} = 6170 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{ton}} \right] * 0,54 \left[ \frac{\text{tonCu}}{\text{hr}} \right] = 3338 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{hr}} \right]$$

Además, por información obtenida del área de operaciones, se sabe que hay  $33 \left[ \frac{\text{grAg}}{\text{ton}} \right]$  y que la recuperación porcentual se encuentra en el orden del 60%.



Entonces, la cantidad de plata que se recupera es:

$$Cantidad\ Ag = 73 \left[ \frac{ton}{hr} \right] * 33 \left[ \frac{grAg}{ton} \right] * 0,6 = 1445 \left[ \frac{grAg}{hr} \right]$$

$$Cantidad\ Ag = 1445 \left[ \frac{grAg}{hr} \right] = 51 \left[ \frac{ozAg}{hr} \right]$$

Considerando el valor de la onza de plata, tenemos que el ingreso no percibido por hora detenida es:

$$Costo_{hora\ detenida2} = 51 \left[ \frac{ozAg}{hr} \right] * 16,3 \left[ \frac{USD}{ozAg} \right] = 831 \left[ \frac{USD}{hr} \right]$$

Entonces, se procede al cálculo del costo de falla:

$$C_{falla} = Costo_{hora\ detenida1} + Costo_{hora\ detenida2}$$

$$C_{falla} = 3338 \left[ \frac{USD}{hr} \right] + 831 \left[ \frac{USD}{hr} \right] = 4169 \left[ \frac{USD}{hr} \right]$$

Por lo tanto, el costo de falla asociado a la no producción es de  $4169 \left[ \frac{USD}{hr} \right]$ , el cual es causado por la detención del Molino de Bolas G producto de una falla y la detención del Molino E debido a que por sí solo no puede mantener la planta concentradora operativa.

**Cálculo Costo Gestión de Compra:** Para el cálculo del costo de gestión de compra se tomará en cuenta el costo de transporte, de urgencia, de seguros, de elevación (contratación de grúas y plumas), el de la hora-hombre comprador y el de la energía consumida por el departamento.

$$C_{\text{gestión compra}} = C_{\text{transp.}} + C_{\text{urgencia}} + C_{\text{elev.}} + C_{\text{mano obra comprador}} + C_{\text{energía}}$$

- Para el costo de transporte se tomó el promedio entre el costo de transporte externo e interno, y se obtuvo un valor de 211 *USD*.
- El costo de seguros no se tomará en cuenta por sí solo, pues éste viene incluido en el costo de transporte.
- El costo de urgencia se considerará solo para aquellas intervenciones que involucran procesos de mecanizado y fabricación, aplicándoseles un factor de urgencia de aproximadamente un 45% del costo del repuesto. Por lo tanto, solo se aplicará costo de urgencia al piñón, descansos y boquilla alimentación, el resto de componentes se encuentran fabricados y listos para ser despachados, a excepción de los revestimientos y parrillas de descarga los cuales deben mantener estrictamente su tiempo de fabricación para obtener las propiedades mecánicas óptimas del caucho.
- El costo de elevación solo se aplicará para algunos modos correctivos (los de más tonelaje: descansos, piñón, inching drive y motor eléctrico del inching drive), para el resto de los modos solo se utilizará fuerza humana o maquinaria que pertenezca a la empresa. El costo de grúa tiene un valor de 1.875 *USD* y el costo de pluma de 938 *USD*; dependiendo del tonelaje y la distancia a la que debe moverse el componente, varía la utilización entre grúa o pluma.

- Para poder realizar el cálculo de costo de mano de obra del comprador se tuvo que obtener información del costo hora-hombre promedio del personal del departamento de mantención encargado de gestionar las compras, el cual equivale a  $15,55 \left[ \frac{USD}{HH} \right]$ ; información otorgada por el jefe del área de Recursos Humanos de Cerro Negro. Por otro lado, el tiempo que se demora en gestionar la compra es de aproximadamente 2 [hr].
- Para el costo de energía del departamento de mantención se tomará un consumo de energía de 2,2 [kWh] a un precio de  $0,1 \left[ \frac{USD}{kWh} \right]$ .

**A considerar:** Una orden de compra de un componente que no presenta urgencia, normalmente demora 15 días en ser aprobada. Por el contrario, cuando es de urgencia, puede aprobarse en 5 días o bien, dependiendo del caso, de forma inmediata.

Finalmente, para poder realizar el Análisis de Costo Global de Mantenimiento se tomaron las siguientes consideraciones generales:

- Los datos vienen de la hoja de vida del molino de Las Cenizas. Su historial de falla data del 22 de enero del 2013 hasta el 28 de mayo del 2018.
- Se consideraron solo las detenciones por temas correctivos.
- Se tomará el valor del dólar como 640 *USD* (Sin variaciones), correspondiente al día 21 de junio del 2018. Valor obtenido del Banco Central de Chile.
- El Molino de Bolas G procesa  $50 \left[ \frac{ton}{hr} \right]$  y el Molino de Bolas E procesa  $23 \left[ \frac{ton}{hr} \right]$ , ambos de forma continua.
- Se tomará el valor de la libra de cobre como 3,085 *USD* (Sin variaciones), correspondiente al día 21 de junio del 2018. Valor obtenido de la Bolsa de Metales.
- Se tomará el valor de la onza de plata como 16,3 *USD* (Sin variaciones), correspondiente al día 21 de junio del 2018. Valor obtenido de la Bolsa de Metales.

Entonces, para las fallas ocurridas entre el 22 de enero del 2013 hasta el 28 de mayo del 2018 y, tomando en cuenta las consideraciones anteriores, se obtiene la Tabla 14:

Modo Correctivo	Hrs. Detención	Cant. Fallas	N° Trab.	Costo Rep.	Costo Int.	Costo Falla	Costos (KUSD)	
							Costo Gestión Compra	CGM
Cambio de Revestimientos Manto	10	3	4	12	12,35	42	0,2	54
Cambio Piñón	324	2	4	31,3	32,57	1351	16,2	1400
Cambio de Inching Drive	10	1	4	11	11,14	42	1,2	54
Cambio Motor Eléctrico	10	2	4	1,25	1,39	42	1,2	44
Cambio de Aceite de Lubricación	12	3	4	2,3	2,51	50	0,2	53
Cambio Bomba de Levante	12	4	4	1,4	1,51	50	0,2	52
Cambio Tuberías Sist. Lubricación	12	1	4	2	2,21	50	0,2	52
Cambio Grasa de Lubricación	5	2	4	1,5	1,85	21	0,2	23
Cambio de Rod. Motor Eléctrico	5	1	4	0,032	0,17	21	0,2	21
Falla Retén Bomba de Lubricación	5	1	4	0,01	0,12	21	0,2	21
Cambio Bomba de Lubricación	12	7	4	1,6	1,71	50	0,2	52
Cambio de Filtros de Lubricación	12	3	4	0,14	0,18	50	0,2	50
Cambio de Descansos Alimentación-Descarga	168	2	4	44	44,84	700	21,9	767
Cambio Sello Dinámico Alim.	5	2	4	0,36	0,50	21	0,2	22
Cambio Sello Estático Alim.	5	3	4	0,06	0,20	21	0,2	21
Cambio Boquilla Alimentación	12	3	4	0,9	1,04	50	0,6	52
Reparación Cajón de Alimentación	2	3	4	0,5	0,57	8	0,2	9
Cambio de Parrillas Descarga	12	4	4	4	4,39	50	0,2	55
Cambio de Pernos Descarga	6	3	4	4	4,21	25	0,2	29
Reparación Cajón de Descarga	2	10	4	0,8	0,87	8	0,2	9

**Tabla 14: Análisis de Costo Global de Mantenimiento – Fuente: Propia.**

Es importante mencionar que las horas de detención son aproximaciones en base a la experiencia entregadas por parte del personal de CMCN y el número de trabajadores corresponde al personal mecánico que actualmente tiene la empresa.

#### 4.6.4. Análisis de Pareto a los Modos Correctivos.

Utilizando los datos de la Tabla 14 se realizarán tres diagramas de Pareto (CGM, horas detención, N° detenciones), con los cuales se podrá determinar el o los componentes críticos del equipo.

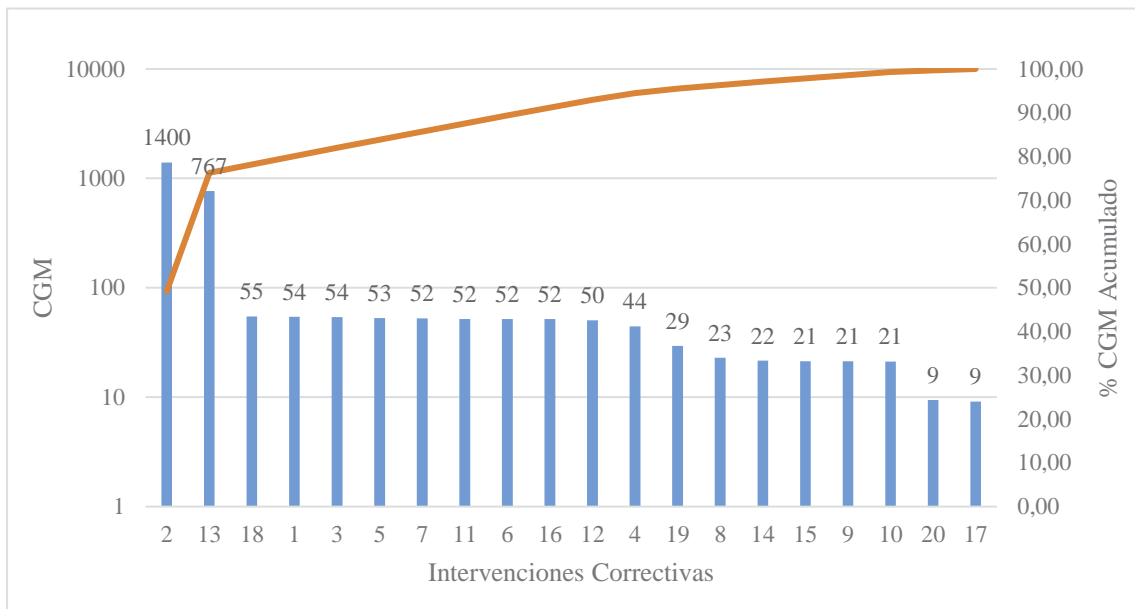
Para la construcción de los gráficos, se ordenarán los datos de forma descendente, como se menciona en el Capítulo II.

A continuación, en la Tabla 15, se muestran los datos correspondientes al Análisis de Pareto según CGM.

Modo Correctivo	N°	CGM	%CGM	%CGM Acumulado
Cambio Piñón	2	1400	49,25	49,25
Cambio Descansos Alimentación-Descarga	13	767	27,00	76,25
Cambio de Parrillas Descarga	18	55	1,92	78,18
Cambio de Revestimientos Manto	1	54	1,91	80,09
Cambio de Inching Drive	3	54	1,90	81,99
Cambio de Aceite de Lubricación	5	53	1,86	83,85
Cambio Tuberías Sist. Lubricación	7	52	1,85	85,69
Cambio Bomba de Lubricación	11	52	1,83	87,52
Cambio Bomba de Levante	6	52	1,82	89,34
Cambio Boquilla Alimentación	16	52	1,82	91,16
Cambio de Filtros de Lubricación	12	50	1,78	92,94
Cambio Motor Eléctrico	4	44	1,56	94,50
Cambio de Pernos Descarga	19	29	1,04	95,53
Cambio Grasa de Lubricación	8	23	0,81	96,34
Cambio Sello Dinámico Alimentación	14	22	0,76	97,10
Cambio Sello Estático Alimentación	15	21	0,75	97,85
Cambio Rod. Motor Eléctrico	9	21	0,75	98,60
Falla Retén Bomba de Lubricación	10	21	0,75	99,35
Reparación Cajón de Descarga	20	9	0,33	99,68
Reparación Cajón de Alimentación	17	9	0,32	100,00

**Tabla 15: Análisis de Pareto CGM a Modos Correctivos – Fuente: Propia.**

Utilizando la tabla anterior, se obtiene el diagrama mostrado en la Figura 38.



**Figura 38: Diagrama de Pareto CGM – Fuente: Propia.**

Para la construcción del gráfico se toma la siguiente consideración: para el 1<sup>er</sup> eje vertical se graficará el CGM en escala logarítmica, debido a que existe una gran diferencia entre los costos y habían modos correctivos que no se lograban apreciar en el diagrama.

Entonces, según el diagrama, podemos ver que los principales Modos Correctivos que generan el 80,09% de los CGM son:

- Cambio Piñón.
- Cambio de Descansos Alimentación- Descarga.
- Cambio Parrillas de Descarga.
- Cambio Revestimientos Manto.

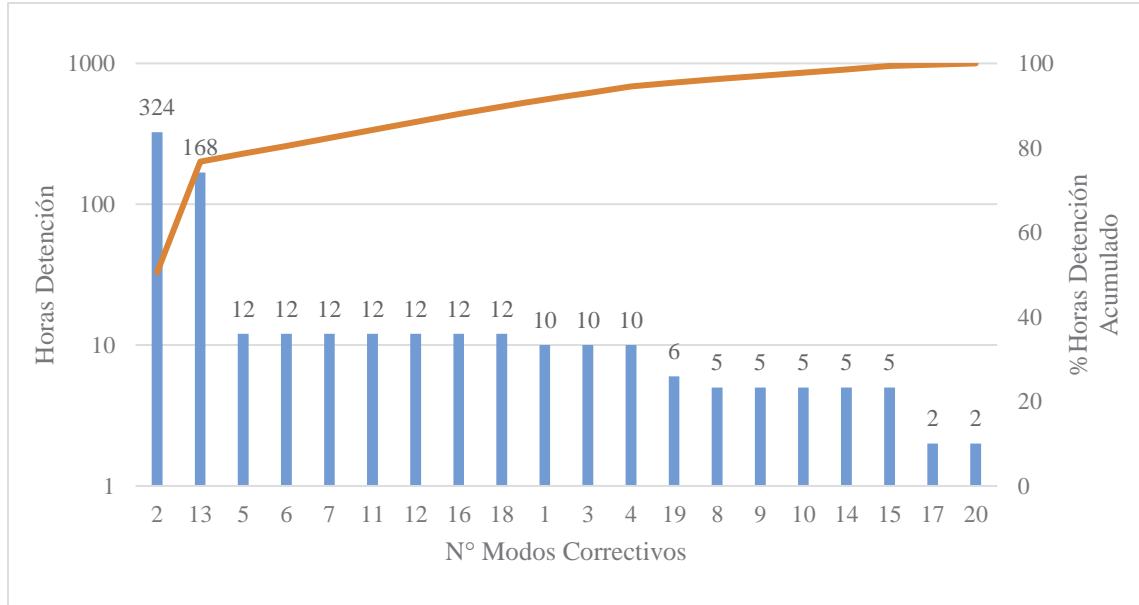
A continuación, en la Tabla 16, se muestran los datos correspondientes al análisis de Pareto según Horas Detención.

Modo Correctivo	N°	Hrs. Detención	%Hrs. Detención	%Hrs. Detención Acumulado
Cambio Piñón	2	324	50,55	50,55
Cambio Descansos Alimentación-Descarga	13	168	26,21	76,76
Cambio de Aceite de Lubricación	5	12	1,87	78,63
Cambio Bomba de Levante	6	12	1,87	80,50
Cambio Tuberías Sist. Lubricación	7	12	1,87	82,37
Cambio Bomba de Lubricación	11	12	1,87	84,24
Cambio de Filtros de Lubricación	12	12	1,87	86,12
Cambio Boquilla Alimentación	16	12	1,87	87,99
Cambio de Parrillas Descarga	18	12	1,87	89,86
Cambio de Revestimientos Manto	1	10	1,56	91,42
Cambio de Inching Drive	3	10	1,56	92,98
Cambio Motor Eléctrico	4	10	1,56	94,54
Cambio de Pernos Descarga	19	6	0,94	95,48
Cambio Grasa de Lubricación	8	5	0,78	96,26
Cambio Rod. Motor Eléctrico	9	5	0,78	97,04
Falla Retén Bomba de Lubricación	10	5	0,78	97,82
Cambio Sello Dinámico Alimentación	14	5	0,78	98,60
Cambio Sello Estático Alimentación	15	5	0,78	99,38
Reparación Cajón de Alimentación	17	2	0,31	99,69
Reparación Cajón de Descarga	20	2	0,31	100,00

**Tabla 16: Análisis de Pareto Horas Detención a Modos Correctivos – Fuente: Propia.**



Graficando los datos obtenidos en la Tabla 16, se obtiene el diagrama mostrado en la Figura 39:



**Figura 39: Diagrama de Pareto Horas Detención – Fuente: Propia.**

Para la construcción del diagrama se toma la siguiente consideración: para el 1<sup>er</sup> eje vertical se graficarán las Horas Detención en escala logarítmica, debido a que existe una gran diferencia entre ellas y habían modos correctivos que no se lograban apreciar en el diagrama.

Entonces, en la Figura 39, podemos ver que los principales Modos Correctivos que generan el 80,5% de las Horas de Detención son:

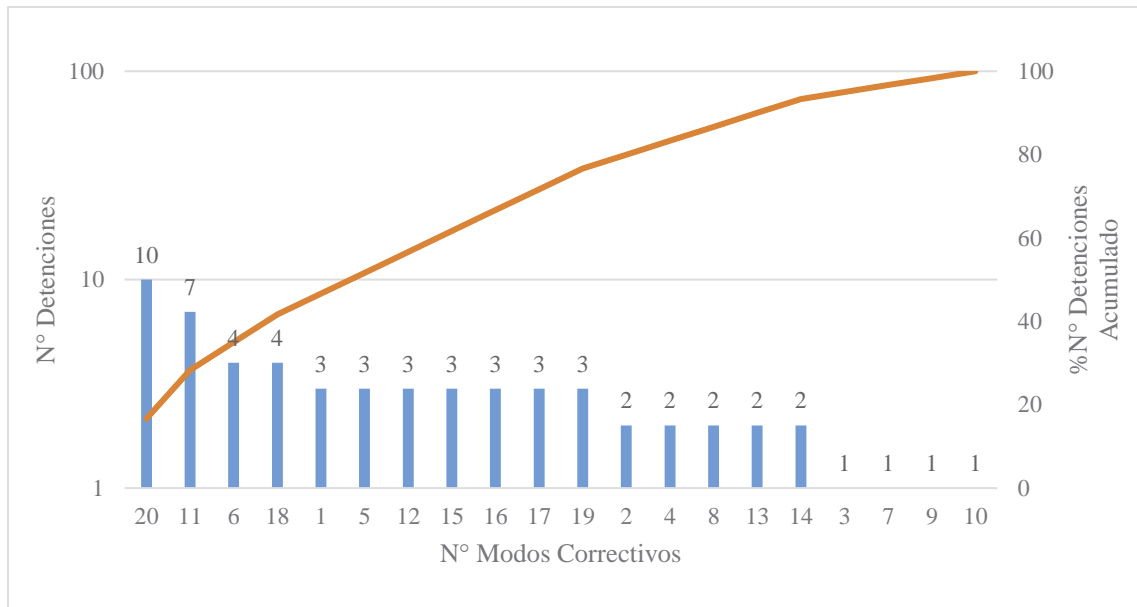
- Cambio Piñón.
- Cambio Descansos Alimentación-Descarga.
- Cambio de Aceite de Lubricación.
- Cambio de Bomba de Levante.

A continuación, en la Tabla 17, se muestran los datos correspondientes al análisis de Pareto según N° Detenciones.

Modo Correctivo	N°	N° Detenciones	%N° Detenciones	%N° Detenciones Acumulado
Reparación Cajón de Descarga	20	10	16,7	16,7
Cambio Bomba de Lubricación	11	7	11,7	28,3
Cambio Bomba de Levante	6	4	6,7	35,0
Cambio de Parrillas Descarga	18	4	6,7	41,7
Cambio de Revestimientos Manto	1	3	5,0	46,7
Cambio de Aceite de Lubricación	5	3	5,0	51,7
Cambio de Filtros de Lubricación	12	3	5,0	56,7
Cambio Sello Estático Alimentación	15	3	5,0	61,7
Cambio Boquilla Alimentación	16	3	5,0	66,7
Reparación Cajón de Alimentación	17	3	5,0	71,7
Cambio de Pernos Descarga	19	3	5,0	76,7
Cambio Piñón	2	2	3,3	80,0
Cambio Motor Eléctrico	4	2	3,3	83,3
Cambio Grasa de Lubricación	8	2	3,3	86,7
Cambio Descansos Alimentación-Descarga	13	2	3,3	90,0
Cambio Sello Dinámico Alimentación	14	2	3,3	93,3
Cambio de Inching Drive	3	1	1,7	95,0
Cambio Tuberías Sist. Lubricación	7	1	1,7	96,7
Cambio Rod. Motor Eléctrico	9	1	1,7	98,3
Falla Retén Bomba de Lubricación	10	1	1,7	100,0

**Tabla 17: Análisis de Pareto N° Detenciones a Modos Correctivos – Fuente: Propia.**

Graficando los datos obtenidos en la Tabla 17, se obtiene el diagrama mostrado en la Figura 40:



**Figura 40: Diagrama de Pareto N° Detenciones – Fuente: Propia.**

Para la construcción del diagrama se toma la siguiente consideración: para el 1<sup>er</sup> eje vertical se graficará el N° Detenciones en escala logarítmica. Esto, debido a que existe una gran diferencia entre ellos y había modos correctivos que no se lograban apreciar en el diagrama.

Entonces, según el diagrama, podemos ver que los principales Modos Correctivos que generan el 77% de las detenciones son:

- Reparación Cajón de Descarga.
- Cambio Bomba de Lubricación.
- Cambio Bomba de Levante.
- Cambio de Parrillas Descarga.
- Cambio de Revestimientos Manto.
- Cambio de Aceite de Lubricación.
- Cambio de Filtros de Lubricación.
- Cambio de Sello Estático Alimentación.
- Cambio Boquilla Alimentación.
- Reparación Cajón de Alimentación.
- Cambio de Pernos Descarga.

#### 4.6.5. Análisis de Jack Knife a los Modos Correctivos.

Para la realización del diagrama de Jack Knife se considerarán los modos correctivos, la cantidad de fallas, la frecuencia de fallas, las horas en que el equipo estuvo detenido hasta su reparación (MTTR), el TFS y la indisponibilidad del equipo (D).

A continuación, en la Tabla 18, se muestran los datos necesarios para realizar el análisis de Jack Knife,

Modos Correctivo	N°	Cant. Fallas	Frecuencia Falla (1/Periodo)	MTTR (hr)	TFS (Periodo)	D
Cambio de Revestimientos Manto	1	3	0,6	10	0,0002	0,0001
Cambio Piñón	2	2	0,4	324	0,0075	0,0030
Cambio de Inching Drive	3	1	0,2	10	0,0002	0,0000
Cambio Motor Eléctrico	4	2	0,4	10	0,0002	0,0001
Cambio de Aceite de Lubricación	5	3	0,6	12	0,0003	0,0002
Cambio Bomba de Levante	6	4	0,8	12	0,0003	0,0002
Cambio Tuberías Sist. Lubricación	7	1	0,2	12	0,0003	0,0001
Cambio Grasa de Lubricación	8	2	0,4	5	0,0001	0,0000
Cambio Rod. Motor Eléctrico	9	1	0,2	5	0,0001	0,0000
Falla Retén Bomba de Lubricación	10	1	0,2	5	0,0001	0,0000
Cambio Bomba de Lubricación	11	7	1,4	12	0,0003	0,0004
Cambio de Filtros de Lubricación	12	3	0,6	12	0,0003	0,0002
Cambio Descansos Alimentación-Descarga	13	2	0,4	168	0,0039	0,0016
Cambio Sello Dinámico Alimentación	14	2	0,4	5	0,0001	0,0000
Cambio Sello Estático Alimentación	15	3	0,6	5	0,0001	0,0001
Cambio Boquilla Alimentación	16	3	0,6	12	0,0003	0,0002
Reparación Cajón de Alimentación	17	3	0,6	2	0,0000	0,0000
Cambio de Parrillas Descarga	18	4	0,8	12	0,0003	0,0002
Cambio de Pernos Descarga	19	3	0,6	6	0,0001	0,0001
Reparación Cajón de Descarga	20	10	2,0	2	0,0000	0,0001

**Tabla 18: Análisis de Jack Knife a Modos Correctivos – Fuente: Propia.**

Es importante mencionar que el periodo con el cual fue desarrollada esta tabla corresponde al del historial de vida del equipo (5 años).

Cabe destacar que la fracción de tiempo en que el equipo se encuentra detenido por mantenimiento correctivo, también llamado indisponibilidad, para los distintos modos correctivos está definido de la siguiente forma:

$$D = Ff * TFS$$

Ahora, se obtendrán el límite de TFS,

$$L TFS = \frac{\sum TFS}{N^{\circ} \text{ Modos Correctivos}} = 0,00074 \text{ [año]}$$

El Límite Frecuencia de Falla,

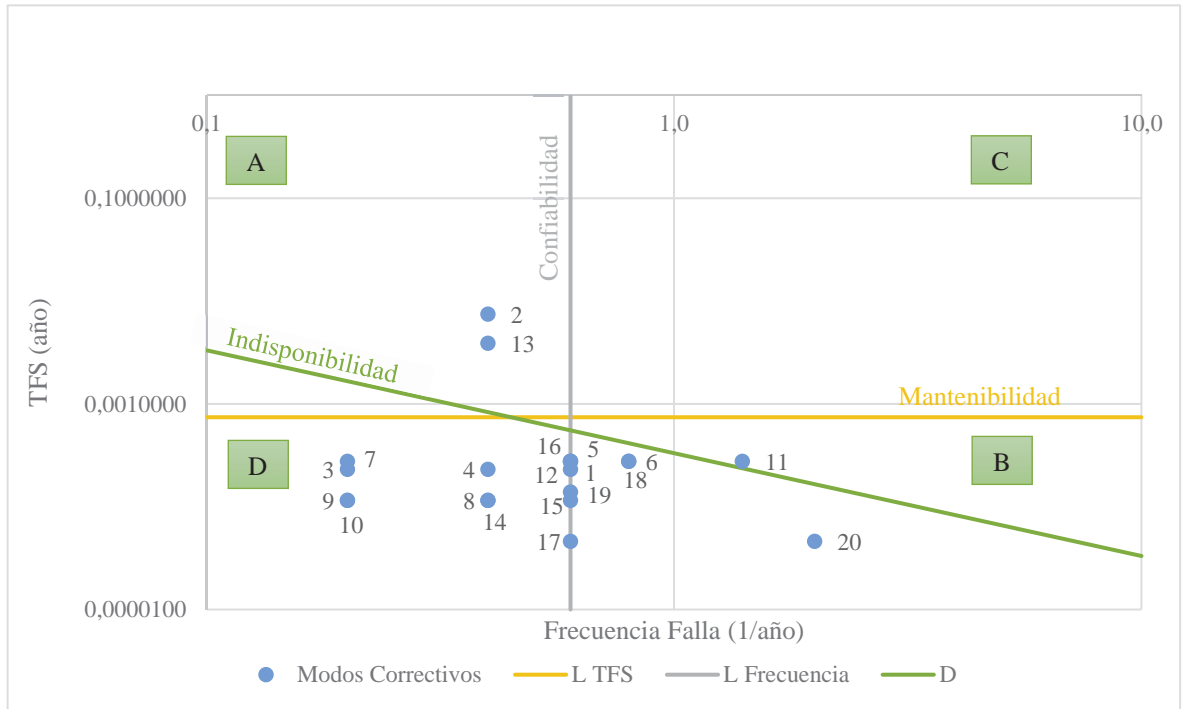
$$L Ff = \frac{\sum Ff}{N^{\circ} \text{ Modos Correctivos}} = 0,6 \left[ \frac{1}{\text{año}} \right]$$

Los puntos de la curva de Iso-Indisponibilidad son los siguientes,

$$\text{Punto 1}_{[x,y]} = [0,2; 0,0017]$$

$$\text{Punto 2}_{[x,y]} = [2; 0,00017]$$

Graficando los datos obtenidos en la Tabla 18 junto con los límites y la curva de iso-indisponibilidad, se obtiene el siguiente diagrama (Figura 41),



**Figura 41: Diagrama de Jack Knife – Fuente: Propia.**

Entonces, de la Figura 41, podemos ver lo siguiente:

- Los Modos Correctivos que se encuentran por encima de la curva D generan una mayor indisponibilidad en el equipo, por lo tanto, son considerados como los más críticos.
- Podemos ver que ningún modo de falla se encuentra en el cuadrante C, el cual es considerado el más crítico.
- Los Modos Correctivos 2 y 13 se encuentran en el cuadrante A, por tanto, son modos Agudos y afectan en la mantenibilidad del equipo.

- Los Modos Correctivos 6, 11, 18 y 20 se encuentran en el cuadrante B, entonces, se consideran como modos Crónicos, los cuales afectan en la confiabilidad del equipo.
- Los Modos Correctivos 1, 5, 12, 15, 16, 17 y 19, podemos ver que se encuentran en la línea de Confiabilidad, por lo tanto, su ocurrencia no es tan significativa. Además, se encuentran debajo de la línea de Mantenibilidad, por lo que no necesitan un alto tiempo de reparación. Entonces, no se considerarán en análisis posteriores.
- Se puede apreciar que el Modo Correctivo 20, al estar en el cuadrante B, nos indica que afecta enormemente la Confiabilidad del equipo. Pero, como su reparación no toma nada de tiempo, la mantenibilidad del equipo no se ve afectada de gran manera, por lo tanto, tampoco se considerará en análisis posteriores.
- También podemos apreciar que los Modos Correctivos 3, 4, 7, 8, 9, 10 y 14, se encuentran en el cuadrante D, es decir, la ocurrencia de fallas no afecta la confiabilidad y el tiempo de reparación no genera problemas en la mantenibilidad del equipo. Por lo tanto, los componentes se encuentran bajo control, a pesar de que algunos tengan elevados CGM, según lo visto en Pareto.

#### 4.6.6. Comparación de Resultados y Elección de Modos Correctivos Críticos.

La elección de los modos críticos se llevará a cabo con los diagramas de Pareto y Jack Knife.

Es importante mencionar que, para hacerlo correctamente, era necesario conocer a cabalidad la función de cada componente y las consecuencias de una eventual falla, a fin de ser objetivo al momento de elegir el criterio que más se ajustara a los requerimientos de la empresa.

##### - Según Análisis de Pareto:

Los resultados variaban dependiendo del criterio utilizado para evaluar los modos correctivos, por lo que resulta realmente complejo visualizar cuales son los modos que posteriormente hay que prestarles atención. Como se muestra en la Tabla 19:

Tipo de Criterio		
CGM	Horas Detenidas	Nº Detenciones
Cambio Piñón	Cambio Piñón	Reparación Cajón de Descarga
Cambio Descansos Molino Alimentación-Descarga	Cambio Descansos Molino Alimentación-Descarga	Cambio Bomba de Lubricación
Cambio de Parrillas Descarga	Cambio de Aceite de Lubricación	Cambio Bomba de Levante
Cambio de Revestimientos Manto	Cambio Bomba de Levante	Cambio de Parrillas Descarga
Cambio de Inching Drive	Cambio Tuberías Sist. Lubricación	Cambio de Revestimientos Manto
Cambio de Aceite de Lubricación	Cambio Bomba de Lubricación	Cambio de Aceite de Lubricación
Cambio Tuberías Sist. Lubricación	Cambio de Filtros de Lubricación	Cambio de Filtros de Lubricación
Cambio Bomba de Lubricación	Cambio Boquilla Alimentación	Cambio Sello Estático Alimentación
Cambio Bomba de Levante	Cambio de Parrillas Descarga	Cambio Boquilla Alimentación
Cambio Boquilla Alimentación	Cambio de Revestimientos Manto	Reparación Cajón de Alimentación
Cambio de Filtros de Lubricación	Cambio de Inching Drive	Cambio de Pernos Descarga
Cambio Motor Eléctrico	Cambio Motor Eléctrico	Cambio Piñón
Cambio de Pernos Descarga	Cambio de Pernos Descarga	Cambio Motor Eléctrico
Cambio Grasa de Lubricación	Cambio Grasa de Lubricación	Cambio Grasa de Lubricación
Cambio Sello Dinámico Alimentación	Cambio Rod. Motor Eléctrico	Cambio Descansos Molino Alimentación-Descarga
Cambio Sello Estático Alimentación	Falla Retén Bomba de Lubricación	Cambio Sello Dinámico Alimentación
Cambio Rod. Motor Eléctrico	Cambio Sello Dinámico Alimentación	Cambio de Inching Drive
Falla Retén Bomba de Lubricación	Cambio Sello Estático Alimentación	Cambio Tuberías Sist. Lubricación
Reparación Cajón de Descarga	Reparación Cajón de Alimentación	Cambio Rod. Motor Eléctrico
Reparación Cajón de Alimentación	Reparación Cajón de Descarga	Falla Retén Bomba de Lubricación

Tabla 19: Resultados Análisis de Pareto – Fuente: Propia.



Entonces, se tomaron los primeros cinco modos correctivos y los que se repiten, entre los distintos criterios analizados, son los siguientes:

- Cambio Piñón.
- Cambio Descansos Molino Alimentación- Descarga.
- Cambio Parrillas de Descarga.
- Cambio Bomba de Levante.
- Cambio Revestimientos Manto.

Hay que tener en cuenta que, de llegar a seleccionar estos modos correctivos como los más críticos, puede que se esté cometiendo un error, pues se están mezclando criterios. Además, se dejan fuera algunos modos que también tienen relevancia.

- **Según Análisis de Jack Knife:**

Se consideraron que los modos correctivos críticos eran aquellos que se encontraban por sobre la curva de iso-indisponibilidad en los cuadrantes A y C. Según esto, los modos correctivos son los siguientes:

- Cambio Piñón.
- Cambio de Descansos Alimentación- Descarga.
- Cambio Bomba de Lubricación.

Por otro lado, también se considerarán los siguientes modos correctivos como críticos:

- Cambio Bomba de Levante.
- Cambio Parrillas de Descarga.

Debido a que estos están por sobre el límite de Frecuencia, provocando problemas en la confiabilidad del equipo y a pesar de que se encuentran bajo la línea de mantenibilidad, están muy cercanos a la curva de iso-indisponibilidad.

- **Resultado y Elección de Modos Correctivos Críticos:**

A causa de la disparidad en los resultados obtenidos con el Análisis de Pareto, se toma la decisión de seleccionar los modos correctivos críticos obtenidos en el análisis de Jack Knife, el cual es mucho más certero y preciso como método de priorización, dado que se consideran componentes que generan defectos importantes tanto en la mantenibilidad como en la confiabilidad y que, coincidentemente, generan un alto CGM. A diferencia del Análisis de Pareto que en cada uno de los criterios tomaba en cuenta modos correctivos que, según Jack Knife, estaban bajo control.

Por otro lado, es importante mencionar que, debido a los alcances del presente trabajo de título, solo se seleccionaron cinco modos correctivos críticos.

#### 4.7. Reducción del Impacto Negativo al CGM de los Modos Correctivos Críticos.

CMCN pretende tener en “stand by” otro molino de bolas, al cual designan Molino F, como una estrategia para reducir el impacto negativo que tiene en la producción una falla del molino principal<sup>6</sup>. Entonces, se realizará un nuevo análisis de CGM a los modos correctivos seleccionados, tomando en cuenta que, cuando falle el Molino G, el Molino E y F se encargarán de mantener operativa la planta concentradora procesando, aproximadamente, un total de  $40 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{hr}} \right]$ .

Entonces, se tiene que:

El flujo de mineral que procesan en conjunto el Molino de Bolas E y F es de  $40 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{hr}} \right]$  aproximadamente, el cual contiene  $0,4 \left[ \text{tonCu} \right]$ . Y la recuperación en la zona de Flotación es del orden del 74%.

Por lo tanto, el flujo de cobre fino de ingreso sería el siguiente:

$$\text{Flujo } Cu_{\text{fino}} = 0,4 \left[ \frac{\text{tonCu}}{\text{hr}} \right]$$

Y considerando la recuperación de 74%, tenemos que el flujo de cobre fino que sale es de:

$$\text{Flujo } Cu_{\text{fino}} = 0,4 * 0,74 = 0,3 \left[ \frac{\text{tonCu}}{\text{hr}} \right]$$

Por otro lado, considerando el valor de la libra de cobre, tenemos que:

$$\text{Valor}_{\text{libra}}^{\text{cobre}} = 3,085 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{lb}} \right]$$

$$\text{Valor}_{\text{tonelada}}^{\text{cobre}} = 3,085 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{lb}} \right] * \left[ \frac{\text{lb}}{0,0005\text{ton}} \right] = 6170 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{ton}} \right]$$

---

<sup>6</sup> Información entregada por el Dpto. de Mantenimiento Mecánico.

Entonces, considerando el valor de la tonelada de cobre, tenemos que el ingreso no percibido por hora detenida es:

$$Ingreso_{Cu} = 6170 \left[ \frac{USD}{ton} \right] * 0,3 \left[ \frac{tonCu}{hr} \right] = 1851 \left[ \frac{USD}{hr} \right]$$

Por información obtenida del área de operaciones, se sabe que hay 33  $\left[ \frac{grAg}{ton} \right]$  y que la recuperación porcentual se encuentra en el orden del 60%.

Entonces, la cantidad de plata que se recupera es:

$$Cantidad\ Ag = 40 \left[ \frac{ton}{hr} \right] * 33 \left[ \frac{grAg}{ton} \right] * 0,6 = 792 \left[ \frac{grAg}{hr} \right]$$

$$Cantidad\ Ag = 792 \left[ \frac{grAg}{hr} \right] = 28 \left[ \frac{ozAg}{hr} \right]$$

Considerando el valor de la onza de plata, tenemos que el ingreso no percibido por hora detenida es:

$$Ingreso_{Ag} = 28 \left[ \frac{ozAg}{hr} \right] * 16,3 \left[ \frac{USD}{ozAg} \right] = 456 \left[ \frac{USD}{hr} \right]$$

Entonces, se procede al cálculo de ingreso, gracias a la producción de ambos molinos:

$$Ingreso_{E\ y\ F} = Ingreso_{Cu} + Ingreso_{Ag}$$

$$Ingreso_{E\ y\ F} = 1851 \left[ \frac{USD}{hr} \right] + 456 \left[ \frac{USD}{hr} \right] = 2307 \left[ \frac{USD}{hr} \right]$$

Por lo tanto, el costo de falla asociado a la no producción, tomando en cuenta los ingresos generados por la nueva estrategia, es el siguiente:

$$C_{falla} = 4169 \left[ \frac{USD}{hr} \right] - 2307 \left[ \frac{USD}{hr} \right] = 1862 \left[ \frac{USD}{hr} \right]$$

Según esto, tenemos como resultado la Tabla 20.

Modo Correctivo	Hrs. Detención	Cant. Fallas	N° Trab.	Costo Rep.	Costo Inter.	Costos (KUSD)		CGM
						Costo Falla	Costo Gestión	
Cambio Piñón	324	2	4	31,3	32,6	603,3	16,2	652
Cambio de Descansos Alimentación- Descarga	168	2	4	44	45	312,8	21,9	380
Cambio de Parrillas Descarga	12	4	4	4	4	22,3	0,2	27
Cambio Bomba de Lubricación	12	7	4	2	2	22,3	0,2	24
Cambio Bomba de Levante	12	4	4	1	2	22,3	0,2	24

**Tabla 20: Reducción Impacto Negativo a CGM – Fuente: Propia.**

De la tabla se puede ver que los primeros dos modos de falla tienen el CGM mas alto para la empresa y, aunque los otros componentes fallan con mayor frecuencia, el costo de falla asociado a factores como la intervención, repuesto y otros, indican que son los más críticos.

## **4.8. Modelo de Confiabilidad.**

A continuación, se presenta el desarrollo del modelo de confiabilidad a los componentes críticos seleccionados.

### **4.8.1. Alcances.**

Se advierte que los análisis realizados cuentan con una cantidad de datos muy precaria, en consecuencia, los resultados, desde el punto de vista estadístico, no son tan robustos. Sin embargo, el análisis se ejecuta para tener una idea inicial del comportamiento de los componentes y del sistema, y con esto llevar a cabo el presente trabajo de título.

### **4.8.2. Aplicación del Modelo de Weibull a los Modos Correctivos Críticos.**

En seguida, se trabajará con la distribución estadística de Weibull para análisis de confiabilidad de sistemas mecánicos, con la cual se adecuará una función a fin de poder modelar el comportamiento de los distintos modos correctivos críticos, para luego obtener los parámetros de Weibull que serán utilizados más adelante.

A continuación, se muestra el análisis de Weibull, la validación del modelo, la curva de confiabilidad, el MTBF y la tasa de falla para cada modo correctivo.

#### 4.8.2.1. Cambio Piñón:

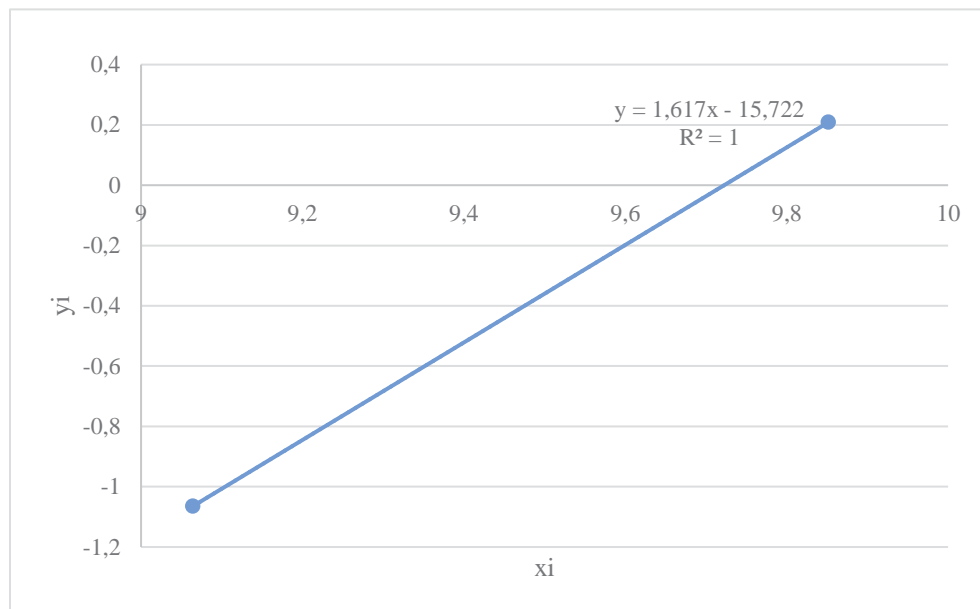
En la Tabla 21 se muestra el cálculo de rangos medianos  $F(i)$ , los valores del eje X ( $x_i$ ) y el eje Y ( $y_i$ ) según el método de los mínimos cuadrados; que nos servirán para graficar y obtener una regresión lineal. La pendiente de esta regresión representa al parámetro de forma  $\beta$ , el cuál será analizado posteriormente.

N° Falla $i$	Tiempo de Falla [hr] $t_i$	Rangos Medianos $F(i)$	$\ln(t_i)$ $x_i$	$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(i)}\right)\right)$ $y_i$
1	8640	0,29	9,06	-1,06
2	18990	0,71	9,85	0,21

Tabla 21: Datos para la Regresión Lineal Modo Correctivo  
Cambio Piñón – Fuente: Propia.

Como se mencionaba antes, la cantidad de datos es muy poca y puede que no sean representativos a la hora de modelar el comportamiento del componente. Por esta misma razón, para minimizar el error en el modelamiento, se estimó la función de distribución con el método de los rangos medianos, que se utiliza cuando la población de datos es pequeña.

A continuación, en la Figura 42, se muestra la regresión lineal del modo correctivo.



**Figura 42: Regresión Lineal Modo Correctivo Cambio Piñón – Fuente: Propia.**

Según el diagrama de la Figura 42, no es necesario minimizar el error cuadrático debido a que la recta representa completamente el comportamiento de este modo. Así pues, según la recta, tenemos los siguientes parámetros de Weibull:

$$\beta = 1,62 [-]$$

$$\eta = 16696 [hr]$$

$$\gamma = 0 [hr]$$



**Validación del Modelo a través del Test de Kolmogorov-Smirnov.**

Para la realización del test, se asume que la población sigue una distribución Gaussiana con una media de 13815 y una desviación standard de 7319. Para encontrar  $F(t)$ , en Excel se utiliza la función distribución normalizada. Los resultados se muestran en la Tabla 22:

$i$	Duración (hr)	$F(i)$	$F(t)$	$D_{ni}$
1	8640	0,29	0,24	0,05
2	18990	0,71	0,76	0,05

**Tabla 22: Datos para Test de K-S para Modo Correctivo  
Cambio Piñón – Fuente: Propia.**

Para 2 datos y un 95% de confiabilidad, de la tabla de Kolmogorov-Smirnov se tiene que  $D(2; 0,05) = 0,84189$ . Y el mayor valor obtenido en la tabla es 0,05.

Entonces, dado que  $D(2; 0,05) > D_{n,máx}$ , se acepta la hipótesis y, por ende, el modelo con los parámetros descritos anteriormente. Por otro lado, se muestra que el modelo de Weibull representa el comportamiento del Piñón.

### Curva de Confiabilidad.

Para obtener la curva de confiabilidad se deben graficar los datos mostrados en la Tabla 23:

$i$	Tiempo entre Fallas (hr)	$R(t)$
0	0	1
1	8640	0,71
2	18990	0,29

Tabla 23: Datos para Curva de Confiabilidad Modo Correctivo  
Cambio Piñón – Fuente: Propia.

A continuación, en la Figura 43, se muestra el diagrama de confiabilidad para el Modo Correctivo

Cambio Piñón:

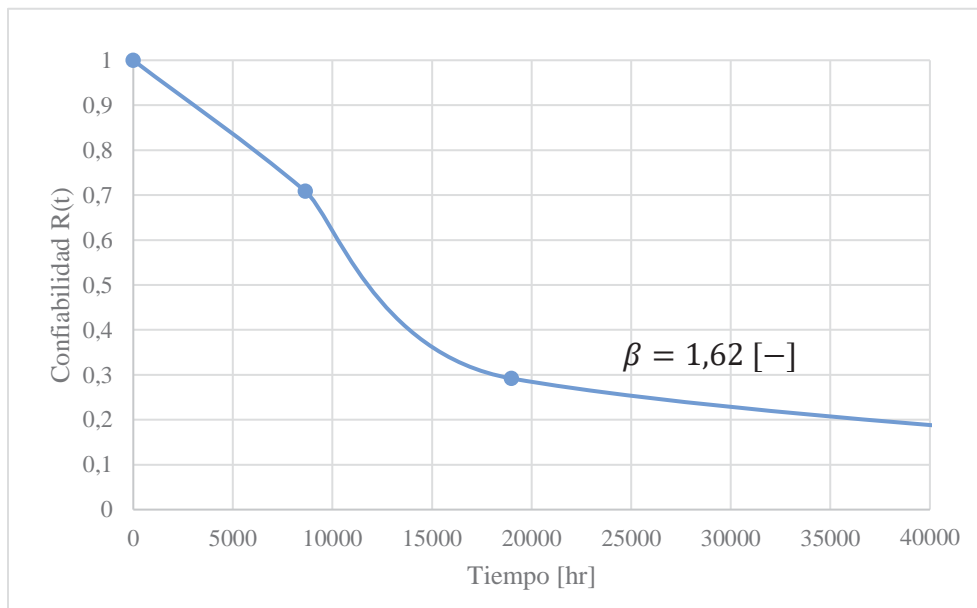


Figura 43: Confiabilidad de Modo Correctivo Cambio Piñón – Fuente: Propia.

Del diagrama, podemos ver que a las 8640 [hr]  $\cong$  360 días de operación, el componente presenta un 70% de confiabilidad y a las 18990 [hr]  $\cong$  791 días de operación el componente presenta un 30% de confiabilidad, lo cual resulta ser muy bajo; considerando costos de adquisición, de reparación, etc.

***Tiempo Medio Entre Fallas.***

Está definido por la siguiente ecuación:

$$MTBF = \gamma + \eta \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

Entonces, utilizando los parámetros de Weibull calculados anteriormente, el tiempo medio entre fallas sería  $MTBF = 14955$  [hr], es decir, cerca de 1 año y 8 meses.

***Tasa de Fallas.***

Está definida por la siguiente ecuación:

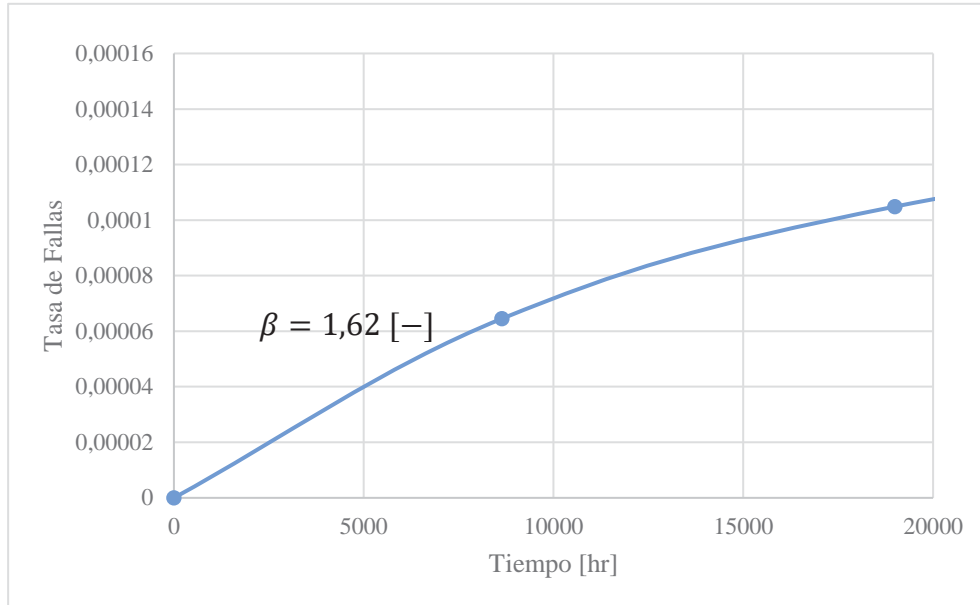
$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

En la Tabla 24, se muestran los datos de la tasa de fallas perteneciente al modo correctivo:

<i>i</i>	Tiempo entre Fallas [hr]	Tasa de Fallas $\lambda$
0	0	0
1	8640	6,5E-05
2	18990	1,0E-04

**Tabla 24: Tasa de Fallas del Modo Correctivo  
Cambio Piñón – Fuente: Propia.**

Graficando los datos de la tasa de fallas, se obtiene la curva mostrada en la Figura 44:



**Figura 44: Tasa de Fallas del Modo Correctivo Cambio Piñón – Fuente: Propia.**

### ***Análisis de Resultados.***

Según el modelo de Weibull aplicado al Piñón, se concluye lo siguiente:

- El parámetro de forma correspondiente a  $\beta = 1,62 [-]$  indica que el componente presenta deterioro prematuro o desgaste, en otras palabras, comienza a sufrir fallas antes de cumplir el ciclo de vida; ya sea por corrosión, erosión, mala utilización del componente, entre otros.
- La curva de confiabilidad se comporta de forma correcta según el parámetro de forma obtenido. Ahora, si analizamos el  $MTBF = 14955 [hr]$ , podemos ver que a esa altura el componente tiene un 45% de confiabilidad; valor que podría tomarse como referencia para un reemplazo preventivo a fin de evitar la falla de éste mientras se encuentre operando y de esta manera evitar la falla de la Corona, componente que toma un alto tiempo y costo de fabricación comparado al Piñón.

- La tasa de fallas se comporta correctamente según el parámetro de forma obtenido. Por otra parte, el aumento de las fallas se puede explicar debido a dos razones:
  - La mala utilización del componente: por desalineamiento y mal montaje.
  - Fallas de los sistemas aledaños: la bomba hidráulica no suministra grasa (bomba extremadamente desgastada, tuberías de entrada se encuentran tapadas, pérdidas de aire en la tubería), presión del sistema hidráulico es variable (falla en la bomba hidráulica, falla en válvulas de sobre flujo, falla en los medidores de presión), los inyectores de grasa se encuentran tapados, contaminación de la grasa lubricante, baja viscosidad del lubricante, entre otros.
  - Fallas por desgaste: piñón con bajos ciclos de fatiga, deterioro mecánico, bajo nivel de mantenimiento.

#### 4.8.2.2. Cambio de Descansos Molino Alimentación-Descarga:

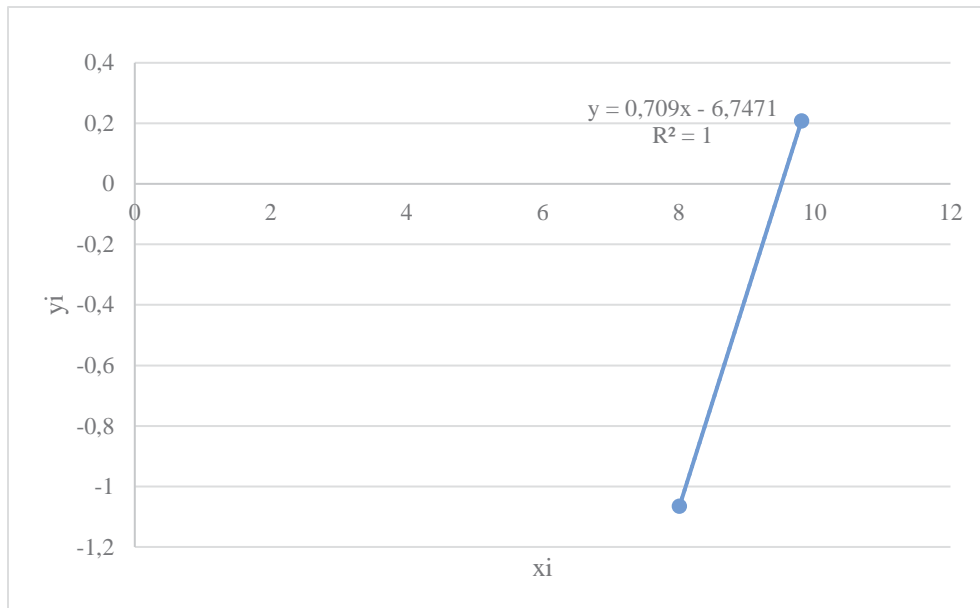
En la Tabla 25 se muestra el cálculo de rangos medianos  $F(i)$ , los valores del eje X ( $x_i$ ) y el eje Y ( $y_i$ ) según el método de los mínimos cuadrados; que nos servirán para graficar y obtener una regresión lineal. La pendiente de esta regresión representa al parámetro de forma  $\beta$ , el cuál será analizado posteriormente.

Nº Falla $i$	Tiempo de Falla [hr] $t_i$	Rangos Medianos $F(i)$	$\ln(t_i)$ $x_i$	$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(i)}\right)\right)$ $y_i$
1	3024	0,29	8,01	-1,06
2	18221	0,71	9,81	0,21

**Tabla 25: Datos para la Regresión Lineal Modo Correctivo Cambio Descansos Molino – Fuente: Propia.**

Como se mencionaba antes, la cantidad de datos es muy poca y puede que no sean representativos a la hora de modelar el comportamiento del componente. Por esta misma razón, para minimizar el error en el modelamiento, se estimó la función de distribución con el método de los rangos medianos, que se utiliza cuando la población de datos es pequeña.

A continuación, en la Figura 45, se muestra la regresión lineal del modo correctivo.



**Figura 45: Regresión Lineal Modo Correctivo Cambio Descansos Molino – Fuente: Propia.**

Entonces, según el diagrama de la Figura 45, no es necesario minimizar el error cuadrático debido a que la recta representa completamente el comportamiento de este modo. Así pues, según la recta, tenemos los siguientes parámetros de Weibull:

$$\beta = 0,71 [-]$$

$$\eta = 13580 [hr]$$

$$\gamma = 0 [hr]$$

**Validación del Modelo a través del Test de Kolmogorov-Smirnov.**

Para la realización del test, se asume que la población sigue una distribución Gaussiana con una media de 10622 y una desviación standard de 10745. Para encontrar  $F(t)$ , en Excel se utiliza la función distribución normalizada. Los resultados se muestran en la Tabla 26:

$i$	Duración (hr)	$F(i)$	$F(t)$	$D_{ni}$
1	3024	0,29	0,24	0,05
2	18221	0,71	0,76	0,05

**Tabla 26: Datos para el Test de K-S Modo Correctivo  
Cambio Descansos Molino – Fuente: Propia.**

Para 2 datos y un 95% de confiabilidad, de la tabla de Kolmogorov-Smirnov se tiene que  $D(2; 0,05) = 0,84189$ . Y el mayor valor obtenido en la tabla es 0,05.

Entonces, dado que  $D(2; 0,05) > D_{n,máx}$ , se acepta la hipótesis y, por ende, el modelo con los parámetros descritos anteriormente. Por otro lado, se muestra que el modelo de Weibull representa el comportamiento de los Descansos.



### Curva de Confiabilidad.

Para obtener la curva de confiabilidad se deben graficar los datos mostrados en la Tabla 27:

i	Tiempo entre Fallas (hr)	R(t)
0	0	1
1	3024	0,71
2	18221	0,29

Tabla 27: Datos para Curva de Confiabilidad Modo Correctivo Cambio Descansos Molino – Fuente: Propia.

Ahora, en la Figura 46, se muestra el diagrama de confiabilidad para el Modo Correctivo Cambio Descansos Molino Alimentación - Descarga:

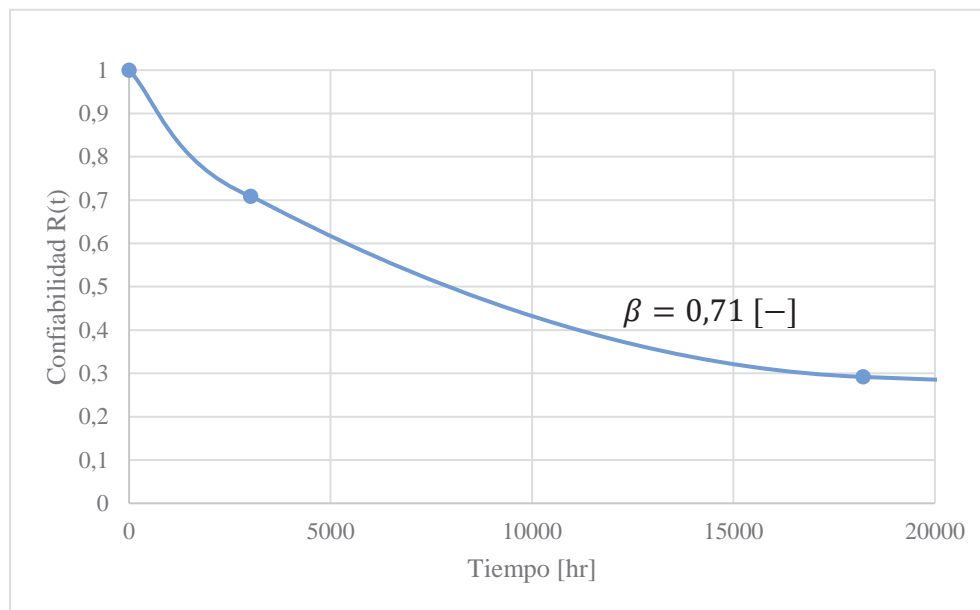


Figura 46: Confiabilidad del Modo Correctivo Cambio Descansos Molino – Fuente: Propia.

Del diagrama, podemos ver que a las 3024 [hr]  $\cong$  126 días de operación el componente presenta un 70% de confiabilidad y a las 18221 [hr]  $\cong$  760 días de operación el componente presenta un 30% de confiabilidad, lo cual resulta ser muy bajo, considerando costos de adquisición, de reparación, etc.

***Tiempo Medio Entre Fallas.***

Está definido por la siguiente ecuación:

$$MTBF = \gamma + \eta \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

Entonces, utilizando los parámetros de Weibull calculados anteriormente el tiempo medio entre fallas sería  $MTBF = 16985$  [hr], es decir, cerca de 1 año y 11 meses.

***Tasa de Fallas.***

Está definida por la siguiente ecuación:

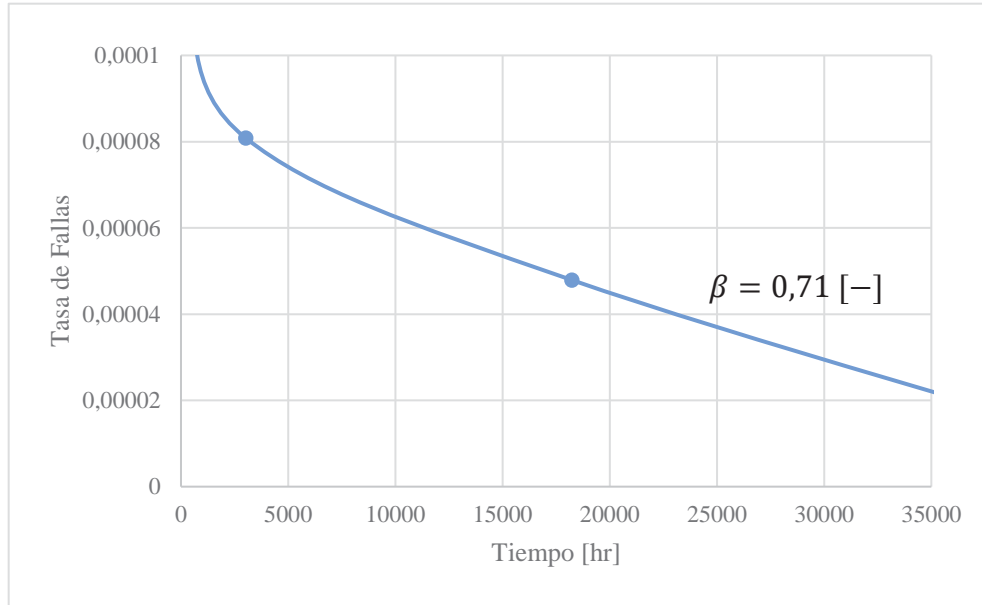
$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta - 1}$$

En la Tabla 28, se muestran los datos de la tasa de fallas del modo correctivo:

i	Tiempo entre Fallas (hr)	Tasa de Fallas $\lambda$
0	0	-
1	3024	8,1E-05
2	18221	4,8E-05

**Tabla 28: Tasa de Fallas del Modo Correctivo  
Cambio Descansos Molino – Fuente: Propia.**

Graficando los datos de la tasa de fallas, se obtiene la curva mostrada en la Figura 47:



**Figura 47: Tasa de Fallas del Modo Correctivo Cambio Descansos Molino – Fuente: Propia.**

### ***Análisis de Resultados.***

Según el modelo de Weibull aplicado a los Descansos de Alimentación - Descarga, se concluye lo siguiente:

- El parámetro de forma correspondiente a  $\beta = 0,71 [-]$  indica que el componente presenta fallas infantiles o prematuras; las cuales pueden haber sido ocasionadas por problemas de ensamblaje, alineamiento, desconocimiento del equipo y de la forma en que opera, fallas humanas, etc.
- La curva de confiabilidad se comporta de forma correcta según el parámetro de forma obtenido. Ahora, si analizamos el  $MTBF = 16985 [hr]$ , podemos ver que a esa altura la confiabilidad del componente es de un 30%, por lo tanto, si tomamos como referencia el valor del MTBF para un reemplazo preventivo sería demasiado bajo, debido a que estos componentes debiesen durar como mínimo  $80000 [hr]$ . Entonces, tomando en cuenta que es uno de los componentes

más costosos del Molino de Bolas tanto en la adquisición como en la mantención; la confiabilidad del componente no debiese ser tan baja. Puede que los resultados obtenidos se justifiquen debido a la baja población de datos, la cual no resulta tan representativa.

- La tasa de fallas se comporta de acuerdo al parámetro de forma obtenido, el cual puede explicarse de la siguiente manera:
  - Desconocimiento de la operación del equipo: aumento de carga dentro del molino, mayor número de bolas, mala lubricación de los descansos.
  - Desconocimiento de la instalación: mal montaje de los descansos, mala alineación, mala fabricación de la loza.
  - Errores humanos: no hay inspección y verificación de equipo como corresponde, etc.

Posteriormente, la disminución de la tasa de falla y su tendencia a un valor constante da a entender que los operadores y mantenedores normalizaron el proceso, entendieron mejor el sistema y su operación.

### 4.8.2.3. Cambio Bomba de Lubricación:

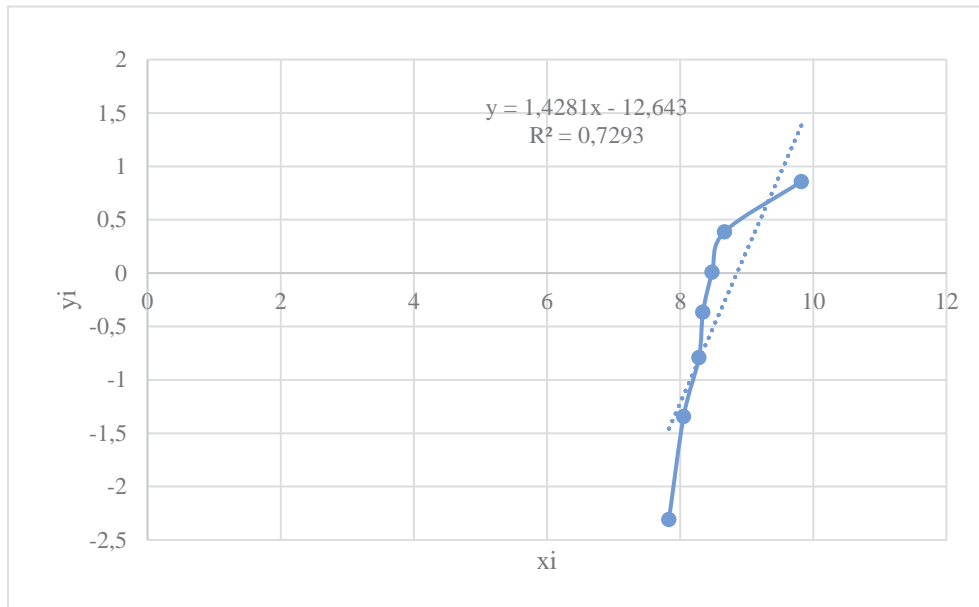
En la Tabla 29 se muestra el cálculo de rangos medianos  $F(i)$ , los valores del eje X ( $x_i$ ) y el eje Y ( $y_i$ ) según el método de los mínimos cuadrados, que nos servirán para graficar y obtener una regresión lineal. La pendiente de esta regresión representa al parámetro de forma  $\beta$ , el cuál será analizado posteriormente.

N° Falla $i$	Tiempo de Falla [hr] $t_i$	Rangos Medianos $F(i)$	$\ln(t_i)$ $x_i$	$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(i)}\right)\right)$ $y_i$
1	2520	0,09	7,83	-2,31
2	3143	0,23	8,05	-1,34
3	3959	0,36	8,28	-0,79
4	4200	0,50	8,34	-0,37
5	4825	0,64	8,48	0,01
6	5807	0,77	8,67	0,39
7	18432	0,91	9,82	0,86

**Tabla 29: Datos para Regresión Lineal Modo Correctivo  
Cambio Bomba Lubricación – Fuente: Propia.**

Como se mencionaba antes, la cantidad de datos es muy poca y puede que no sean representativos a la hora de modelar el comportamiento del componente. Por esta misma razón, para minimizar el error en el modelamiento, se estimó la función de distribución con el método de los rangos medianos, que se utiliza cuando la población de datos es pequeña.

A continuación, en la Figura 48, se muestra la regresión lineal del modo correctivo.



**Figura 48: Regresión Lineal Modo Correctivo  
Cambio Bomba Lubricación – Fuente: Propia.**

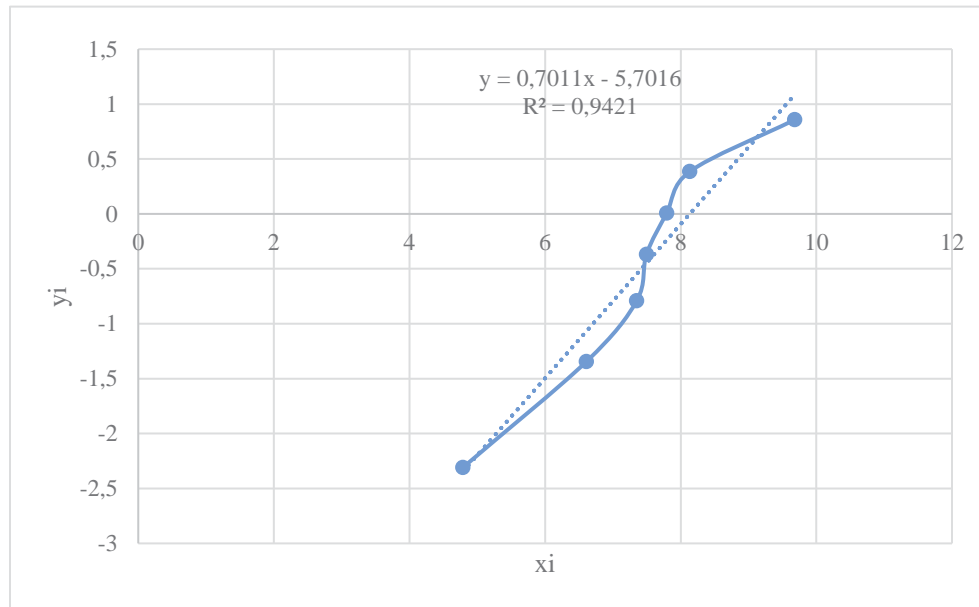
La forma de la curva nos indica que  $\gamma > 0$  (Meruane, 2011). Según esto, de forma iterativa se realizaron ajustes a la curva modificando el parámetro de localización para poder obtener el menor error cuadrático, dando como resultado  $\gamma = 2400$  [hr].

Como resultado tenemos la Tabla 30:

N° Falla <i>i</i>	Tiempo de Falla <i>t<sub>i</sub></i>	Rangos Medianos <i>F(i)</i>	$\ln(t_i)$ <i>x<sub>i</sub></i>	$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(i)}\right)\right)$ <i>y<sub>i</sub></i>
1	120	0,09	4,79	-2,31
2	743	0,23	6,61	-1,34
3	1559	0,36	7,35	-0,79
4	1800	0,50	7,50	-0,37
5	2425	0,64	7,79	0,01
6	3407	0,77	8,13	0,39
7	16032	0,91	9,68	0,86

**Tabla 30: Datos Modificados para la Obtención de Parámetros de Weibull para  
Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación – Fuente: Propia.**

A continuación, en la Figura 49, se muestra la curva de regresión modificada:



**Figura 49: Regresión Lineal Modificada Modo Correctivo  
Cambio Bomba Lubricación – Fuente: Propia.**

Por lo tanto, según el nuevo diagrama tenemos los siguientes parámetros de Weibull:

$$\beta = 0,7 [-]$$

$$\eta = 3403 [hr]$$

$$\gamma = 2400 [hr]$$

**Validación del Modelo a través del Test de Kolmogorov-Smirnov.**

Para la realización del test, se asume que la población sigue una distribución Gaussiana con una media de 6127 y una desviación standard de 5531. Para encontrar  $F(t)$ , en Excel se utiliza la función distribución normalizada. Los resultados se muestran en la Tabla 31:

$i$	Duración (hr)	$F(i)$	$F(t)$	$D_{ni}$
1	120	0,09	0,26	0,16
2	743	0,23	0,29	0,07
3	1559	0,36	0,35	0,02
4	1800	0,50	0,36	0,14
5	2425	0,64	0,41	0,23
6	3407	0,77	0,48	0,29
7	16032	0,91	0,99	0,08

**Tabla 31: Datos para el Test de K-S Modo Correctivo  
Cambio Bomba Lubricación – Fuente: Propia.**

Para 7 datos y un 95% de confiabilidad, de la tabla de Kolmogorov-Smirnov se tiene que  $D(7; 0,05) = 0,48342$ . Y el mayor valor obtenido en la tabla es 0,29.

Entonces, dado que  $D(7; 0,05) > D_{n,máx}$ , se acepta la hipótesis y, por ende, el modelo con los parámetros descritos anteriormente. Por otro lado, se muestra que el modelo de Weibull representa el comportamiento de la Bomba de Lubricación.



### Curva de Confiabilidad.

Para obtener la curva de confiabilidad se deben graficar los datos mostrados en la Tabla 32:

$i$	Tiempo entre Fallas (hr)	$R(t)$
0	0	1
1	120	1
2	743	1
3	1559	1
4	1800	1
5	2425	0,99
6	3407	0,74
7	16032	0,02

Tabla 32: Datos para la Curva de Confiabilidad Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación – Fuente: Propia.

Ahora, en la Figura 50, se muestra el diagrama de confiabilidad para el Modo Correctivo Cambio Bomba de Lubricación:

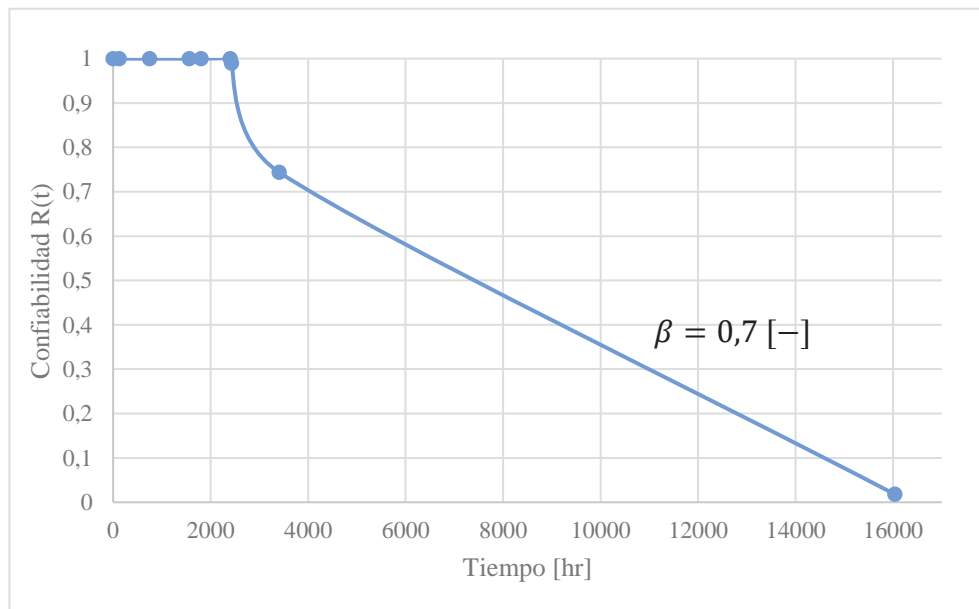


Figura 50: Confiabilidad del Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación – Fuente: Propia.

Del diagrama, podemos ver que la confiabilidad se mantuvo en un 100% hasta las 2400 [hr], pues teóricamente, no pueden ocurrir fallas ni deterioro del componente antes del parámetro de localización utilizado. Por otro lado, a las 2425 [hr]  $\cong$  101 días de operación el componente presentaba un 99% de confiabilidad, a las 3407 [hr]  $\cong$  142 días presentaba un 74% y a las 16032 [hr]  $\cong$  668 días un 1,82% de confiabilidad.

***Tiempo Medio Entre Fallas.***

Está definido por la siguiente ecuación:

$$MTBF = \gamma + \eta \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

Entonces, utilizando los parámetros de Weibull calculados anteriormente el tiempo medio entre fallas sería  $MTBF = 6700$  [hr], es decir, cerca de 9 meses.

***Tasa de Fallas.***

Está definida por la siguiente ecuación:

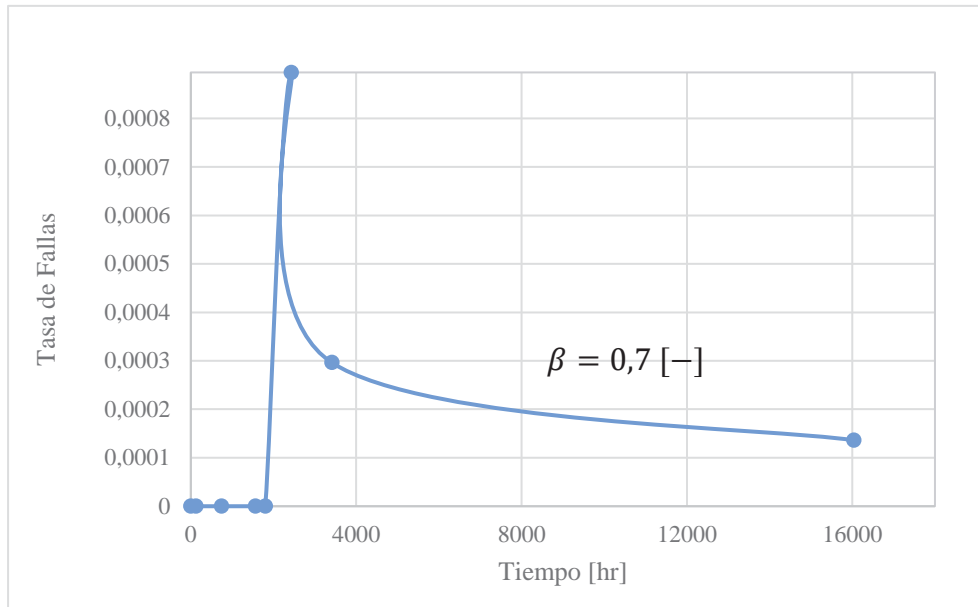
$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta - 1}$$

En la Tabla 33, se muestran los datos de la tasa de fallas del modo correctivo:

<i>i</i>	Tiempo entre Fallas [hr]	Tasa de Fallas
0	0	0
1	120	0
2	743	0
3	1559	0
4	1800	0
5	2425	0,0009
6	3407	0,0003
7	16032	0,0001

**Tabla 33: Tasa de Fallas del Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación – Fuente: Propia.**

Graficando los datos de la tasa de fallas, se obtiene la curva mostrada en la Figura 51:



**Figura 51: Tasa de Fallas del Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación – Fuente: Propia.**

Al igual que en el caso de la confiabilidad, podemos ver que la tasa de falla comienza después del parámetro de localización utilizado. Esto ocurre debido a que, teóricamente, no pueden haber fallas ni deterioro de los componentes antes del  $\gamma$ .

### **Análisis de Resultados.**

Según el modelo de Weibull aplicado a la Bomba de Lubricación, se concluye lo siguiente:

- El parámetro de forma correspondiente a  $\beta = 0,7 [-]$  indica que el componente presenta fallas infantiles o prematuras, las cuales pueden haber sido ocasionadas por problemas de ensamblaje, alineamiento, desconocimiento del equipo y de la forma en que opera, fallas humanas, etc.
- La curva de confiabilidad se comporta de forma correcta según el parámetro de forma obtenido. Ahora, analizando el  $MTBF = 6700[hr]$ , podemos ver que a esa altura la confiabilidad del

equipo es de un 55%, por lo tanto, si tomamos el valor de MTBF como referencia para un reemplazo preventivo sería bajo, debido a que estos componentes debiesen durar como mínimo 1 año operando.

- El comportamiento inicial de la tasa de fallas, como se mencionaba anteriormente, se debe a las modificaciones hechas al parámetro de localización, por otro lado, también se comporta de acuerdo al parámetro de forma obtenido. Las fallas pueden haber ocurrido por las siguientes razones:

- Desconocimiento de la operación del equipo y sistema: dirección de giro de la bomba incorrecto, bajo nivel de aceite en los estanques.
- Desconocimiento de la instalación: mal montaje de la bomba, mala alineación.
- Errores humanos: contaminación del aceite de lubricación, no hay inspección y verificación de equipo como corresponde, etc.

Posteriormente, la disminución de la tasa de falla y su tendencia a un valor constante da a entender que los operadores y mantenedores normalizaron el proceso, entendieron mejor el sistema de lubricación y su operación.

#### 4.8.2.4. Cambio Bomba de Levante:

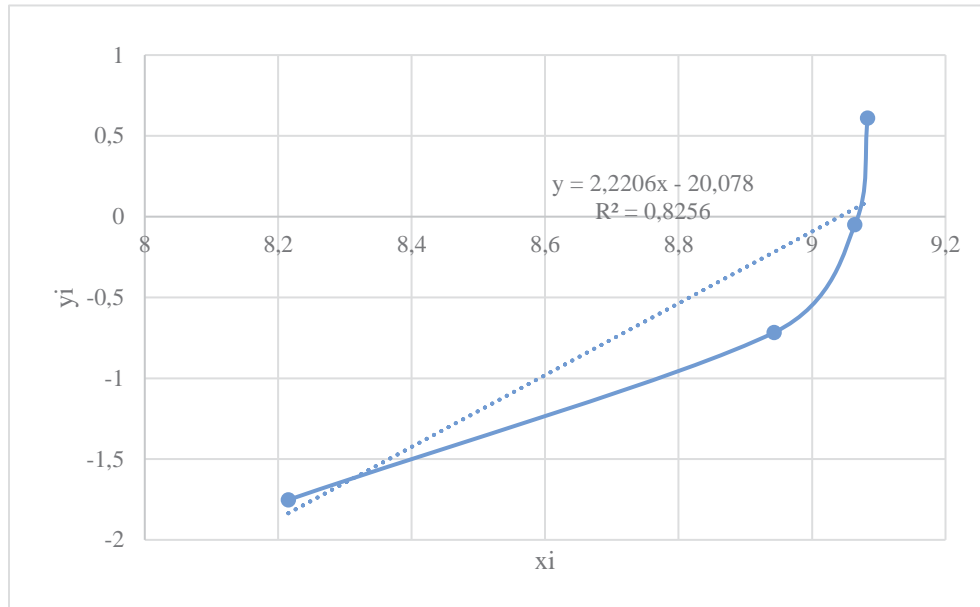
En la Tabla 34 se muestra el cálculo de rangos medianos  $F(i)$ , los valores del eje X ( $x_i$ ) y el eje Y ( $y_i$ ) según el método de los mínimos cuadrados, que nos servirán para graficar y obtener una regresión lineal. La pendiente de esta regresión representa al parámetro de forma  $\beta$ , el cuál será analizado posteriormente.

N° Falla $i$	Tiempo de Falla [hr] $t_i$	Rangos Medianos $F(i)$	$\ln(t_i)$ $x_i$	$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(i)}\right)\right)$ $y_i$
1	3696	0,16	8,22	-1,75
2	7656	0,39	8,94	-0,72
3	8640	0,61	9,06	-0,05
4	8808	0,84	9,08	0,61

**Tabla 34: Datos para la Regresión Lineal Modo Correctivo  
Cambio Bomba Levante – Fuente: Propia.**

Como se mencionaba antes, la cantidad de datos es poca y puede que no sean representativos a la hora de modelar el comportamiento del componente. Por esta misma razón, para minimizar el error en el modelamiento, se estimó la función de distribución con el método de los rangos medianos, que se utiliza cuando la población de datos es pequeña.

A continuación, en la Figura 52, se muestra la regresión lineal del modo correctivo.



**Figura 52: Regresión Lineal Modo Correctivo  
Cambio Bomba Levante – Fuente: Propia.**

Entonces, la forma de la curva nos indica que  $\gamma \geq 0$  (Meruane, 2011). Según esto, se realizaron ajustes a la curva modificando el parámetro de localización  $\gamma$ , sin embargo, el error cuadrático aumentaba para cualquier valor de gamma mayor a cero, Por lo tanto, se toman los parámetros de Weibull sin modificar la curva:

$$\beta = 2,22 [-]$$

$$\eta = 8448 [hr]$$

$$\gamma = 0 [hr]$$

**Validación del Modelo a través del Test de Kolmogorov-Smirnov.**

Para la realización del test, se asume que la población sigue una distribución Gaussiana con una media de 11256 y una desviación standard de 6323. Para encontrar  $F(t)$ , en Excel se utiliza la función distribución normalizada. Los resultados se muestran en la Tabla 35:

$i$	Duración (hr)	$F(i)$	$F(t)$	$D_{ni}$
1	3696	0,16	0,07	0,09
2	7656	0,39	0,58	0,19
3	8640	0,61	0,73	0,11
4	8808	0,84	0,75	0,09

**Tabla 35: Datos para el Test de K-S Modo Correctivo  
Cambio Bomba Levante – Fuente: Propia.**

Para 4 datos y un 95% de confiabilidad, de la tabla de Kolmogorov-Smirnov se tiene que  $D(4; 0,05) = 0,6239$ . Y el mayor valor obtenido en la tabla es 0,19.

Entonces, dado que  $D(4; 0,05) > D_{n,máx}$ , se acepta la hipótesis y, por ende, el modelo con los parámetros descritos anteriormente. Por otro lado, se muestra que el modelo de Weibull representa el comportamiento de la Bomba de Levante.

### Curva de Confiabilidad.

Para obtener la curva de confiabilidad se deben graficar los datos mostrados en la Tabla 36:

$i$	Tiempo entre Fallas (hr)	$R(t)$
0	0	1
1	3696	0,85
2	7656	0,45
3	8640	0,35
4	8808	0,33

Tabla 36: Datos para Curva de Confiabilidad Modo Correctivo Cambio Bomba Levante – Fuente: Propia.

Ahora, en la Figura 53, se muestra el diagrama de confiabilidad para el Modo Correctivo Cambio Bomba de Levante:

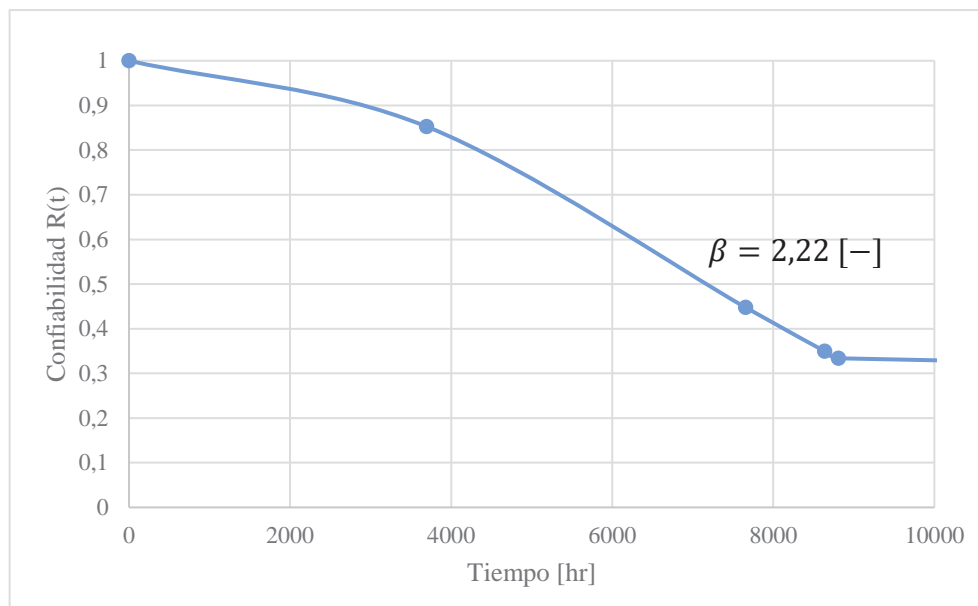


Figura 53: Confiabilidad del Modo Correctivo Cambio Bomba Levante – Fuente: Propia.



Del diagrama, podemos ver que a las 3696 [hr]  $\cong$  154 días de operación el componente presentaba un 85% de confiabilidad, a las 7656 [hr]  $\cong$  319 días de operación presentaba un 45% y a las 8808 [hr]  $\cong$  367 días un 33%.

### ***Tiempo Medio Entre Fallas.***

Está definido por la siguiente ecuación:

$$MTBF = \gamma + \eta \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

Entonces, utilizando los parámetros de Weibull calculados anteriormente el tiempo medio entre fallas sería  $MTBF = 7482$  [hr], es decir, cerca de 10 meses.

### ***Tasa de Fallas.***

Está definida por la siguiente ecuación:

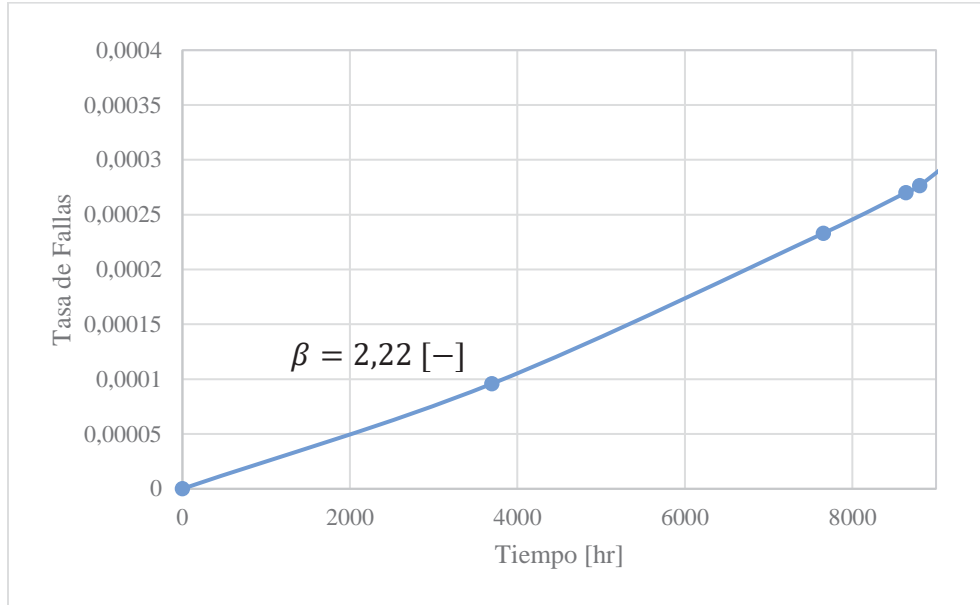
$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

En la Tabla 37, se muestran los datos de la tasa de fallas:

i	Tiempo entre Fallas [hr]	Tasa de Fallas $\lambda$
0	0	0
1	3696	9,6E-05
2	7656	2,3E-04
3	8640	2,7E-04
4	8808	2,8E-04

**Tabla 37: Tasa de Fallas del Modo Correctivo  
Cambio Bomba Levante – Fuente: Propia.**

Graficando los datos de la tasa de fallas, se obtiene la curva mostrada en la Figura 54:



**Figura 54: Tasa de Fallas del Modo Correctivo Cambio Bomba Levante – Fuente: Propia.**

### ***Análisis de Resultados.***

Según el modelo de Weibull aplicado a la Bomba de Levante, se concluye lo siguiente:

- El parámetro de forma correspondiente a  $\beta = 2,22 [-]$  indica que el componente presenta fallas por deterioro prematuro, en otras palabras, el equipo comienza a fallar antes de cumplir su ciclo de vida; puede ocurrir producto de una mala utilización del componente, corrosión, erosión, bajos ciclos de fatiga, entre otros.
- La curva de confiabilidad se comporta de forma correcta según el parámetro de forma obtenido. Ahora, analizando el  $MTBF = 7482[hr]$ , podemos ver que a esa altura la confiabilidad del equipo es de un 45%, por lo tanto, se podría tomar el valor de MTBF como referencia para un reemplazo, sin embargo, hay que tener en cuenta que estos componentes debiesen durar como mínimo 1 año operando.

- La tasa de falla se comporta de acuerdo al parámetro de forma obtenido. Por otra parte, el aumento de las fallas se puede explicar debido a las siguientes razones:
  - La mala utilización del componente: por desalineamiento, mal montaje e instalación.
  - Fallas de los sistemas o componentes aledaños: contaminación del aceite producto de fugas a nivel superior (sistema alimentación, sistema descarga), motor no funciona correctamente.
  - Fallas por desgaste: bomba con bajos ciclos de fatiga, deterioro mecánico, bajo nivel de mantenimiento.

#### 4.8.2.5. Cambio Parrillas de Descarga:

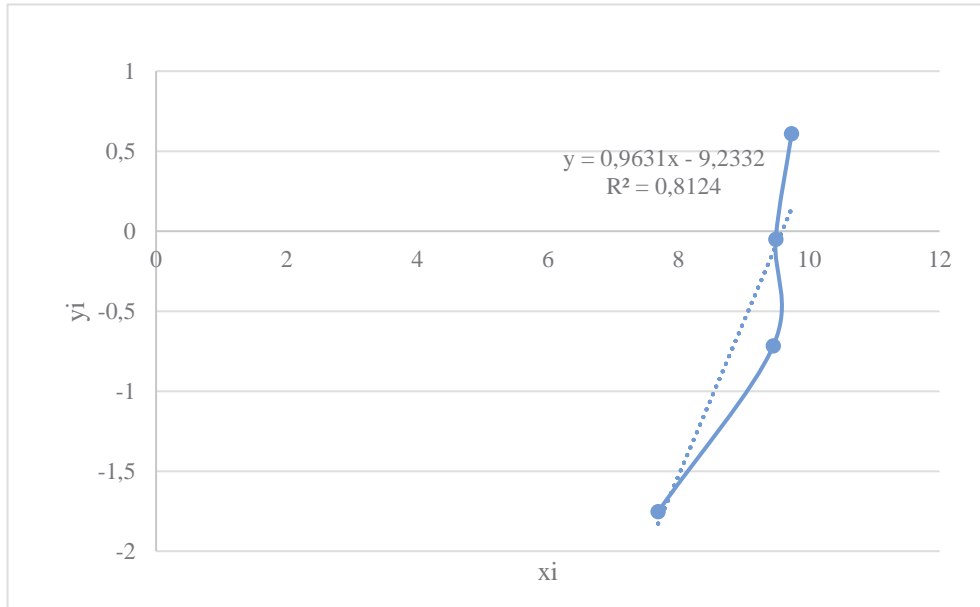
En la Tabla 38 se muestra el cálculo de rangos medianos  $F(i)$ , los valores del eje X ( $x_i$ ) y el eje Y ( $y_i$ ) según el método de los mínimos cuadrados, que nos servirán para graficar y obtener una regresión lineal. La pendiente de esta regresión representa al parámetro de forma  $\beta$ , el cuál será analizado posteriormente.

N° Falla $i$	Tiempo de Falla [hr] $t_i$	Rangos Medianos $F(i)$	$\ln(t_i)$ $x_i$	$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(i)}\right)\right)$ $y_i$
1	2184	0,16	7,69	-1,75
2	12744	0,39	9,45	-0,72
3	13223	0,61	9,49	-0,05
4	16872	0,84	9,73	0,61

Tabla 38: Datos para la Regresión Lineal Modo Correctivo  
Cambio Parrillas Descarga – Fuente: Propia.

Como se mencionaba antes, se puede ver que la cantidad de datos es poca y puede que no sean representativos a la hora de modelar el comportamiento del componente. Por esta misma razón, para minimizar el error en el modelamiento, se estimó la función de distribución con el método de los rangos medianos, el cual se utiliza cuando la población de datos es pequeña.

A continuación, en la Figura 55, se muestra la regresión lineal del modo correctivo.



**Figura 55: Regresión Lineal Modo Correctivo  
Cambio Parrillas Descarga – Fuente: Propia.**

Entonces, la forma de la curva nos indica que  $\gamma \geq 0$  (Meruane, 2011). Según esto, se realizaron ajustes a la curva modificando el parámetro de localización  $\gamma$ , pero el error cuadrático aumentaba para cualquier valor de gamma mayor a cero, Por lo tanto, se tomaron los parámetros de Weibull sin modificar la curva:

$$\beta = 0,96 [-]$$

$$\eta = 14574 [hr]$$

$$\gamma = 0 [hr]$$

**Validación del Modelo a través del Test de Kolmogorov-Smirnov.**

Para la realización del test, se asume que la población sigue una distribución Gaussiana con una media de 11256 y una desviación standard de 6323. Para encontrar  $F(t)$  en Excel, se utiliza la función distribución normalizada, los resultados se muestran en la Tabla 39:

$i$	Duración (hr)	$F(i)$	$F(t)$	$D_{ni}$
1	2184	0,16	0,08	0,08
2	12744	0,39	0,59	0,21
3	13223	0,61	0,62	0,01
4	16872	0,84	0,81	0,03

**Tabla 39: Datos para el Test de K-S Modo Correctivo  
Cambio Parrillas Descarga – Fuente: Propia.**

Para 4 datos y un 95% de confiabilidad, de la tabla de Kolmogorov-Smirnov se tiene que  $D(4; 0,05) = 0,6239$ . Y el mayor valor obtenido en la tabla es 0,21.

Entonces, dado que  $D(4; 0,05) > D_{n,máx}$ , se acepta la hipótesis y, por ende, el modelo con los parámetros descritos anteriormente. Por otro lado, se muestra que el modelo de Weibull representa el comportamiento de las Parrillas de Descarga.

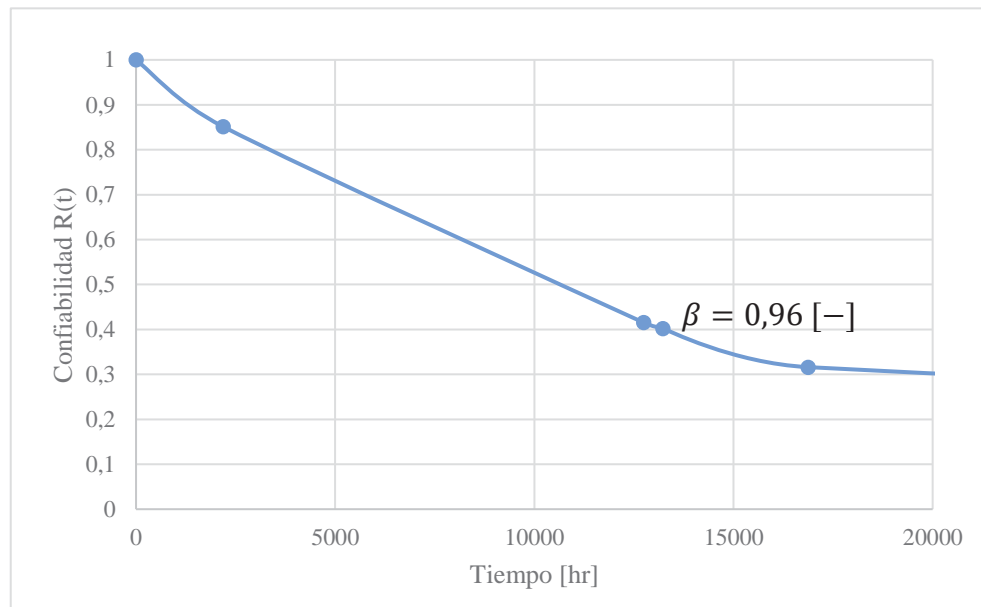
### Curva de Confiabilidad.

Para obtener la curva de confiabilidad se deben graficar los datos mostrados en la Tabla 40:

$i$	Tiempo entre Fallas (hr)	$R(t)$
0	0	1
1	2184	0,85
2	12744	0,42
3	13223	0,40
4	16872	0,32

**Tabla 40: Datos para Curva de Confiabilidad Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga – Fuente: Propia.**

Ahora, en la Figura 56 se muestra el diagrama de confiabilidad para el Modo Correctivo Cambio Parrilla Descarga:



**Figura 56: Confiabilidad del Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga.**

Del diagrama, podemos ver que a los 2184 [hr]  $\cong$  91 días de operación el componente presentaba un 85% de confiabilidad, a las 12744 [hr]  $\cong$  531 días de operación un 41%, a las 13200 [hr]  $\cong$  550 días un 40% y, por último, a las 16872 [hr]  $\cong$  703 días un 31% de confiabilidad.

***Tiempo Medio Entre Fallas.***

Está definido por la siguiente ecuación:

$$MTBF = \gamma + \eta \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

Entonces, utilizando los parámetros de Weibull calculados anteriormente el tiempo medio entre fallas sería  $MTBF = 14818$  [hr], es decir, cerca de 1 año y 8 meses.

***Tasa de Fallas.***

Está definida por la siguiente ecuación:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

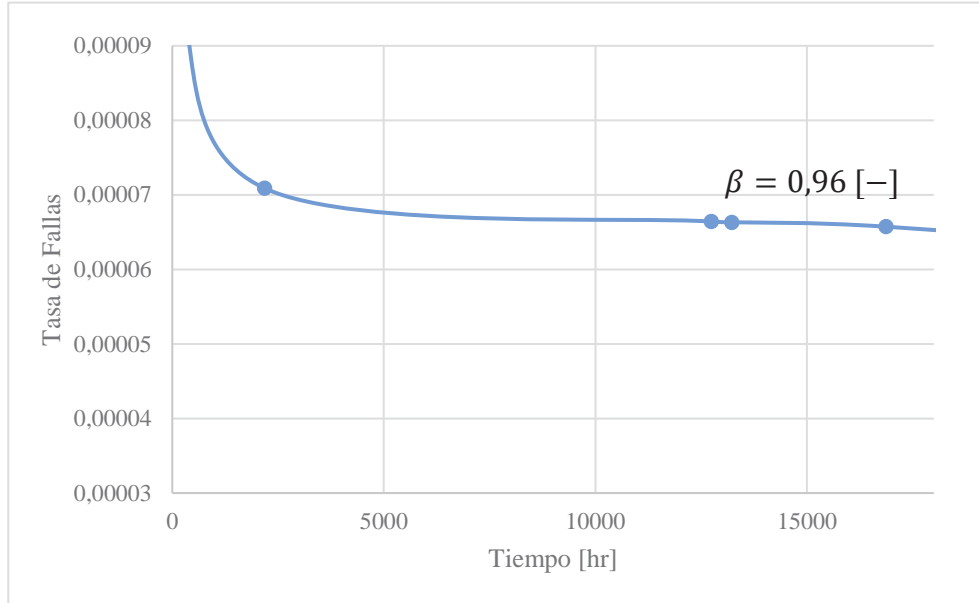
En la Tabla 41, se muestran los datos de la tasa de fallas:

i	Tiempo entre Fallas [hr]	Tasa de Fallas $\lambda$
0	0	-
1	2184	7,09E-05
2	12744	6,64E-05
3	13223	6,63E-05
4	16872	6,57E-05

**Tabla 41: Tasa de Fallas del Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga – Fuente: Propia.**



Graficando los datos de la tasa de fallas, se obtiene la curva mostrada en la Figura 57:



**Figura 57: Tasa de Fallas del Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga – Fuente: Propia.**

### ***Análisis de Resultados.***

Según el modelo de Weibull aplicado a las Parrillas Descarga, se concluye lo siguiente:

- El parámetro de forma correspondiente a  $\beta = 0,96 [-]$  indica que el componente presenta fallas prematuras o infantiles; las cuales pueden ser provocadas por problemas de ensamble, mal alineamiento, desconocimiento del equipo y de la forma en que opera, fallas humanas, entre otros.
- La curva de confiabilidad se comporta de forma correcta según el parámetro de forma obtenido. Ahora, analizando el  $MTBF = 14818 [hr]$ , podemos ver que a esa altura la confiabilidad del equipo es de un 36%, ahora, si tomamos el valor de MTBF como referencia para un reemplazo preventivo estaría por sobre el rango esperado, debido a que estos componentes debiesen durar como máximo 1 año operando; aunque debiese evaluarse la situación caso a caso.

- La tasa de falla se comporta de acuerdo al parámetro de forma obtenido. Las fallas pueden haber ocurrido por las siguientes razones:

- Desconocimiento de la operación del equipo: aumento de carga dentro del molino, carga muy abrasiva, bajo nivel de bolas.
- Desconocimiento de la instalación: mal montaje de las parrillas de descarga.
- Errores humanos: no hay inspección y verificación de equipo como corresponde.

Por otro lado, la disminución de la tasa de falla y su tendencia a un valor constante indica que los operadores y mantenedores normalizaron el proceso, entendieron mejor el componente y la operación.

#### 4.9. Árboles de Falla de los Modos Correctivos Críticos.

En el siguiente apartado se realizarán árboles de falla correspondientes a los modos correctivos críticos; para que al momento en que se presente una falla, los árboles sirvan como herramienta para poder determinar de una forma mucho precisa y rápida el origen de ésta.

La construcción de estos árboles fue realizada gracias al FMECA, consultas a mecánicos, operadores, jefes de área y catálogos de componentes similares.

Es importante mencionar que se realizará una modificación en la simbología de los árboles de falla; por un tema de espacios y ajuste. En la Figura 6, mostrada en el marco teórico, las fallas primarias son representadas por un círculo y, desde ahora, serán representadas por un rectángulo de esquinas redondeadas.

##### 4.9.1. Árbol de Falla Molino de Bolas G.

A continuación, se muestra el árbol de fallas general del molino de bolas G (Figura 58).

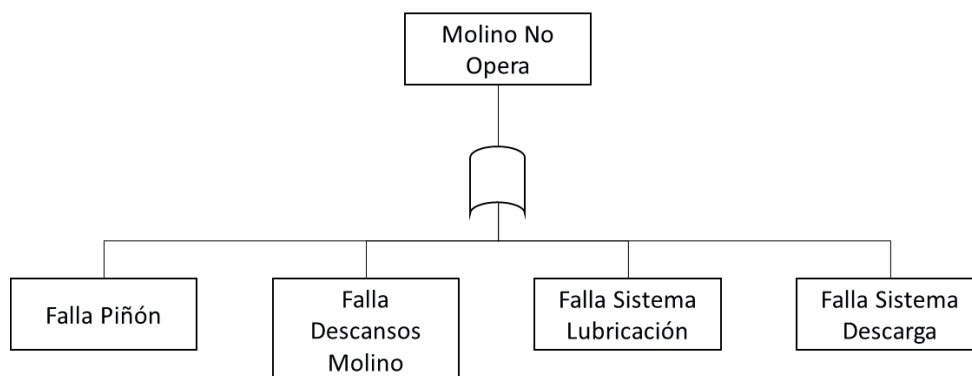


Figura 58: Árbol de Falla Molino de Bolas G – Fuente: Propia.

#### 4.9.2. Árbol de Falla Piñón.

A continuación, se muestra el árbol de fallas del piñón (Figura 59).

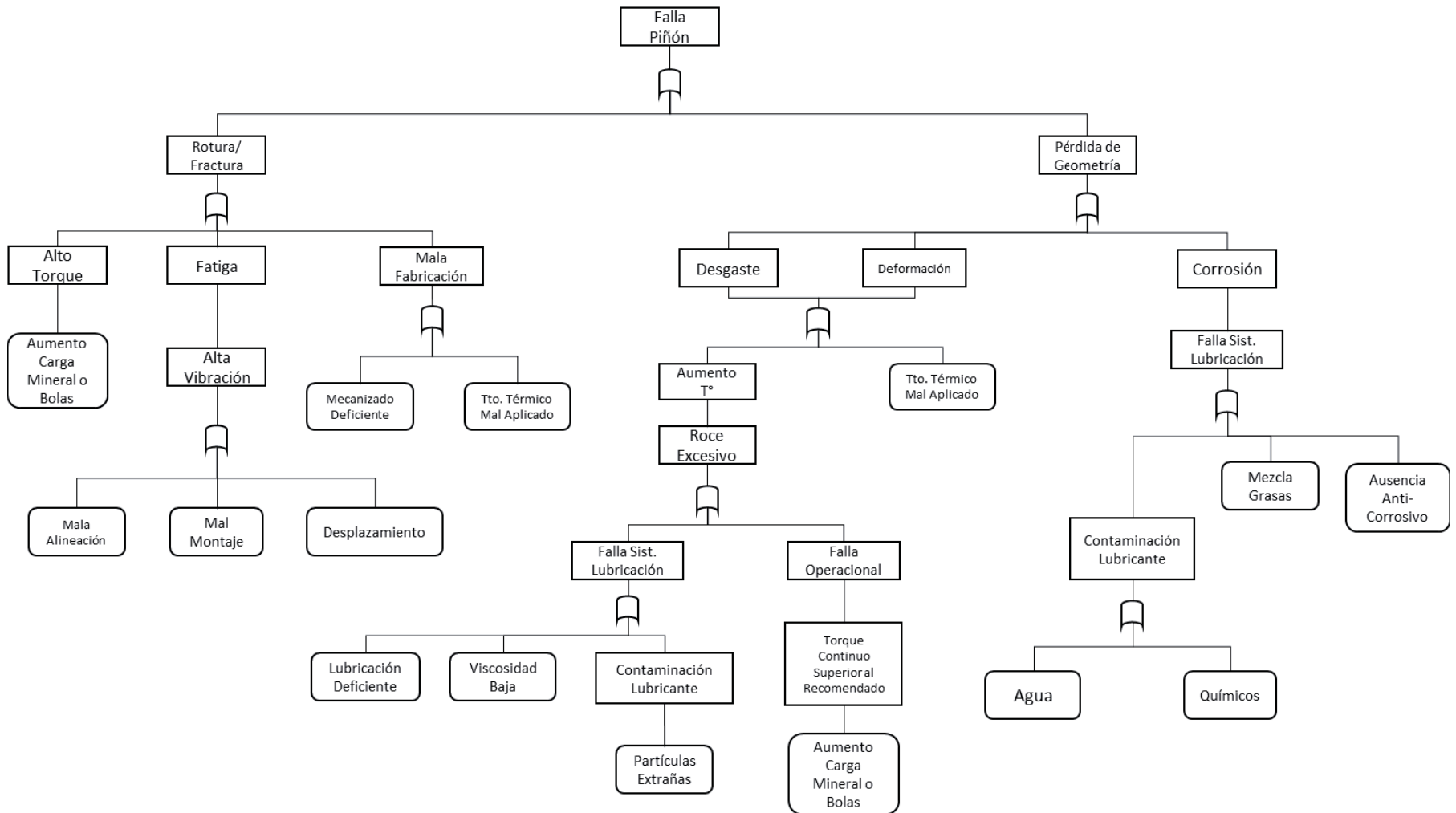


Figura 59: Árbol de Falla Piñón – Fuente: Propia.

### 4.9.3. Árbol de Falla Descansos Molino Alimentación – Descarga.

A continuación, se muestra el árbol de fallas de los descansos del molino (Figura 60).

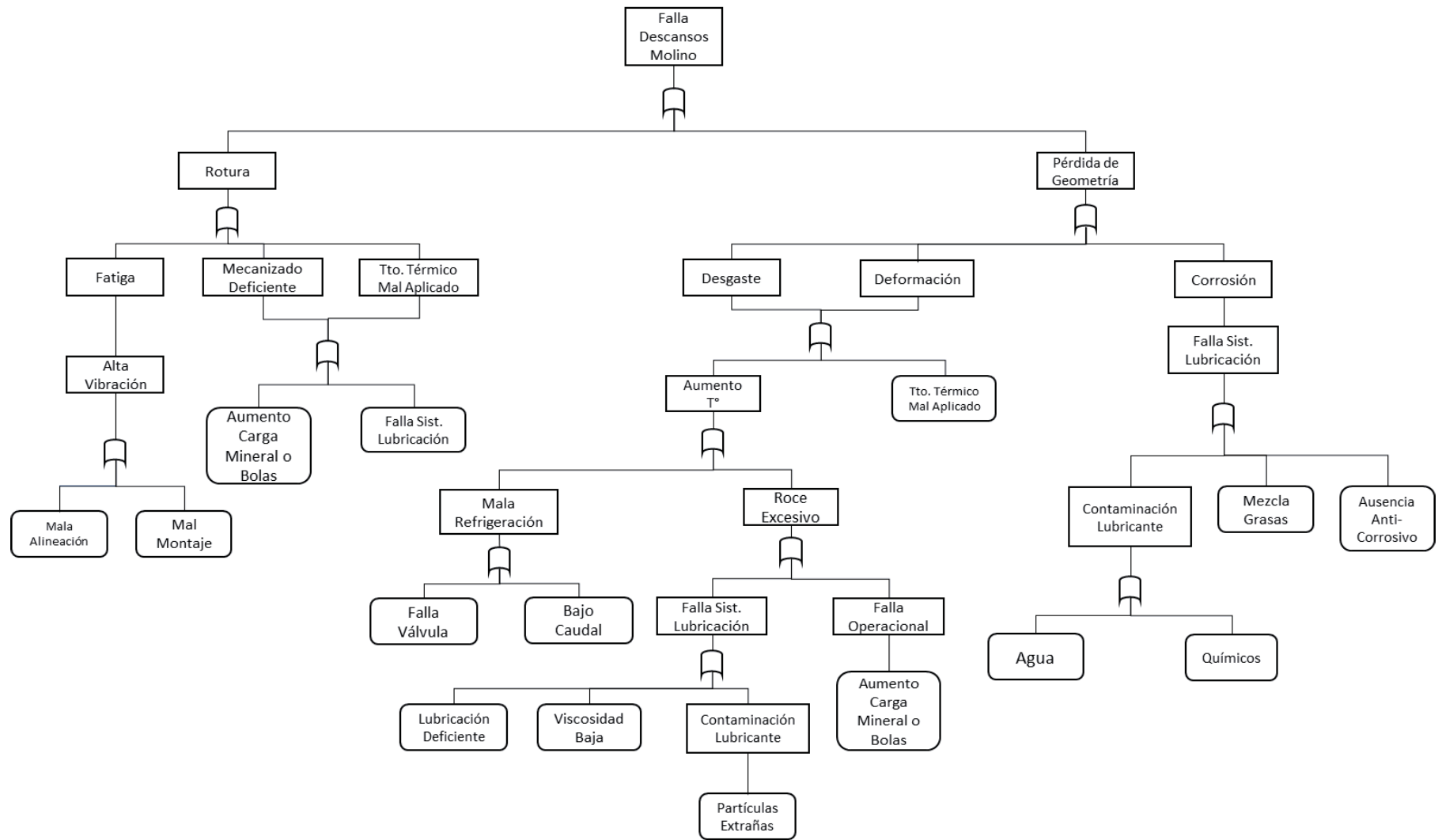


Figura 60: Árbol de Falla Descansos Molino Alimentación-Descarga – Fuente: Propia.

#### 4.9.4. Árbol de Falla Sistema Lubricación.

A continuación, se muestra el árbol de fallas general del sistema de lubricación (Figura 61).

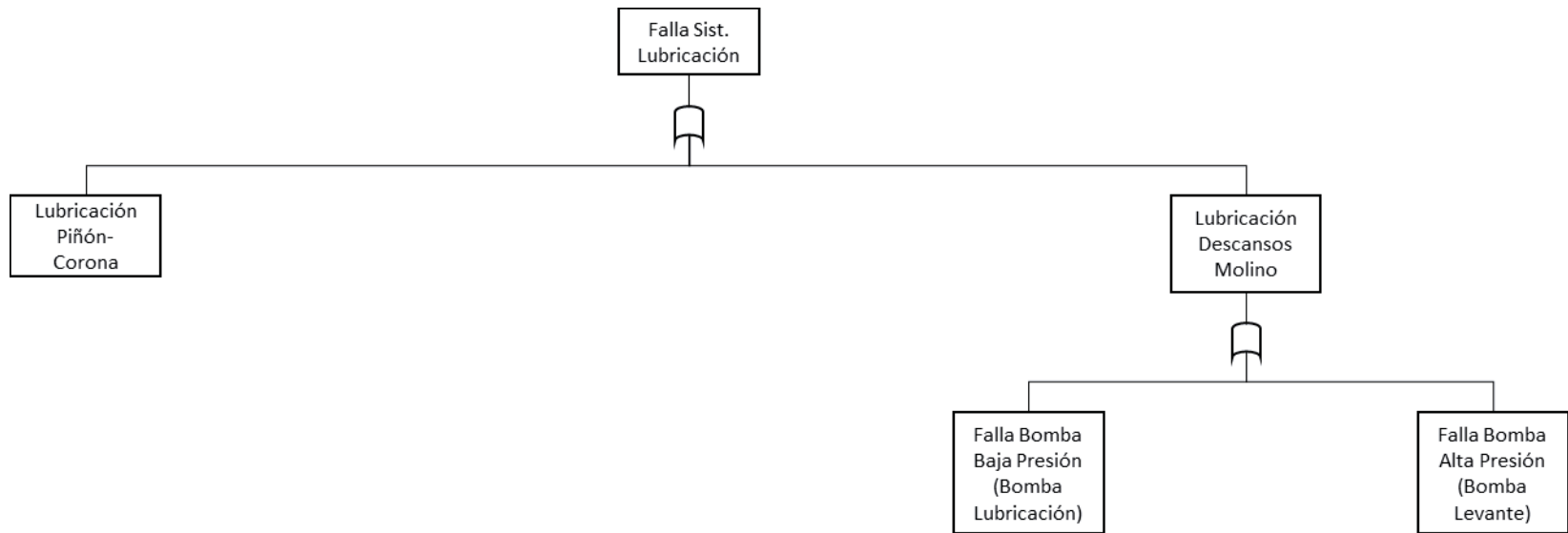


Figura 61: Árbol de Falla Sistema Lubricación – Fuente: Propia.

#### 4.9.4.1. Árbol de Falla Sistema Lubricación Piñón – Corona.

A continuación, se muestra el árbol de fallas del sistema de lubricación del piñón – corona (Figura 62).

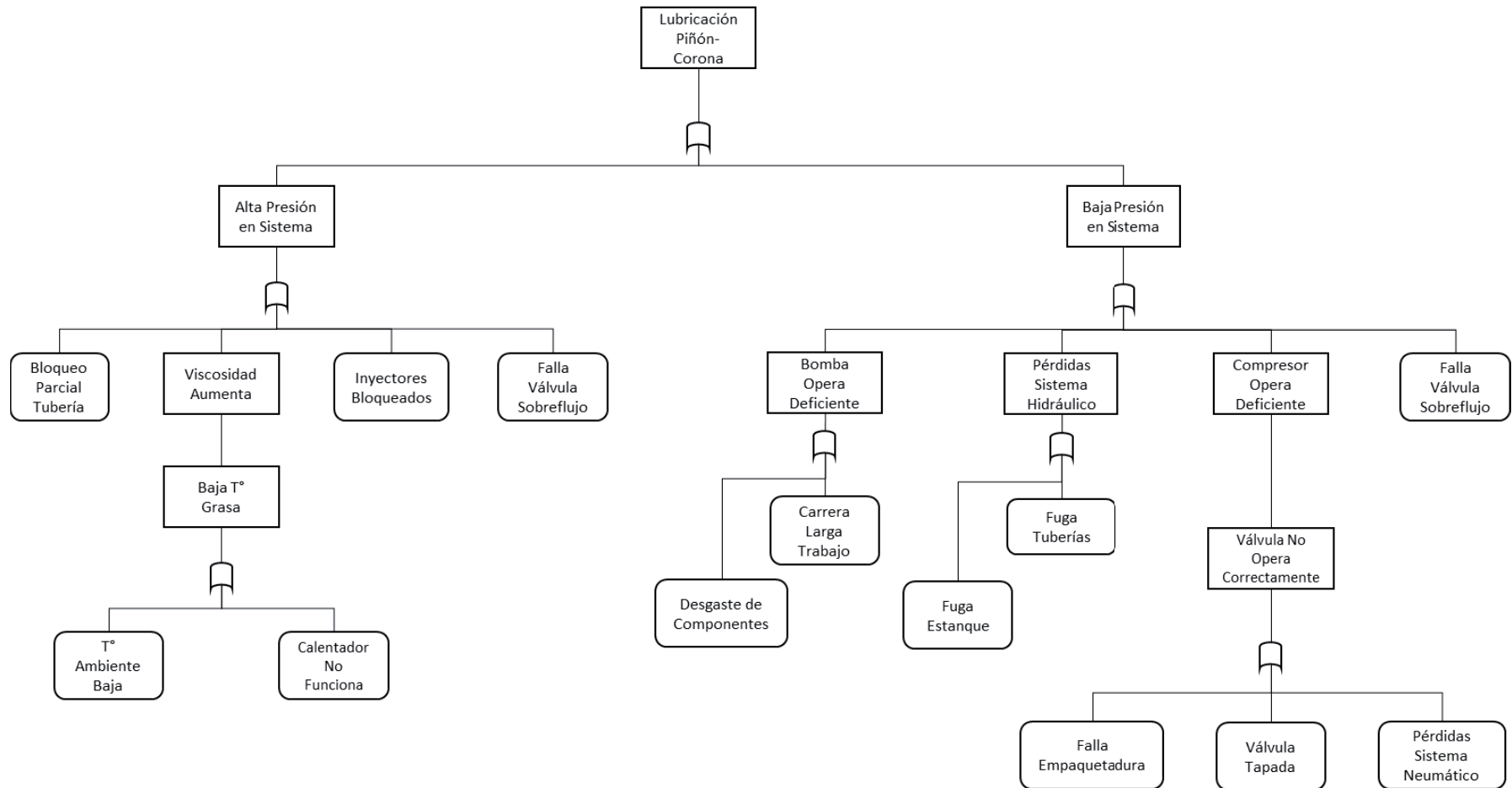


Figura 62: Continuación Árbol de Falla Sistema Lubricación – Fuente: Propia.

#### 4.9.4.2. Árbol de Falla Sistema Lubricación Descansos – Bomba Lubricación.

A continuación, se muestra el árbol de falla de la bomba de lubricación perteneciente al sistema de lubricación (Figura 63).

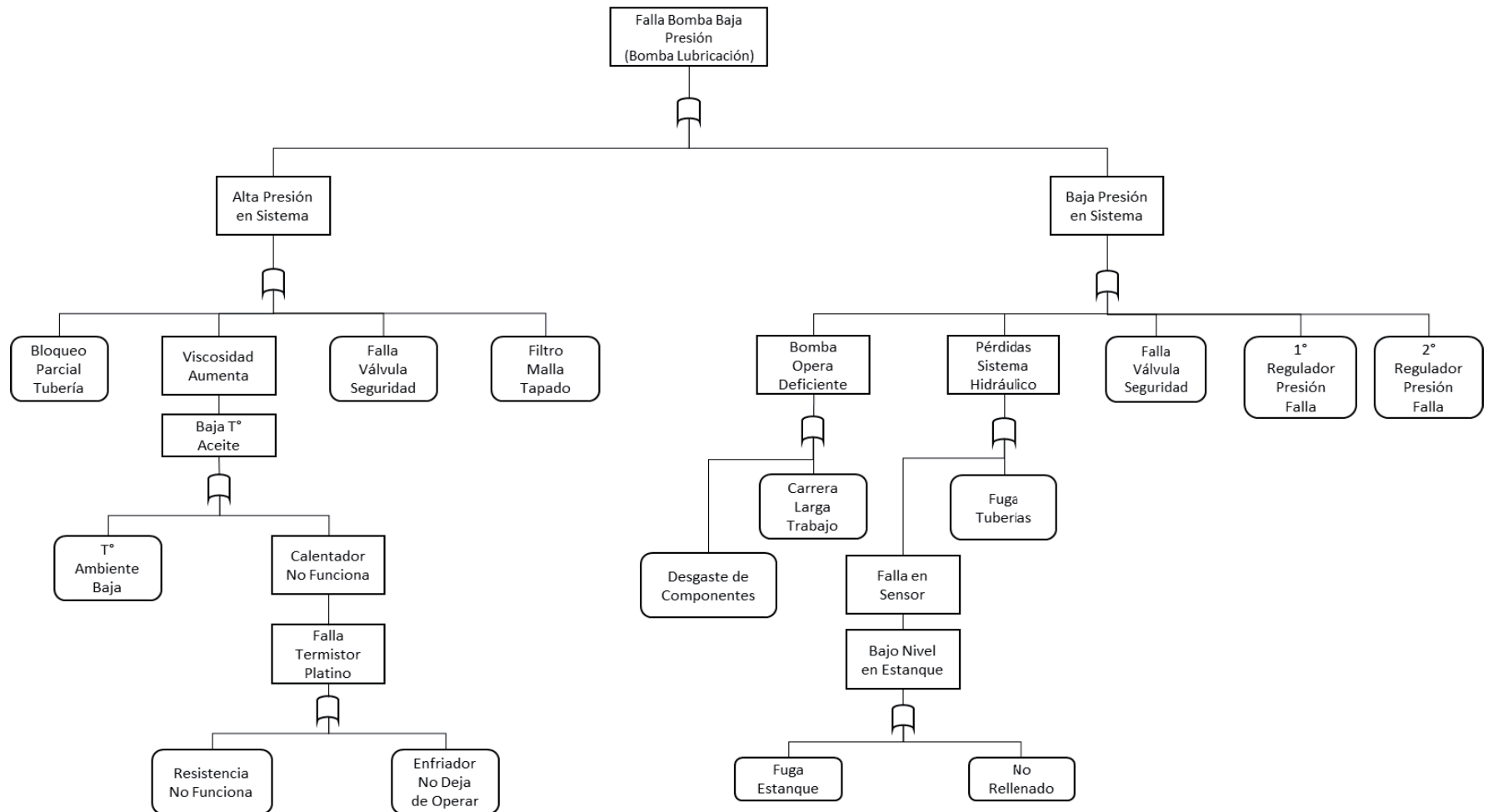


Figura 63: Continuación Árbol de Falla Sistema Lubricación – Fuente: Propia.



#### 4.9.4.3. Árbol de Falla Sistema Lubricación Descansos – Bomba Levante.

A continuación, se muestra el árbol de fallas de la bomba de levante perteneciente al sistema de lubricación (Figura 64).

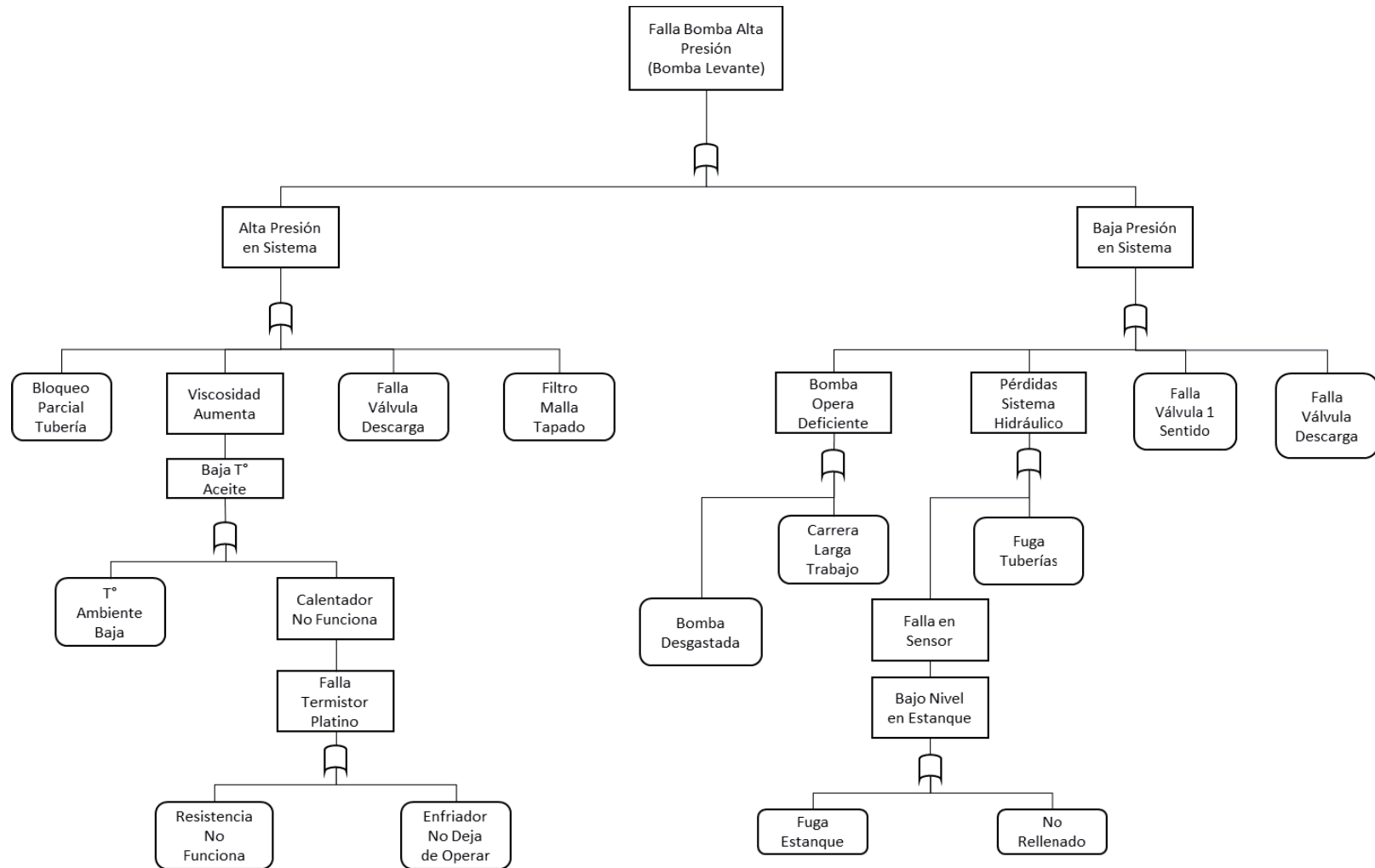


Figura 64: Continuación Árbol de Falla Sistema Lubricación – Fuente: Propia.

#### 4.9.5. Árbol de Falla Sistema Descarga.

A continuación, se muestra el árbol de fallas del sistema de descarga (Figura 65).

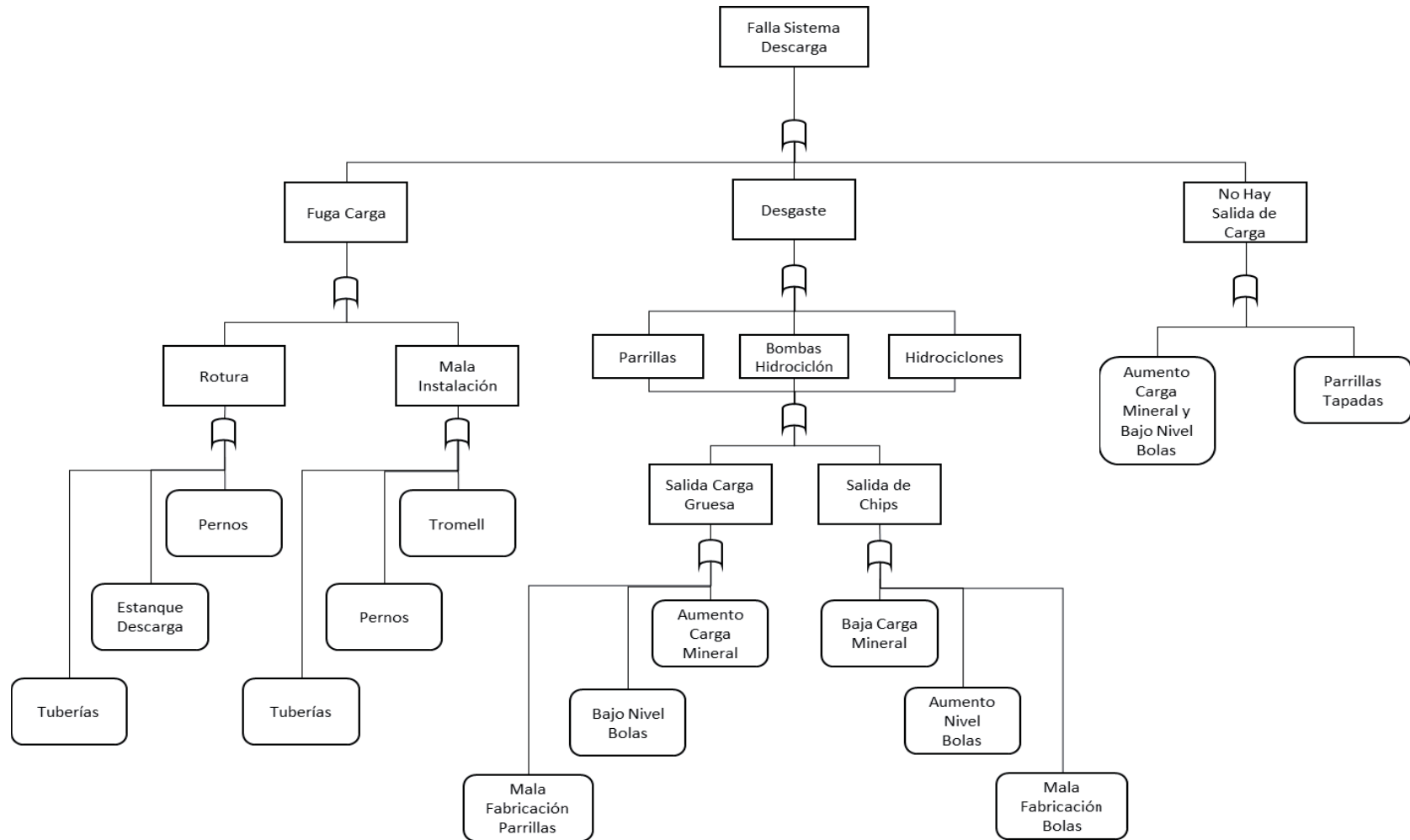


Figura 65: Árbol de Falla Sistema Descarga – Fuente: Propia.

## **Capítulo V: Plan de Mantenimiento**

### **5.1. Introducción.**

En el siguiente capítulo se desarrollará un plan de mantenimiento en función del modelo de confiabilidad y del contexto operacional de Compañía Minera Cerro Negro. En donde se buscará minimizar los costos asociados a mantención y a las fallas imprevistas que conllevan a mantenciones correctivas.

Como medida inicial se realizarán recomendaciones previas para los modos correctivos críticos según el parámetro de forma que tengan, posteriormente se propondrá el plan de mantenimiento en base a la condición operacional de la empresa.

### **5.2. Alcances.**

Como se ha mencionado anteriormente, el plan de mantenimiento estará basado en los datos del molino de bolas perteneciente al Grupo Minero Las Cenizas y se propondrá llevarlo a cabo en Cerro Negro debido a las semejanzas constructivas y operacionales entre ambos molinos.

### 5.3. Recomendaciones Previas.

Como medida inicial del plan de mantenimiento, se darán algunas recomendaciones según el parámetro de forma  $\beta$  que tengan los modos correctivos críticos seleccionados. A continuación, en la Tabla 42, se muestra el resumen:

Modo Correctivo	$\beta$ [-]	Causa de Falla
Cambio Piñón	1,62	Fallas por deterioro prematuro
Cambio Descansos Alimentación-Descarga	0,71	Fallas prematuras/infantiles
Cambio Bomba Lubricación	0,7	Fallas prematuras/infantiles
Cambio Bomba Levante	2,22	Fallas por deterioro prematuro
Cambio Parrillas Descarga	0,96	Fallas prematuras/infantiles

**Tabla 42: Parámetro de Forma según Modo Correctivo Crítico – Fuente: Propia.**

De la tabla podemos ver que los modos correctivos críticos Cambio Descansos Alimentación-Descarga, Cambio Bomba de Lubricación y Cambio Parrillas Descarga sufren fallas prematuras/infantiles pues su  $\beta < 1$ . La solución a este problema no recae en implementar un mantenimiento tipo preventivo, sino en encontrar la causa raíz y eliminarla; la cual suele estar relacionada con malos montajes, problemas en la alineación, desconocimientos del mantenimiento del equipo y de su operación, errores en diseño del componente, entre otros. Es importante mencionar que en el caso de que hayan existido problemas con la alineación, es estrictamente necesario realizar el alineamiento nuevamente, pues los errores seguirán ocurriendo incluso trayendo fallas a nivel superior y, en caso de que existan problemas relacionados con el diseño del componente, se hace la recomendación de realizar un chequeo previo al componente antes de instalarlo.

Ahora, de las causas mencionadas, las que mayor incidencia tienen en las fallas infantiles es el desconocimiento del mantenimiento y operación de los equipos, ambas relacionadas con errores

netamente humanos (Moubray, 1991). Por consiguiente, para dar fin a esto, lo ideal sería capacitar a los operadores y mantenedores respecto al montaje y funcionamiento de los componentes, la operación del equipo y el tipo de mantenimiento que debe realizarse.

Sin embargo, hay que tener claro que los errores humanos no son estrictamente responsabilidad de las mismas personas, sino también de la propia organización de la empresa; puede que no se estén generando procedimientos necesarios para realizar los trabajos, falta de planes de capacitación, desarrollo y reconocimiento de los trabajadores, entre otros.

Entonces, se hacen necesarias las siguientes acciones básicas para evitar fallas infantiles en los componentes críticos:

- Establecer procedimientos de trabajo.
- Instructivos paso a paso de montajes de componentes críticos.
- Dejar a disposición de los operadores y mantenedores la documentación técnica del equipo, manuales y planos.
- Dejar a disposición de los mantenedores todas las herramientas necesarias para poder realizar las actividades de montaje y mantención.
- Capacitación y entrenamiento continuo.

Siguiendo estas recomendaciones, tanto operadores como mecánicos, cuando deban enfrentarse al proceso inicial de instalación y puesta en marcha de un equipo, lo harán con el mayor manejo de información y conocimiento posible junto con el equipo necesario para la ejecución de todas las tareas. Esto permitirá llevar a cabo un trabajo más preciso, con el mínimo de errores y en un menor tiempo; logrando minimizar la tasa de fallas considerablemente y por ende el CGM.

Ahora, de los modos de intervención correctiva Cambio Piñón y Cambio Bomba Levante podemos ver que ambos sufren fallas por deterioro prematuro, puesto que su parámetro de forma se encuentra entre  $1 < \beta < 4$ ; fallas relacionadas frecuentemente con bajos ciclos de fatiga, corrosión, erosión, deterioro mecánico o hidráulico, bajo nivel de mantenimiento y reparación, mal estado operacional, entre otros. La solución a este tipo de fallas recae en la aplicación de un mantenimiento de tipo preventivo con el fin de evitar que éstas ocurran.

En esta etapa la tasa de fallas es creciente y con la aplicación de acciones preventivas sería posible restaurar el sistema a un estado en el cual la tasa de fallas sea mucho más baja. Entonces, se hace necesaria la aplicación de las siguientes acciones básicas para evitar fallas por deterioro prematuro:

- Dejar a disposición de los operadores instructivos operacionales del equipo.
- Lista de chequeo de equipo y componentes.
- Estandarizar modos de falla.
- Reporte de fallas para la construcción de un historial de fallas.
- Dejar a disposición de los mantenedores todas las herramientas necesarias para poder realizar las actividades de mantención.
- Plan de mantenimiento preventivo.
- Capacitación y entrenamiento continuo.

Siguiendo estas recomendaciones, tanto operadores como mecánicos, podrán otorgar a los administradores del departamento de mantención un registro que sea fiel a las fallas ocurridas y de esta forma se podrá modelar de forma representativa el comportamiento tanto del equipo como el de los componentes más críticos. Con esto, se podrá estandarizar los modos de fallas y se podrá diseñar un plan de mantenimiento preventivo que se ajuste a las condiciones de funcionamiento del equipo y de la planta. Finalmente, con esto se podrán prevenir fallas en componentes que generen alta indisponibilidad en el sistema y junto a esto, minimizar el CGM.

Por otro lado, para asegurar y extender la vida útil del Piñón y de los Descansos se recomienda realizar análisis de vibraciones; aunque esta acción está netamente relacionada con el mantenimiento tipo predictivo, se hace necesaria debido a los altos costos que tienen estos componentes en términos de adquisición, instalación y falla.

Además, es importante mencionar que, a pesar de que los modos críticos Cambio Descansos Alimentación-Descarga, Cambio Bomba de Lubricación y Cambio Parrillas Descarga posean fallas prematuras/infantiles, igualmente se incluirán en el plan de mantenimiento preventivo, pues deben chequearse a corto, mediano y largo plazo.

#### **5.4. Plan de Mantenimiento Propuesto para la Empresa.**

Según el contexto operacional en el que actualmente se encuentra CMCN, se propone establecer un plan de mantenimiento preventivo “basado en la condición”, el cual estará fundamentado, principalmente, por listas de chequeos de equipos (diarias, semanales, mensuales, etc.) y reportes de fallas. Entonces, a partir de un hallazgo se generará inmediatamente una orden de trabajo preventivo.

De acuerdo a lo mencionado, uno de los primeros puntos a evaluar será la frecuencia óptima de inspecciones, con la que se busca determinar el estado del equipo y sus componentes; una vez obtenidos los resultados será posible tomar acciones preventivas, las cuales permitirán reducir la cantidad de fallas imprevistas y, también, disminuir el CGM optimizando el tiempo entre inspecciones.

Para ello se analizarán dos frecuencias de inspección:

- Frecuencia óptima de inspecciones con detención de equipo.
- Frecuencia óptima de inspecciones sin detención de equipo.

Es importante mencionar que no se realizarán los cálculos de frecuencia óptima de inspecciones considerando los parámetros de Weibull, debido a que no tenemos el parámetro alfa (costos preventivos sobre costos correctivos) puesto que la empresa no tiene registros relacionados a costos preventivos. Por otro lado, el resto de recomendaciones, mencionadas en el apartado **5.3.** deberán ser aplicadas, eventualmente, a mediano y largo plazo por parte del personal de la empresa.



### 5.4.1. Frecuencia Óptima de Inspecciones con Detención de Equipo.

Para el desarrollo de este apartado se tomarán las siguientes consideraciones,

- Se tomarán en cuenta 30 días en el mes.
- El tiempo y N° de inspecciones no se encontraba dentro del historial de falla, por lo tanto, se consultarán a personal del área de mantenimiento de CMCN.
- La cantidad de reparaciones se sacarán del historial de falla.
- En el costo de intervención generado por una reparación también se considerará el costo del repuesto, pues de esta forma se estará en un escenario más conservativo; sopesando el CGM ocasionado por una falla de los modos correctivos.

#### 5.4.1.1. Piñón.

En la Tabla 43 se muestran los datos de inspecciones y reparaciones respectivas al modo correctivo.

Periodo		Inspecciones		Reparaciones	
Año	Mes	Cantidad/Mes	Tiempo por Inspección [hr]	Cantidad Rep./Periodo	Tiempo por Reparación [hr]
5	60	1	5	2	36

**Tabla 43: Datos con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Piñón – Fuente: Propia.**

En la Tabla 44 se muestran los datos obtenidos del análisis del CGM.

Costo Falla Modificado	Costo Repuesto
[USD]	[USD]
1862	31300

**Tabla 44: Datos de Costos con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Piñón – Fuente: Propia.**

En la Tabla 45 se muestra el número de trabajadores necesarios para realizar labores de reparación e inspección con detención de equipo, y los costos asociados a aquellas acciones para el modo correctivo.

Inspecciones		Reparaciones	
Cantidad	Costo HH [USD]	Cantidad	Costo HH [USD]
5	48,8	4	8,8

**Tabla 45: Datos de Trabajadores con Detención de Equipo  
Modo Correctivo Cambio Piñón – Fuente: Propia.**

Cabe destacar que el aumento del costo hora-hombre en las inspecciones<sup>7</sup> se debe a que las labores de inspección para un componente de elevado costo como el Piñón, deberán ser llevadas a cabo por personal externo capacitado.

Ahora, según los datos entregados se tienen los siguientes indicadores,

$$k = 0,0333 \left[ \frac{1}{mes^2} \right]$$

$$MTTI = \frac{5 [hr]}{24 \left[ \frac{hr}{día} \right] * 30 \left[ \frac{día}{mes} \right]} = 0,006944 [mes]$$

$$MTTR = \frac{36 [hr]}{24 \left[ \frac{hr}{día} \right] * 30 \left[ \frac{día}{mes} \right]} = 0,05 [mes]$$

---

<sup>7</sup> Costo HH entregado por Dpto. de Mantenimiento.

Y los costos asociados a inspecciones y reparaciones según el modo correctivo, son los siguientes,

$$C_{i,i} = 1220 \left[ \frac{USD}{mes} \right]$$

$$C_{i,r} = 31342 \left[ \frac{USD}{mes} \right]$$

$$C_f = 11544 \left[ \frac{USD}{mes} \right]$$

Finalmente, con los indicadores y costos calculados, se procede al cálculo de la frecuencia óptima de inspecciones,

$$n^* = 0,8979 \left[ \frac{inspecciones}{mes} \right]$$

Lo que equivale a inspeccionar el Piñón cada 33 [días].

#### 5.4.1.2. Descansos Molino Alimentación-Descarga.

En la Tabla 46 se muestran los datos de inspecciones y reparaciones respectivas al modo correctivo.

Periodo		Inspecciones		Reparaciones	
Año	Mes	Cantidad/Mes	Tiempo por Inspección [hr]	Cantidad Rep./Periodo	Tiempo por Reparación [hr]
5	60	1	5	2	24

**Tabla 46: Datos con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Descansos Molino – Fuente: Propia.**

En la Tabla 47 se muestran los datos obtenidos del análisis del CGM,

Costo Falla Modificado	Costo Repuesto
[USD]	[USD]
1862	44000

**Tabla 47: Datos de Costos con Detención de Equipo para Modo Correctivo Cambio Descansos Molino – Fuente: Propia.**

En la Tabla 48 se muestran el número de trabajadores necesarios para realizar labores de reparación e inspección y los costos asociados a aquellas acciones para el modo correctivo.

Inspecciones		Reparaciones	
Cantidad	Costo HH [USD]	Cantidad	Costo HH [USD]
5	48,8	4	8,8

**Tabla 48: Datos de Trabajadores con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Descansos Molino – Fuente: Propia.**

Cabe destacar que las labores de inspección, para un componente de elevado costo como los Descansos, debiesen ser llevadas a cabo por personal externo capacitado.

Entonces, según los datos entregados se tienen los siguientes indicadores,

$$k = 0,0333 \left[ \frac{1}{\text{mes}^2} \right]$$

$$MTTI = \frac{5 \text{ [hr]}}{24 \left[ \frac{\text{hr}}{\text{día}} \right] * 30 \left[ \frac{\text{día}}{\text{mes}} \right]} = 0,006944 \text{ [mes]}$$

$$MTTR = \frac{24 \text{ [hr]}}{24 \left[ \frac{\text{hr}}{\text{día}} \right] * 30 \left[ \frac{\text{día}}{\text{mes}} \right]} = 0,0333 \text{ [mes]}$$

Y los costos asociados a inspecciones y reparaciones según el modo correctivo, son los siguientes,

$$C_{i,i} = 1220 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{mes}} \right]$$

$$C_{i,r} = 44028 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{mes}} \right]$$

$$C_f = 10800 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{mes}} \right]$$

Finalmente, con los indicadores y costos calculados se procede al cálculo de la frecuencia óptima de inspecciones,

$$n^* = 0,854 \left[ \frac{\text{inspecciones}}{\text{mes}} \right]$$

Lo que equivale a inspeccionar los Descansos del Molino cada 35 [días].

### 5.4.1.3. Bomba de Lubricación.

En la Tabla 49 se muestran los datos de inspecciones y reparaciones respectivas al modo correctivo.

Periodo		Inspecciones		Reparaciones	
Año	Semanas	Cantidad/Sem.	Tiempo por Inspección [hr]	Cantidad Rep./Periodo	Tiempo por Reparación [hr]
5	258	1	2	7	3

**Tabla 49: Datos con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación – Fuente: Propia.**

En la Tabla 50 se muestran los datos obtenidos del análisis del CGM,

Costo Falla Modificado	Costo Repuesto
[USD]	[USD]
1862	1600

**Tabla 50: Datos de Costos con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación – Fuente: Propia.**

En la Tabla 51 se muestran el número de trabajadores necesarios para realizar labores de reparación e inspección y los costos asociados a aquellas acciones para el modo correctivo.

Inspecciones		Reparaciones	
Cantidad	Costo HH [USD]	Cantidad	Costo HH [USD]
1	8,8	4	8,8

**Tabla 51: Datos de Trabajadores con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación – Fuente: Propia.**

Cabe destacar que las labores de inspección para este modo correctivo serán llevadas a cabo por personal de la empresa. El costo asociado se encuentra en la tabla.

Entonces, según los datos entregados se tienen los siguientes indicadores,

$$k = 0,02713 \left[ \frac{1}{\text{semana}^2} \right]$$

$$MTTI = \frac{2 \text{ [hr]}}{24 \left[ \frac{\text{hr}}{\text{día}} \right] * 7 \left[ \frac{\text{día}}{\text{semana}} \right]} = 0,01191 \text{ [semana]}$$

$$MTTR = \frac{3 \text{ [hr]}}{24 \left[ \frac{\text{hr}}{\text{día}} \right] * 7 \left[ \frac{\text{día}}{\text{semana}} \right]} = 0,01785 \text{ [semana]}$$

Y los costos asociados a inspecciones y reparaciones según el modo correctivo, son los siguientes,

$$C_{i,i} = 17,6 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{semana}} \right]$$

$$C_{i,r} = 1602 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{semana}} \right]$$

$$C_f = 3875 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{semana}} \right]$$

Finalmente, con los indicadores y costos calculados se procede al cálculo de la frecuencia óptima de inspecciones,

$$n^* = 0,24 \left[ \frac{\text{inspecciones}}{\text{semana}} \right]$$

Lo que equivale a inspeccionar las Bombas de Lubricación cada 29 [días].

#### 5.4.1.4. Bomba de Levante.

En la Tabla 52 se muestran los datos de inspecciones y reparaciones respectivas al modo correctivo.

Periodo		Inspecciones		Reparaciones	
Año	Semanas	Cantidad/Sem.	Tiempo por Inspección [hr]	Cantidad Rep./Periodo	Tiempo por Reparación [hr]
5	258	1	2	4	3

**Tabla 52: Datos con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Bomba Levante – Fuente: Propia.**

En la Tabla 53 se muestran los datos obtenidos del análisis del CGM.

Costo Falla Modificado	Costo Repuesto
[USD]	[USD]
1862	1400

**Tabla 53: Datos de Costos con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Bomba Levante – Fuente: Propia.**

En la Tabla 54 se muestran el número de trabajadores necesarios para realizar labores de reparación e inspección y los costos asociados a aquellas acciones para el Modo Correctivo.

Inspecciones		Reparaciones	
Cantidad	Costo HH [USD]	Cantidad	Costo HH [USD]
1	8,8	4	8,8

**Tabla 54: Datos de Trabajadores con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Bomba Levante – Fuente: Propia.**

Cabe destacar que las labores de inspección para este modo correctivo serán llevadas a cabo por personal de la empresa. El costo asociado se encuentra en la tabla.



Entonces, según los datos entregados se tienen los siguientes indicadores,

$$k = 0,0155 \left[ \frac{1}{\text{semana}^2} \right]$$

$$MTTI = \frac{2 \text{ [hr]}}{24 \left[ \frac{\text{hr}}{\text{día}} \right] * 7 \left[ \frac{\text{día}}{\text{semana}} \right]} = 0,0119 \text{ [semana]}$$

$$MTTR = \frac{3 \text{ [hr]}}{24 \left[ \frac{\text{hr}}{\text{día}} \right] * 7 \left[ \frac{\text{día}}{\text{semana}} \right]} = 0,01786 \text{ [semana]}$$

Y los costos asociados a inspecciones y reparaciones según el modo correctivo, son los siguientes,

$$C_{i,i} = 17,6 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{semana}} \right]$$

$$C_{i,r} = 1400 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{semana}} \right]$$

$$C_f = 3810 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{semana}} \right]$$

Finalmente, con los indicadores y costos calculados se procede al cálculo de la frecuencia óptima de inspecciones,

$$n^* = 0,178 \left[ \frac{\text{inspecciones}}{\text{semana}} \right]$$

Lo que equivale a inspeccionar las Bombas de Levante cada 39 [días].

#### 5.4.1.5. Parrillas de Descarga.

En la Tabla 55 se muestran los datos de inspecciones y reparaciones respectivas al modo correctivo.

Periodo		Inspecciones		Reparaciones	
Año	Mes	Cantidad/Mes	Tiempo por Inspección [hr]	Cantidad Rep./Periodo	Tiempo por Reparación [hr]
5	60	1	2	4	11

**Tabla 55: Datos con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga – Fuente: Propia.**

En la Tabla 56 se muestran los datos obtenidos del análisis del CGM.

Costo Falla Modificado	Costo Repuesto
[USD]	[USD]
1862	4000

**Tabla 56: Datos de Costos con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga – Fuente: Propia.**

En la Tabla 57 se muestran el número de trabajadores necesarios para realizar labores de reparación e inspección y los costos asociados a aquellas acciones para el Modo Correctivo.

Inspecciones		Reparaciones	
Cantidad	Costo HH [USD]	Cantidad	Costo HH [USD]
1	8,8	4	8,8

**Tabla 57: Datos de Trabajadores con Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga – Fuente: Propia.**

Cabe destacar que las labores de inspección para este modo correctivo serán llevadas a cabo por personal de la empresa. El costo asociado se encuentra en la tabla.

Entonces, según los datos entregados se tienen los siguientes indicadores,

$$k = 0,0667 \left[ \frac{1}{mes^2} \right]$$

$$MTTI = \frac{2 [hr]}{24 \left[ \frac{hr}{día} \right] * 30 \left[ \frac{día}{mes} \right]} = 0,00277778 [mes]$$

$$MTTR = \frac{11 [hr]}{24 \left[ \frac{hr}{día} \right] * 30 \left[ \frac{día}{mes} \right]} = 0,01527778 [mes]$$

Y los costos asociados a inspecciones y reparaciones según el modo correctivo, son los siguientes,

$$C_{i,i} = 17,6 \left[ \frac{USD}{mes} \right]$$

$$C_{i,r} = 4026 \left[ \frac{USD}{mes} \right]$$

$$C_f = 5090 \left[ \frac{USD}{mes} \right]$$

Finalmente, con los indicadores y costos calculados se procede al cálculo de la frecuencia óptima de inspecciones,

$$n^* = 0,8089 \left[ \frac{inspecciones}{mes} \right]$$

Lo que equivale a inspeccionar las Parrillas de Descarga cada 37 [días].

#### 5.4.2. Resumen Frecuencia Óptima de Inspecciones con Detención de Equipo.

A continuación, en la Tabla 58, se presenta un resumen de las frecuencias óptimas de inspección con detención de equipo para los modos correctivos críticos,

<i>Frecuencia (Días)</i>	
Modo Correctivo	Frecuencia Inspección
Cambio Piñón	33
Cambio Descansos Alimentación-Descarga	35
Cambio Bomba Lubricación	29
Cambio Bomba Levante	39
Cambio Parrillas Descarga	37

**Tabla 58: Frecuencia Óptima de Inspección con Detención de Equipo según Modos Correctivos – Fuente: Propia.**

De la cual podemos ver que para cada modo correctivo la frecuencia de inspección es distinta y, como esta actividad implica la detención del equipo, lo ideal sería que se realizaran al mismo tiempo para evitar detenciones seguidas del molino. Entonces, se decide calcular la media de estas frecuencias con el fin de llegar a una solución intermedia; que sería realizar la mayor parte de las inspecciones en una sola detención.

Por lo tanto, la media de frecuencias de inspección para los modos correctivos sería la siguiente:

$$\bar{F} = 35 \text{ [días]} = 840 \text{ [hr]}$$

Por otro lado, se propone la idea de tener Bombas de Levante y Lubricación en “Stand By”, para cuando se realicen las actividades de inspección el mayor tiempo sea destinado a componentes más críticos e importantes; como por ejemplo el Piñón y los Descansos.

### 5.4.3. Frecuencia Óptima de Inspecciones sin Detención de Equipo.

Para el desarrollo de este apartado se tomarán las siguientes consideraciones,

- Se tomarán en cuenta 30 días en el mes.
- El tiempo y N° de inspecciones no se encontraba dentro del historial de falla, por lo tanto, se consultarán a personal del área de mantenimiento de CMCN.
- La cantidad de reparaciones se sacarán del historial de falla.
- En el costo de intervención generado por una reparación también se considerará el costo del repuesto, pues de esta forma se estará en un escenario más conservativo; sopesando el CGM ocasionado por una falla de los modos correctivos.

#### 5.4.3.1. Piñón.

En la Tabla 59 se muestran los datos de inspecciones y reparaciones respectivas al modo correctivo.

Periodo		Inspecciones		Reparaciones	
Año	Semanas	Cantidad/Sem.	Tiempo por Inspección [hr]	Cantidad Rep./Periodo	Tiempo por Reparación [hr]
5	258	1	0,5	2	36

**Tabla 59: Datos sin Detención de Equipo  
Modo Correctivo Cambio Piñón – Fuente: Propia.**

Según el Análisis del CGM, se obtuvo lo siguiente,

Costo Falla Modificado	Costo Repuesto
[USD]	[USD]
1862	31300

**Tabla 60: Datos de Costos sin Detención de Equipo  
Modo Correctivo Cambio Piñón – Fuente: Propia.**

En la Tabla 61 se muestran el número de trabajadores necesarios para realizar labores de reparación e inspección y los costos asociados a aquellas acciones para el modo correctivo.

Inspecciones		Reparaciones	
Cantidad	Costo HH [USD]	Cantidad	Costo HH [USD]
1	8,8	4	8,8

**Tabla 61: Datos de Trabajadores sin Detención de Equipo  
Modo Correctivo Cambio Piñón – Fuente: Propia.**

Cabe destacar que las labores de inspección para este modo correctivo serán llevadas a cabo por personal de la empresa.

Entonces, según los datos entregados se tienen los siguientes indicadores:

$$k = 0,00775 \left[ \frac{1}{\text{semana}^2} \right]$$

$$MTTI = \frac{0,5 \text{ [hr]}}{24 \left[ \frac{\text{hr}}{\text{día}} \right] * 7 \left[ \frac{\text{día}}{\text{semana}} \right]} = 0,00297 \text{ [semana]}$$

$$MTTR = \frac{36 \text{ [hr]}}{24 \left[ \frac{\text{hr}}{\text{día}} \right] * 7 \left[ \frac{\text{día}}{\text{semana}} \right]} = 0,214 \text{ [semana]}$$

Y los costos asociados a inspecciones y reparaciones según el modo correctivo, son los siguientes,

$$C_{i,i} = 4,4 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{semana}} \right]$$

$$C_{i,r} = 31310 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{semana}} \right]$$

$$C_f = 1450 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{semana}} \right]$$

Finalmente, con los indicadores y costos calculados se procede al cálculo de la frecuencia óptima de inspecciones,

$$n^* = 64,5 \left[ \frac{\text{inspecciones}}{\text{semana}} \right]$$

Lo que equivale a inspeccionar el Piñón cada 0,11 [días].

#### 5.4.3.2. Descansos Molino Alimentación-Descarga.

En la Tabla 62 se muestran los datos de inspecciones y reparaciones respectivas al modo correctivo.

Periodo		Inspecciones		Reparaciones	
Año	Semanas	Cantidad/Sem.	Tiempo por Inspección [hr]	Cantidad Rep./Periodo	Tiempo por Reparación [hr]
5	258	1	0,5	2	24

**Tabla 62: Datos sin Detención de Equipo Modo Correctivo  
Cambio Descansos Molino – Fuente: Propia.**

Según el Análisis del CGM, se obtuvo lo siguiente,

Costo Falla Modificado	Costo Repuesto
[USD]	[USD]
1862	44000

**Tabla 63: Datos de Costos sin Detención de Equipo Modo Correctivo  
Cambio Descansos Molino – Fuente: Propia.**

En la Tabla 64 se muestran el número de trabajadores necesarios para realizar labores de reparación e inspección y los costos asociados a aquellas acciones para el modo correctivo.

Inspecciones		Reparaciones	
Cantidad	Costo HH [USD]	Cantidad	Costo HH [USD]
1	8,8	4	8,8

**Tabla 64: Datos de Trabajadores sin Detención de Equipo  
Modo Correctivo Cambio Descansos Molino – Fuente: Propia.**

Cabe destacar que las labores de inspección para este modo correctivo serán llevadas a cabo por personal de la empresa.

Entonces, según los datos entregados se tienen los siguientes indicadores,

$$k = 0,00775 \left[ \frac{1}{\text{semana}^2} \right]$$

$$MTTI = \frac{0,5 \text{ [hr]}}{24 \left[ \frac{\text{hr}}{\text{día}} \right] * 7 \left[ \frac{\text{día}}{\text{semana}} \right]} = 0,00297 \text{ [semana]}$$

$$MTTR = \frac{24 \text{ [hr]}}{24 \left[ \frac{\text{hr}}{\text{día}} \right] * 7 \left[ \frac{\text{día}}{\text{semana}} \right]} = 0,143 \text{ [semana]}$$

Y los costos asociados a inspecciones y reparaciones según el modo correctivo, son los siguientes,

$$C_{i,i} = 4,4 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{semana}} \right]$$

$$C_{i,r} = 44007 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{semana}} \right]$$

$$C_f = 1277 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{semana}} \right]$$



Finalmente, con los indicadores y costos calculados se procede al cálculo de la frecuencia óptima de inspecciones,

$$n^* = 61,88 \left[ \frac{\text{inspecciones}}{\text{semana}} \right]$$

Lo que equivale a inspeccionar los Descansos cada 0,11 [días].

#### 5.4.3.3. Bomba de Lubricación.

En la Tabla 65 se muestran los datos de inspecciones y reparaciones respectivas al modo correctivo.

Periodo		Inspecciones		Reparaciones	
Año	Semanas	Cantidad/Sem.	Tiempo por Inspección [hr]	Cantidad Rep./Periodo	Tiempo por Reparación [hr]
5	258	1	0,25	7	3

**Tabla 65: Datos sin Detención de Equipo Modo Correctivo  
Cambio Bomba Lubricación – Fuente: Propia.**

Según el Análisis del CGM, se obtuvo lo siguiente,

Costo Falla Modificado	Costo Repuesto
[USD]	[USD]
1862	1600

**Tabla 66: Datos de Costos sin Detención de Equipo Modo Correctivo  
Cambio Bomba Lubricación – Fuente: Propia.**

En la Tabla 67 se muestran el número de trabajadores necesarios para realizar labores de reparación e inspección y los costos asociados a aquellas acciones para el modo correctivo.

Inspecciones		Reparaciones	
Cantidad	Costo HH [USD]	Cantidad	Costo HH [USD]
1	8,8	4	8,8

**Tabla 67: Datos de Trabajadores sin Detención de Equipo  
Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación – Fuente: Propia.**

Cabe destacar que las labores de inspección para este modo correctivo serán llevadas a cabo por personal de la empresa.

Entonces, según los datos entregados se tienen los siguientes indicadores,

$$k = 0,02713 \left[ \frac{1}{\text{semana}^2} \right]$$

$$MTTI = \frac{0,25 \left[ \frac{\text{hr}}{\text{inspección}} \right]}{24 \left[ \frac{\text{hr}}{\text{día}} \right] * 7 \left[ \frac{\text{día}}{\text{semana}} \right]} = 0,00149 [\text{semana}]$$

$$MTTR = \frac{3 \left[ \frac{\text{hr}}{\text{reparación}} \right]}{24 \left[ \frac{\text{hr}}{\text{día}} \right] * 7 \left[ \frac{\text{día}}{\text{semana}} \right]} = 0,0179 [\text{semana}]$$

Y los costos asociados a inspecciones y reparaciones según el modo correctivo, son los siguientes,

$$C_{i,i} = 2,2 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{semana}} \right]$$

$$C_{i,r} = 1603 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{semana}} \right]$$

$$C_f = 617 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{semana}} \right]$$

Finalmente, con los indicadores y costos calculados se procede al cálculo de la frecuencia óptima de inspecciones,

$$n^* = 18,13 \left[ \frac{\text{inspecciones}}{\text{semana}} \right]$$

Lo que equivale a inspeccionar las Bombas de Lubricación aproximadamente cada 0,39 [días].

#### 5.4.3.4. Bomba de Levante.

En la Tabla 68 se muestran los datos de inspecciones y reparaciones respectivas al modo correctivo.

Periodo		Inspecciones		Reparaciones	
Año	Semanas	Cantidad/Sem.	Tiempo por Inspección [hr]	Cantidad Rep./Periodo	Tiempo por Reparación [hr]
5	258	1	0,25	4	3

**Tabla 68: Datos sin Detención de Equipo Modo Correctivo  
Cambio Bomba Levante – Fuente: Propia.**

Según el Análisis del CGM, se obtuvo lo siguiente,

Costo Falla Modificado	Costo Repuesto
[USD]	[USD]
1862	1400

**Tabla 69: Datos de Costos sin Detención de Equipo  
Modo Correctivo Cambio Bomba Levante – Fuente: Propia.**

En la Tabla 70 se muestran el número de trabajadores necesarios para realizar labores de reparación e inspección y los costos asociados a aquellas acciones para el Modo Correctivo.

Inspecciones		Reparaciones	
Cantidad	Costo HH [USD]	Cantidad	Costo HH [USD]
1	8,8	4	8,8

**Tabla 70: Datos de Trabajadores sin Detención de Equipo  
Modo Correctivo Cambio Bomba Levante – Fuente: Propia.**

Cabe destacar que las labores de inspección para este modo correctivo serán llevadas a cabo por personal de la empresa. El costo asociado se encuentra en la tabla.

Entonces, según los datos entregados se tienen los siguientes indicadores,

$$k = 0,0155 \left[ \frac{1}{\text{semana}^2} \right]$$

$$MTTI = \frac{0,25 \text{ [hr]}}{24 \left[ \frac{\text{hr}}{\text{día}} \right] * 7 \left[ \frac{\text{día}}{\text{semana}} \right]} = 0,00149 \text{ [semana]}$$

$$MTTR = \frac{3 \text{ [hr]}}{24 \left[ \frac{\text{hr}}{\text{día}} \right] * 7 \left[ \frac{\text{día}}{\text{semana}} \right]} = 0,0179 \text{ [semana]}$$

Y los costos asociados a inspecciones y reparaciones según el modo correctivo, son los siguientes,

$$C_{i,i} = 2,2 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{semana}} \right]$$

$$C_{i,r} = 1401 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{semana}} \right]$$

$$C_f = 552 \left[ \frac{\text{USD}}{\text{semana}} \right]$$

Finalmente, con los indicadores y costos calculados se procede al cálculo de la frecuencia óptima de inspecciones,

$$n^* = 12,85 \left[ \frac{\text{inspecciones}}{\text{semana}} \right]$$

Lo que equivale a inspeccionar las Bombas de Levante aproximadamente cada 1 [día].

#### 5.4.3.5. Parrillas de Descarga.

En la Tabla 71 se muestran los datos de inspecciones y reparaciones respectivas al modo correctivo.

Periodo		Inspecciones		Reparaciones	
Año	Semanas	Cada 2 Semanas	Tiempo por Inspección [hr]	Cantidad Rep./Periodo	Tiempo por Reparación [hr]
5	258	1	0,5	4	11

**Tabla 71: Datos sin Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga – Fuente: Propia.**

Según el Análisis del CGM, se obtuvo lo siguiente,

Costo Falla Modificado	Costo Repuesto
[USD]	[USD]
1862	4000

**Tabla 72: Datos de Costos sin Detención de Equipo Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga – Fuente: Propia.**

En la Tabla 73 se muestran el número de trabajadores necesarios para realizar labores de reparación e inspección y los costos asociados a aquellas acciones para el modo correctivo.

Inspecciones		Reparaciones	
Cantidad	Costo HH [USD]	Cantidad	Costo HH [USD]
1	8,8	4	8,8

**Tabla 73: Datos de Trabajadores sin Detención de Equipo  
Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga – Fuente: Propia.**

Cabe destacar que las labores de inspección para este modo correctivo serán llevadas a cabo por personal de la empresa. El costo asociado se encuentra en la tabla.

Entonces, según los datos entregados se tienen los siguientes indicadores,

$$k = 0,0155 \left[ \frac{1}{\text{semana}^2} \right]$$

$$MTTI = \frac{0,5 \text{ [hr]}}{24 \left[ \frac{\text{hr}}{\text{día}} \right] * 7 \left[ \frac{\text{día}}{\text{semana}} \right]} = 0,0029 \text{ [semana]}$$

$$MTTR = \frac{11 \text{ [hr]}}{24 \left[ \frac{\text{hr}}{\text{día}} \right] * 7 \left[ \frac{\text{día}}{\text{semana}} \right]} = 0,065 \text{ [semana]}$$

Pero, como la inspección se realiza cada 2 semanas se tiene lo siguiente,

$$\lambda(n = 2 \text{ semanas}) = 0,0155 = \frac{k}{2}$$

Luego,

$$k = 0,031 \left[ \frac{1}{\text{semana}^2} \right]$$

Entonces, los costos asociados a inspecciones y reparaciones según el modo correctivo, son los siguientes,

$$C_{i,i} = 4,4 \left[ \frac{USD}{semana} \right]$$

$$C_{i,r} = 4006 \left[ \frac{USD}{semana} \right]$$

$$C_f = 1249 \left[ \frac{USD}{semana} \right]$$

Finalmente, con los indicadores y costos calculados se procede al cálculo de la frecuencia óptima de inspecciones,

$$n^* = 28,54 \left[ \frac{inspecciones}{semana} \right]$$

Lo que equivale a inspeccionar las Parrillas de Descarga cada 0,25 [día].

#### 5.4.4. Resumen Frecuencia Óptima de Inspecciones sin Detención de Equipo.

A continuación, en la Tabla 74, se presenta un resumen de las frecuencias óptimas de inspección para los modos correctivos críticos,

<i>Frecuencia (Días)</i>	
Modo Correctivo	Frecuencia Inspección
Cambio Piñón	0,11
Cambio Descansos Alimentación-Descarga	0,11
Cambio Bomba Lubricación	0,39
Cambio Bomba Levante	1
Cambio Parrillas Descarga	0,25

**Tabla 74: Frecuencia Óptima de Inspección sin Detención de Equipo según Modos Correctivos – Fuente: Propia.**

De la cual podemos ver que para cada modo correctivo la frecuencia de inspección es distinta. Sin embargo, como los costos asociados a las inspecciones son bajos y que éstas no implican la detención del Molino de Bolas G; resulta indiferente la diferencia de resultados. Por lo tanto, se recomienda realizarlas de forma diaria.



#### **5.4.5. Check List de Actividades para los Modos Correctivos Críticos.**

En el siguiente apartado se desarrollaron listas de chequeo de actividades para sustentar el plan de mantenimiento propuesto. Su utilización se centra, principalmente, en realizar comprobaciones sistemáticas a actividades rutinarias, asegurando la consistencia de las tareas en el menor tiempo posible; a fin de recopilar hallazgos que nos permitan generar actividades preventivas, las cuales se encargarán de minimizar la ocurrencia de fallas inesperadas junto con el CGM.

Los Check List están enfocados, precisamente, en los modos correctivos críticos, sin embargo, abarcan otros sistemas que son completamente necesarios para que funcionen bien los modos críticos seleccionados.

Por otro lado, es importante mencionar que el desarrollo de las listas se llevó a cabo con la ayuda de mantenedores de la Compañía, se tomó en cuenta el análisis FMECA, los árboles de falla, las frecuencias óptimas de inspección (con y sin detención del equipo) calculadas para minimizar el CGM, las especificaciones técnicas de los componentes junto con la tabla A1 de severidad de vibraciones según la norma ISO 10816-3.

Los Check List que serán utilizados por parte de los mecánicos y mantenedores de CMCN se encontrarán en el Anexo D.

La calendarización de las actividades se encontrará en el Anexo E.

La tabla A1 de severidad de vibraciones según la norma ISO 10816-3 se adjunta en el Anexo F.

### 5.4.5.1. Check List – Diario.

La siguiente lista de chequeo se realizará diariamente de acuerdo a las frecuencias óptimas de inspección calculadas anteriormente; las cuales permitirán reducir los CGM.

Las actividades de esta lista de chequeo no implican detención de equipo.

#### 1. Sistema Descansos Alimentación – Descarga.

##### 1.1. Medición de vibraciones:

- ✓ Descanso lado alimentación | Magnitud: < 4,5 [mm/s].
- ✓ Descanso lado descarga | Magnitud: < 4,5 [mm/s].

##### 1.2. Registro de T°:

- ✓ Descanso lado alimentación | Margen: 25 – 32° C.
- ✓ Descanso lado descarga | Margen: 25 – 35° C.

\*Si superan los 50°C el molino de bolas se detiene automáticamente.

##### 1.3. Estado operacional:

- ✓ Inspección de ruidos extraños.
- ✓ Inspección visual muñón y cojinete hidrostático.
- ✓ Inspección de válvulas de refrigeración.

#### 2. Sistema Piñón – Corona.

##### 2.1. Medición de vibraciones:

- ✓ Descanso contraeje lado alimentación | Magnitud: < 4,5 [mm/s].
- ✓ Descanso contraeje lado descarga | Magnitud: < 4,5 [mm/s].

##### 2.2. Registro de T°:

- ✓ Descanso contraeje lado alimentación | Margen: 25 – 35° C.
- ✓ Descanso contraeje lado descarga | Margen: 25 – 35° C.
- ✓ Piñón (extremo alimentación, centro, extremo descarga) | Margen: 25 – 40° C.

- ✓ Corona (extremo alimentación, centro, extremo descarga) | Margen: 25 – 40° C.

### 2.3. Estado operacional:

- ✓ Inspección de ruidos extraños en Piñón – Corona.
- ✓ Inspección visual a Piñón – Corona.
- ✓ Inspección de ruidos extraños en Descansos contraeje.
- ✓ Inspección visual en Descansos contraeje.

## 3. **Sistema de Lubricación:**

### 3.1. Registro de presión:

#### 3.1.1. Descansos Alimentación – Descarga:

- ✓ Bomba de levante (Alta presión) muñones | Magnitud: 31,5 [MPa].
- ✓ Bomba de lubricación (Baja presión) muñones | Magnitud: 0,4 [MPa].

#### 3.1.2. Piñón – Corona:

- ✓ Bomba de lubricación piñón – corona | Magnitud: 2,5 [MPa]

### 3.2. Registro de T°:

#### 3.2.1. Descansos Alimentación – Descarga:

- ✓ Bomba de levante muñones | Magnitud: < 40° C.
- ✓ Bomba de lubricación muñones | Magnitud: < 40° C.
- ✓ Estanque de aceite | Margen: 25 – 45° C.

#### 3.2.2. Piñón – Corona:

- ✓ Bomba de lubricación piñón – corona | Magnitud: < 40° C.
- ✓ Estanque de grasa | Margen: 15 – 70° C.

### 3.3. Estado operacional:

- ✓ Inspección visual de fugas y otros.
- ✓ Inspección de ruidos extraños de componentes del Sistema de Lubricación.

- ✓ Verificar visualmente que los inyectores no se encuentren obstruidos y que el ciclo de inyección se encuentre dentro del rango | Rango: 30 [s] de inyección cada 30 [min]

#### **4. Unidad Neumática.**

##### 4.1. Registro de presión:

- ✓ Verificar presión de trabajo del compresor | Magnitud: 0,7 [MPa]

##### 4.2. Estado operacional:

- ✓ Ajustar piezas que se encuentren sueltas.
- ✓ Inspección de ruidos extraños motor, compresor.
- ✓ Inspección visual de fugas en piping neumático.

#### **5. Sistema Descarga.**

##### 5.1. Estado operacional:

- ✓ Verificación visual del tipo de flujo en la descarga, granulometría. (ver en el Trommel y Cajón de descarga)
- ✓ Inspección de ruidos extraños en bombas de hidrociclón.
- ✓ Inspección de ruidos extraños en hidrociclones.

Se analiza la unidad neumática de forma individual debido a que es de gran importancia para la correcta lubricación del Piñón – Corona.

Es importante mencionar que, a pesar de que la medición de vibraciones tenga carácter predictivo, se recomienda realizar debido a los altos costos que implica una falla en los componentes respectivos.

### 5.4.5.2. Check List – Semanal.

#### 1. Sistema de Lubricación.

##### 1.1. Descansos Alimentación – Descarga:

- ✓ Nivel de aceite; rellenar si fuese necesario | Volumen: 800 [lt].
- ✓ Verificación de funcionamiento de la unidad de lubricación.
- ✓ Inspección y limpieza de filtro de malla.
- ✓ Inspección de válvulas.

##### 1.2. Piñón – Corona:

- ✓ Nivel de grasa; rellenar si fuese necesario | Volumen: 200 [lt].
- ✓ Verificación de funcionamiento de la unidad de lubricación.
- ✓ Inspección y limpieza de filtro de malla.
- ✓ Inspección de válvulas.

#### 2. Unidad Neumática.

##### 2.1. Estado operacional:

- ✓ Nivel de aceite del compresor; rellenar si fuese necesario | Volumen: 62 [lt].
- ✓ Verificación de funcionamiento de la unidad neumática.
- ✓ Evacuación de condensado en piping neumático.
- ✓ Inspección y limpieza de filtros (escape aire/aceite).

Se analiza la unidad neumática de forma individual debido a que es de gran importancia para la correcta lubricación del Piñón – Corona.

### 5.4.5.3. Check List – Mensual (Cada 840 horas).

La siguiente lista de chequeo se realizará cada 35 días, de acuerdo a los tiempos óptimos de inspección calculados anteriormente, los cuales nos permitirán reducir los CGM.

Es importante mencionar que algunas de las actividades implican la detención del equipo.

#### 1. Sistema de Lubricación.

##### 1.1. Descansos Alimentación – Descarga:

- ✓ Inspeccionar fugas en piping lubricación Descansos.
- ✓ Nivel de aceite; rellenar si fuese necesario | Volumen: 800 [lt].

##### 1.2. Piñón – Corona:

- ✓ Inspeccionar fugas en piping lubricación Piñón – Corona.
- ✓ Nivel de grasa; rellenar si fuese necesario | Volumen: 200 [lt].

##### 1.3. Estado operacional:

- ✓ Limpieza del área de lubricación.
- ✓ Inspección interna bomba de levante; cambiar componentes de ser necesario.
- ✓ Inspección interna bomba de lubricación; cambiar componentes de ser necesario.

#### 2. Sistema Piñón – Corona.

##### 2.1. Estado operacional:

- ✓ Verificación visual estado de los dientes del Piñón y Corona (Si tienen desgaste, desgarros, indentaciones, fisuras, arrugamiento, etc.).
- ✓ Revisión de carga y contaminación de engranajes; realizar limpieza de ser necesario.

### **3. Sistema Descansos Alimentación – Descarga.**

#### 3.1. Estado operacional:

- ✓ Verificar estado de los Descansos Alimentación – Descarga (Desgaste, indentaciones, fisuras, fusión, etc.
- ✓ Revisión de alojamientos de los descansos por acumulación de carga; realizar limpieza de ser necesario.

### **4. Sistema Descarga.**

#### 4.1. Estado operacional:

- ✓ Verificación estado de Parrillas Descarga (Si se encuentran tapadas, si tienen desgaste, rotura, etc.).

### **5. Unidad Neumática.**

#### 5.1. Estado operacional:

- ✓ Nivel de aceite compresor; rellenar si fuese necesario | Volumen: 62 [lt].
- ✓ Inspeccionar fugas en piping neumático.
- ✓ Estado de las correas de transmisión.

Se analiza la unidad neumática de forma individual debido a que es de gran importancia para la correcta lubricación del Piñón – Corona.

Es importante mencionar que, a pesar de que la medición de vibraciones tenga carácter predictivo, se recomienda realizar debido a los altos costos que implica una falla en los componentes respectivos.

#### **5.4.5.4. Check List – Bimensual (Cada 1680 horas).**

La siguiente lista de chequeo se realizará cada 70 días; cuando se esté llevando a cabo lista de chequeo de las 840 horas. Todo esto por temas de costo y recomendaciones de mantenedores.

Es importante mencionar que algunas de las actividades implican la detención del equipo.

##### **1. Sistema Piñón – Corona.**

###### 1.1. Alineamiento estático (contacto, raíz, backlash):

- ✓ Lado Alimentación.
- ✓ Lado Descarga.

###### 1.2. Juego interno descansos contraeje:

- ✓ Descanso lado Alimentación.
- ✓ Descanso lado Descarga.



#### **5.4.5.5. Check List – Trimestral (Cada 2520 horas).**

La siguiente lista de chequeo se realizará cada 105 días; cuando se esté llevando a cabo el Check List de las 840 horas. Todo esto por temas de costo y recomendaciones de mantenedores.

Es importante mencionar que algunas de las actividades implican la detención del equipo.

##### **1. Sistema de Lubricación.**

###### 1.1. Descansos Alimentación – Descarga:

- ✓ Limpieza del lugar para evitar contaminar lubricante.
- ✓ Realizar cambio de aceite al sistema.
- ✓ Realizar cambios de filtro de aceite.

###### 1.2. Piñón – Corona.

- ✓ Limpieza del lugar para evitar contaminar grasa.
- ✓ Realizar cambio de grasa al sistema.
- ✓ Realizar cambios de filtro de grasa.

##### **2. Totalidad de Sistemas.**

- ✓ Aplicar reapriete a pernos del sistema.

Cabe destacar que, el reapriete a pernos del sistema se realiza debido a que están involucrados en gran parte de los modos correctivos críticos. El auto – aflojamiento y la pérdida de tensión de los pernos se debe, principalmente, a las vibraciones, alzas de temperatura y deformaciones, fenómenos que se encuentran presentes en el funcionamiento de un molino de bolas.

#### **5.4.5.6. Check List – Semestral (Cada 5040 horas).**

La siguiente lista de chequeo se realizará cada 210 días; cuando se esté llevando a cabo el Check List de las 840 horas. Todo esto por temas de costo y recomendaciones de mantenedores.

Todas las actividades de esta lista de chequeo implican la detención del equipo.

##### **1. Sistema de Alimentación.**

- ✓ Cambio revestimientos trunnion.
- ✓ Cambio de lifters a tapa de alimentación.
- ✓ Cambio de corazas a tapa de alimentación.

##### **2. Sistema de Descarga.**

- ✓ Cambio de revestimientos trommel.
- ✓ Cambio de lifters a tapa descarga.
- ✓ Cambio de parrillas de descarga.
- ✓ Cambio cajones de descarga.
- ✓ Cambio tapa central.

Es importante mencionar que el fabricante recomienda realizar el cambio de las parrillas de descarga de forma semestral; para evitar fallas inoportunas en caso de que no se lleve un registro del estado de éstas. Por otro lado, a las 5040 horas según el análisis de Weibull, las parrillas tienen un 73% de confiabilidad; por lo que se podría extender su vida útil un tiempo más realizando inspecciones y llevando un registro de su status.

Cabe destacar que se realizarán actividades en el Sistema de Alimentación, aunque este no sea un modo correctivo crítico; también por recomendaciones del fabricante.

#### **5.4.5.7. Check List – Anual (Cada 10080 horas).**

La siguiente lista de chequeo se realizará cada 420 días; cuando se esté llevando a cabo el Check List de las 840 horas. Todo esto por temas de costo, recomendaciones de mantenedores y fabricante.

Todas las actividades de esta lista de chequeo implican la detención del equipo.

##### **1. Sistema Manto Cilíndrico.**

- ✓ Cambio de lifters.
- ✓ Cambio de corazas.
- ✓ Cambio de revestimientos a tapa de registro.
- ✓ Cambio de anillos periféricos.

Cabe destacar que la realización de este Check List es sumamente importante, debido a que el buen funcionamiento de los modos correctivos críticos depende, en gran parte, del buen funcionamiento de los componentes que se encuentran dentro del molino de bolas.

#### **5.4.6. Reporte de Fallas.**

En el siguiente apartado, debido a la precaria información entregada en la hoja de vida del molino de Minera Las Cenizas, como parte del plan de mantenimiento preventivo propuesto, se recomienda realizar una hoja de reporte de fallas; la cual pueda aplicarse a los distintos sistemas del Molino de Bolas G y, además, sea extrapolable a todos los equipos de la Compañía. El objetivo es poder llevar un registro, identificar la causa raíz de las fallas, que sirva para poder modelar el comportamiento de los distintos componentes de una forma mucho más fiel y, como se trata de un proceso iterativo, mejorar a mediano y largo plazo el plan de mantenimiento preventivo junto con la reducción de los CGM.

Para cumplir lo anteriormente expuesto, es de vital importancia que el reporte de fallas abarque la siguiente información:

- Hora en que ocurre la falla.
- Hora en que se detiene el equipo.
- Identificación del componente que presenta la falla.
- Causa que provocó la falla.
- Solución correctiva al problema.
- Hora en que se reparó el componente.
- Hora de la puesta en marcha.

El detalle de la hoja de Reporte de Fallas se encuentra en el Anexo G.

#### **5.4.7. Check List de Mantenimiento para los Modos Correctivos Críticos.**

En este apartado se desarrollarán listas de chequeo para la ejecución de actividades de mantención relacionadas a los modos correctivos críticos, las cuales servirán a los administradores y mecánicos como una guía de secuencia lógica de montaje/desmontaje.

Por otra parte, se propone a futuro, la construcción de árboles de mantenimiento junto con la ejecución de la planificación PERT – CPM, la cual ayudará a planificar y controlar las actividades relacionadas al mantenimiento; a fin de obtener la ruta crítica que minimizará el tiempo de trabajo y los CGM.

A continuación, se presentan las listas de chequeos de mantenimiento para los modos correctivos críticos.

#### **5.4.7.1. Check List de Mantenimiento Piñón.**

##### **Primer Check List: Verificación de estado del piñón.**

1. Detener molino de bolas.
2. Con la utilización del inching drive verificar estado del piñón (diente a diente), en caso de que se encuentre en buen estado, poner en marcha el equipo nuevamente. De lo contrario continuar con la lista de chequeo.

##### **Segundo Check List: Estado de piñón es deficiente.**

3. Desconectar placa de inyectores, revisar estado y limpiar.
4. Sacar pernos de unión protección piñón – corona (revisar estado en que se encuentran y cambiar de ser necesario) y desmontar protección.
5. Sacar pernos de fijación de las tapas obturadoras de los descansos del contraeje; revisar estado en que se encuentran y cambiar de ser necesario.
6. Sacar pernos de fijación de la tapa superior de los descansos del contraeje; revisar estado en que se encuentran.
7. Desmontar del contraeje el acople del inching – drive; revisar chavetero del cubo.
8. Revisar chaveta y chavetero del contraeje lado del inching – drive.
9. Desmontar el embrague del contraeje; revisar chavetero del cubo.
10. Revisar chaveta y chavetero del contraeje lado del embrague.
11. Sacar pernos de anclaje de los descansos del contraeje; revisar estado en que se encuentran y cambiar de ser necesario.
12. Con utilización de eslingas y grúa telescópica, desplazar contraeje y descansos alejándolos de la corona, para poder llevar el conjunto a zonas aptas para realizar desmontaje.
13. Desmontaje en caliente de piñón del contraeje.

14. Revisar chaveta y chavetero del contraeje zona piñón.
15. Inspeccionar estado de contraeje (deflexión, rotura, fisuras, etc.), en caso de que exista un repuesto en stock, utilizarlo para la instalación; sino fabricar uno nuevo.
16. Inspeccionar estado de descansos y rodamientos (deformación, agripamiento, rotura, juego radial, juego axial, etc.), en caso de ser necesario; reemplazar componente.

**Tercer Check List: Montaje de nuevo piñón.**

17. Montar chaveta y piñón en contraeje después de haber revisado las tolerancias de ajuste.
18. Montar rodamientos en los descansos del contraeje y lubricar.
19. Montar conjunto contraeje – piñón en los rodamientos de los descansos.
20. Instalar pernos de anclaje de los descansos del contraeje.
21. Instalar tapa superior de los descansos del contraeje y apernar.
22. Instalar las tapas obturadoras de los descansos del contraeje y apernar.
23. Desplazar conjunto contraeje – piñón a la corona mediante eslingas y grúa telescópica, realizar ajuste e inspeccionar alineamiento estático entre engranajes (Contacto, Raíz, Backlash).
24. Instalar chaveta y contraeje al embrague.
25. Instalar chaveta y acople del inching drive al contraeje.
26. Revisar alineamiento entre inching – drive, contraeje y embrague; de ser necesario ajustar nuevamente.
27. Instalar protección del piñón – corona y apernar.
28. Montar placa de inyectores en la protección y soldar.
29. Probar montaje con el inching – drive en vacío.

#### **5.4.7.2. Check List de Mantenimiento Descanso Alimentación.**

##### **Primer Check List: Primera verificación de estado muñón, descanso y alojamiento.**

1. Revisar estado de los componentes y operación (muñón y cojinete) a través de la ventanilla de inspección, en caso de que todo se encuentre en orden el equipo continúa operando y no se procede con el chequeo de la lista. De lo contrario continuar en el paso 2.
2. En caso de que se registre alguna anomalía (viruta de metal blanco y mucha suciedad) se procede a detener el molino de bolas. Continuar con 2do Check List.

##### **Segundo Check List: Desmontaje de tapa superior descanso.**

3. Sacar pernos de fijación del sello estático; revisar estado en que se encuentran.
4. Sacar sello estático y revisar su estado.
5. Desinstalar piping lubricación del descanso; luego revisar y limpiar junto a las boquillas de lubricación.
6. Sacar pernos de unión de la tapa superior del descanso; revisar estado en el que se encuentran.
7. Desmontar tapa superior del descanso. Continuar con 3er Check List

##### **Tercer Check List: Segunda verificación de estado muñón, descanso y alojamiento.**

8. Revisar estado de muñón (desgaste, fisuras, fusión, etc.) y estado del descanso (cojinete de deslizamiento hidrostático). En caso de que ambos componentes se encuentren en mal estado, se procede al 4to Check List. De lo contrario se continua al paso 9.
9. En caso de que el muñón se encuentre en estado deficiente, se procede al 5to Check List. De lo contrario se continua al paso 10.



10. En caso de que el descanso (cojinete de deslizamiento hidrostático) se encuentre en mal estado, se procede al 6to Check List. De lo contrario no se continúa con la lista de chequeo; se procede a instalar todo el conjunto y a poner en marcha el equipo.

**Cuarto Check List: Estado del muñón y descanso son deficientes.**

11. Se procede con el desmontaje del muñón y el descanso; mencionados en los Check List Quinto y Sexto, respectivamente.
12. Para montar el nuevo descanso el molino debe estar izado desde la parte de alimentación, para tener holgura suficiente en la instalación.
13. Montaje nuevo muñón (adosado a tapa de alimentación) junto con el sello dinámico.
14. Apernar tapa de alimentación e instalar revestimientos.
15. Instalar tapa superior del descanso junto con el sello estático.
16. Conectar piping de lubricación.
17. Instalar spout/boquilla de alimentación a estanque de alimentación.
18. Desplazar estanque de alimentación para montar spout dentro de trunnion linner (pertenece a la tapa de alimentación).
19. Se procede a probar equipo en vacío con el inching – drive.

**Quinto Check List: Estado de muñón deficiente.**

20. Desplazar estanque de alimentación.
21. Sacar pernos de unión del Spout/boquilla de alimentación y luego desmontar.
22. Sacar pernos de fijación del sello dinámico; revisar estado en que se encuentran.
23. Desmontar sello dinámico; revisar su estado.
24. Retiro de bolas de acero dentro del molino; realizar limpieza interna y drenar.

25. Sacar pernos de la tapa de alimentación, sacar pernos de fijación de revestimientos y desinstalar revestimientos.
26. Desmontar muñón de alimentación junto con la tapa de alimentación, luego rectificar muñón y de ser necesario reemplazar por uno nuevo.
27. Limpiar área de alojamiento.
28. Montar nuevamente el muñón (el cual se encuentra adosado a la tapa de alimentación) junto con todo el conjunto restante; se procede a probar equipo en vacío con el inching – drive.

**Sexto Check List: Estado del descanso deficiente.**

29. Desplazar estanque de alimentación.
30. Se procede a izar el molino desde la parte de alimentación, con el fin de dar la holgura suficiente para desmontar descanso.
31. Desmontar descanso (cojinete de deslizamiento hidrostático).
32. Limpiar área de alojamiento.
33. Para el montaje del nuevo descanso el molino debe estar izado desde la parte de alimentación.
34. Instalar tapa superior del descanso junto con el sello estático.
35. Conectar piping de lubricación.
36. Instalar spout/boquilla de alimentación a estanque.
37. Desplazar estanque para montar spout dentro de trunnion liner (perteneciente a la tapa de alimentación).
38. Se procede a probar equipo en vacío con el inching – drive.

### **5.4.7.3. Check List de Mantenimiento Descanso Descarga.**

#### **Primer Check List: Primera verificación de estado muñón, descanso y alojamiento.**

1. Revisar estado de los componentes y operación (muñón y cojinete) a través de la ventanilla de inspección, en caso de que todo se encuentre en orden el equipo continúa operando y no se procede con el chequeo de la lista. De lo contrario continuar en el paso 2.
2. En caso de que se registre alguna anomalía (viruta de metal blanco y mucha suciedad) se procede a detener el molino de bolas. Continuar con 2do Check List.

#### **Segundo Check List: Desmontaje de tapa superior descanso.**

3. Sacar pernos de fijación del sello estático y revisar estado en que se encuentran.
4. Sacar sello estático y revisar su estado.
5. Desinstalar piping lubricación del descanso; luego revisar y limpiar junto a las boquillas de lubricación.
6. Sacar pernos de unión de la tapa superior del descanso; revisar estado en el que se encuentran.
7. Desmontar tapa superior del descanso. Continuar con 3er Check List

#### **Tercer Check List: Segunda verificación de estado muñón, descanso y alojamiento.**

8. Revisar estado de muñón (desgaste, fisuras, fusión, etc.) y estado del descanso (cojinete de deslizamiento hidrostático). En caso de que ambos componentes se encuentren en mal estado, se procede al 4to Check List; de lo contrario se continua al paso 9.
9. En caso de que el muñón se encuentre en estado deficiente, se procede al 5to Check List. De lo contrario se continua al paso 10.

10. En caso de que el descanso (cojinete de deslizamiento hidrostático), se procede al 6to Check List. De lo contrario no se continúa con la lista de chequeo; se procede a instalar todo el conjunto y poner en marcha el equipo.

**Cuarto Check List: Estado del muñón y descanso son deficientes.**

11. Se procede con el desmontaje del muñón y el descanso; mencionados en los Check List 4to y 5to, respectivamente.
12. Para montar el nuevo descanso el molino debe estar izado desde la parte de descarga, para tener holgura suficiente en la instalación.
13. Montaje nuevo muñón (adosado a la tapa de descarga) junto con el sello dinámico.
14. Apernar tapa de descarga e instalar revestimientos.
15. Instalar tapa superior del descanso junto con el sello estático.
16. Conectar piping de lubricación.
17. Se procede a probar equipo en vacío con el inching – drive.

**Quinto Check List: Estado de muñón deficiente.**

18. Sacar pernos de fijación del sello dinámico; revisar estado en que se encuentran.
19. Desmontar sello dinámico; revisar su estado.
20. Retiro de bolas de acero dentro del molino; realizar limpieza interna y drenar.
21. Sacar pernos de la tapa de descarga, sacar pernos de fijación de revestimientos y desinstalar.
22. Desmontar muñón de descarga junto con la tapa de descarga, luego rectificar muñón o de ser necesario reemplazar por uno nuevo.
23. Limpiar área de alojamiento.

24. Montar nuevamente el muñón (el cual se encuentra adosado a la tapa de descarga) junto con todo el conjunto restante; se procede a probar equipo en vacío con inching – drive.

**Sexto Check List: Estado del descanso deficiente.**

25. Se procede a izar el molino desde la parte de descarga, con el fin de dar la holgura suficiente como para desmontar descanso.

26. Desmontar descanso (cojinete de deslizamiento hidrostático).

27. Limpiar área de alojamiento.

28. Para el montaje del nuevo descanso el molino debe estar izado desde la parte de descarga.

29. Instalar tapa superior del descanso junto con el sello estático.

30. Conectar piping de lubricación.

31. Se procede a probar equipo en vacío con el inching – drive.

#### **5.4.7.4. Check List de Mantenimiento Bomba de Lubricación.**

##### **Primer Check List: Verificación estado bomba lubricación.**

1. Se verifica estado de la bomba de lubricación, en caso de estar en buenas condiciones no se continúa con la lista de chequeo. De lo contrario se continúa con el 2do Check List.

##### **Segundo Check List: Estado de la bomba lubricación es deficiente.**

2. Detener molino.
  3. Poner en marcha la bomba en stand – by.
  4. Poner en marcha el molino.
  5. Sacar pernos de fijación de la bomba que se va a cambiar.
  6. Desinstalar conexiones de piping, revisar y limpiarlas.
  7. Desinstalar conexiones eléctricas.
  8. Desmontar motor y bomba y luego desacoplar.
  9. Instalar tapa de sellado al estanque de lubricación para evitar ingreso de partículas.
  10. Inspeccionar motor y bomba lubricación.
- *En caso de que la bomba de lubricación se encuentre en buen estado, se debe montar nuevamente. No se continúa con la lista de chequeo. De lo contrario continuar con 3er Check List.*

##### **Tercer Check List: Montaje de la nueva bomba lubricación.**

11. Acoplar nueva bomba a motor.
12. Desinstalar tapa de sellado.
13. Apernar conjunto moto-bomba al estanque de lubricación.
14. Instalar piping y conexiones eléctricas al conjunto.

#### **5.4.7.5. Check List de Mantenimiento Bomba Levante.**

##### **Primer Check List: Verificación estado bomba levante.**

1. Se verifica estado de la bomba de levante, en caso de estar en buenas condiciones no se continúa con la lista de chequeo. De lo contrario se continúa con el segundo Check List.

##### **Segundo Check List: Estado de la bomba levante es deficiente.**

2. Detener molino.
  3. Poner en marcha la bomba en stand – by.
  4. Poner en marcha molino.
  5. Sacar pernos de fijación de la bomba.
  6. Desinstalar conexiones de piping, revisar y limpiarlas.
  7. Desinstalar conexiones eléctricas.
  8. Desmontar motor y bomba.
  9. Instalar tapa de sellado al estanque de lubricación para evitar ingreso de partículas.
  10. Inspeccionar motor y bomba de levante.
- *En caso de que la bomba de levante se encuentre en buen estado, se debe montar nuevamente. No se continúa con la lista de chequeo. De lo contrario continuar con 3er Check List.*

##### **Tercer Check List: Montaje de la nueva bomba levante.**

11. Acoplar nueva bomba a motor.
12. Desinstalar tapa de sellado.
13. Apernar conjunto moto-bomba al estanque de lubricación.
14. Instalar piping y conexiones eléctricas al conjunto.

#### **5.4.7.6. Check List de Mantenimiento Parrillas Descarga.**

##### **Primer Check List: Verificación estado parrillas descarga, tapa central.**

1. Evacuar la carga de mineral del interior.
2. Detener molino de bolas.
3. Lavado y drenaje del molino de bolas.
4. Inspeccionar estado de la tapa central (desgaste, rotura, etc.).
5. Inspeccionar estado de las parrillas de descarga (slot, desgaste, rotura, etc.).
6. En el caso de que el estado de parrillas descarga sea deficiente, continuar con 2do Check List. De lo contrario continuar con paso 7.
7. En el caso de que la tapa central se encuentre en mal estado, continuar con 3er Check List. De lo contrario continuar con paso 8.
8. En el caso de que el estado de parrillas descarga y tapa central sea bueno, continuar con 4to Check List.

##### **Segundo Check List: Estado de parrillas descarga deficiente.**

9. En caso de que solo se deban limpiar las parrillas descarga pues se encuentran tapadas, se procede con el 4to Check List. De lo contrario se continúa con la lista de chequeo en el paso 10.
10. Desmontar anillo periférico y revisar estado en que se encuentran; de ser necesario reemplazar.
11. Desmontar tapa central.
12. Sacar pernos de fijación de revestimientos locales del manto cilíndrico y revisar estado en que se encuentran; reemplazar de ser necesario.



13. Desmontar revestimientos locales del manto cilíndrico y revisar estado en el que se encuentran; reemplazar de ser necesario.
14. Sacar pernos de fijación de las parrillas de descarga y desmontar.
15. Inspeccionar estado de cajones de descarga (desgaste, rotura, etc.).
16. En caso de que los cajones de descarga se encuentren en buen estado se procede al montaje de todo el conjunto con las nuevas parrillas de descarga, se continúa en paso 17. De lo contrario se procede con el 5to Check List.
17. En caso haber inspeccionado solo la primera mitad de los revestimientos, se procede al paso 18. De lo contrario se procede a poner en marcha el equipo.
18. Girar molino de bolas con inching – drive a la otra mitad y realizar el mismo proceso desde el paso 5 en adelante.

**Tercer Check List: Estado de tapa central deficiente.**

19. Desmontar anillo periférico y revisar estado en que se encuentran, de ser necesario reemplazar.
20. Desmontar tapa central.
21. Sacar pernos de fijación de revestimientos locales del manto cilíndrico y revisar estado en el que se encuentran, reemplazar de ser necesario.
22. Desmontar revestimientos locales del manto cilíndrico y revisar estado en el que se encuentran, reemplazar de ser necesario.
23. Sacar pernos de fijación de las parrillas de descarga y revisar estado en el que se encuentran.
24. Desmontar parrillas de descarga (en buen estado, serán reutilizadas).
25. Inspeccionar estado de cajones de descarga (desgaste, rotura, etc.).

26. En caso de que cajones de descarga se encuentren en buen estado se procede al montaje de todo el conjunto junto con la nueva tapa central y se continúa con el paso 27. De lo contrario se procede con el Quinto Check List.
27. En caso haber inspeccionado solo la primera mitad de los cajones de descarga, se procede al paso 28. De lo contrario se procede a poner en marcha el equipo.
28. Girar molino de bolas con inching – drive a la otra mitad y realizar el mismo proceso desde el paso 5 en adelante.

#### **Cuarto Check List: Verificación estado cajones descarga.**

29. Se desmontan anillos periféricos, parrillas descargas y tapa central.
30. Inspeccionar estado de cajones de descarga (desgaste, rotura, etc.).
31. En caso de que cajones de descarga se encuentren en mal estado se continua con 5to Check List. De lo contrario se procede al montaje de todo el conjunto.
32. En caso haber inspeccionado solo la primera mitad de los revestimientos, se procede al paso 33. De lo contrario se procede a poner en marcha el equipo.
33. Girar molino de bolas con inching – drive a la otra mitad y realizar el mismo proceso desde el paso 5 en adelante.

#### **Quinto Check List: Montaje de Cajones Descarga.**

34. Desmontar cajones en mal estado.
35. Instalar cajones de descarga nuevos, parrillas de descarga y apernar.
36. Instalar revestimientos locales de manto cilíndrico y apernar.
37. Instalar anillos periféricos.
38. Instalar tapa central de descarga.

39. En caso haber inspeccionado solo la primera mitad de los revestimientos, se procede al paso 40. De lo contrario se procede a poner en marcha el equipo.
40. Girar molino de bolas con inching – drive a la otra mitad y realizar el mismo proceso desde el paso 5 en adelante.

## Capítulo VI: Plan de Repuestos

### 6.1. Introducción.

En el capítulo IV se mencionó que la bodega de CMCN no se encargaba de almacenar repuestos, sino de gestionar la compra y distribuir los componentes inmediatamente llegan a la empresa. Además, quedó en evidencia que uno de los factores que más alza generaba en el CGM, después de ocurrida una falla, era precisamente el no tener repuestos almacenados en bodega; dado que los tiempos muertos generados por la espera de estos, terminaban aumentando el costo de falla drásticamente. Entonces, en este capítulo se evaluará la utilización de un modelo que optimice la gestión de los repuestos del departamento de mantención, a través de la minimización del costo global con el costo de falla.

Para el desarrollo del modelo deberán considerarse los siguientes parámetros:

- Costo de falla.
- Precio del repuesto.
- Tasa de interés.
- Costo de adquisición del repuesto.
- Tasa de demanda del repuesto.

Es importante mencionar que, de los parámetros mencionados, el costo de falla y la tasa de interés tendrán los mismos valores para cualquier modo correctivo. Entonces, el costo de falla será:

$$C_{falla} = 1,862 \left[ \frac{KUSD}{hr} \right]$$

Y la tasa de interés

$$i_{anual} = 15\% \leftrightarrow i_{mensual} = 1,2\%$$

## 6.2. Alcances.

El modelo de gestión de repuestos será aplicado solamente a los modos correctivos críticos. Por otro lado, la tasa de demanda de repuestos, independiente de la confiabilidad que tengan en ese punto, se considerará como,

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \left[ \frac{1}{\text{unidad de tiempo}} \right]$$

- MTBF correspondiente a cada modo correctivo crítico.

Dependiendo de los resultados, a futuro, se propone analizar detalladamente caso a caso.

## 6.3. Plan de Repuestos.

A continuación, se aplicará el modelo mencionado para cada uno de los modos correctivos.

### 6.3.1. Cambio Piñón.

Los parámetros a considerar de este repuesto se muestran en la Tabla 75.

Parámetros de Gestión		
Precio repuesto	31,3	[KUSD]
Costo adquisición	16,2	[KUSD]
Tasa demanda	0,05	[1/mes]

Tabla 75: Parámetros de Gestión de Repuestos  
Modo Correctivo Cambio Piñón – Fuente: Propia.

Según esto, tenemos que el nivel de servicio  $\bar{\alpha}$  es el siguiente,

$$\bar{\alpha} = \frac{C_{falla}}{C_{falla} + P_u \cdot \iota} = 0,831[-]$$

Entonces, la cantidad óptima a pedir es,

$$q^* = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot Cad}{\bar{\alpha} \cdot P_u \cdot \iota}} = 2,3 \cong 2$$

Cantidad con la cual se logra obtener el mínimo costo global del repuesto,

$$C_{gr} = 2,27 \left[ \frac{KUSD}{mes} \right]$$

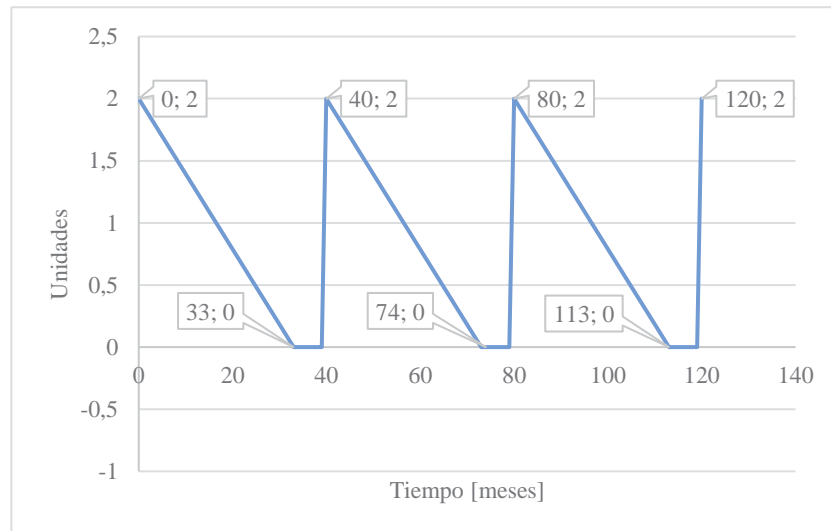
A continuación, en la Tabla 76 se muestran los tiempos correspondientes al modo correctivo,

	<i>Tiempo (meses)</i>	
Tiempo entre pedidos	T	40
Tiempo disponible	To	33
Tiempo no disponible	Tr	7

**Tabla 76: Tiempos Modo Correctivo  
Cambio Piñón – Fuente: Propia.**

Entonces, tomando en cuenta el tiempo T entre pedidos, el  $C_{gr}$  nos da un valor de 91 [KUSD]; el cual representa el costo total del repuesto a los 40 meses.

En la Figura 66 se muestra el modelo de la dinámica de pedidos perteneciente al modo correctivo crítico Cambio Piñón,



**Figura 66: Dinámica de Pedidos Modo Correctivo  
Cambio Piñón – Fuente: Propia.**

**Consideraciones:**

- Se ha considerado constante el tiempo de llegada del componente.
- Los componentes solicitados en el instante  $T_r$  son utilizados tan pronto llegan a la empresa, en el instante  $T$ .

**Análisis de Resultados:**

Si consideramos el  $MTBF = 14955 [hr] \cong 20,7[meses]$  y el tiempo entre pedidos  $T$  que corresponde a  $40 [meses]$ , se puede apreciar que al momento en que probablemente ocurra una falla del componente o bien este deba cambiarse por temas de confiabilidad, la empresa contará con 2 repuestos para realizar el cambio de forma inmediata, evitando tiempos muertos generados por la gestión de compra y disminuyendo el CGM.

Por otro lado, se disponen de 7 meses para gestionar la nueva compra de componentes, holgura suficiente como para evitar el costo de urgencia.

### 6.3.2. Cambio Descansos Molino Alimentación – Descarga.

Los parámetros a considerar de este repuesto se muestran en la Tabla 77.

Parámetros de Gestión		
Precio repuesto	44	[KUSD]
Costo adquisición	21,9	[KUSD]
Tasa demanda	0,046	[1/mes]

**Tabla 77: Parámetros de Gestión de Repuestos Modo Correctivo Cambio Descansos Molino – Fuente: Propia.**

Según esto, tenemos que el nivel de servicio  $\bar{\alpha}$  es el siguiente,

$$\bar{\alpha} = \frac{C_{falla}}{C_{falla} + P_u \cdot t} = 0,777[-]$$

Entonces, la cantidad óptima a pedir es,

$$q^* = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot Cad}{\bar{\alpha} \cdot P_u \cdot t}} = 2,24 \cong 2$$

Cantidad con la cual se obtiene el mínimo costo global del repuesto,

$$C_{gr} = 2,92 \left[ \frac{KUSD}{mes} \right]$$

A continuación, en la Tabla 78 se muestran los tiempos correspondientes al modo correctivo,

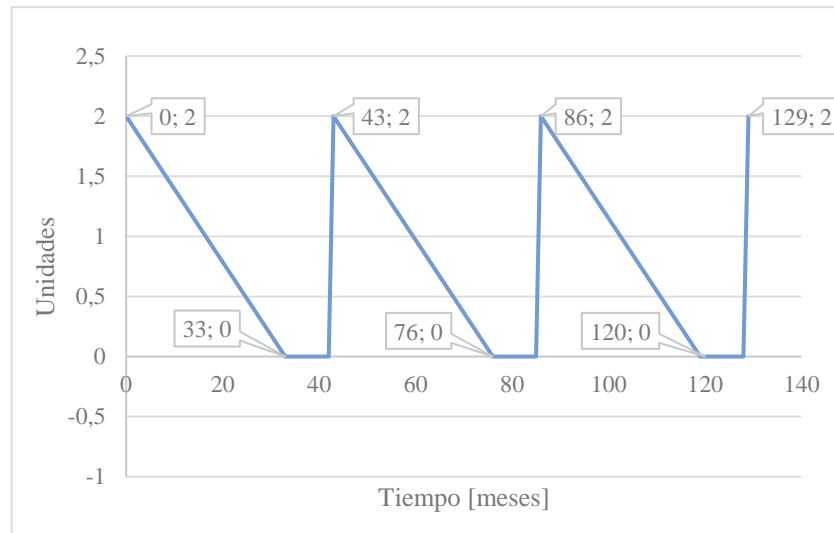
Tiempo (meses)		
Tiempo entre pedidos	T	43
Tiempo disponible	To	33
Tiempo no disponible	Tr	10

**Tabla 78: Tiempos Modo Correctivo Cambio Descansos Molino – Fuente: Propia.**



Entonces, tomando en cuenta el tiempo T entre pedidos, el  $C_{gr}$  nos da un valor de 127 [KUSD]; el cual representa el costo total del repuesto a los 43 meses.

En la Figura 67 se muestra el modelo de la dinámica de pedidos perteneciente al modo correctivo crítico Cambio Descansos Alimentación – Descarga,



**Figura 67: Dinámica de Pedidos Modo Correctivo Cambio Descansos Molino – Fuente: Propia.**

**Consideraciones:**

- Se ha considerado constante el tiempo de llegada del componente.
- Los componentes solicitados en el instante  $T_r$  son utilizados tan pronto llegan a la empresa, en el instante  $T$ .

**Análisis de Resultados:**

Si consideramos el  $MTBF = 16985 [hr] \cong 24[meses]$  y el tiempo entre pedidos  $T$  que corresponde a 43 [meses], se puede apreciar que al momento en que posiblemente ocurra una falla del componente, la empresa contará con 2 repuestos para realizar el cambio de forma inmediata, evitando tiempos muertos generados por la gestión de compra junto con la minimización del CGM.

Por otro lado, podemos ver que se disponen de 10 meses para gestionar la nueva compra de componentes, holgura suficiente como para evitar el costo de urgencia al pedir el componente.

Sin embargo, a pesar de que los resultados obtenidos son positivos en relación a tiempos y costos, no son favorables en relación a la vida esperada que deben tener los descansos del molino. Entonces, eventualmente, el caso deberá evaluarse con más detalle, pues los resultados obtenidos posiblemente se deban a la ínfima cantidad de datos del modo correctivo, por lo que el modelamiento no se pudo realizar de forma representativa.

### 6.3.3. Cambio Bomba Lubricación.

Los parámetros a considerar de este repuesto se muestran en la Tabla 79.

Parámetros de Gestión		
Precio repuesto	1,6	[KUSD]
Costo adquisición	0,2	[KUSD]
Tasa demanda	0,1	[1/mes]

**Tabla 79: Parámetros de Gestión de Repuestos Modo Correctivo  
Cambio Bomba Lubricación – Fuente: Propia.**

Según esto, tenemos que el nivel de servicio  $\bar{\alpha}$  es el siguiente,

$$\bar{\alpha} = \frac{C_{falla}}{C_{falla} + P_u \cdot \iota} = 0,9896[-]$$

Entonces, la cantidad óptima a pedir es,

$$q^* = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot Cad}{\bar{\alpha} \cdot P_u \cdot \iota}} = 1,5 \cong 2$$

Cantidad con la cual se obtiene el mínimo costo global del repuesto,

$$C_{gr} = 0,1885 \left[ \frac{KUSD}{mes} \right]$$

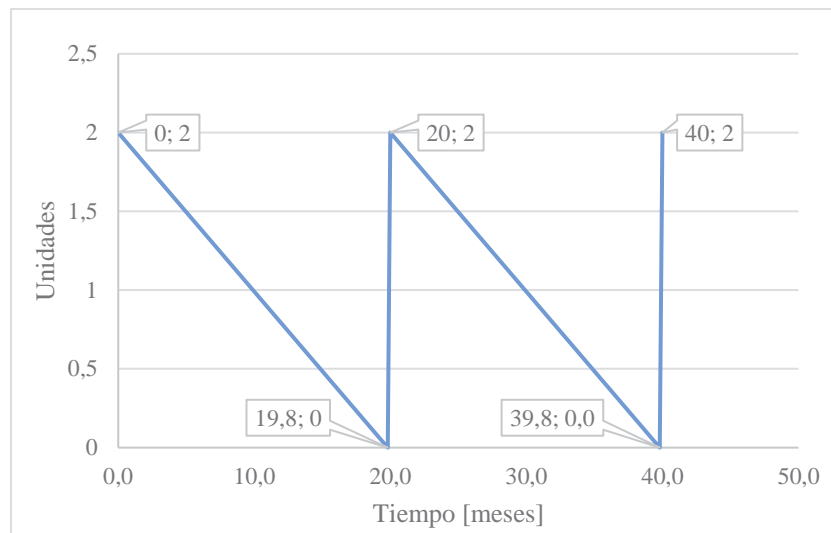
A continuación, en la Tabla 80 se muestran los tiempos correspondientes al modo correctivo,

<i>Tiempo (meses)</i>		
Tiempo entre pedidos	T	20
Tiempo disponible	To	19,8
Tiempo no disponible	Tr	0,2

**Tabla 80: Tiempos Modo Correctivo  
Cambio Bomba Lubricación – Fuente: Propia.**

Ahora, tomando en cuenta el tiempo T entre pedidos, el  $C_{gr}$  nos da un valor de 3,77 [KUSD]; el cual representa el costo total del repuesto a los 20 meses.

En la Figura 68 se muestra el modelo de la dinámica de pedidos perteneciente al modo correctivo crítico Cambio Bomba Lubricación,



**Figura 68: Dinámica de Pedidos Modo Correctivo Cambio Bomba Lubricación – Fuente: Propia.**

### **Consideraciones:**

- Se ha considerado constante el tiempo de llegada del componente.
- Los componentes solicitados en el instante  $T_r$  son utilizados tan pronto llegan a la empresa, en el instante  $T$ .

### **Análisis de Resultados:**

Si consideramos el  $MTBF = 6700 [hr] \cong 9 [meses]$  y el tiempo entre pedidos  $T$  que corresponde aproximadamente a  $20 [meses]$ , podemos ver que la empresa contará con dos componentes para realizar el cambio inmediato, evitando tiempos muertos generados por la gestión de compra y disminuyendo el CGM.

De la Tabla 80 vemos que se disponen de  $0,2 [meses] \cong 6 [días]$ , para gestionar la nueva compra de componentes y que estos lleguen a la empresa, por otro lado, como se mencionaba en el capítulo IV, las órdenes de compra de carácter normal demoran aproximadamente 15 días en aprobarse; por lo que estaríamos fuera del plazo estipulado. En este caso, la orden de compra debiese tener carácter de urgencia, sin embargo, en caso de que ocurra cualquier imprevisto, igualmente nos saldríamos del plazo estipulado. Entonces, para evitar cualquier percance, debiese evaluarse el tiempo en que se ejecuta la gestión de compra.

### 6.3.4. Cambio Bomba Levante.

Los parámetros a considerar de este repuesto se muestran en la Tabla 81.

Parámetros de Gestión		
Precio repuesto	1,4	[KUSD]
Costo adquisición	0,2	[KUSD]
Tasa demanda	0,1	[1/mes]

**Tabla 81: Parámetros de Gestión de Repuestos Modo Correctivo  
Cambio Bomba Levante – Fuente: Propia.**

Según esto, tenemos que el nivel de servicio  $\bar{\alpha}$  es el siguiente,

$$\bar{\alpha} = \frac{C_{falla}}{C_{falla} + P_u \cdot t} = 0,991[-]$$

Entonces, la cantidad óptima a pedir es,

$$q^* = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot Cad}{\bar{\alpha} \cdot P_u \cdot t}} = 1,56 \cong 2$$

Cantidad con la cual se logra obtener el mínimo costo global del repuesto,

$$C_{gr} = 0,166 \left[ \frac{KUSD}{mes} \right]$$

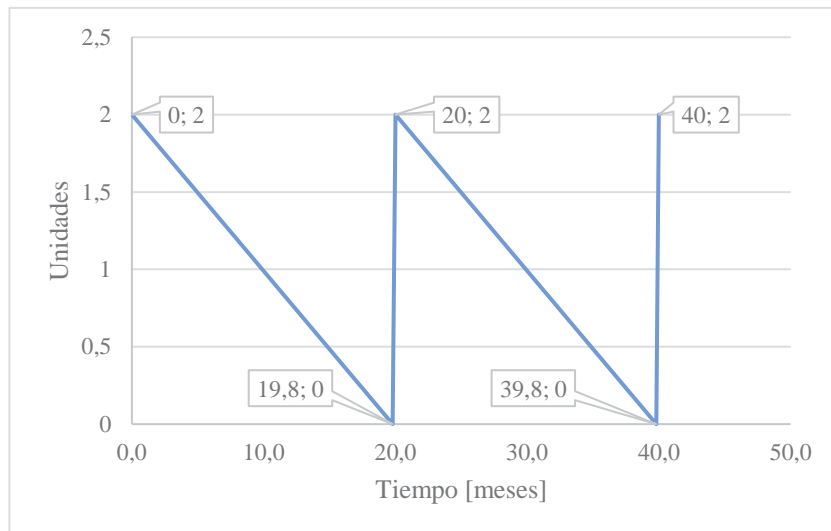
A continuación, en la Tabla 82 se muestran los tiempos correspondientes al modo correctivo,

<i>Tiempo (meses)</i>		
Tiempo entre pedidos	T	20
Tiempo disponible	To	19,8
Tiempo no disponible	Tr	0,2

**Tabla 82: Tiempos Modo Correctivo  
Cambio Bomba Levante – Fuente: Propia.**

Ahora, tomando en cuenta el tiempo T entre pedidos, el  $C_{gr}$  nos da un valor de 3,33 [KUSD]; el cual representa el costo total del repuesto a los 20 meses.

En la Figura 69 se muestra el modelo de la dinámica de pedidos del modo correctivo crítico Cambio Bomba Levante,



**Figura 69: Dinámica de Pedidos Modo Correctivo Cambio Bomba Levante – Fuente: Propia.**

**Consideraciones:**

- Se ha considerado constante el tiempo de llegada del componente.
- Los componentes solicitados en el instante  $T_r$  son utilizados tan pronto llegan a la empresa, en el instante  $T$ .

**Análisis de Resultados:**

Si consideramos el  $MTBF = 7482 [hr] \cong 10 [meses]$ , y el tiempo entre pedidos  $T$  que corresponde a  $20 [meses]$ , podemos ver que al momento en que posiblemente ocurra una falla la empresa contará con dos componente para realizar el cambio de forma inmediata, por lo que esta condición evitaría tiempos muertos generados por la gestión de compra y disminuiría el CGM.

De la Tabla 82 vemos que se disponen de  $0,2 [meses] \cong 6 [días]$ , para gestionar la nueva compra de componentes y que estos lleguen a la empresa, por otro lado, como se mencionaba en el capítulo IV, las órdenes de compra de carácter normal demoran aproximadamente 15 días en aprobarse; por lo que estaríamos fuera del plazo estipulado. En este caso, la orden de compra debiese tener carácter de urgencia, sin embargo, en caso de que ocurra cualquier imprevisto, igualmente nos saldríamos del plazo estipulado. Entonces, para evitar cualquier percance, debiese evaluarse el tiempo en que se ejecuta la gestión de compra.



### 6.3.5. Cambio Parrillas Descarga.

Los parámetros a considerar de este repuesto se muestran en la Tabla 83.

Parámetros de Gestión		
Precio repuesto	4	[KUSD]
Costo adquisición	0,2	[KUSD]
Tasa demanda	0,05	[1/mes]

**Tabla 83: Parámetros de Gestión de Repuestos Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga – Fuente: Propia.**

Según esto, tenemos que el nivel de servicio  $\bar{\alpha}$  es el siguiente,

$$\bar{\alpha} = \frac{C_{falla}}{C_{falla} + P_u \cdot \iota} = 0,975[-]$$

Por lo tanto, tenemos que la cantidad óptima a pedir es,

$$q^* = \sqrt{\frac{2 * \lambda * Cad}{\bar{\alpha} * P_u * \iota}} = 0,66 \cong 1$$

Con esta cantidad no se consigue obtener el mínimo costo global del repuesto, sino con una inferior. Sin embargo, se trabajará con  $q^* \cong 1$ , puesto que CMCN compra el juego de parrillas completo. Entonces,

$$C_{gr} = 0,23 \left[ \frac{KUSD}{mes} \right]$$

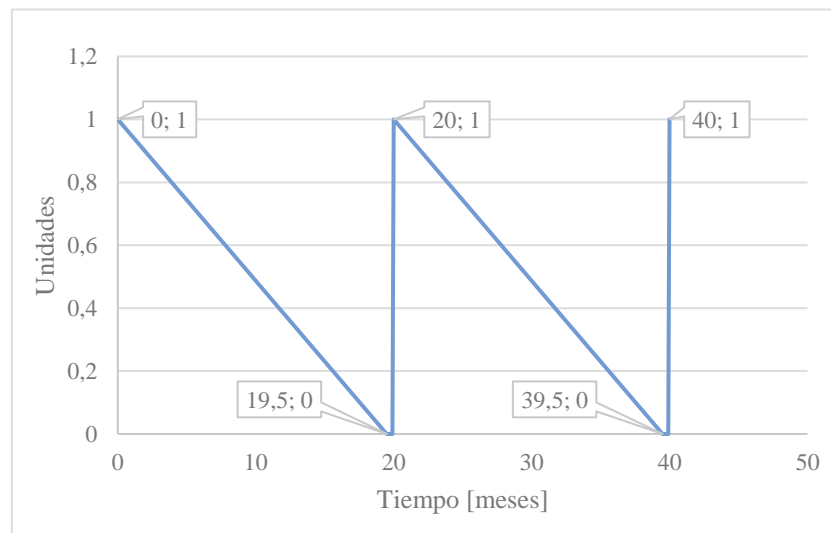
A continuación, en la Tabla 84 se muestran los tiempos correspondientes al modo correctivo,

<i>Tiempo (meses)</i>		
Tiempo entre pedidos	T	20
Tiempo disponible	To	19,5
Tiempo no disponible	Tr	05

**Tabla 84: Tiempos Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga – Fuente: Propia.**

Ahora, tomando en cuenta el tiempo T entre pedidos, el  $C_{gr}$  nos da un valor de 4,65 [KUSD]; el cual representa el costo total del repuesto a los 20 meses.

En la Figura 70 se muestra el modelo de la dinámica de pedidos del modo correctivo crítico Cambio Parrillas Descarga es el siguiente,



**Figura 70: Dinámica de Pedidos Modo Correctivo Cambio Parrillas Descarga – Fuente: Propia.**

### **Consideraciones:**

- Se ha considerado constante el tiempo de llegada del componente.
- Los componentes solicitados en el instante  $T_r$  son utilizados tan pronto llegan a la empresa, en el instante  $T$ .
- 1 repuesto equivale a un juego completo de parrillas de descarga.

### **Análisis de Resultados:**

Si consideramos el  $MTBF = 7000 [hr] \cong 9,7 [meses]$  y el tiempo entre pedidos  $T$  que corresponde aproximadamente a  $20 [meses]$ , podemos ver que al momento en que posiblemente ocurra una falla, la empresa contará con un componente para realizar el cambio inmediato, por lo que esta condición evitaría tiempos muertos generados por la gestión de compra y disminuiría el CGM.

De la Tabla 84 vemos que se disponen de  $0,5 [meses] \cong 15 [días]$ , para gestionar la nueva compra de componentes y que estos lleguen a la empresa, por otro lado, como se mencionaba en el capítulo IV, las órdenes de compra de carácter normal demoran aproximadamente 15 días en aprobarse; por lo que estaríamos en el límite del plazo estipulado. En este caso, la orden de compra debiese tener carácter de urgencia, sin embargo, en caso de que ocurra cualquier imprevisto, igualmente nos saldríamos del plazo estipulado. Entonces, para evitar cualquier percance, debiese evaluarse el tiempo en que se ejecuta la gestión de compra.

## **Capítulo VII: Estudio del Impacto Económico**

### **7.1. Introducción.**

En el presente capítulo se realizará un estudio al impacto económico que generaría en la empresa la aplicación de las actividades propuestas. Para ello se llevará a cabo una comparación de los costos generados por la política actual de mantenimiento versus los costos obtenidos con la aplicación de las actividades propuestas por el plan de mantenimiento, gestión de repuestos y recomendaciones varias. Antes de ejecutar el análisis, los puntos a considerar son los siguientes,

1. Con la aplicación de la frecuencia óptima de inspecciones con detención de equipo a los modos correctivos críticos, se realizará una inspección mensual menos al año.
2. Con la aplicación de las listas de chequeo y el reporte de fallas se espera tener un registro más fidedigno y robusto de los incidentes. Con esto se podrá llevar un mejor control del equipo; se podrá modelar con mayor precisión el comportamiento de los componentes y posteriormente se podrá atacar y prevenir con mayor exactitud las fallas; se asume que el equipo fallará menos debido al control exhaustivo que se llevará a cabo.
3. Con el plan de repuestos, a pesar de que haya una inversión mayor en el momento de la compra, a mediano y largo plazo se minimizarán los costos de gestión y también los tiempos muertos generados por la espera de los componentes.

Entonces, el resultado de los puntos mencionados anteriormente se verá reflejado en una disminución de los CGM, de los costos asociados a las inspecciones con detención de equipo y en el aumento de la producción junto con una constancia y estabilidad en la operación de trabajo.

## 7.2. Impacto Económico.

En el siguiente apartado se llevará a cabo el análisis económico de los costos globales de mantenimiento y los costos de la aplicación de las frecuencias de inspecciones con detención de equipo.

### - Análisis Económico a CGM según Plan de Mantenimiento y Repuestos:

Para poder realizar una comparación entre los costos antes y después de aplicar el plan de mantenimiento y la gestión de repuestos, se tomarán las siguientes consideraciones,

- Ambos análisis se compararán en el mismo horizonte de tiempo, el cual corresponderá al periodo del historial de fallas (5 años).
- Aunque después de aplicar el plan de mantenimiento debiesen disminuir la cantidad de fallas, se considerará la misma ocurrencia de fallas para los modos correctivos críticos, pues no sabemos con certeza en cuanto disminuirá la tasa de falla de cada modo.
- Para las bombas de lubricación y levante, el costo de falla ( $C_{falla}$ ) se consideró cero, pues se toma en cuenta la recomendación de tener bombas en “stand by”, lo que significa que los tiempos de detención serán prácticamente despreciables.
- Con el plan de repuestos, el costo de falla ( $C_{falla}$ ) disminuye, pues ya no habrán tiempos de espera debido a la falta de componentes. Entonces, las horas de detención del equipo corresponderán solo a las horas que tome la reparación.
- El costo de gestión de compra ( $C_{gestión\ compra}$ ) y el costo del repuesto ( $C_{repuesto}$ ) fueron reemplazados por el costo global del repuesto ( $C_{gr}$ ), el cual se obtuvo en el capítulo VI.

A continuación, en la Tabla 85, se muestra la modificación de los CGM producto de la aplicación del plan de mantenimiento y el plan de repuestos.

<i>Costos (KUSD)</i>							
Modo Correctivo	Hrs. Detención	Cant. Fallas	N° Trabaj.	Costo Gestión Repuesto	Costo Inter.	Costo Falla	CGM
Cambio Piñón	36	2	4	91	32,6	67	190,6
Cambio Descansos Alimentación-Descarga	24	2	4	127	44,8	44,7	216,5
Cambio de Parrillas Descarga	11	4	4	14	4,4	20,5	38,9
Cambio Bomba de Lubricación	3	7	4	11,3	1,7	0	13
Cambio Bomba de Levante	3	4	4	10	1,5	0	11,5

**Tabla 85: Análisis de CGM Modificado según Plan de Mantenimiento y Repuestos – Fuente: Propia.**

**- Análisis Económico a Frecuencias Óptima de Inspección con Detención de Equipo:**

Para poder realizar la comparación entre el antes y el después de la aplicación de las frecuencias óptimas, el estudio se realizó en el mismo horizonte de tiempo para ambos casos; equivalente al periodo del historial de fallas (5 años).

A continuación, en la Tabla 86, se presenta una comparación entre los costos asociados a las frecuencias de inspección con detención de equipo.

Modo Correctivo	Antes	Después
	<i>Costos [KUSD]</i>	<i>Costos [KUSD]</i>
Cambio Piñón	73,2	62,54
Cambio Descansos Alimentación-Descarga	73,2	62,54
Cambio de Parrillas Descarga	1,06	0,9
Cambio Bomba de Lubricación	4,5	0,91
Cambio Bomba de Levante	4,5	0,91

**Tabla 86: Comparación entre Frecuencia de Inspecciones con Detención de Equipo – Fuente: Propia.**

- **Resultado Final:**

En la Tabla 87, se presenta un resumen de los costos totales antes y después de la aplicación del plan de mantenimiento y repuestos.

<i>Costos (KUSD)</i>					
	Tipo	Antes	Después	Ahorro	% Ahorro
	CGM Modos Correctivos Críticos	1107	470	637	57,5
	Frecuencia Inspecciones con Detención de Equipo	156	127	29	18,6
	TOTAL	1263	598	666	52,7

**Tabla 87: Resumen de Comparación Costos Totales – Fuente: Propia.**

De la Tabla podemos ver que,

- Debido al plan de mantenimiento y al plan de repuestos que se está proponiendo, el ahorro alcanzado es de 637 [KUSD] en los 5 años, es decir, 127,4 [KUSD/año]. Por lo tanto, se puede apreciar que un plan de repuestos es sumamente vital para lograr la minimización de los CGM, pues se ataca el problema principal, que serían los costos de falla.
- Se puede apreciar que con las frecuencias óptimas de inspecciones con detención de equipo el ahorro alcanzado sería de 29 [KUSD], es decir, 5,8 [KUSD/año].
- Entonces, el ahorro total anual sería de 133,2 [KUSD], aproximadamente 85 millones de pesos chilenos. Los cuales podrían invertirse en la compra de otros repuestos, intervenciones preventivas, e incluso compra de nuevos equipos.

## Capítulo VIII: Conclusión

### 8.1. Resultados.

1. En el desarrollo del presente trabajo de título quedó demostrado que la falta de un plan de mantenimiento, la falta de un plan de repuestos y las recurrentes actividades asociadas a labores correctivas, no representan un escenario favorable para el buen funcionamiento del Molino de Bolas G y la economía de la empresa.
2. El FMECA permite visualizar e identificar modos de falla distintos a los entregados por el historial de fallas, otorgando información sumamente relevante sobre la función de los componentes, modos de falla, efectos y eventuales soluciones.
3. En el desarrollo del análisis de criticidad y el modelo de confiabilidad, era de suma importancia aplicar e interpretar los datos con prudencia, puesto que la hoja de vida del molino presentaba grandes vacíos en la información de las fallas junto con una cantidad de datos muy escasa, entonces, a pesar de obtener valores que se ajustaban a la teoría, es probable que no hayan sido representativos. Por lo tanto, se recomienda imperativamente aplicar las listas de chequeo y reporte de fallas propuestas en el plan de mantenimiento, con el objetivo de comenzar a llevar un registro/historial del equipo que pueda ser utilizado más adelante.
4. Después de haber finalizado el Capítulo IV queda en evidencia que los componentes que más atención hay que prestarles es al Piñón y a los Descansos del Molino Alimentación-Descarga, puesto que, con una falla de estos, el valor del CGM resulta ser altamente crítico para la empresa.



5. Con la propuesta del plan de mantenimiento basado en la condición se espera que, con los hallazgos realizados, la tasa de fallas de los componentes disminuya y la ejecución de actividades preventivas aumente. Dando lugar a una mejora en la disponibilidad de los componentes y, por ende, del equipo.
6. En el estudio del impacto económico se pudo apreciar que la frecuencia óptima de inspecciones no resultó ser tan relevante en cuanto a la minimización de los costos; pero aun así, es de suma importancia llevarlas a cabo, pues son las actividades que sustentan el plan de mantenimiento propuesto. Por otro lado, el plan de repuestos resultó ser uno de los puntos más relevantes respecto a la minimización de los CGM, puesto que ataca los costos provocados por la no producción por falta de un componente (costo de falla); incidente que más tiempos muertos genera en la empresa. Por lo que se recomienda de forma imperativa aplicar el plan de repuestos.
7. Finalmente, la propuesta del plan de mantenimiento y el plan de repuestos debe ser considerada como un plan piloto dentro de Compañía Minera Cerro Negro S.A., el cual irá mejorando con el tiempo en base a la mejor calidad de registros y los resultados obtenidos. La recomendación fundamental se basa, principalmente, en la realización y generación de políticas que permitan el desarrollo de un mantenimiento centrado en la confiabilidad, con la utilización de herramientas de gestión que permitan llevar un control y registro del equipo en base a inspecciones rutinarias; las cuales serán realizadas por el personal mecánico y administrativo de la empresa. Lo ideal sería que se impulse la implementación y seguimiento de este tipo de trabajo, pues los resultados se obtienen a mediano y largo plazo.

## Referencias

- Durán, Orlando. (2018). Ejemplos de Priorización. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Quilpué, Chile.
- Higgins, L. (1994). Maintenance Engineering Handbook.
- Jara, A. (2014). Estudio de Mantenimiento Basado en la Confiabilidad Acodado al Sistema Asset Management Aplicado a la Flota de Bulldozer CAT D10T, Minera Anglo American Operación Mantoverde (Tesis de pregrado). Universidad del Bio-Bio, Concepción, Chile.
- Meruane, V. (2011). Gestión de Activos Físicos, Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Moubray, J. (1991). Reliability Centered Maintenance. Lutterworth, Reino Unido
- Pascual, R. (2005). El Arte de Mantener, Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Real Academia Española. (2017). Diccionario de la lengua española (23.1 ed.). Madrid, España.
- Tavares, L. (2002). Administración Moderna de Mantenimiento. Rio de Janeiro, Brasil.
- Wireman, T. (1998). Developing Performance Indicators for Managing Maintenance. Nueva York, Estados Unidos.

## Bibliografía

- Cerro Negro. (2014). Control de Proceso y Mantenimiento Área Molienda. Pitipeumo, Chile.
- Cerro Negro. (2014). Proyecto Molino G. Pitipeumo, Chile.
- Cerro Negro (2018). Historia. Recuperado el 12 de junio 2018, de [http://www.cerronegro.cl/conocenos/cono\\_historia.html](http://www.cerronegro.cl/conocenos/cono_historia.html).
- Cerro Negro (2018). Ubicación. Recuperado el 12 de junio 2018, de [http://www.cerronegro.cl/conocenos/cono\\_ubicacion.html](http://www.cerronegro.cl/conocenos/cono_ubicacion.html).
- Durán, Orlando. (2018). Ejemplos de Priorización. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Quilpué, Chile.
- Encuentro en Gestión de Activos Físicos 24<sup>a</sup> Edición, Colegio de Ingenieros de Chile A.G., Santiago, 17 de Agosto de 2018.
- Guardia, R. (2017). Apuntes Mantenimiento Industrial. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Quilpué, Chile.
- Guardia, R. (2017). Apuntes Gestión del Mantenimiento. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Quilpué, Chile.
- Higgins, L. (1994). Maintenance Engineering Handbook.
- Jara, A. (2014). Estudio de Mantenimiento Basado en la Confiabilidad Acodado al Sistema Asset Management Aplicado a la Flota de Bulldozer CAT D10T, Minera Anglo American Operación Mantoverde (Tesis de pregrado). Universidad del Bio-Bio, Concepción, Chile.
- Mendoza, C. (2014). Estudio de Factibilidad en la Implementación de Mantenimiento Basado en Confiabilidad Aplicado a Equipos Médicos Críticos (Tesis de pregrado). Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

- Meruane, V. (2011). Gestión de Activos Físicos, Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Moubray, J. (1991). Reliability Centered Maintenance. Lutterworth, Reino Unido
- Pascual, R. (2005). El Arte de Mantener, Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Real Academia Española. (2017). Diccionario de la lengua española (23.1 ed.). Madrid, España.
- Tavares, L. (2002). Administración Moderna de Mantenimiento. Rio de Janeiro, Brasil.
- Wireman, T. (1998). Developing Performance Indicators for Managing Maintenance. Nueva York, Estados Unidos.

## **Anexos**

### **Anexo A: Software de Confiabilidad e Inspecciones.**

Para la ejecución de los cálculos desarrollados en el capítulo IV, V y VI se creó un software para facilitar el trabajo personal y, eventualmente, el trabajo del personal mecánico y administrativo de Compañía Minera Cerro Negro S.A.

Es importante mencionar que la aplicación de estos métodos es conveniente realizarla de manera iterativa, pues de esta forma se irá obteniendo una mayor precisión en los resultados finales junto con la mejora de las acciones de mantenimiento.

### **Aplicación del Software.**

Antes de iniciar, primero se debe obtener un registro fidedigno de los acontecimientos correctivos del Molino de Bolas (cambio de componentes, fallas, limpiezas, inspecciones, entre otros), con el fin de aprovechar el máximo potencial del software. Para ello, deberán seguirse las recomendaciones del capítulo V como, por ejemplo: contar con la ayuda mutua entre mecánicos y operadores para poder aplicar las listas de chequeo propuestas y completar los reportes de falla de la manera más confiable posible, con el fin de que los resultados obtenidos representen de la mejor forma el comportamiento del equipo.

Posteriormente, cuando se tenga una base de datos sólida respecto a los acontecimientos correctivos, estos deberán ser ingresados en la planilla de datos del software junto con los datos correspondientes a los Costos Globales de Mantenimiento<sup>8</sup>. Con esto, el programa irá entregando de forma instantánea diagramas de Pareto (CGM, N° detenciones y Horas detenidas) y Jack-Knife,

---

<sup>8</sup> Capítulo IV: Análisis de Criticidad.

además de seleccionar automáticamente los modos más críticos de cada análisis realizado. Luego, el usuario, en base a su criterio y los requerimientos de la empresa, deberá escoger uno de los métodos desarrollados para continuar con el análisis.

Después de haber seleccionado el método, el software evaluará si acepta o rechaza la hipótesis, en base al tamaño de la muestra, a través del test de Kolmogorov-Smirnov; en caso de aceptarla entregará inmediatamente el modelo de Weibull (curva de confiabilidad, curva de tasa de fallas y MTBF) para los modos pertenecientes al método de priorización seleccionado; en caso de rechazarla de igual manera arrojará el modelo de Weibull, pero con la advertencia de que el análisis no es representativo y que se recomienda tener una base de datos más robusta.

Posteriormente, el usuario deberá ingresar al software, para cada uno de los modos pertenecientes al método de priorización seleccionado, la cantidad de inspecciones mensuales junto con el tiempo invertido en ellas. Con esto, el programa arrojará la frecuencia de inspecciones óptimas para cada uno de los modos, con el fin de minimizar el CGM y las fallas correctivas.

Finalmente, con los datos que se encuentran dentro del software, se ejecuta inmediatamente la gestión óptima de repuestos. La cual podrá ser modificada por el usuario según la confiabilidad que desea en el sistema al momento de cambiar un componente.

Por otro lado, se podrán tomar acciones preventivas o predictivas según la condición en que se encuentren los componentes, y como resultado aumentar la confiabilidad del sistema junto con la prolongación de la vida útil de los mismos.

Respecto a la interpretación de los datos, hay que tener cuidado y bastante criterio, pues se toman varias consideraciones para la realización de los cálculos.

**Anexo B: Sistemas, Sub-Sistemas y Componentes del Molino G.**

A continuación, se muestra el desglose realizado al molino de bolas G.

Sistema	Sub-Sistema	Componente
1) Manto Cilíndrico	1.1) Cilindro	1.1.1) Lifters/Levantadores 1.1.2) Corazas 1.1.3) Anillo Periférico 1.1.3.1) Tapa Anillo 1.1.4) Manhole/Tapa de Registro 1.1.5) Pernos
2) Sistema Piñón-Corona	2.1) Corona	2.1.1) Pernos
	2.2) Contraeje	2.2.1) Descansos Contraeje 2.2.1.1) Pernos 2.2.2) Eje 2.2.2.1) Chaveta lado Inching Drive 2.2.2.2) Chaveta lado Embrague 2.2.3) Rodamientos
		2.3) Piñón
3) Sistema Girolento	3.1) Motor Eléctrico	3.1.1) Rodamientos
	3.2) Acople	3.2.1) Palanca de Accionamiento 3.2.2) Chaveta Acople
		3.3) Freno Hidráulico
	3.4) Inching Drive	3.4.1) Pines
4) Sistema de Lubricación	4.1) Sistema de Lubricación Descansos Molino Alimentación - Descarga	4.1.1) Estanque de Aceite 4.1.1.1) Termistor de Platino 4.1.2) Bomba de Levante Descansos 4.1.3) Motor de Bomba de Levante 4.1.4) Bomba de Lubricación Descansos 4.1.5) Motor de Bomba de Lubricación
	4.2) Sistema de Lubricación Piñón-Corona	4.2.1) Estanque de Grasa 4.2.1.1) Calentador 4.2.2) Bomba de Lubricación Piñón-Corona 4.2.3) Compresor 4.2.4) Inyectores
5) Sistema Motriz	5.1) Transformador	
	5.2) Tablero Eléctrico	
	5.3) Tablero PLC	
	5.4) Excitatriz	
	5.5) Motor Síncrono	5.5.1) Descansos Motor Síncrono 5.5.1.1) Pernos

6) Descansos de Molino	6.1) Descansos Alimentación - Descarga	6.1.1) Soporte 6.1.2) Cojinete de Deslizamiento Hidrostático 6.1.3) Carter de Aceite 6.1.4) Base de Soportes 6.1.5) Inyectores 6.1.6) Pernos
7) Sistema de Embrague	7.1) Unidad Neumática	7.1.1) Compresor
	7.2) Rotor Seal	
	7.3) Embrague	7.3.1) Zapatas 7.3.2) Chaveta Embrague 7.3.3) Pernos
8) Sistema Alimentación	8.1) Tapa de Alimentación	8.1.1) Lifters/Levantadores 8.1.2) Corazas 8.1.3) Sello Dinámico 8.1.4) Sello Estático 8.1.5) Pernos
	8.2) Ducto/Cono de Alimentación	8.2.1) Spout/Boquilla Alimentación 8.2.2) Trunnion Alimentación Helicoidal 8.2.3) Muñón Alimentación
	8.3) Cajón/Tacho de Alimentación	8.3.1) Parrillas/Revestimientos
9) Sistema Descarga	9.1) Tapa de Descarga	9.1.1) Lifters/Levantadores 9.1.2) Corazas 9.1.3) Tapa Central Descarga 9.1.4) Pernos
	9.2) Ducto/Cono de Descarga	9.2.1) Trommel Descarga Helicoidal 9.2.2) Muñón Descarga
	9.3) Cajón/Tacho de Descarga	9.3.1) Parrillas/Revestimientos
	9.4) Bombas Centrífugas del Hidrociclón	9.4.1) Rodamientos 9.4.2) Revestimientos (carcasa e impulsor) 9.4.3) Motor 9.4.4) Pernos
	9.5) Hidrociclón	9.5.1) Revestimientos 9.5.2) Distribuidor 9.5.3) Pernos



### **Anexo C: Análisis FMECA de Sistemas Básicos Molino G.**

En este anexo se llevará a cabo el FMECA a cada uno de los sistemas que componen el Molino de Bolas, a través del modelo cualitativo. Se entregarán detalles de la función de los sistemas, los posibles modos de falla, las causas que ocasionan estas fallas, los efectos locales y a nivel superior, los métodos de detección, las acciones correctivas y la gravedad que poseen los modos de falla.

Los sistemas a los cuales se les realizará el análisis FMECA son los siguientes:

1. Manto Cilíndrico.
2. Piñón-Corona.
3. Girolento.
4. Lubricación.
5. Motriz.
6. Descansos Molino Alimentación-Descarga.
7. Embrague.
8. Alimentación.
9. Descarga.

## Anexo C.1: Análisis FMECA de Sistema Manto Cilíndrico.

A continuación, se muestra el análisis FMECA del sistema Manto Cilíndrico.

Sistema	Función	Modo de Falla	Causas	Efectos Locales	Efectos de Nivel Superior	Efectos Finales	Métodos de Detección	Acciones Correctivas	Gravedad
Manto Cilíndrico	Mover el mineral y las bolas que están encargadas de la conminución del mineral.	Fuga de carga	Rotura o mal apriete de pernos, tapa de alimentación y descarga mal instaladas, sello estático y dinámico mal instalados	Pérdida de carga de mineral, caída de revestimientos	Desgaste o abolladura de Manto Cilíndrico, rotura de bolas, salida de chips en la descarga, desgaste estanque de descarga, desgaste bombas de hidrociclón, desgaste de revestimientos	Molino no opera	Inspección visual, revisión de pernos, ruidos anormales en el molino	Verificar y corregir apriete de pernos, instalación de tapas y los sellos; reemplazar pernos cortados o con fallas; reemplazar sellos defectuosos;	2
			Tapa de registro mal sellada y desprendimiento	Pérdida de carga de mineral y bolas	Desgaste o abolladura de Manto Cilíndrico, destrucción de componentes externos producto de la expulsión de las bolas	Molino no opera	Inspección visual, revisión de tapa de registro	Verificar y corregir sello y cierre de la tapa de registro; reemplazar en caso de falla.	4
		Sonidos extraños, alta vibración, flujo en la descarga del molino es anormal	Bajo nivel de carga mineral, nivel de bolas normal	Desgaste prematuro y excesivo de revestimientos, rotura de bolas	Salida de chips en la descarga, desgaste estanque de descarga, desgaste revestimientos, desgaste bombas de hidrociclón e hidrociclones	Molino no opera	Cambio frecuente de impulsores de bombas, ruidos anormales en el molino, inspección visual cintas transportadoras de alimentación, inspección visual en los descansos, inspección visual en la descarga del molino, utilización de instrumentos	Controlar nivel de carga de mineral para mantener proporción óptima; controlar velocidad de las cintas transportadoras de alimentación;	2
			Alto nivel de bolas, nivel de carga de mineral normal						Controlar nivel de bolas para mantener proporción óptima; limpiar descansos en caso de que hayan virutas provocadas por desgaste o bien reemplazarlos
			Alto nivel de carga mineral, nivel de bolas normal	Desgaste prematuro y excesivo de revestimientos	Salida de carga de mineral gruesa, desgaste de los descansos, desgaste de bombas de hidrociclón e hidrociclones, desgaste del estanque de descarga	Molino no opera	Cambio frecuente de impulsores de bombas, inspección visual en cintas transportadoras de alimentación, inspección visual en la descarga del molino, inspección visual en los descansos (Viruta, color), utilización de instrumentos	Controlar nivel de carga de mineral para mantener proporción óptima; controlar velocidad de las cintas transportadoras de alimentación; limpiar descansos en caso de que hayan virutas provocadas por desgaste o bien reemplazarlos	2
			Bajo nivel de bolas, nivel de carga de mineral normal						Controlar nivel de bolas para mantener proporción óptima;

**Anexo C.2:** Análisis FMECA de Sistema Piñón – Corona.

A continuación, se muestra el análisis FMECA del sistema Piñón – Corona.

Sistema	Función	Modo de Falla	Causas	Efectos Locales	Efectos de Nivel Superior	Efectos Finales	Métodos de Detección	Acciones Correctivas	Gravedad
Piñón-Corona	Encargado de transmitir el movimiento rotatorio a la Corona y Manto Cilíndrico	Sonidos extraños, alta vibración, calor	Mal montaje del conjunto, desalineamiento, desplazamiento, poca limpieza del conjunto, mal mecanizado de los componentes	Desgaste prematuro piñón	Ruptura piñón y eventualmente corona, deflexión del contraeje	Molino no opera	Ruidos anormales en Piñón-Corona, inspección visual, utilización de instrumentos, inspección sensorial	Verificar radio de contacto de la corona, verificar concentricidad del piñón, volver a realizar alineamiento si fuese necesario, reemplazar componentes si fuese necesario, comprobar mecanizado de piñón y corona	3
				Desgaste prematuro corona	Ruptura corona y eventualmente piñón, deflexión del contraeje	Molino no opera			3
				Desgaste prematuro de rodamientos contraeje	Ruptura de rodamientos, deflexión del contraeje	Molino no opera	Utilización de instrumentos, ruidos anormales en descansos contraeje, inspección visual, inspección sensorial		2
			Sistema de lubricación no funciona como corresponde o está contaminado	Degaste prematuro piñón-corona	Desgarramiento, ruptura de dientes, sobrecalentamiento y eventual fundición, desgaste abrasivo y adhesivo, corrosión, indentación de partículas	Molino no opera	Ruidos anormales en Piñón-Corona, inspección visual, inspección sensorial, utilización de instrumentos	Controlar nivel de grasa en estanque y rellenar si fuese necesario, revisar y limpiar los inyectores, destapar tuberías, reemplazar bombas si fuese el caso, cambio de filtros, revisar si hay fugas y reparar, controlar presión de las bombas y del sistema neumático	3

### Anexo C.3: Análisis FMECA de Sistema Girolento.

A continuación, se muestra el análisis FMECA del sistema Girolento.

Sistema	Función	Modo de Falla	Causas	Efectos Locales	Efectos de Nivel Superior	Efectos Finales	Métodos de Detección	Acciones Correctivas	Gravedad
Girolento	Permite que el equipo pueda partir de una manera más suave a través de un Inching Drive.	Motor no arranca	Falla suministro de energía	Motor funciona	Piñón-Corona no arranca, molino no se mueve;	Molino no opera	Verificar conexiones eléctricas y estado de fuente de alimentación	Reparar conexiones eléctricas en mal estado o estado de fuente de alimentación, reemplazar componentes en caso de ser necesario.	1
		Molino no gira	Rotura palanca de accionamiento	Acople no funciona		Molino no opera	Inspección visual y verificación de componentes	Reparar palanca de accionamiento, reemplazar si es necesario	2
		Dificultad al mover el molino	Alto nivel de carga	Rotura pines Inching Drive	Piñón-Corona no arranca, molino no se mueve; desgaste y fractura de los dientes del sistema Piñón-Corona producto del alto torque; Desgaste de los descansos del molino	Molino no opera	Inspección visual cintas transportadoras y pines Inching Drive, inspección visual en la descarga del molino	Reemplazar componentes y controlar nivel de carga de mineral para mantener proporción óptima; controlar velocidad de las cintas transportadoras de alimentación;	3

### Anexo C.4: Análisis FMECA de Sistema Lubricación.

A continuación, se muestra el análisis FMECA del sistema de Lurbicación.

Sistema	Función	Modo de Falla	Causas	Efectos Locales	Efectos de Nivel Superior	Efectos Finales	Métodos de Detección	Acciones Correctivas	Gravedad
Sistema Lubricación	Se encarga de proveer lubricante y mantener la temperatura óptima de los componentes.	Desgaste en varios componentes del Molino de Bolas, alza de temperatura	Baja capacidad de aceite lubricante, presión del sistema es demasiado baja (bomba muy desgastada, tubería de entrada tapada, tubería de entrada tiene pérdidas de aceite) , presión del sistema es demasiado alta (Bloqueo parcial en tuberías, falla de la válvula de sobreflujo, temperatura del aceite muy baja), presión del sistema es variable, bomba no suministra aceite, acumulación de material	Desgaste de piezas excesivo, agripamiento, fundición	Ruptura de distintos componentes	Molino no opera	Verificar nivel y temperatura de aceite; inspección visual de componentes (color oscuro); inspección sensorial	Reemplazar partes desgastadas de bombas, limpiar tuberías, agregar aceite al estanque, sellar tuberías en caso de fugas, regular presión de trabajo, regular temperatura de aceite, cambiar aceite si es necesario	3
			Baja capacidad de grasa lubricante, presión del sistema es demasiado baja, presión del sistema es demasiado alta, presión del sistema es variable, bomba no suministra grasa, inyectores bloqueados,	Desgaste de piezas excesivo, agripamiento, fundición	Ruptura y desgarramiento de distintos componentes	Molino no opera	Verificar nivel de grasa lubricante y temperatura de componentes, inspección visual de piping lubricación y neumático, inspección visual de componentes; inspección sensorial	Reemplazar partes desgastadas de bomba hidráulica, limpiar tuberías, agregar aceite al estanque, sellar tuberías en caso de fugas, regular presión de trabajo de bomba hidráulica, verificar estado de compresor y presión de trabajo, regular temperatura de grasa, limpiar y desobstruir inyectores junto con piping de lubricación y neumático	3

**Anexo C.5:** Análisis FMECA de Sistema Motriz.

A continuación, se muestra el análisis FMECA al sistema Motriz.

Sistema	Función	Modo de Falla	Causas	Efectos Locales	Efectos de Nivel Superior	Efectos Finales	Métodos de Detección	Acciones Correctivas	Gravedad
Sistema Motriz	Permite otorgarle el torque necesario al Conjunto Piñón-Corona.	Molino no gira	Falla suministro de energía, falla excitatriz, voltaje muy bajo	Motor funciona	Posibles daños mayores	Molino no opera	Inspección visual	Verificar estado de componentes, conexiones y reparar; agregar película de aceite a los rodamientos del motor para ayudarlo en el giro	1
			Carga demasiado grande en el molino	Motor funciona	Posibles daños mayores	Molino no opera	Inspección visual, verificar carga dentro del molino	Se debe realizar una limpieza del interior del molino con la ayuda del Inching Drive (Giro lento) hasta que se encuentre en un estado óptimo de operación	3
		Generación de calor en descansos del motor, alta vibración	Desalineamiento, mal montaje de los descansos y el conjunto	Desgaste prematuro de los descansos del motor	Ruptura de los rodamientos, deflexión del eje, problemas en otros componentes	Molino no opera	Ruidos anormales en descansos del motor, inspección visual y sensorial, utilización de instrumentos	Reemplazo de componentes y eventualmente realizar alineamiento	3

**Anexo C.6:** Análisis FMECA de Sistema Descansos Molino Alimentación – Descarga.

A continuación, se muestra el análisis FMECA al sistema Descansos Molino Alimentación – Descarga.

Sistema	Función	Modo de Falla	Causas	Efectos Locales	Efectos de Nivel Superior	Efectos Finales	Métodos de Detección	Acciones Correctivas	Gravedad
Descansos Molino Alimentación - Descarga	Cumple la función de sostener el Manto Cilíndrico.	Sonidos extraños, alta vibración, calor	Gran aumento de carga en el interior del molino	Desgaste, fundición, agripamiento de los descansos del molino	Salida de carga de mineral gruesa; motor no opera; desgaste y fractura de los dientes del sistema Piñón-Corona producto del alto torque; Desgaste del estanque de descarga, bombas de hidrociclón e hidrociclones; desgaste prematuro y excesivo de revestimientos;	Molino no opera	Ruidos anormales, inspección visual cintas transportadoras de alimentación; inspección visual sistema piñón-corona; inspección visual descansos, utilización de instrumentos; inspección visual en la descarga del molino; cambio frecuente de impulsores de bombas; inspección sensorial	Controlar nivel de carga de mineral para mantener proporción óptima; controlar velocidad de las cintas transportadoras de alimentación	3
			Desalineamiento entre los descansos	Desgaste, fundición, agripamiento de los descansos del molino	Fractura de los dientes del sistema Piñón-Corona; deflexión del contraeje y rotura de los descansos del contraeje	Molino no opera	Ruidos anormales, alta vibración, utilización de instrumentos	Realizar alineamiento	3
			Sistema de lubricación no funciona como corresponde o está contaminado	Desgaste, indentación, fundición, agripamiento de los descansos del molino	Falla total de los descansos y posibles daños mayores	Molino no opera	Verificación del nivel de aceite en el estanque, fugas de aceite en tuberías, verificación de la presión de trabajo de las bombas, cambio frecuente de filtros, ruidos anormales, alta vibración, aumento de temperatura	Controlar nivel de aceite en estanque y rellenar si fuese necesario, revisar y destapar tuberías, reemplazar bombas si fuese el caso, cambio de filtros, revisar si hay fugas y reparar, controlar presión de las bombas, cambiar aceite en caso de ser necesario	3

**Anexo C.7:** Análisis FMECA de Sistema Embrague.

A continuación, se muestra el análisis FMECA del sistema Embrague.

Sistema	Función	Modo de Falla	Causas	Efectos Locales	Efectos de Nivel Superior	Efectos Finales	Métodos de Detección	Acciones Correctivas	Gravedad
Sistema Embrague	Encargado de acoplar el Conjunto Motriz con el Conjunto Piñón-Corona.	Molino no gira	Presión del sistema neumático es demasiado bajo (fuga de aire a través de cañerías, compresor con averías)	Embrague no funciona	No hay transmisión de movimiento al Piñón-Corona	Molino no opera	Inspección visual del embrague; verificación de la presión de trabajo del compresor, inspección visual de cañerías y comprobación de fugas	Controlar presión de compresor y ajustar si es necesario, revisar si hay fugas y reparar; reparar componentes defectuosos de compresor y de ser necesario reemplazarlo	1
			Presión del sistema neumático es demasiado alto	Falla en el rotorseal (sello dinámico); desgaste prematuro de balatas y zapatas	Transmisión deficiente al Piñón-Corona y eventual falla	Molino no opera	Verificación de la presión de trabajo del compresor; inspección visual rotorseal	Controlar presión de compresor y ajustar si es necesario, reparación de rotorseal y si fuese necesario reparar	2
			Gran aumento de carga en el interior del molino	Rotura de zapatas, desgaste de balatas; corte de pernos de sujeción (debido al aumento de torque)	No hay transmisión de movimiento al Piñón-Corona	Molino no opera	Inspección visual, ruidos anormales en embrague	Controlar nivel de carga de mineral para mantener proporción óptima; controlar velocidad de las cintas transportadoras de alimentación; limpiar el interior del molino	3



**Anexo C.8:** Análisis FMECA de Sistema Alimentación.

A continuación, se muestra el análisis FMECA al sistema Alimentación.

Sistema	Función	Modo de Falla	Causas	Efectos Locales	Efectos de Nivel Superior	Efectos Finales	Métodos de Detección	Acciones Correctivas	Gravedad
Sistema Alimentación	Permite la entrada de la carga de mineral al equipo.	Fuga de carga	Rotura o mal apriete de pernos	Pérdida de carga de mineral, caída de revestimientos	Mayor nivel de bolas dentro del molino, desgaste o abolladura de Manto Cilíndrico, rotura de bolas, desgaste de los revestimientos, salida de chips en la descarga, desgaste estanque de descarga, desgaste bombas de hidrociclón	Molino no opera	Ruidos anormales, alta vibración, inspección visual	Verificar y corregir apriete de pernos, reemplazar pernos cortados o con fallas	1
			Rotura estanque de alimentación	Pérdida de carga de mineral		Molino no opera		Verificación y reparación de estanque de alimentación	1
			Rotura Spout/Boquilla a alimentación	Pérdida de carga de mineral; contaminación de los descansos		Molino no opera		Verificación y reparación de Spout, de ser necesario reemplazar componente	2
			Mala instalación de sello dinámico y estático	Pérdida de carga de mineral; contaminación de los descansos		Molino no opera		Verificación y re-instalación de sellos, de ser necesario reemplazar sellos defectuosos	1
			Mala instalación de trunnion linner o desgaste de trunnion	Pérdida de carga de mineral; contaminación de los descansos		Molino no opera		Verificación y re-instalación de trunnion linner, de ser necesario reemplazar componente	2

## Anexo C.9: Análisis FMECA de Sistema Descarga.



A continuación, se muestra el análisis FMECA al sistema de Descarga.

Sistema	Función	Modo de Falla	Causas	Efectos Locales	Efectos de Nivel Superior	Efectos Finales	Métodos de Detección	Acciones Correctivas	Gravedad
Sistema Descarga	Permite la salida de la carga de mineral tratada del equipo.	Fuga de carga	Rotura o mal apriete de pernos	Pérdida de carga fina, caída de revestimientos	Falla en bombas por aireación (revestimientos), mala clasificación de los hidrociclones	Molino no opera	Inspección visual, ruidos anormales en bomba e hidrociclones	Verificar y corregir apriete de pernos, reemplazar pernos cortados o con fallas	1
			Rotura estanque de descarga	Pérdida de carga fina		Molino no opera		Verificación y reparación de estanque de descarga	1
			Mala instalación trommel de descarga o desgaste de trommel	Pérdida de carga fina		Molino no opera		Verificación y re-instalación de trommel, de ser necesario reemplazar componente	2
		Sonidos extraños, alta vibración, flujo en la descarga del molino es anormal	Gran aumento de carga en el interior del molino; bajo nivel de bolas; mala fabricación parrillas	Desgaste excesivo estanque de descarga, desgaste excesivo parrillas de descarga	Salida de carga de mineral gruesa; Desgaste del estanque de descarga, bombas de hidrociclón e hidrociclones; desgaste prematuro y excesivo de revestimientos; mala clasificación de mineral	Molino no opera	Inspección visual en la descarga del molino, ruidos anormales en bomba e hidrociclones, frecuente cambio de impulsores	Controlar nivel de carga de mineral para mantener proporción óptima; controlar velocidad de las cintas transportadoras de alimentación; limpiar descansos en caso de que hayan virutas provocadas por desgaste o bien reemplazarlos	3
			Mayor nivel de bolas ; baja carga mineral; mala fabricación bolas					Salida de chips en la descarga, desgaste bombas de hidrociclón e hidrociclones; mala clasificación de mineral	Molino no opera
			Gran aumento de carga y muy bajo nivel de bolas	No hay flujo de descarga (Parrillas Tapadas)	Falla de bombas de hidrociclón por aireación	Molino no opera		Inspección visual en la descarga del molino, ruidos anormales en bombas de hidrociclones e hidrociclones	Se debe realizar una limpieza del interior del molino con la ayuda del Inching Drive (Girolento) hasta que se encuentre en un estado óptimo de operación

**Anexo D:** Check List y Calendarización de Actividades.

**Anexo D.1:** Check List Diario A.

A continuación, se muestra la lista de chequeo diaria A.

COMPAÑÍA MINERA CERRO NEGRO S.A DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO MECÁNICO Y ELÉCTRICO	<b>CHECK-LIST                  DIARIO                  MOLINO DE                  BOLAS G</b>	 
---	---	---

Use implementos de seguridad, no asuma riesgos innecesarios.

*Compañía Minera Cerro Negro S.A.*

Nombre: .....

Fecha: .....

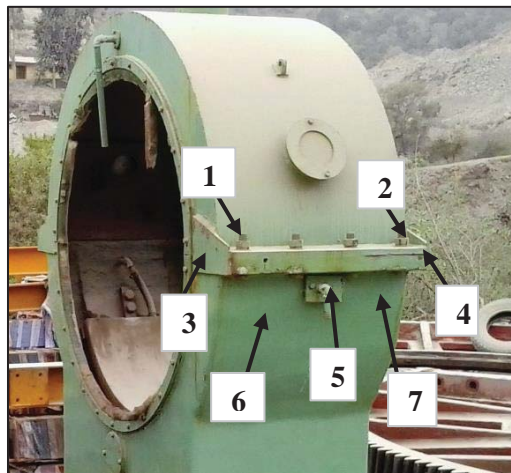
Hora de inicio: .....

**ACTIVIDADES DESCANSOS MOLINO ALIMENTACIÓN - DESCARGA**

**MEDICIÓN DE VIBRACIONES Y TEMPERATURA**


DESCANSO LADO "ALIMENTACIÓN"					DESCANSO LADO "DESCARGA"				
MEDICIÓN DE VIBRACIONES "VELOCIDAD" (MM/S) [< 4,5 (mm/s)]			REGISTRO TEMPERATURA (° C) [< 50 °C]		MEDICIÓN DE VIBRACIONES "VELOCIDAD" (MM/S) [< 4,5 (mm/s)]			REGISTRO TEMPERATURA (° C) [< 50 °C]	
Puntos	Radial	Axial	Rango ópt.	Registro	Puntos	Radial	Axial	Rango ópt.	Registro
1			25 - 32		1			25 - 35	
2			25 - 32		2			25 - 35	
3			25 - 32		3			25 - 35	
4			25 - 32		4			25 - 35	
5			25 - 32		5			25 - 35	
6			25 - 32		6			25 - 35	
7			25 - 32		7			25 - 35	

*Puntos en donde se deben medir  
las vibraciones*





**Anexo D.2:** Check List Diario B.

A continuación, se muestra la lista de chequeo diaria B.

COMPAÑÍA MINERA CERRO NEGRO S.A DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO MECÁNICO Y ELÉCTRICO		<b>CHECK-LIST</b> <b>DIARIO MOLINO DE</b> <b>BOLAS G</b>		
Use implementos de seguridad, no asuma riesgos innecesarios. <b>Compañía Minera Cerro Negro S.A.</b>				
Nombre: _____ Fecha: _____ Hora de inicio: _____				
<b>ACTIVIDADES DESCANSOS MOLINO ALIMENTACIÓN - DESCARGA</b>				
<b>ESTADO OPERACIONAL</b>				
<b>DESCANSO LADO "ALIMENTACIÓN"</b>		<b>NORMAL</b>	<b>MALO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>
Inspección de ruidos extraños				
Inspección visual muñón y cojinete hidrostático				
Inspección válvula de refrigeración				
<b>DESCANSO LADO "DESCARGA"</b>		<b>NORMAL</b>	<b>MALO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>
Inspección de ruidos extraños				
Inspección visual muñón y cojinete hidrostático				
Inspección válvula de refrigeración				
<b>ACTIVIDADES PIÑÓN - CORONA</b>				
<b>ESTADO OPERACIONAL</b>				
<b>PIÑÓN - CORONA</b>		<b>NORMAL</b>	<b>MALO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>
Inspección de ruidos extraños				
Inspección visual				
<b>DESCANSO CONTRAEJE LADO "ALIMENTACIÓN"</b>		<b>NORMAL</b>	<b>MALO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>
Inspección de ruidos extraños				
Inspección visual				
<b>DESCANSO CONTRAEJE LADO "DESCARGA"</b>		<b>NORMAL</b>	<b>MALO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>
Inspección de ruidos extraños				
Inspección visual				
<b>ACTIVIDADES SISTEMA DESCARGA</b>				
<b>ESTADO OPERACIONAL</b>				
<b>DESCARGA</b>		<b>NORMAL</b>	<b>MALO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>
Inspección de ruidos extraños (bombas de hidrociclones e hidrociclones)				
Inspección visual del tipo de flujo en la descarga (trommel y cajón descarga)				



**Anexo D.3: Check List Diario C.**

A continuación, se muestra la lista de chequeo diaria C.

COMPAÑÍA MINERA CERRO NEGRO S.A DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO MECÁNICO Y ELÉCTRICO				<b>CHECK-LIST                  DIARIO                  MOLINO DE                  BOLAS G</b>		 			
Use implementos de seguridad, no asuma riesgos innecesarios. <b>Compañía Minera Cerro Negro S.A.</b>									
Nombre: ..... Fecha: ..... Hora de inicio: .....									
<b>ACTIVIDADES PIÑÓN - CORONA</b>									
<b>MEDICIÓN DE VIBRACIONES Y TEMPERATURA</b>									
<b>DESCANSO CONTRAEJE LADO                  "ALIMENTACIÓN"</b>					<b>DESCANSO CONTRAEJE LADO                  "DESCARGA"</b>				
MEDICIÓN DE VIBRACIONES "VELOCIDAD" (MM/S) [< 4,5 (mm/s)]			REGISTRO TEMPERATURA (° C) [< 50 °C]		MEDICIÓN DE VIBRACIONES "VELOCIDAD" (MM/S) [< 4,5 (mm/s)]			REGISTRO TEMPERATURA (° C) [< 50 °C]	
<b>Puntos</b>	<i>Radial</i>	<i>Axial</i>	<i>Rango ópt.</i>	<i>Registro</i>	<b>Puntos</b>	<i>Radial</i>	<i>Axial</i>	<i>Rango ópt.</i>	<i>Registr o</i>
<b>1</b>			25 - 35		<b>1</b>			25 - 35	
<b>2</b>			25 - 35		<b>2</b>			25 - 35	
<b>3</b>			25 - 35		<b>3</b>			25 - 35	
<b>4</b>			25 - 35		<b>4</b>			25 - 35	
<b>PIÑÓN</b>					<b>CORONA</b>				
REGISTRO TEMPERATURA (° C) [< 50 °C]					REGISTRO TEMPERATURA (° C) [< 50 °C]				
<b>Puntos</b>	<i>Rango óptimo</i>	<i>Registro</i>			<b>Puntos</b>	<i>Rango óptimo</i>	<i>Registro</i>		
<b>1</b>	25 - 40				<b>1</b>	25 - 40			
<b>2</b>	25 - 40				<b>2</b>	25 - 40			
<b>3</b>	25 - 40				<b>3</b>	25 - 40			


**Anexo D.4:** Check List Diario D.

A continuación, se muestra la lista de chequeo diaria D.

COMPAÑÍA MINERA CERRO NEGRO S.A DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO MECÁNICO Y ELÉCTRICO		<b>CHECK-LIST DIARIO                  MOLINO DE BOLAS G</b>		 
Use implementos de seguridad, no asuma riesgos innecesarios. <b>Compañía Minera Cerro Negro S.A.</b>				
Nombre: ..... Fecha: ..... Hora de inicio: .....				
<b>ACTIVIDADES SISTEMA DE LUBRICACIÓN</b>				
<b>REGISTRO DE PRESIÓN</b>				
<b>DESCANSOS MOLINO ALIMENTACIÓN - DESCARGA</b>				
<b>DESCANSO LADO "ALIMENTACIÓN"</b>		<b>DESCANSO LADO "DESCARGA"</b>		
<b>Bomba de Levante (Alta presión)</b>	<i>Registro de Presión [MPa]</i>	<b>Bomba de Levante (Alta presión)</b>	<i>Registro de Presión [MPa]</i>	
<b>Magnitud: 31,5 [MPa]</b>		<b>Magnitud: 31,5 [MPa]</b>		
<b>Bomba de Lubricación (Baja presión)</b>	<i>Registro de Presión [MPa]</i>	<b>Bomba de Lubricación (Baja presión)</b>	<i>Registro de Presión [MPa]</i>	
<b>Rango óptimo: 0,4 - 0,6 [MPa]</b>		<b>Rango óptimo: 0,4 - 0,6 [MPa]</b>		
<b>PIÑÓN CORONA</b>				
<b>Bomba de Lubricación</b>		<i>Registro de Presión [MPa]</i>		
<b>Magnitud: 2,5 [Mpa]</b>				
<b>ESTADO OPERACIONAL</b>				
<b>DESCANSOS MOLINO ALIMENTACIÓN - DESCARGA</b>				
<b>LUBRICACIÓN DESCANSOS MOLINO ALIMENTACIÓN - DESCARGA</b>	<b>NORMAL</b>	<b>MALO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>	
Inspección de ruidos extraños motores, bombas				
Inspección visual de fugas en piping lubricación				
<b>PIÑÓN - CORONA</b>				
<b>LUBRICACIÓN PIÑÓN - CORONA</b>	<b>NORMAL</b>	<b>MALO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>	
Inspección de ruidos extraños motores, bombas				
Inspección visual de fugas en piping lubricación				
Inspección visual de los inyectores (evitar obstrucción)Rango: 30[s] de inyección cada 30 min.				
<b>Observaciones Generales:</b>				


**Anexo D.5:** Check List Diario E.

A continuación, se muestra la lista de chequeo diaria E.

COMPAÑÍA MINERA CERRO NEGRO S.A DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO MECÁNICO Y ELÉCTRICO		<b>CHECK-LIST                  DIARIO MOLINO                  DE BOLAS G</b>		
Use implementos de seguridad, no asuma riesgos innecesarios. <b>Compañía Minera Cerro Negro S.A.</b>				
Nombre: ..... Fecha: ..... Hora de inicio: .....				
<b>ACTIVIDADES SISTEMA DE LUBRICACIÓN</b>				
<b>REGISTRO DE TEMPERATURA</b>				
<b>DESCANSOS MOLINO ALIMENTACIÓN - DESCARGA</b>				
<b>DESCANSO LADO "ALIMENTACIÓN"</b>		<b>DESCANSO LADO "DESCARGA"</b>		
<b>Bomba de Levante (Alta presión)</b>	<i>Registro de Temperatura °C</i>	<b>Bomba de Levante (Alta presión)</b>	<i>Registro de Temperatura °C</i>	
<b>Magnitud: &lt; 40 °C</b>		<b>Magnitud: &lt; 40 °C</b>		
<b>Bomba de Lubricación (Baja presión)</b>	<i>Registro de Temperatura °C</i>	<b>Bomba de Lubricación (Baja presión)</b>	<i>Registro de Temperatura °C</i>	
<b>Magnitud: &lt; 40 °C</b>		<b>Magnitud: &lt; 40 °C</b>		
<b>Estanque de Aceite</b>		<i>Registro de Temperatura °C</i>		
<b>Rango óptimo: 25 - 45 °C</b>				
<b>PIÑÓN CORONA</b>				
<b>Bomba de Lubricación</b>		<i>Registro de Temperatura °C</i>		
<b>Magnitud: &lt; 40 °C</b>				
<b>Estanque de Grasa</b>		<i>Registro de Temperatura °C</i>		
<b>Rango óptimo: 15 - 70 °C</b>				
<b>Observaciones Generales:</b>				

**Anexo D.6:** Check List Diario F.


A continuación, se muestra la lista de chequeo diaria F.

COMPAÑÍA MINERA CERRO NEGRO S.A DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO MECÁNICO Y ELÉCTRICO		<b>CHECK-LIST                  DIARIO MOLINO                  DE BOLAS G</b>		
Use implementos de seguridad, no asuma riesgos innecesarios. <i>Compañía Minera Cerro Negro S.A.</i>				
Nombre: ..... Fecha: ..... Hora de inicio: .....				
<b>ACTIVIDADES UNIDAD NEUMÁTICA PIÑÓN - CORONA</b>				
<b>REGISTRO DE PRESIÓN</b>				
<b>COMPRESOR</b>				
<b>Presión de Trabajo del Compresor</b>			<i>Registro de Presión [MPa]</i>	
<b>Magnitud: 0,7 [MPa]</b>				
<b>ESTADO OPERACIONAL</b>				
<b>Unidad Neumática</b>	<b>NORMAL</b>	<b>MALO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>	
Inspección de ruidos extraños motor, compresor				
Inspección de válvulas.				
Inspección visual de fugas en piping neumático				
Ajustar piezas que se encuentren sueltas				
<b>Observaciones Generales:</b>				




**Anexo D.7: Check List Semanal.**

A continuación, se muestra la lista de chequeo semanal.

COMPAÑÍA MINERA CERRO NEGRO S.A DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO MECÁNICO Y ELÉCTRICO		<b>CHECK-LIST                  SEMANAL                  MOLINO DE                  BOLAS G</b>		
Use implementos de seguridad, no asuma riesgos innecesarios. <b>Compañía Minera Cerro Negro S.A.</b>				
Nombre: _____ Fecha: _____ Hora de inicio: _____				
<b>ACTIVIDADES SISTEMA DE LUBRICACIÓN</b>				
<b>ESTADO OPERACIONAL</b>				
<b>DESCANSOS MOLINO ALIMENTACIÓN - DESCARGA</b>				
<b>Sistema Lubricación</b>	<b>NORMAL</b>	<b>MALO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>	
Verificación de funcionamiento de la unidad de lubricación				
Nivel de aceite en el estanque (rellenar si fuese necesario Volumen: 800 [lt])				
Inspección de válvulas				
Limpieza de filtro de malla				
<b>PIÑÓN - CORONA</b>				
<b>Sistema Lubricación</b>	<b>NORMAL</b>	<b>MALO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>	
Verificación de funcionamiento de la unidad de lubricación				
Nivel de grasa en el estanque (rellenar si fuese necesario Volumen: 200 [lt])				
Inspección de válvulas				
Limpieza filtro de malla				
<b>ACTIVIDADES UNIDAD NEUMÁTICA</b>				
<b>ESTADO OPERACIONAL</b>				
<b>Sistema Neumático</b>	<b>NORMAL</b>	<b>MALO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>	
Nivel de aceite del compresor (rellenar si fuese necesario Volumen: 62 [lt])				
Limpieza de filtro (escape aire/aceite)				
Verificación de funcionamiento de la unidad neumática				
Evacuación de condensado en piping neumático				
<b>* De forma Bisemanal rellenar estanque de aceite del compresor.</b>				
<b>Observaciones Generales:</b>   				


**Anexo D.8: Check List Mensual A.**

A continuación, se muestra la lista de chequeo mensual A.

COMPAÑÍA MINERA CERRO NEGRO S.A DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO MECÁNICO Y ELÉCTRICO		<b>CHECK-LIST                  MENSUAL                  MOLINO DE                  BOLAS G (840 hrs.)</b>		
Use implementos de seguridad, no asuma riesgos innecesarios. <b>Compañía Minera Cerro Negro S.A.</b>				
Nombre: ..... Fecha: ..... Hora de inicio: .....				
<b>ACTIVIDADES SISTEMA LUBRICACIÓN</b>				
<b>ESTADO OPERACIONAL</b>				
<b>DESCANSOS MOLINO ALIMENTACIÓN - DESCARGA</b>				
<b>Sistema Lubricación</b>	<b>NORMAL</b>	<b>MALO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>	
Nivel de aceite en el estanque (rellenar si fuese necesario Volumen: 800 [lt])				
Inspección de fugas en piping lubricación				
<b>PIÑÓN - CORONA</b>				
<b>Sistema Lubricación</b>	<b>NORMAL</b>	<b>MALO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>	
Nivel de grasa en el estanque (rellenar si fuese necesario Volumen: 200 [lt])				
Inspección visual inyectores de lubricación				
Inspección de fugas en piping lubricación				
<b>ACTIVIDADES PIÑÓN - CORONA</b>				
<b>ESTADO OPERACIONAL</b>				
<b>Piñón - Corona</b>	<b>NORMAL</b>	<b>MALO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>	
Revisar de carga y contaminación en los engranajes (Limpieza de ser necesario)				
Verificación visual estado de los dientes de piñón y corona (Desgaste, desgarros, identaciones, fisuras, arrugamiento, etc.)				
<b>ACTIVIDADES DESCANSOS MOLINO ALIMENTACIÓN - DESCARGA</b>				
<b>ESTADO OPERACIONAL</b>				
<b>Descansos Alimentación - Descarga</b>	<b>NORMAL</b>	<b>MALO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>	
Verificación visual estado de los descansos (Desgaste, identaciones, fisuras, etc.)				
Revisar alojamiento de los descansos por acumulación de carga (Limpieza)				


**Anexo D.9:** Check List Mensual B.

A continuación, se muestra la lista de chequeo mensual B.

COMPAÑÍA MINERA CERRO NEGRO S.A DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO MECÁNICO Y ELÉCTRICO		<b>CHECK-LIST                  MENSUAL MOLINO                  DE BOLAS G (840                  hrs.)</b>		
Use implementos de seguridad, no asuma riesgos innecesarios. <b>Compañía Minera Cerro Negro S.A.</b>				
Nombre: _____ Fecha: _____ Hora de inicio: _____				
<b>ACTIVIDADES SISTEMA DESCARGA</b>				
<b>ESTADO OPERACIONAL</b>				
<b>Sistema Descarga</b>	<b>NORMAL</b>	<b>MALO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>	
Verificación visual estado de las parrillas de descarga (Obstrucción, desgaste, rotura, etc.)				
<b>ACTIVIDADES SISTEMA NEUMÁTICO</b>				
<b>ESTADO OPERACIONAL</b>				
<b>Sistema Neumático</b>	<b>NORMAL</b>	<b>MALO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>	
Nivel de aceite del compresor (rellenar si fuese necesario Volumen: 62 [lt])				
Inspección visual correas de transmisión				
Inspección de fugas en piping neumático				
<b>ACTIVIDADES SISTEMA DE LUBRICACIÓN</b>				
<b>ESTADO OPERACIONAL</b>				
<b>Sistema Lubricación</b>	<b>NORMAL</b>	<b>MALO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>	
Limpieza del área de lubricación.				
Inspección interna bomba levante (alta presión); cambiar componentes de ser necesario				
Inspección interna bomba lubricación (baja presión); cambiar componentes de ser necesario				
<b>Observaciones Generales:</b>    				



**Anexo D.10:** Check List Bimensual (1680 hrs.).

A continuación, se muestra la lista de chequeo bimensual correspondiente a las 1680 hrs.

COMPAÑÍA MINERA CERRO NEGRO S.A DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO MECÁNICO Y ELÉCTRICO		<b>CHECK-LIST BIMENSUAL MOLINO DE BOLAS G (1680 hrs.)</b>			
Use implementos de seguridad, no asuma riesgos innecesarios. <b>Compañía Minera Cerro Negro S.A.</b>					
Nombre: ..... Fecha: ..... Hora de inicio: .....					
<b>ACTIVIDADES PIÑÓN - CORONA</b>					
<b>ESTADO OPERACIONAL</b>					
<b>Alineamiento Estático Piñón - Corona</b>					
<b>Piñón - Corona (lado alimentación)</b>		<b>Contacto</b>	<b>Raíz</b>	<b>Juego (Backlash)</b>	<b>Tolerancia Backlash</b>
0°					0,07" - 0,08"
180°					0,07" - 0,08"
<b>Piñón - Corona (lado descarga)</b>		<b>Contacto</b>	<b>Raíz</b>	<b>Juego (Backlash)</b>	<b>Tolerancia Backlash</b>
0°					0,07" - 0,08"
180°					0,07" - 0,08"
<b>Juego Interno Descansos Contraeje</b>				<b>Observaciones Generales:</b>	
<b>Descanso contraeje lado alimentación</b>		<b>Tolerancia</b>	<b>Registro</b>		
1					
2					
<b>Descanso contraeje lado descarga</b>		<b>Contacto</b>	<b>Raíz</b>		
1					
2					


**Anexo D.11:** Check List Trimestral (2520 hrs.).

A continuación, se muestra la lista de chequeo trimestral correspondiente a las 2520 hrs.

COMPAÑÍA MINERA CERRO NEGRO S.A DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO MECÁNICO Y ELÉCTRICO		<b>CHECK-LIST                  TRIMESTRAL                  MOLINO DE                  BOLAS G (2520                  hrs.)</b>		 	
Use implementos de seguridad, no asuma riesgos innecesarios. <b>Compañía Minera Cerro Negro S.A.</b>					
Nombre: ..... Fecha: ..... Hora de inicio: .....					
<b>ACTIVIDADES SISTEMA DE LUBRICACIÓN</b>					
<b>DESCANSOS MOLINO ALIMENTACIÓN - DESCARGA</b>					
<b>ESTADO OPERACIONAL</b>					
<b>Sistema Lubricación</b>		<b>NORMAL</b>	<b>MALO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>	
Limpieza del lugar para evitar contaminar lubricante					
<b>CAMBIO DE COMPONENTES</b>					
<b>Sistema Lubricación</b>		<b>NOMINAL</b>	<b>REGISTRO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>	
Cambio de aceite al sistema					
Cambio de filtro de aceite					
<b>PIÑÓN - CORONA</b>					
<b>ESTADO OPERACIONAL</b>					
<b>Sistema Lubricación</b>		<b>NORMAL</b>	<b>MALO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>	
Limpieza del lugar para evitar contaminar lubricante					
<b>CAMBIO DE COMPONENTES</b>					
<b>Sistema Lubricación</b>		<b>NOMINAL</b>	<b>REGISTRO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>	
Cambio de grasa al sistema					
Cambio de filtro de grasa					
<b>ACTIVIDADES TOTALIDAD SISTEMAS</b>					
<b>ESTADO OPERACIONAL</b>					
<b>Pernos del Sistema</b>		<b>NORMAL</b>	<b>MALO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>	
Revisión y reapriete de los pernos del sistema					
<b>Observaciones Generales:</b>  					

**Anexo D.12:** Check List Semestral (5040 hrs.).

A continuación, se muestra la lista de chequeo semestral correspondiente a las 5040 hrs.

COMPAÑÍA MINERA CERRO NEGRO S.A DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO MECÁNICO Y ELÉCTRICO	CHECK-LIST SEMESTRAL MOLINO DE BOLAS G (5040 hrs.)		
<p style="text-align: center; color: red;"><b>Use implementos de seguridad, no asuma riesgos innecesarios.</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Compañía Minera Cerro Negro S.A.</b></p>			
Nombre: ..... Fecha: ..... Hora de inicio: .....			
<b>ACTIVIDADES SISTEMA DE ALIMENTACIÓN - DESCARGA</b>			
<b>CAMBIO DE COMPONENTES</b>			
<b>TAPA DE ALIMENTACIÓN</b>	<b>NOMINAL</b>	<b>REGISTRO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>
Cambio de lifters			
Cambio trunnion			
Cambio de corazas			
<b>TAPA DE DESCARGA</b>	<b>NOMINAL</b>	<b>REGISTRO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>
Cambio de lifters			
Cambio cajones			
Cambio trommel			
Cambio tapa central			
Cambio de corazas			
<b>Observaciones Generales:</b>			

**Anexo D.13:** Check List Anual (10080 hrs.).

A continuación, se muestra la lista de chequeo anual correspondiente a las 10080 hrs.

COMPAÑÍA MINERA CERRO NEGRO S.A DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO MECÁNICO Y ELÉCTRICO		<b>CHECK-LIST                  ANUAL                  MOLINO DE                  BOLAS G                  (10080 hrs.)</b>		 
Use implementos de seguridad, no asuma riesgos innecesarios. <b>Compañía Minera Cerro Negro S.A.</b>				
Nombre: ..... Fecha: ..... Hora de inicio: .....				
<b>ACTIVIDADES MANTO CILÍNDRICO</b>				
<b>CAMBIO DE COMPONENTES</b>				
<b>MANTO</b>	<b>NOMINAL</b>	<b>REGISTRO</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>	
Cambio de lifters				
Cambio de anillos periféricos				
Cambio de corazas				
Cambio revestimientos tapa registro				
<b>Observaciones                  Generales:</b>				

**Anexo E.1:** Calendarización Sistema Lubricación Descansos Molino.

A continuación, se muestra la calendarización de actividades correspondientes al Sistema de Lubricación Descansos Molino.

Sistema Lubricación		Agosto					Septiembre					Octubre					Noviembre					Diciembre									
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5					
Descansos Alimentación - Descarga	Estanque de aceite	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf
	Inspección válvulas de refrigeración	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf
	Espacio donde se encuentra el estanque																														
	Aceite del sistema																														
	Ruidos anormales en motores y bombas	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf
	Fugas en piping lubricación	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf
	Filtro de malla	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf
	Interior bomba lubricación																														
	Interior bomba levante																														

Enero					Febrero					Marzo					Abril					Mayo					Junio					Julio					Agosto				
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf

Frecuencia		Actividades		Estado	
S	Semanal		Rellenar	f	Funcionando
BS	BiSemanal		Inspección	d	Detenido
M	Mensual(840 horas)		Limpieza		
BM	BiMensual(1680 horas)		Cambio		
TM	Trimestral(2520 horas)		Medición		
SM	Semestral(5040 horas)		Apriete/Ajuste		
A	Anual(10080 horas)				



**Anexo E.2:** Calendarización Sistema Lubricación Piñón – Corona.

A continuación, se muestra la calendarización de actividades correspondientes al Sistema de Lubricación Piñón – Corona.

Sistema Lubricación	Agosto					Septiembre					Octubre					Noviembre					Diciembre					Enero				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Estanque de grasa	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf
Espacio donde se encuentra el estanque																														
Grasa del sistema																														
Ruidos anormales en motor y bomba	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf
Funcionamiento de inyectores lubricación	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf
Fugas en piping lubricación	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf
Filtro de malla	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf

Febrero					Marzo					Abril					Mayo					Junio					Julio					Agosto				
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf
				TMd																														
				TMd																														
				TMd																														
Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf
Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf
				Md					Md					Md					Md					Md					Md					Md
Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf
Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf

Frecuencia		Actividades		Estado	
S	Semanal		Rellenar	f	Funcionando
BS	BiSemanal		Inspección	d	Detenido
M	Mensual(840 horas)		Limpieza		
BM	BiMensual(1680 horas)		Cambio		
TM	Trimestral(2520 horas)		Medición		
SM	Semestral(5040 horas)		Apriete/Ajuste		
A	Anual(10080 horas)				





### Anexo E.5: Calendarización Unidad Neumática.

A continuación, se muestra la calendarización de actividades correspondientes a la Unidad Neumática.

Unidad Neumática		Agosto					Septiembre					Octubre					Noviembre					Diciembre					Enero				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Compresor	Aceite del compresor	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf
			BS		BS			BS		BS			BS		BS			BS		BS			BS		BS			BS		BS	
	Ruido anormal en motor, compresor	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf
	Fugas en piping neumático	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf
	Filtro de escape (aire/aceite)	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf
			BS		BS			BS		BS			BS		BS			BS		BS			BS		BS			BS		BS	
Evacuación del condensado en piping	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	

Febrero					Marzo					Abril					Mayo					Junio					Julio					Agosto				
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf
	BS		BS			BS		BS			BS		BS			BS		BS			BS		BS			BS		BS			BS		BS	
Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf
Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf
Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf
	BS		BS			BS		BS			BS		BS			BS		BS			BS		BS			BS		BS			BS		BS	
Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf

Frecuencia		Actividades		Estado	
S	Semanal		Rellenar	f	Funcionando
BS	BiSemanal		Inspección	d	Detenido
M	Mensual(840 horas)		Limpieza		
BM	BiMensual(1680 horas)		Cambio		
TM	Trimestral(2520 horas)		Medición		
SM	Semestral(5040 horas)		Apriete/Ajuste		
A	Anual(10080 horas)				

**Anexo E.6:** Calendarización Sistema Piñón – Corona.

A continuación, se muestra la calendarización de las actividades correspondientes al Sistema Piñón – Corona.

Piñón - Corona		Agosto					Septiembre					Octubre					Noviembre					Diciembre													
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5									
Piñon - Corona	Estado de los dientes Piñón - Corona							Mf							Mf									Mf										Mf	
	Alineamiento estático lado alimentación y descarga (contacto, backlash)														BMd																				BMd
Contraeje	Vibración descansos lado alimentación y descarga								Mf						Mf								Mf											Mf	
	Juego interno lado alimentación y descarga															BMd																		BMd	

Enero					Febrero					Marzo					Abril					Mayo					Junio					Julio					Agosto				
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
			Mf						Mf					Mf					Mf					Mf					Mf					Mf					Mf
									BMd										BMd					BMd					BMd					Ad					BMd
			Mf						Mf					Mf					Mf					Mf					Mf					Mf					Mf
									BMd										BMd					BMd					BMd					BMd					BMd

Frecuencia		Actividades		Estado	
S	Semanal		Rellenar	f	Funcionando
BS	BiSemanal		Inspección	d	Detenido
M	Mensual(840 horas)		Limpieza		
BM	BiMensual(1680 horas)		Cambio		
TM	Trimestral(2520 horas)		Medición		
SM	Semestral(5040 horas)		Apriete/Ajuste		
A	Anual(10080 horas)				





### Anexo E.9: Calendarización Reapriete Pernos Sistema.

A continuación, se muestra la calendarización de actividades correspondientes al Reapriete de Pernos del Sistema.

Molino de bolas		Agosto					Septiembre					Octubre					Noviembre					Diciembre					Enero									
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5					
Totalidad de sistemas	Pernos																																			

Febrero					Marzo					Abril					Mayo					Junio					Julio					Agosto									
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5					

Frecuencia		Actividades		Estado	
S	Semanal		Rellenar	f	Funcionando
BS	BiSemanal		Inspección	d	Detenido
M	Mensual(840 horas)		Limpieza		
BM	BiMensual(1680 horas)		Cambio		
TM	Trimestral(2520 horas)		Medición		
SM	Semestral(5040 horas)		Apriete/Ajuste		
A	Anual(10080 horas)				



**Anexo F:** Tabla A1 de Severidad Norma ISO 10816-3 Vibración Mecánica.

Para medir vibraciones en el Molino de Bolas de Compañía Minera Cerro Negro, se debe utilizar la tabla A1, debido a que el equipo es eléctrico y cuenta con una altura de eje mayor a 315 [mm].

Por otro lado, el tipo de soporte que este posee es rígido, debido a que la velocidad de rotación del equipo es menor a su primera velocidad crítica.


**Tabla A1. Máquinas del Grupo1: Máquinas grandes** con potencia nominal sobre 300 Kw y no más de 50 MW; máquinas eléctricas con altura de eje  $H \geq 315$  mm.

Desplazamiento RMS $\mu\text{m}$	Velocidad RMS mm/s	Tipo de soporte	
		Rígido	Flexible
bajo 29	bajo 2,3	A	A
29 - 45	2,3 - 3,5	B	B
45 - 57	3,5 - 4,5		
57 - 90	4,5 - 7,1	C	C
90 - 140	7,1 - 11,0	D	D
sobre 140	sobre 11,0		D

Entonces, la velocidad de vibración en el sistema considerada aceptable debe ser menor a 4,5 [mm/s].

**Anexo G:** Reporte de Fallas.

A continuación, se muestra el Reporte de Fallas propuesto a CMCN.

<b>REPORTE DE FALLAS</b> COMPAÑÍA MINERA CERRO NEGRO S.A DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO MECÁNICO Y ELÉCTRICO		
Nombre: ..... Fecha: ..... Hora de inicio: ..... Hora de detención equipo: ..... Hora de reparación: ..... Hora de puesta en marcha: .....		
<b>TIPO DE FALLA</b>		
Mecánica <input type="checkbox"/> <span style="margin-left: 300px;">Eléctrica</span> <input type="checkbox"/>		
<b>ÁREA DE OCURRENCIA</b>		
Chancado 1° <input type="checkbox"/>	Chancado 2° <input type="checkbox"/>	Chancado 3° <input type="checkbox"/>
Molienda <input type="checkbox"/>	Flotación <input type="checkbox"/>	Espesador/Filtro <input type="checkbox"/>
Relave <input type="checkbox"/>	Red de Agua <input type="checkbox"/>	
<b>IDENTIFICACIÓN FALLA</b>		
Equipo: ..... Componente que presenta la falla: ..... Posible causa que provocó la falla: ..... Solución correctiva al problema: .....		
<b>OTROS</b>		
Observaciones: ..... ..... .....		
_____ Firma Mecánico/Eléctrico		_____ Firma Coordinador Mecánico/Eléctrico
Use implementos de seguridad, no asuma riesgos innecesarios. <b>Compañía Minera Cerro Negro S.A.</b>		