



Universidad de Chile  
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  
Departamento de Ingeniería Mecánica



# Mantenimiento de un Chancador Sandvik H-8000

## INFORME FINAL

ME57A - Mantenimiento de Maquinaria  
Profesor Rodrigo Pascual J.

Sergio Botto G.  
Daniel Punolef D.  
Sebastián Rey P.

**Santiago, 21 de noviembre de 2003**

# Indice

<b>1. Evaluación de Impacto Técnico/Económico del Proyecto</b>	<b>4</b>
<b>2. Introducción</b>	<b>5</b>
<b>3. Objetivos</b>	<b>6</b>
<b>4. Antecedentes de la empresa</b>	<b>7</b>
<b>5. Descripción del equipo</b>	<b>8</b>
<b>6. Identificación del equipo</b>	<b>9</b>
<b>7. Diagrama funcional de bloques</b>	<b>11</b>
<b>8. Condiciones de operación</b>	<b>12</b>
<b>9. Condiciones actuales de mantención</b>	<b>13</b>
<b>10. Análisis de modo de falla</b>	<b>14</b>
<b>11. Árbol de fallas</b>	<b>15</b>
<b>12. Análisis de importancia</b>	<b>18</b>
<b>13. Análisis de costo de falla</b>	<b>19</b>
<b>14. Análisis de Pareto de los modos de falla</b>	<b>20</b>
<b>15. Memoria de Cálculo del Costo por Modos de Falla</b>	<b>22</b>
<b>16. Arbol de Mantención</b>	<b>24</b>
<b>17. Modelo de Weibull para Modo de Falla Crítico</b>	<b>28</b>
17.1. Método Iterativo . . . . .	28
17.2. Sensibilidad y Error Cuadrático . . . . .	28
17.3. Validación del Modelo . . . . .	29
17.4. Curva de Confiabilidad . . . . .	30
17.5. MTBF . . . . .	31
17.6. Tasa de fallas . . . . .	31
<b>18. Definición de Estrategia Óptima de Mantención</b>	<b>33</b>
18.1. Plazo óptimo entre Mantenciones Preventivas . . . . .	33
18.2. Costos de Mantención Predictiva . . . . .	34
18.3. Costos de Mantención Preventiva . . . . .	35

<b>19.Frecuencia Optima de Inspecciones</b>	<b>36</b>
19.1. Minimización del CGM . . . . .	36
19.2. Maximización de Disponibilidad . . . . .	37
<b>20.Agrupamiento Optimo de Tareas Preventivas</b>	<b>38</b>
<b>21.Reemplazo Optimo de Equipos</b>	<b>40</b>
<b>22.Análisis Bibliográfico</b>	<b>41</b>
22.1. Resumen de Papers estudiados . . . . .	41
22.2. Comentarios y Utilidad . . . . .	41
<b>23.Evolución de Defectos e Inspecciones.</b>	<b>42</b>
23.1. Desarrollo del Modelo . . . . .	42
23.2. Comentarios . . . . .	44
<b>24.Overhaul/Reemplazo con Programación no Lineal.</b>	<b>45</b>
24.1. Overhaul Optimo con Tasa de Fallas con Distribución Weibull . . . . .	45
24.2. Comentarios . . . . .	47
<b>25.Periodos de Garantía y Mantenimiento Preventiva.</b>	<b>48</b>
25.1. Evaluación de Estrategia de Mantenimiento . . . . .	48
25.1.1. Costo de mantenimiento correctiva para comprador . . . . .	48
25.1.2. Costos de mantenimiento correctiva para vendedor . . . . .	48
25.2. Comentarios . . . . .	50
<b>26.Planificación PERT para Plan Preventivo Completo del Equipo.</b>	<b>51</b>
26.1. Planificación de Tiempos. . . . .	51
26.2. Planificación de Cargas. . . . .	56
26.3. Planificación de Tareas . . . . .	56
26.4. Comentarios . . . . .	56
<b>27.Gestión de Repuestos.</b>	<b>58</b>
27.1. Determinación de Cantidad Optima de Pedido . . . . .	58
27.2. Comentarios . . . . .	58
<b>28.Redundancia Optima.</b>	<b>60</b>
28.1. Estudio de Redundancia en Planta de Chancado . . . . .	60
28.2. Comentarios . . . . .	61
<b>29.Tamaño de Cuadrillas.</b>	<b>62</b>
29.1. Esfuerzo Optimo de una Cuadrilla. . . . .	62
29.1.1. Descripción del Modelo . . . . .	62

29.2. Comentarios . . . . .	63
<b>30. Plan de Mantenimiento RBM.</b>	<b>64</b>
30.1. Constitución de Grupos. . . . .	64
30.2. Etapa I: Estudio del sistema. . . . .	64
30.3. Etapa II: Análisis de Fallas. . . . .	64
30.4. Elaboración del Plan Técnico. . . . .	65
30.5. Comentarios . . . . .	66
<b>31. Mantenimiento TPM.</b>	<b>67</b>
31.1. Hoja de Inspección. . . . .	67
31.2. Indicadores TPM. . . . .	67
31.3. Comentarios . . . . .	68
<b>32. Conclusiones Finales</b>	<b>70</b>

# 1. Evaluación de Impacto Técnico/Económico del Proyecto

A continuación se hará un resumen de los alcances logrados por el plan de mantenimiento que se detalla en el presente informe.

La tabla 1. muestra un resumen de los ahorros logrados por la implementación de la política de mantenimiento propuesta.

El detalle de los resultados obtenidos en la tabla 1. se muestran en los capítulos de este informe.

Una síntesis de los resultados obtenidos es la siguiente:

1. El Ahorro logrado por establecer una política de mantenencias preventivas es de 56 KUSD/año. Esto se ha logrado ya que una mantención preventiva tiene un costo asociado menor que una intervención correctiva, si bien se hace una detención más del equipo al año, esta trae consigo un menor riesgo en posibles daños asociados a una falla en el componente principal del equipo, que como se detalla en el informe es el Eje Principal.
2. Mediante la planificación PERT, se ha logrado la disminución en 2.5 horas en la mantención del componente principal, esta disminución de tiempos, trae consigo un ahorro de 134 KUSD/año.
3. En el proyecto se realizó un agrupamiento de tareas preventivas para trabajar sobre el *Hydroset*, esta agrupación implica un ahorro de cerca de 1000 USD/año, si bien no es mucho en relación a los otros puntos antes descritos, esta tarea se puede realizar para componentes que tengan una mayor importancia dentro del equipo.

Cuadro 1: Comparación Política Actual v/s Propuesta de Proyecto

		Costos (KUSD)				
	Política	Antes	Después	Ahorro	% Ahorro	Normalizado
1	Frec. De inspecciones	192	136	56	29	0,070
2	PERT+Frec.Optima Mant.	329	195	134	41	0,168
3	Agrupamiento de tareas	3,6	0,74	2,86	79	0,004
<b>TOTAL</b>		<b>524,6</b>	<b>331,74</b>	<b>192,86</b>	<b>37</b>	<b>0,241</b>

## 2. Introducción

El siguiente informe corresponde a la entrega final del trabajo semestral del curso *ME57A - Mantenimiento de Maquinaria*. Este consiste en el análisis de un equipo particular perteneciente a una empresa ligada al ámbito industrial.

Para el desarrollo de un buen trabajo, el equipo debe estar bajo un plan de mantenimiento periódica a cargo de la empresa o de algún contratista que se disponga. Dentro de este plan se debe llevar un historial de revisiones, reparaciones y los costos asociados a estas actividades. La información recopilada en base a los historiales, es de gran utilidad para la realización de los modelos matemáticos que se desarrollarán en el presente trabajo.

El Equipo seleccionado para realizar un plan de mantenimiento, es un chancador *Sandvik Hydrocone H-8000*, que realiza operaciones de chancado terciario en la División El Teniente de CODELCO-CHILE.

En el presente trabajo se basará en el mantenimiento *Centrado en la confiabilidad* (RBM), donde en primera instancia se realizará una descripción del equipo, su funcionamiento y los componentes principales. Considerando el historial de fallas se realizará un análisis de Pareto, que junto a un análisis de modos de fallas, efecto y criticidad se determinará el componente crítico de este equipo.

En base a este componente crítico se realizará un plan de mantenimiento preventiva en base al modelo de Weibull para fallas.

Por otro lado, se realizará un estudio con el fin de mejorar la gestión de mantenimiento dentro de la planta de chancado con el objetivo de minimizar el *Costo Global de Mantenimiento* (CGM).

### 3. Objetivos

El objetivo principal del trabajo semestral es diseñar un plan de mantenimiento preventivo para el Chancador Sandvik H-8000, los objetivos generales son:

- Tener un conocimiento del equipo, y determinar el componente crítico.
- Modelar el comportamiento de las fallas mediante el modelo de Weibull y así determinar parámetros como tiempo medio entre fallas(MTBF), frecuencia óptima de mantenimiento, curva de tasa de fallas ( $\lambda(t)$ ), tiempo entre overhauls, tiempo de reemplazo de equipo.
- Realizar un estudio a la gestión operativa de la planta, como determinar cantidad óptima de pedido para bodega, tamaño de cuadrillas, planificación de tareas.
- Determinar el ahorro que se obtiene al implementar el plan de mantenimiento.

## 4. Antecedentes de la empresa

Dentro de la División El Teniente, la Planta de Chancado Secundario tiene como fin la obtención de una roca de mineral de media pulgada de tamaño, para esto cuenta con equipos chancadores secundarios y terciarios, ambos son del tipo cónico. En total, existen 3 equipos chancadores secundarios, que trabajan con la roca de mayor tamaño y 8 equipos terciarios, dentro de estos últimos se encuentran los chancadores Sandvik H-8000, que fueron adquiridos por la empresa hace 3 años.

Dado que El Teniente opera bajo los conceptos de centro de costos, la planta de chancado tiene como *comprador* de producto final (*roca de 1/2 in.* a la planta de concentración de mineral. Entre ambos centros productivos existe un buzón de almacenamiento que cubre en caso de fallas, las pérdidas asociadas a la no producción. Sin embargo este *pulmón* no tiene una capacidad infinita, por lo tanto para fallas con un alto tiempo para reparar (TTR), el buzón se vacía y se incurre en costo de falla.

Dada la gran producción de estos equipos, la mantención juega un rol vital ya que las fallas traen costos de no producción muy elevadosm que si bien son disminuidos en parte por el pulmón, siguen siendo grandes sumas de dinero.

## 5. Descripción del equipo

El equipo con el cual se trabajará es un Chancador cónico Sandvik H-8800, el cual realiza tareas de chancado terciario.

Pese a que existen más equipos que realizan las mismas tareas, una falla y la detención que provoca esta no puede ser cubierta por los demás chancadores, dado que estos trabajan siempre a capacidad máxima. Por lo cual la redundancia de equipos solo se aplica en el momento que no exista material proveniente del chancador primario, ubicado en la mina. Dado que esto sucede en muy raras ocasiones, se considera que no existe redundancia de equipos.

El funcionamiento del equipo consta de 7 conjuntos básicos:

1. Carcasa superior y araña: cuya función es la de sostener el eje principal
2. Eje principal: Realiza el chancado de mineral por medio de la presión ejercida entre planchas de revestimiento
3. Carcasa inferior: Soporta los conjuntos de excéntrica, eje piñón e hydroset
4. Excéntrico: Elemento que da giro excéntrico del eje principal
5. Eje-Piñón: Entrega el torque al excéntrico proveniente de un motor
6. Hydroset: Determina la altura del poste con la cual se realizara el chancado
7. Sistema de lubricación: Proveer de lubricante al conjunto completo

Los datos principales del equipo se resumen en la tabla 2. Esta información ha sido obtenida de [5].

Marca	Sandvik
Modelo	Hydrocone H-8000
Peso	66.5 ton
Altura	5820 mm
Diámetro exterior	2750 mm
Angulo de excentricidad	8°
Capacidad máxima de diseño	350 ton/hr
Color	Azul
Marca motor	Siemens
Potencia	800 HP





Figura 2: Equipo en funcionamiento

## 7. Diagrama funcional de bloques

El figura 3. muestra el diagrama de bloques para el chancador, donde se aprecia la división de los principales sistemas con que cuenta el equipo, sus funciones y su interacción con el medio. Este diagrama tiene la utilidad de que cualquier *flecha* que se vea interrumpida implica un falla en el equipo.

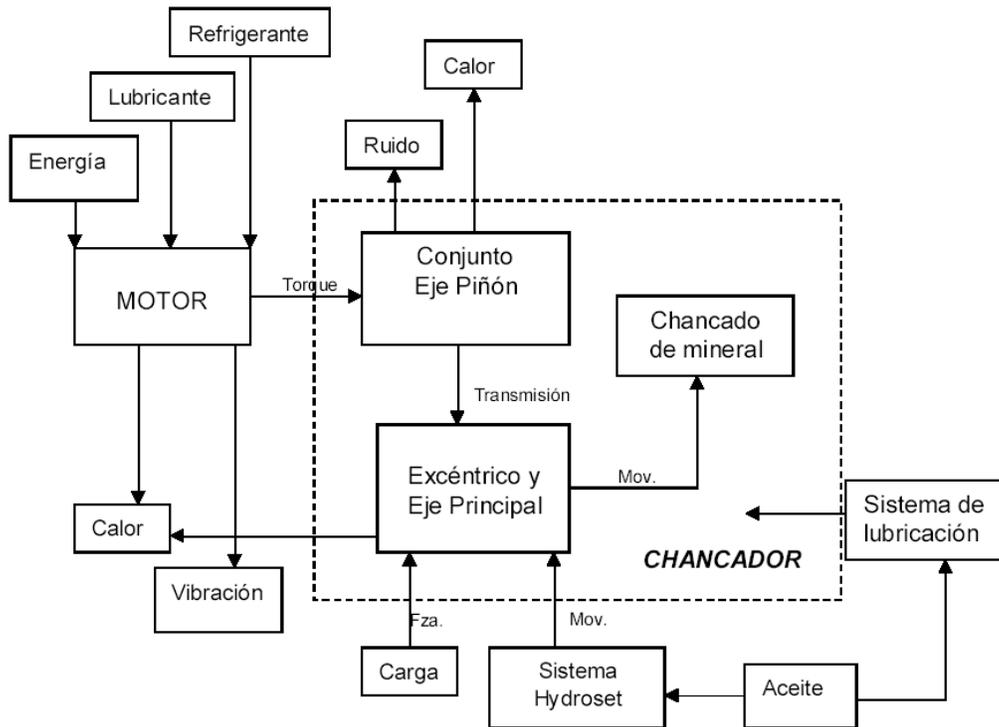


Figura 3: Diagrama Funcional de Bloques

## 8. Condiciones de operación

La máquina realiza exclusivamente operaciones de chancado, donde la exigencia es máxima debido a las presiones ejercidas para la trituración del mineral. Su funcionamiento es continuo durante el día, solo se detiene en caso de imprevistos o mantenencias programadas.

El chancador recibe un flujo de mineral aproximado de 340 ton/hr. Pese a que en la planta existen electroimanes para la detección de objetos extraños, de todas formas una parte de estos entran al chancador, este tipo de situaciones acarrea la mayor cantidad de fallas en los revestimientos del poste y de la carcasa superior.

El equipo está expuesto a un ambiente con alta concentración de polvo, además del que se genera en el proceso mismo, el ingreso de polvo en la máquina trae consigo fallas en bujes y sistemas de lubricación.

## 9. Condiciones actuales de mantención

En la actualidad, el equipo recibe una mantención oportunista, es decir, existen ciertos componentes críticos que reciben una mantención programada, y dado que en la mayoría de estos casos se debe desmontar todo el equipo, se revisa el interior del chancador y se repara lo que tenga indicios de falla.

El principal conjunto del equipo es el poste o eje principal, para este existe una mantención preventiva.

Según la información recopilada, a las partes menos críticas no se les hace mantención preventiva porque implica una detención total de la línea de producción.

Para la mantención de los chancadores, se cuenta con un equipo que ingenieros y técnicos a cargo del buen funcionamiento de equipos, los técnicos se dividen en cuadrillas de 5 personas para desmontar el equipo y de 2 personas para el reemplazo de conjuntos menores.

A modo de ejemplo, la tabla 3. contiene algunos componentes del chancador y sus tiempos de mantención. Los tiempos de esta tabla se han obtenido de la referencia [4].

Cuadro 3: Frecuencia de cambio actual

Tipo de mantención	Item	Frec. De cambio
Mantencion Preventiva		
	Laina poste	1200
	Cambio de Aceite lubricación	2000
	Cambio Filtro de lubricación	2000
	Cambio poste y Top Shell	1200
	Valvula de Control	5000
	Cambio INNER	5000
	Filtro Piñon	10000
	Bomba de aceite	5000
	Buje y sello grasa Top Shell	3000
Mantención Correctiva		
	Sello hidroset	Desgaste excesivo
	Valvula alivio Hidroset	Desgaste excesivo
	Manguera de lubricación	Desgaste excesivo
	Intercambiador de calor	Temperatura mayor a límite
	Perno Top Shell y Bottom Shell	Corrosión o inicio de grieta
	Buje de Bronce del excentrico quemado	Indicios de quemado
	Cuerpo excentrico	Desgaste excesivo
	Suples Top Shell	Desgaste excesivo
	Manguera lubricación retorno	Desgaste excesivo
	Valvulas piso limitadora	Desgaste excesivo

## 10. Análisis de modo de falla

A continuación se presenta el análisis FMECA de modos de falla, éste se muestra en la tabla 4.

Subsistema	Función	Modo de Falla	Causas	Daños			Métodos de detección	Acciones correctivas	Gravedad(1 a 5)
				Efectos locales	Efectos de nivel superior	Efectos finales			
Eje Principal	Chancado de mineral	Eje no gira	Gripaje entre eje principal y buje excéntrico	Mal funcionamiento del eje	Ruptura de eje	Chancador no opera	Color que toma el eje, (más oscuro)	Desmontar eje principal y unidad excéntrica	5
	Chancado de mineral	Eje gira muy rápido o con régimen excéntrico	Gripaje en portacojinetes de collar	Mal funcionamiento del eje	Ruptura de eje	Chancador no opera	Color que toma el eje, (más oscuro)	Parar y desmontar chancador, controlar piezas de cojinetes	5
	Chancado de mineral	Lainas quebradas	Elementos extraños en el chancador	fractura de material de desgaste	Ruptura de eje	Chancador no opera	Virutas de acero a la salida del chancador	Reemplazar lainas	5
	Chancado de mineral	Eje con fracturas	Fatiga de material debido a vibraciones presentes	Fractura de eje	Posibles daños con mayores consecuencias	Chancador no opera	Instrumentos	Reemplazar eje	5
Excéntrico	Dar giro excéntrico	Buje de Bronce quemado	Aceite sucio, filtro de aceite tapado, sello no funciona	Aumento de desgaste en las piezas del buje	Buje quemado	Chancador no opera	Aumento de temperatura de aceite, baja de nivel	cambiar filtro, controlar niveles de aceite	3
Hydroset	Fijar altura de poste	El chancador no mantiene la ranura entre poste y laina	Fuga de aceite, válvula de seguridad no estanca, aire en sistema hydroset, válvula maniobra no estanca	Mala calidad de mineral	Posibles daños con mayores consecuencias	Chancador no opera	Por Instrumentos	Controlar tubos de aceite, nivel de aceite, limpiar o cambiar válvulas	3
Eje Piñón	Transmitir potencia y	Sonidos extraño en chancador	juego de engranajes mal montados, desgaste de buje	Desgaste prematuro de piñón	Ruptura de piñón	Chancador no opera	Ruidos anormales en el chancador	medir distancia entre ejes, evitar juego, controlar tornillos	3
Motor	Dar torque al chancador	Motor no funciona, con ruidos extraños	Suministro de energía, correas, condiciones ambientales	Motor funciona	Posibles daños con mayores consecuencias	Chancador no opera	verificar conexiones, estado de correas, indicadores básicos	Reparar, reemplazar o rellenar, según correspond a la causa de la falla	2
Carcasas superior e inferior	Fijación de equipo	Fracturas, pernos de fijación cortados	Impacto, vibraciones	Chancador con estructura abollada	Posibles daños con mayores consecuencias	Chancador no opera	Revisar estado de pernos	Reemplazar pernos en mal estado	1
Sistema de lubricación	Mantener temp. aceptable en el equipo	Desgaste en diferentes partes del equipo	Baja capacidad de aceite, perdida en mangueras, falla en intercambiador de calor	Desagaste en piezas	Ruptura de distintos componentes	Chancador no opera	Revisar niveles y temperatura de aceite	Cambio de aceite, reemplazar o reparar lo necesario	4

Cuadro 4: FMECA

## 11. Árbol de fallas

En las figuras 4., 5. y 6. se presenta el árbol de falla del equipo en estudio.

La utilidad de los arboles de fallas es que al momento de provocarse una falla, este sirve como herramienta para diagnosticar con mayor precisión y menor tiempo el origen posible de esta. Los elementos de cada componente fueron obtenidos de la referencia [4].

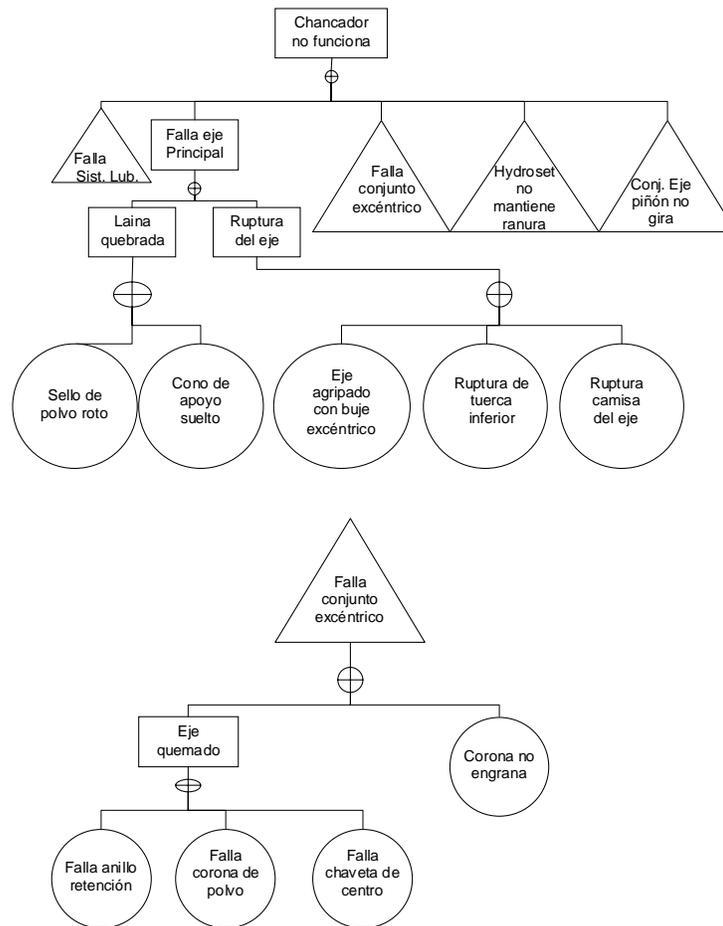


Figura 4: Árbol de Falla del Chancador

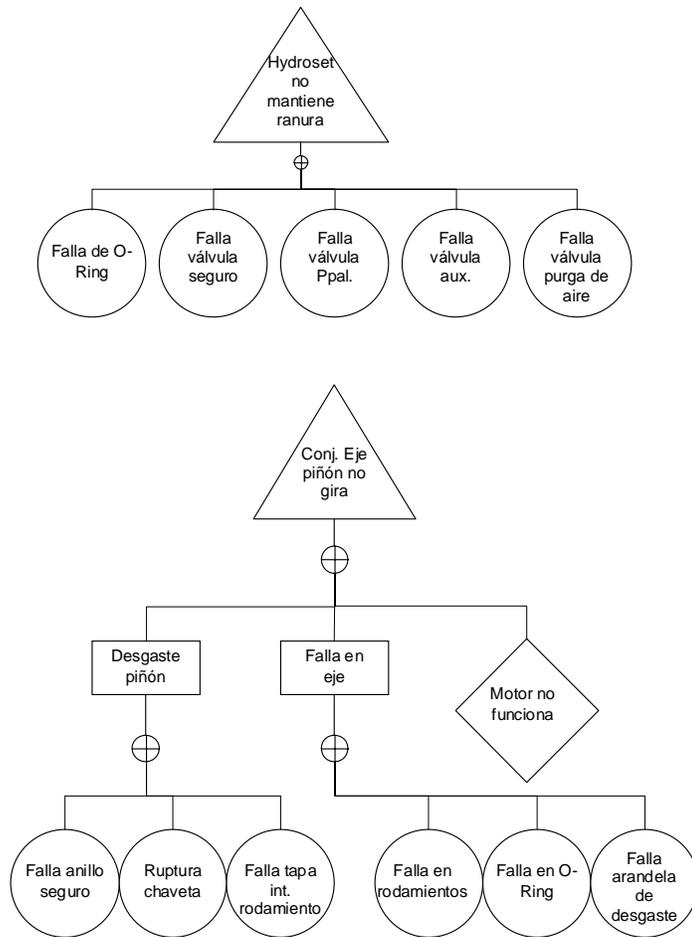


Figura 5: Continuación Árbol de Falla

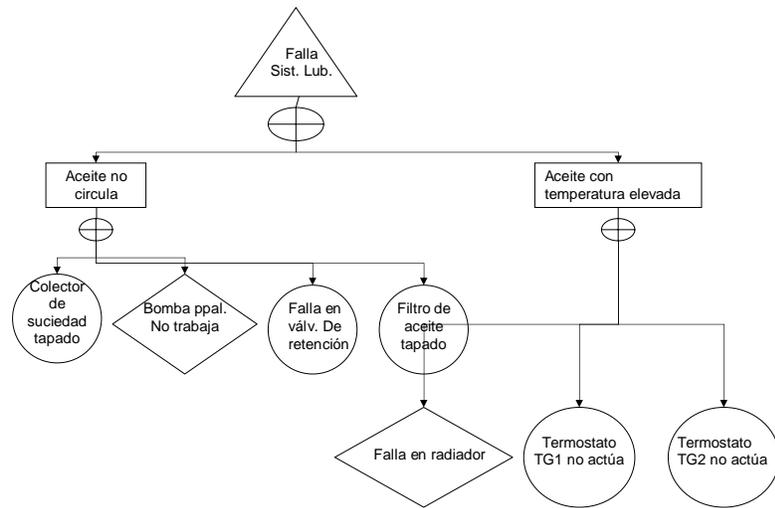


Figura 6: Continuación Árbol de Falla

## 12. Análisis de importancia

Con los datos obtenidos resulta difícil hacer un análisis de importancia ya que se dispone de un historial reducido, por lo que se considera como mejor método para el análisis de importancia es el juicio bien informado y la experiencia de los encargados de mantenimiento. La tabla 5. muestra el análisis de importancia obtenido. Este se hizo en base a los tiempos que implican cada falla y el costo asociado a esta junto con la información recopilada en entrevistas con mantenedores del equipo, para este análisis se tomó como intervalo de tiempo el año en el cual se posee el historial.

Cuadro 5: Análisis de importancia

Modo de falla	Probabilidad de Falla
Cambio poste	0,50
Cambio INNER	0,15
Cuerpo excentrico	0,06
Buje y sello grasa Top Shell	0,05
Intercambiador de calor	0,04
Cambio Filtro de lubricación	0,04
Laina con deformaciones	0,03
Laina poste quebrada	0,03
Bomba de aceite	0,02
Valvula alivio Hidroset	0,02
Valvulas pieso limitadora	0,02
Cambio de Aceite lubricación	0,02
Manguera de lubricación	0,01
Filtración Hidroset	0,01
Filtro Piñon	0,01
Sello hidroset roto	0,01
Perno cortado Top Shell y Bottom Shell	0,01

### 13. Análisis de costo de falla

Para realizar el análisis de costo de falla, se consideraron los siguientes puntos.

- Se recopiló el historial de fallas del equipo entre los meses de Enero y Junio del año 2003, además del precio del repuesto asociado a la mantención.
- El costo de hora hombre promedio es de \$3.000/hr.
- El costo de almacenamiento se tomo como un 8% del valor del repuesto.
- El flujo a través del chancador es de 3.3 (ton de cobre fino seco)/hr., asumiendo que el valor del cobre es 0,85 USD/libra, se estima que el costo de falla asociado a la no producción es de 3800 USD. Esto es en primera aproximación, debido a la existencia de un *pulmón* con capacidad de almacenar mineral, se deberá hacer una simulación para ver el verdadero costo de falla por equipo. Este análisis es una primera aproximación al análisis de los costos de falla

Para las fallas entre julio de 2002 a junio de 2003, se obtiene la tabla 6, tomando en cuenta las condiciones anteriores.

Cuadro 6: Análisis de costos de falla

Modo de falla	hrs.Det	Cant. fallas	Cant.trab.	$C_{rep}$	$C_i$	CGM(KUSD)			
						$C_f$	$C_a$	CGM	
Bomba de aceite	2	4	2	4	10	12	0,40	22	
Buje y sello grasa Top Shell	5	2	5	10	5	18	1,00	24	
Cambio de Aceite lubricación	1	6	2	1	4	12	0,06	16	
Cambio Filtro de lubricación	1	10	2	1	5	20	0,05	25	
Cambio INNER	4	4	5	30	30	32	3,00	65	
Cambio poste y Top Shell	10	7	5	80	70	140	8,00	218	
Cuerpo excentrico	4	2	5	18	9	16	1,80	27	
Filtración Hidroset	2	2	2	0,1	0,2	6	0,01	6	
Filtro Piñon	2	2	2	0,1	0,2	6	0,01	6	
Intercambiador de calor	2	4	2	7	13	16	0,65	30	
Laina con deformaciones	4	2	5	6	3	16	0,60	20	
Laina poste quebrada	4	2	5	6	3	16	0,60	20	
Manguera de lubricación	2	2	2	0,6	0,7	8	0,06	9	
Perno cortado Top Shell y Bottom Shell	1	2	2	0,1	0,2	4	0,01	4	
Sello hidroset roto	1	2	2	0,3	0,5	4	0,03	45	
Valvula alivio Hidroset	2	4	2	4	11	12	0,40	23	
Valvulas pieso limitadora	2	4	2	4	11	12	0,40	23	

## 14. Análisis de Pareto de los modos de falla

El análisis de Pareto busca la determinación de componentes críticos, ordenando los datos por costo de forma descendente.

Usando los costos calculados en el punto anterior, se obtienen los resultados de la tabla 7.

Cuadro 7: Análisis de Pareto

Modo de falla	Fi	Fi/Ft	Costos (KUSD)		
			Costo total	Ci	Ci/Ct
Cambio poste	6	0,10	22	22	0,50
Cambio INNER	10	0,17	24	46	0,65
Cuerpo excentrico	12	0,20	16	62	0,70
Buje y sello grasa Top Shell	14	0,23	25	87	0,75
Intercambiador de calor	18	0,30	65	152	0,79
Cambio Filtro de lubricación	28	0,47	218	370	0,83
Laina con deformaciones	30	0,50	27	397	0,86
Laina poste quebrada	32	0,53	6	403	0,89
Bomba de aceite	36	0,60	6	409	0,91
Valvula alivio Hidroset	40	0,67	30	439	0,93
Valvulas pieso limitadora	44	0,73	20	459	0,95
Cambio de Aceite lubricación	50	0,83	20	479	0,97
Manguera de lubricación	52	0,87	9	488	0,97
Filtración Hidroset	54	0,90	4	492	0,98
Filtro Piñon	56	0,93	45	537	0,99
Sello hidroset roto	58	0,97	23	560	0,99
Perno cortado Top Shell y Bottom Shell	60	1,00	23	583	1,00

Graficando los datos obtenidos en la tabla 7, se obtiene la curva de la figura 7.

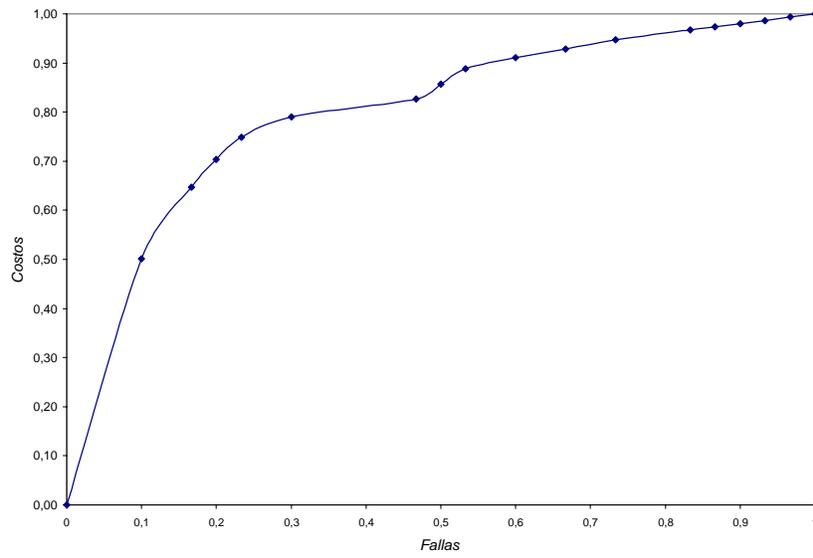


Figura 7: Gráfico de Pareto

## 15. Memoria de Cálculo del Costo por Modos de Falla

En esta sección se analizará el costo asociado a tres modos de fallas:

- Falla de eje principal
- Corte de pernos carcasa superior e inferior
- Falla en filtro de lubricación

El CGM se divide en:

- Costo de falla ( $C_f$ )
- Costo de almacenamiento ( $C_a$ )
- Costo de intervención ( $C_i$ )

Este último se divide en:

- Costo de repuesto ( $C_{rep}$ )
- Costo asociado a mano de obra ( $C_{HH}$ )
- Costo de material fungible ( $C_{fung}$ )

Se han tomado las siguientes consideraciones para los tres tipos de falla:

1. El costo de fungibles se ha despreciado dado su magnitud frente a los demás tipos de costo.
2. El costo de almacenamiento se ha supuesto como un 6% del costo del repuesto ref [1].
3. El costo de H.H. es de  $4USD/hr$ .

El flujo de mineral que pasa a través de un chancador es de  $3.4 tonCu/hr.$ , por lo que inicialmente el costo de falla sería de  $6000 USD/hr$ , pero dada la existencia de un buzón de mineral al final de la planta de chancado, el costo de falla disminuye a  $2000USD/hr.$ . Dado que el buzón esta en caso de que existan fallas. Los tiempos de reparación (TTR) fueron obtenidos como un promedio del historial de fallas, en base a los tiempos de la tabla 6. Dado que no existe redundancia de equipos y que éstos trabajan a máxima capacidad solo se toma como costo de falla la no producción, contando la existencia del buzón (pulmón de alivio).

El costo de los repuestos utilizados se resume a continuación:

- Eje principal:  $80000 USD$
- Pernos carcasa inferior-superior (4):  $120 USD$
- Filtro de lubricación:  $500 USD$

La cantidad de mecánicos por tarea es:

- Eje principal: 5 mecánicos

- Pernos carcasa inferior-superior: 2 mecánicos
- Filtro de lubricación: 2 mecánicos

En la tabla 8. se resume el costo por modo de falla.

Cuadro 8: Costo por Modo de Falla

	Hrs. Det.	Cant. Mec	Costos (USD)					CGM
			$C_{rep}$	$C_i$	$C_f$	$C_a$		
<b>Cambio eje principal</b>	10	5	8000	200	14000	480	47000	
<b>Cambio Filtro de lubricación</b>	1	2	500	8	1400	30	4500	
<b>Pernos cortados top y bottom shell</b>	1	2	120	8	1400	7	1660	

En la tabla 8. se ve que el modo de falla crítico, tiene el CGM mayor para el equipo, pese a que los otros componentes pueden fallar con mayor frecuencia, el costo de falla asociado, y el de intervención dado por los repuestos y las H.H. utilizadas, muestra que es el componente del equipo a trabajar.

## 16. Arbol de Mantenimiento

En las figuras 8. y 9. se muestra el árbol de mantenimiento para el modo de falla crítico determinado en los puntos anteriores, este es, Eje principal no gira.

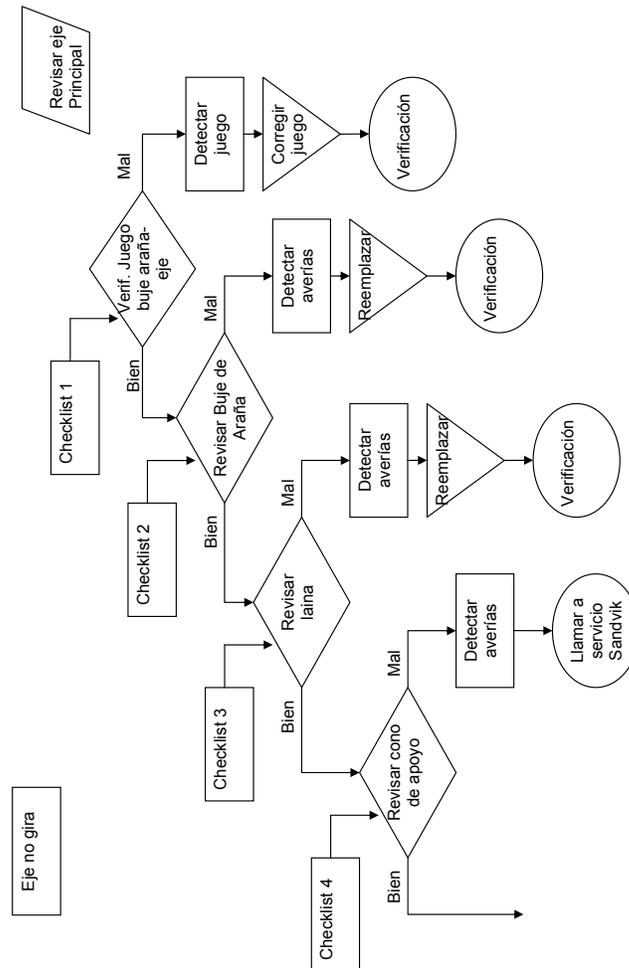


Figura 8: Arbol de Mantenimiento

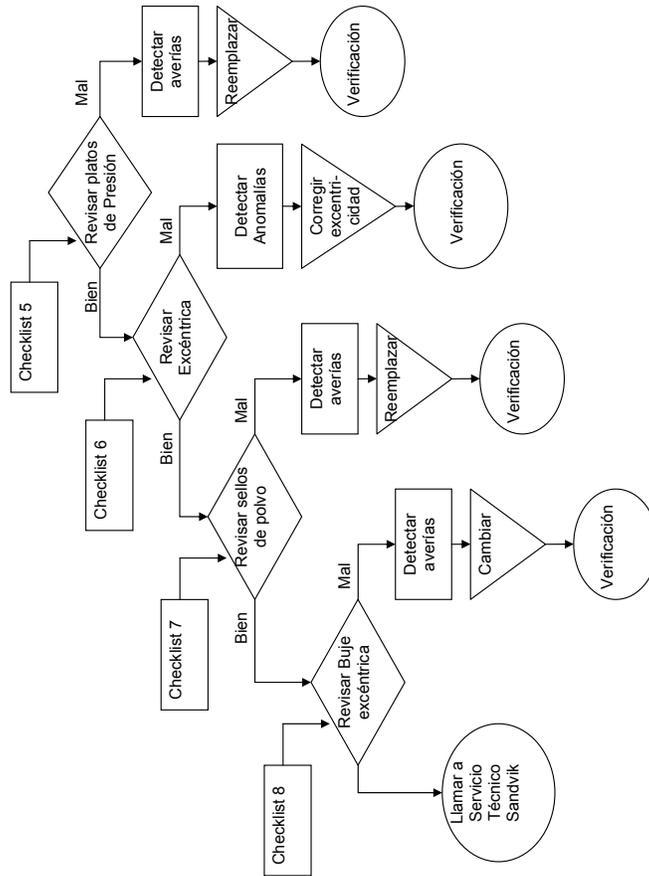


Figura 9: Arbol de Mantenimiento

Los checklist descritos a continuación son las tareas a realizar para cada una de las pruebas mostradas en el árbol de mantenimiento. Los parámetros de cada uno de los *checklist* fueron basados en la información de [4].

### **Checklist 1**

- Remover pernos de remoción de unión carcasa superior y carcasa inferior
- Utilizar pernos de levante para separar parcialmente la junta cónica
- Levantar la carcasa superior utilizando estrobos y grúas adecuadas
- Inspeccionar la corrosión posible u otros daños
- Verificar que juego entre buje y eje principal no supere los 3.5 mm.

### **Checklist 2**

- Retirar pernos de fijación de tapa del buje
- Retirar O-ring
- Retirar pernos de fijación de buje de araña
- Desmontar buje usando estrobos y grúa

### **Checklist 3**

- Retirar camisa del eje principal
  - Insertar cáncamos en los hoyos de levante de la camisa para levante con grúa o gata
  - Rápidamente, calentar un espacio longitudinal alrededor de 50mm alrededor
  - Continúe aplicando presión de levante cuando la camisa comienza a moverse
- Realizar inspección visual de estado de lana de desgaste, considerar aspectos como deformación, ruptura, signos de agripamiento

### **Checklist 4**

- Cortar anillo de corte de tuerca exterior y retirarla
- Retirar lana usando cáncamos de levante y una grúa o gata
- Revisar estado de tuerca interior que fija cono de apoyo, si esta está suelta, removerla y reemplazarla
- Revisar inspección visual del cono de apoyo, tomar en cuenta aspectos como desgaste excesivo
- Utilizar un feeler entre cono de apoyo y eje principal para ver si está suelto

### **Checklist 5**

- Utilizar gancho de levante especial suministrado en el juego de herramientas para levantar el plato de presión intermedia y el plato de presión del pistón del hydroset

- Cuando reemplaza los componentes de presión, asegurarse que el pin de ajuste ubicado en el pistón del hydroset esté alineado con el orificio en el plato de presión del pistón
- Realizar inspección visual del estado de los platos de presión

#### **Checklist 6**

- Verificar excentricidades y tolerancias según los siguientes parámetros:
  - Juego máximo excéntrica-buje excéntrica: 0.3 mm
  - Holgura en eje: 560 mm
  - Holgura eje carcasa-excéntrica: 2.2 mm
- Realizar inspección visual del estado del buje excéntrica, tomando en cuenta parámetros como color de buje, o signos de agripamiento

#### **Checklist 7**

- Remover todos los pernos, incluyendo los pernos cortos enroscados en el collar de polvo
- Utilizar 4 pernos largos como pernos de levante para separar el collar de polvo de la carcasa inferior
- Levantar el collar de polvo con 4 cáncamos de levante, poner cuidado en no dañar el empaque
- Realizar inspección visual del estado del sello de polvo, tomando en cuenta parámetros como ruptura, mal ajuste

#### **Checklist 8**

- Remover anillos de sello interno
- Remover buje utilizando cáncamos y gata de levante
- Realizar inspección

La descripción de los Checklist asociados a cada prueba realizada en la mantención del chancador, facilita la inspección y el desarrollo de tareas específicas para disminuir el tiempo de intervención y así minimizar el CGM.

## 17. Modelo de Weibull para Modo de Falla Crítico

En esta sección, se trabajará con el modo de falla crítico descrito en las secciones anteriores. La forma de trabajo es adecuar una función para modelar el comportamiento de la frecuencia de fallas y así obtener los parámetros de Weibull, que serán utilizados posteriormente.

### 17.1. Método Iterativo

Para la comenazar la utilización del método se usa como tiempo entre fallas, el obtenido del historial de fallas que se tiene en la empresa para el modo crítico. La información recopilada, se muestra en la tabla 9.

Aplicando el modelo de Weibull a los datos obtenidos, se obtienen los gráficos de la figura 10.

### 17.2. Sensibilidad y Error Cuadrático

Para la obtención de gamma tal que minimice el error cuadrático medio, se utilizó MatLab, que muestra el gráfico de la figura 10. Con este modelo se obtienen los siguientes parámetros de Weibull:

- $\beta=1.2553$
- $\eta=229$
- $\gamma=802$

El valor de beta cercano a 1, indica que el componente se encuentra en su etapa de madurez, donde la tasa de fallas es constante, esto coincide con la edad del equipo en relación a cuantos años se espera que este en buen funcionamiento. Por otro lado, el valor de  $\gamma$  asegura que el tiempo sin que se incurra en fallas sera de 802 hrs..

Cuadro 9: Cálculos del Modelo de Weibull

i	Tiempo entre fallas segun historial (hrs.)	Fi	ln(T)	$ln(ln(\frac{1}{1-F_i}))$
1	850	0,13	6,75	-2,01
2	880	0,25	6,78	-1,25
3	920	0,38	6,82	-0,76
4	990	0,50	6,90	-0,37
5	1050	0,63	6,96	-0,02
6	1110	0,75	7,01	0,33
7	1160	0,88	7,06	0,73

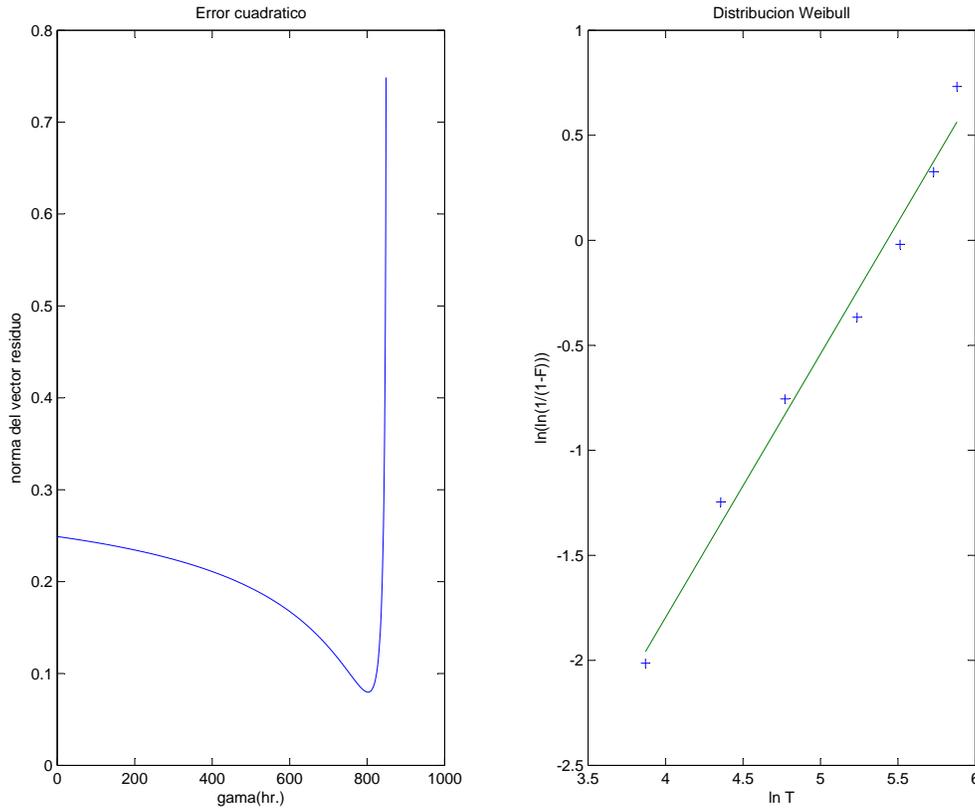


Figura 10: Modelo de Weibull

En la figura 10. se observa que la correlación es altísima, por lo cual se considerará que los datos obtenidos del historial se comportan como el modelo de Weibull, sin embargo esta hipótesis debe ser corroborada.

### 17.3. Validación del Modelo

Dado que del historial se tienen solo 7 fallas, se utilizará para la validación del modelo el método de Kolmogorov-Smirnov, la tabla, muestra el procedimiento para validar o rechazar el modelo obtenido, esto se muestra en la tabla 10.

Cuadro 10: Test de Kolmogorov-Smirnov

<b>i</b>	<b>Tiempo entre fallas segun historial (hrs.)</b>	<b>f(t)</b>	<b>F(t)</b>	<b>Dni</b>
<b>1</b>	850	0,13	0,132	0,007
<b>2</b>	880	0,25	0,229	0,021
<b>3</b>	920	0,38	0,354	0,021
<b>4</b>	990	0,50	0,543	0,043
<b>5</b>	1050	0,63	0,670	0,045
<b>6</b>	1110	0,75	0,767	0,017
<b>7</b>	1160	0,88	0,827	0,048

Para 7 datos y un 95 % de confiabilidad, de la tabla de Kolmogorov-Smirnov se obtiene  $D(7; 0,05) = 0,486$ . El mayor valor de  $D_n$  obtenido en la tabla es 0.048

Dado que  $D(7; 0,05) > D_{n,max}$ , se acepta el modelo con los parámetros descritos en la sección anterior. Esto ya se había previsto dada la alta correlación de datos observados en la figura 3., además esto muestra que el modelo de Weibull representa de gran forma el comportamiento del chancador.

#### 17.4. Curva de Confiabilidad

La curva de confiabilidad para Weibull sigue la siguiente relación:

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

Para obtener  $R(t)$ , se utilizan los datos obtenidos en la sección anterior, tanto para tiempos como para los parámetros de Weibull. Esto se resume en la tabla 11.

Cuadro 11: Confiabilidad

<b>i</b>	<b>Tiempo entre fallas segun historial (hrs.)</b>	<b>R(t)</b>
<b>1</b>	850	0,87
<b>2</b>	880	0,77
<b>3</b>	920	0,65
<b>4</b>	990	0,46
<b>5</b>	1050	0,33
<b>6</b>	1110	0,23
<b>7</b>	1160	0,17

Con esto, se obtiene la curva de confiabilidad mostrada en la figura 11.

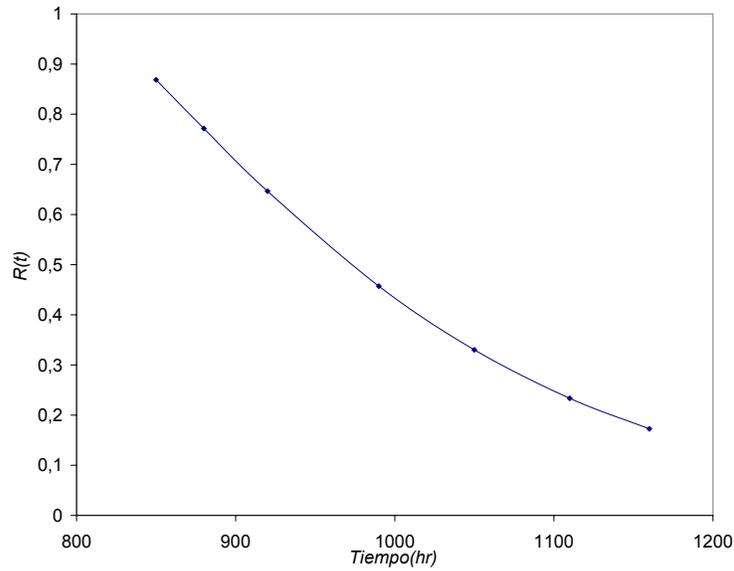


Figura 11: Confiabilidad v/s Tiempo

De la figura 11. se ve que, pasado 40 días se tiene una confiabilidad de 40 %, por otro lado se observa que el cambio de 1200 hrs. previsto por la empresa se realiza cuando se tiene un 10 % de confiabilidad. Este valor de reemplazo, en base al diseño del equipo es muy alto, dada que la confiabilidad en 1200 hrs. es muy baja, en base al historial de la máquina, se determinará un nuevo plazo entre mantenciones preventivas.

### 17.5. MTBF

Para la determinación del tiempo medio entre fallas (MTBF), se utiliza la ecuación 2.

$$MTBF = \gamma + \eta \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) \quad (2)$$

Utilizando los parámetros de Weibull determinados anteriormente, se obtiene un  $MTBF = 42,3$  días. (1015 hrs.)

### 17.6. Tasa de fallas

Para determinar la tasa de fallas, se utiliza la ecuación 3.

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta - 1} \quad (3)$$

En la tabla 12. se observa la tasa de fallas en función del tiempo.

Cuadro 12: Tasa de Fallas

<b>i</b>	<b>Tiempo entre fallas segun historial (hrs.)</b>	$\lambda(t)$
<b>1</b>	850	0,0037
<b>2</b>	880	0,0042
<b>3</b>	920	0,0046
<b>4</b>	990	0,0052
<b>5</b>	1050	0,0056
<b>6</b>	1110	0,0059
<b>7</b>	1160	0,0062

Al graficar, se obtiene la figura refgraftasa.

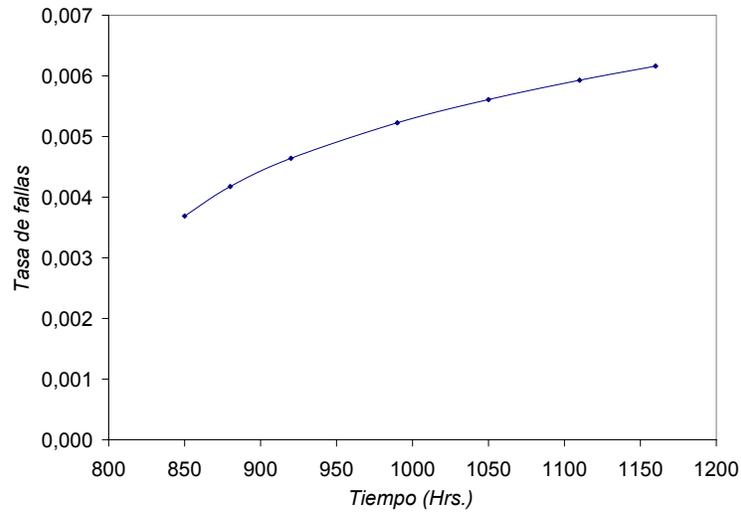


Figura 12: Tasa de Fallas

## 18. Definición de Estrategia Óptima de Mantenimiento

En esta sección, se definirá la estrategia de mantenimiento óptima, esto consiste principalmente en determinar el tiempo entre mantenencias preventivas además de obtener costos de mantenimiento predictivos y preventivos.

### 18.1. Plazo óptimo entre Mantenencias Preventivas

Para obtener el plazo óptimo entre mantenencias preventivas se debe minimizar la razón de costos preventivos y correctivos. Para esto, se calculará el valor  $X_s$  tal que minimice esta razón. Utilizando Matlab para calcular este valor, sólo basta ingresar el parámetro beta de Weibull y  $r$  (costo de falla/costo intervención). Se tiene:

- $\beta=1.2553$
- $r=\text{costo de falla/costo intervención} = 2000(\text{USD/hr})/200(\text{USD/hr}) = 10$
- $k=0.5(C_{i,pr}/C_{i,c})$

Así, se obtiene la curva de la figura 13

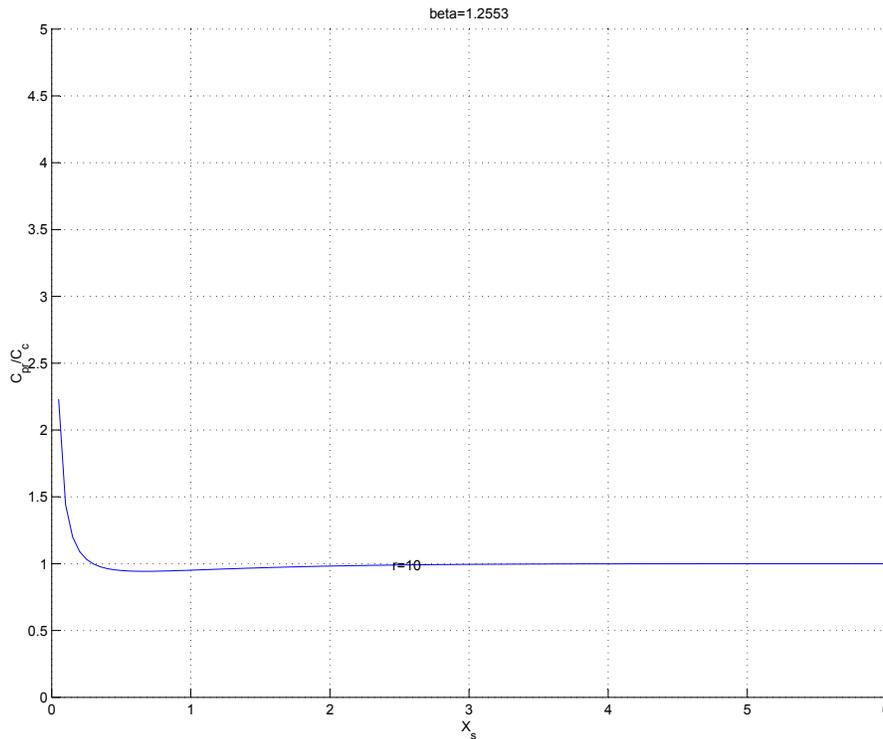


Figura 13:  $X_s$  mínimo

De la figura 13, se observa que el valor mínimo de  $X_s$  es aproximadamente 0.9. Por otro lado, se ve que hacer mantención preventiva tiene un costo igual a 0.91 veces el de hacer mantención correctiva.

Tomando estos valores y considerando los parámetros de Weibull del modelo, se tiene que el plazo óptimo entre mantenciones preventivas es:

$$T_s^* = \eta X_s^* + \gamma \quad (4)$$

Por lo cual el plazo óptimo entre mantenciones preventivas es de 42 días.

## 18.2. Costos de Mantención Predictiva

Usando la ecuación 5.

$$\frac{C_s}{C_i} < \frac{C_{pr}}{C_c} (1 + r) - 1 \quad (5)$$

Donde:

- $C_s$ : Costos predictivos
- $C_i$ : Costo de intervención
- $C_{pr}$ : Costos preventivos
- $C_c$ : Costos correctivos

Reemplazando los valores en la ecuación 5.

$$\frac{C_s}{C_i} < 9,23 \quad (6)$$

Utilizando el valor del costo de intervención descrito anteriormente, se tiene que el costo de mantenimiento predictivo no debe ser superior a:

$$C_s < 1846 \quad (7)$$

Por otro lado, los costos de mantención correctiva son:

$$C_c = \frac{2000}{MTBF_x} \quad (8)$$

Donde:

$$MTBF_x = \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) \quad (9)$$

Por lo que  $MTBF_x = 0.93$

Por lo tanto

$$C_c = 2150,54 \frac{USD}{hr} \quad (10)$$

### 18.3. Costos de Mantenimiento Preventiva

Usando el valor obtenido anteriormente, se determina que el costo de mantenimiento preventiva es de:

$$C_{pr} = 1957 \frac{USD}{hr} \quad (11)$$

En primera instancia, el costo predictivo entrega la mejor política de mantenimiento, ya que es menor frente a las otros (correctivos, preventivos). La mantenimiento predictiva es factible para el chancador, ya que este cuenta con sensores que miden parámetros como abertura, potencia consumida, medida de roca al final del proceso, RPM del eje. Sin embargo, el aviso de estos sensores ocurre cuando la falla ya ha ocurrido, este debe ser un aspecto a considerar en la decisión de política de mantenimiento. Dado esto, la mantenimiento preventiva es la estrategia más adecuada a tomar, porque se evita la ocurrencia de fallas.

## 19. Frecuencia Optima de Inspecciones

Con el desarrollo de esta sección, se busca la minimización del CGM, optimizando los tiempos entre inspecciones.

### 19.1. Minimización del CGM

Tomando que la tasa de falla varía inversamente con el número de inspecciones. Se ocupan los siguientes datos obtenidos del historial de la empresa para determinar el número óptimo de inspecciones por mes:

- Existen 7 fallas en un año por lo que se tienen 0,6 fallas al mes
- Se hacen 2 inspecciones al mes, las que duran 4 horas
- La reparación dura aproximadamente 6 horas y como se tienen 0.6 fallas al mes y el costo por hora de las fallas es 2000 USD tenemos un costo de falla de 7200 USD/mes.
- Para realizar las tareas de inspección se utilizan 2 mecánicos cuyos costos son de 4 USD/hora.
- Para realizar las tareas de reparación se utilizan 5 mecánicos cuyos costos son de 4 USD/hora, la reparación dura 6 horas y se realizan 0.6 reparaciones al mes. Además se cuenta el valor del repuesto que es de 6000 USD

Con esto se obtienen los siguientes coeficientes:

- $K = 0.6 \text{ fallas/mes}$
- $i = 180 \text{ inspecciones/mes}$
- $\mu = 90 \text{ reparaciones/mes}$
- $C_f = 6960 \text{ USD/mes}$
- $C_{i,i} = 64 \text{ USD/mes}$
- $C_{i,r} = 6070 \text{ USD/mes}$

Usando la relación

$$n^* = \sqrt{k \frac{i}{\mu} \left( \frac{C_f + C_{i,r}}{C_f + C_{i,i}} \right)} \quad (12)$$

Se obtiene que  $n^* = 1.47$  inspecciones/mes

Lo que dice que son inspecciones cada 20 días. Este valor es adecuado a la realidad de la planta, ya que las inspecciones implican la detención de la máquina.

## 19.2. Maximización de Disponibilidad

El objetivo es obtener la disponibilidad del equipo en relación al tiempo. Se ocupan como datos de entrada el MTTR, el tiempo de inspección y el de reparación.

Para realizar los cálculos se tiene que:

- $K=0.6$
- $i=180$
- $\mu=90$

Usando la siguiente relación:

$$n = \sqrt{\frac{K_i}{\mu}} = 1,24 \quad (13)$$

$$\lambda(n) = \frac{K}{n} = 0,482 \quad (14)$$

$$D(n) = \frac{\lambda(n)}{\mu} + \frac{n}{i} = 0,012 \quad (15)$$

Dado que la disponibilidad máxima es  $A = 1-D(n)$

Se tiene que la disponibilidad máxima es  $=0.987$

La Disponibilidad máxima es de 98.7%.

## 20. Agrupamiento Optimo de Tareas Preventivas

En esta sección se ocuparon los siguientes modos de falla. Esta elección fue hecha en base a que son componentes parte de un mismo sub-sistema(*Hydroset*). Así el desarrollo de estas tareas, permite aprovechar el tiempo en las intervenciones y minimizar el costo que implica la detención de la máquina( $C_f$ ).

- Reparación válvula alivio Hidroset
- Cambio de filtro de lubricación
- Cambio de sellos hidroset

El desarrollo de la solución esta basado en el modelo de Weibull. La obtención de los parámetros de Weibull, se realizó en Matlab, al igual que para la falla crítica. Los valores de resultado son.

### **Reparación válvula alivio Hidroset**

- $\beta=1.5$
- $\gamma=265$
- $\eta=51.39$

### **Cambio de filtro de lubricación**

- $\beta=1.08$
- $\gamma=689$
- $\eta=32.75$

### **Cambio de sellos hidroset**

- $\beta=1.181$
- $\gamma=3333$
- $\eta=330.84$

Esto se realizó ocupando los historiales de estos tres modos de falla y, agrupándolos en Excel, mediante el programa Solver se obtuvieron los resultados de la tabla 13.

Cuadro 13: Desarrollo en Excel

S	2000		
i	1	2	3
etha <sub>i</sub>	51,39	32,75	330,84
beta <sub>i</sub>	1,50	1,08	1,18
s <sub>i</sub>	8	8	8
c <sup>r</sup> <sub>i</sub>	2008	2008	2008
k <sub>i</sub> *T	70,12	70,12	70,12
M <sub>i</sub>	3200,55	4569,37	321,40
Φ <sub>i</sub>	45,76	65,28	4,70
S/T	28,52		
ΣΦ <sub>i</sub>	115,73		
J	144,25		
k <sub>i</sub>	1	1	1
T	70,12		

## 21. Reemplazo Optimo de Equipos

En esta sección se busca evaluar el periodo óptimo para reemplazar el chancador. Se consideró el modelo de depreciación exponencial, ya que no es un producto tecnológico que requiera de una depreciación acelerada y costo exponencial ya que los costos comienzan a crecer rápidamente con el transcurrir del tiempo.

**Depreciación:** Mediante una aproximación exponencial en el tiempo, se calculó un valor estimativo del parámetro lambda.

**Depreciación exponencial:**

$$e^{-\lambda t} = 0,033 \quad (16)$$

así

$$\lambda = -\ln(0,033)/30 = 0,11 \quad (17)$$

**Costos de mantención y operación:** estimando el costo de mantención y operación el primer período de tiempo como un 4 % del costo del equipo nuevo, y aproximando un crecimiento exponencial con ley:

$$C = 8000000e^{0,119t} - 1 \quad (18)$$

Así  $\mu = 0.119$

Por lo tanto

$$\frac{\lambda}{\mu} = \frac{0,11}{0,119} = 0,95 \quad (19)$$

Con estos resultado y tomando  $A/a = 27$ , el gráfico de Kauffmann entrega que  $\mu t=2.6$  y con esto se determina que  $t=23.7$  años.

Este Valor difiere mucho de la vida útil dada por diseño, 30 años, la estimación realizada se ha hecho en base del CGM, y dado que no se conoce este valor con certeza, la vida útil del equipo ha sido estimada con un error de 6 años aprox.

## 22. Análisis Bibliográfico

### 22.1. Resumen de Papers estudiados

#### Resumen de [2]

*Este paper presenta un modelo de predicción del desempeño de un chancador cónico en base a la capacidad total del chancador y la distribución del tamaño de la roca. A partir de estos parámetros se crean los mapas de desempeño del chancador (CPM), estos mapas pueden ser usados para elegir los parámetros de operación de un solo chancador o de una planta.*

#### Resumen de [3]

*Este paper describe mediante una ecuación el comportamiento de las rocas en el proceso de chancado, en base a esto se calcula la distribución de presiones que se ejercen en las lánas y cóncavos de un chancador y calculan las fuerzas resultantes. Tiene como conclusión, el diseño de la potencia requerida para realizar el proceso de conminución.*

### 22.2. Comentarios y Utilidad

Con respecto a la primera referencia, se puede recomendar este método para ser implementado como parámetro indicador a tomar en cuenta en posibles políticas de mantenciones predictivas. En relación al segundo, permite conocer de una forma más analítica el proceso que se lleva a cabo en los chancadores de cono, así se ve las fuerzas a las que están sometidas las lánas y cóncavos de desgaste, junto con el eje principal, que es la falla principal que presenta el equipo.

Ambos papers, tienen la ventaja de que han sido desarrollados para *Sandvik Rock Processing*, que es una de las principales empresas en el diseño de estos equipos.

## 23. Evolución de Defectos e Inspecciones.

### 23.1. Desarrollo del Modelo

En esta sección se emplea el método entregado en el apunte del curso para determinar el tiempo óptimo entre inspecciones minimizando el CGM. Esto se realizará del punto de vista de evolución de defectos, considerando la probabilidad de que un defecto se convierta en falla.

El modelo es utilizado para el componente crítico del equipo, que es el eje principal.

Se necesitan los siguientes parámetros:

- Costos de intervención ( $C_i$ ) y de falla ( $C_f$ ) de inspección para los siguientes escenarios:
  - Inspección
  - Corrección
  - Prevención
- Tiempo requerido para reparar  $T_r$  días
- Tiempo requerido por una inspección  $T_i$  días
- Tasa de arribo de fallas  $\lambda$  *fallas/días*
- Parámetros de Weibull estimados son:
  - $\beta$
  - $\eta$

Estos parámetros se deben estimar subjetivamente mediante cuestionarios realizados a los mantenedores, con preguntas como *¿Hace cuánto tiempo podría haberse observado la falla en una inspección?* o *¿Si no se repara el defecto, cuánto tiempo se puede postergar antes de que ocurra la falla?*, y así estimar la función densidad de probabilidad ( $f(t)$ ) y acumulada ( $F(t)$ ), utilizando el modelo de Weibull.

Los valores utilizados para el uso del modelo se muestran en la tabla 14. Estos han sido ya estimados en puntos anteriores por lo que no se detalla el como han sido calculados. Para la estimación de los parámetros  $\beta$  y  $\eta$ , se realizó el cuestionario antes dicho y se obtuvo que 100 horas antes de producirse la falla se pudo haber observado el defecto mediante una inspección, según esto se realizó una estimación de los nuevos parámetros de Weibull a utilizar, los resultados corregidos se muestran en la tabla 15.

Usando los valores de la tabla 15. Se realiza el mismo procedimiento hecho en el informe anterior, obteniendo los nuevos parámetros a utilizar en la aplicación de este modelo. Que son  $\beta = 1,43$  y  $\eta = 218$ . Utilizando el algoritmo presentado en la referencia [1]., se obtienen la probabilidad  $b$  de que un defecto se convierta en falla y el costo global ( $CGM$ ), ambos en función del tiempo entre inspecciones. Las figuras 23.1. y 15. muestran gráficamente el comportamiento de  $b$  y de  $CGM$ , respectivamente.

Cuadro 14: Parámetros Utilizados

$\lambda$	0,02	fallas/dias
$\eta$	167	dias
$\beta$	1,65	
$T_i$	0,166	dias
$T_r$	0,33	dias
$C_{g,insp}$	8	KUSD
$C_{g,prev}$	47	KUSD
$C_{g,corr}$	47	KUSD

Cuadro 15: Estimación de parámetros Weibull

i	Tiempos corregidos por inspecciones (hrs.)	Fi	$\ln(T)$	$\ln(\ln(\frac{1}{1-F_i}))$
1	750	0,13	6,62	-2,01
2	780	0,25	6,66	-1,25
3	820	0,38	6,71	-0,76
4	890	0,50	6,79	-0,37
5	950	0,63	6,86	-0,02
6	1010	0,75	6,92	0,33
7	1060	0,88	6,97	0,73

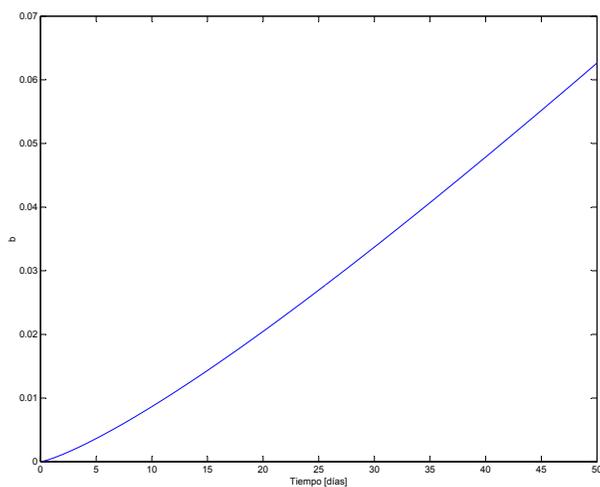


Figura 14: Probabilidad de que un defecto se convierta en falla

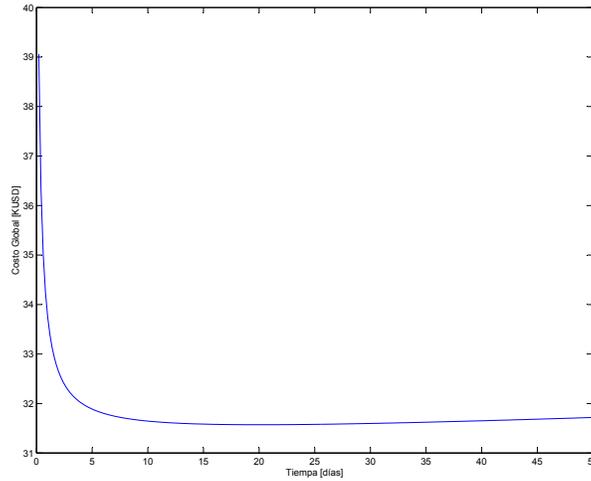


Figura 15: Costo global de mantención

De la figura 15, se observa que el costo global mínimo se obtiene para inspecciones cada 24 días.

### 23.2. Comentarios

En el capítulo *Frecuencia de inspecciones*, se obtuvo una frecuencia óptima de 20 días. El hecho de que se hagan inspecciones 4 días más tarde que con el modelo anterior, implica una mayor utilización del componente y un menor costo asociado a la no producción (el equipo debe ser detenido) y al costo de inspección. Este modelo minimiza el costo global y por lo tanto el período de 24 días cada inspecciones es la frecuencia a seguir.

Además con la realización de este modelo, lo que se busca es encontrar el período óptimo para realizar una inspección y así evitar el hecho de que un defecto inicial se convierta en falla. La diferencia entre ambos modelos radica que el modelo desarrollado en el capítulo *Frecuencia de Inspecciones* estudia directamente la influencia de la frecuencia entre inspecciones sobre la tasa de fallas, mientras que este método considera el modelamiento estadístico por el cual un defecto se convierte en falla.

En la estimación de los nuevos parámetros de Weibull, el menor valor de  $\eta$  concuerda con lo esperado ya que se ha tomado un tiempo menor entre fallas, y este parámetro indica el tiempo que asegura la no existencia de fallas, mientras que el mayor valor de  $\beta$  es debido a que se considera el equipo más avanzado en su ciclo de vida (*Curva de la bañera*).

Este método, ofrece ventajas y desventajas frente al presentado en el capítulo *Frecuencia de Inspecciones* ya que no requiere de un análisis acabado para encontrar los parámetros pero si obliga a estimar la probabilidad de que un defecto se convierta en falla.

## 24. Overhaul/Reemplazo con Programación no Lineal.

### 24.1. Overhaul Optimo con Tasa de Fallas con Distribución Weibull

Esta sección tiene por objetivo el determinar el intervalo óptimo para realizar el overhaul al equipo chancador. Para esto, se realizará un estudio en base a la distribución de Weibull para el componente crítico (Eje principal), el cual fue determinado en el capítulo de Análisis de Pareto del informe 1.

Se justifica el uso del eje principal como agente para determinación del overhaul por el hecho de que éste representa el 60 % de los costos, mientras que el otro 20 % está dado por tareas relacionadas al trabajo sobre este componente.

En base a los resultados obtenidos en el capítulo "Modelo de Weibull para un modo de falla" del segundo informe para este componente, se obtuvieron los siguientes parámetros:

$$\beta = 1,2553$$

$$\eta = 229$$

$$\gamma = 0$$

La estructura de costos es:

$$c_g = c_r + c_o \cdot (n - 1) + c_m \cdot \int_0^t \lambda(x)dx \quad (20)$$

Los costos a considerar son los siguientes:

- Costo de reemplazo  $C_r$
- Costo de Overhaul  $C_o$ . Que tiene la siguiente estructura

$$C_o = C_{int,o} + C_{f,o} \quad (21)$$

Donde el costo de intervención  $C_{int,o}$  se divide en costo de mano de obra y de repuestos.

- Costo de reparación  $C_m$ .

Para la estimación de estos, se considerará lo siguiente.

- El equipo nuevo tiene un valor de 800000 *USD*.
- El overhaul tiene una duración de 10 horas, en este tiempo se considera el desmontaje de los componentes antiguos y la instalación de los nuevos. El costo de no producir es de 2000 *USD/hr*. (tabla 8). Por lo que el costo de no producir debido al overhaul es de  $2000 * 10 = 20000$  *USD*.
- Por otro lado, para la realización de esta tarea se necesita de 5 personas con un costo de 4 *USD/hr.*, por lo que el costo asociado a la mano de obra es de 200 *USD*.
- El costo del repuesto se estima en 100000 *USD*, considerando el repuesto del eje principal, mas los bujes y descansos.

Siguiendo la ecuación 21., se obtiene un costo de overhaul de 120200 USD.

El costo de reparación, está dado por el costo estimado en el capítulo 1 del informe 2, y es de 47000 USD. Por lo tanto, los costos están dados por:

- Cr=800000 USD
- Co=120200 USD
- Cm=47000 USD
- p=1

El factor de mejora p, se ha considerado 1, dado que el overhaul que se realiza en la empresa puede ser considerado extremo, ya que no se hace reparación de componentes, más bien, se realiza un reemplazo con un componente nuevo que lo deja *como nuevo*. El modelo mostrado en [1], no considerará el hecho de que en los overhauls se use el reemplazo de componentes, la relación mostrada es la siguiente:

$$\hat{H}(nT_s) = \left(\frac{T_s}{\eta}\right)^\beta \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} p^{n-i} q^{i-1} i^\beta \quad (22)$$

Donde  $\hat{H}(nT_s)$  es el numero de fallas en el tiempo entre reemplazo y reemplazo, que representa  $\int_0^t \lambda(x) dx$  en la ecuación 20. Dado que la relación 22. no es válida cuando  $p = 1$  se tomará  $\lim_{p \rightarrow 1} \hat{H}(nT_s)$ , usando Matlab.

Con esto se obtiene:

- m=86
- s=128

Esto quiere decir que se debe realizar Overhaul cada 4 meses y que el reemplazo del sistema se debe hacer a los 30.15 años ( $86 \cdot 128 / 365 = 30.15$ ).

Al comparar este valor de reemplazo con el visto en el capítulo de Reemplazo óptimo del equipo (23.7 años), se observa que al considerar la realización de overhauls periódicos se aumenta la vida útil del equipo en 6 años, lo cual es un beneficio por el elevado costo de adquisición del sistema.

Al realizar un análisis de sensibilidad sobre el valor de p, se obtiene la tabla 16, en esta se ve que el hecho de realizar un reemplazo (overhaul crítico), es de gran importancia para extender la vida del equipo, ya que para bajos valores de p, es decir, mantenciones con un nivel no muy alto de mejoramiento, la vida útil del equipo se ve seriamente disminuida.

Cuadro 16: Análisis de Sensibilidad

<b>p</b>	<b>m</b>	<b>s</b>	<b>Tiempo de Reemplazo</b>
0,7	4	214,78	2,35
0,8	5	196,84	2,70
0,9	8	166,97	3,66
0,95	11	155,43	4,68
0,999	85	124	28,88
1	86	128	30,15

## 24.2. Comentarios

Es importante destacar que en el desarrollo del modelo utilizado solo se ha considerado el modo de falla principal, sin considerar el resto. Lo que no invalida completamente el modelo, por las razones anteriormente discutidas. Si bien en un análisis más detallado se deberían considerar todos los modos de falla el hecho de considerar uno sólo da una buena estimación del tiempo entre overhauls.

El uso del factor de mejora  $p = 1$  se justifica ya que es el que se acerca más a la política actual de mantención de la planta de Chancado Secundario, donde se realizan reemplazos y no reparaciones de los componentes. El estudio de sensibilidad sobre  $p$ , indica que la política de reemplazos llevados en la planta es la correcta, ya que como se ve en la tabla 16. la diferencia entre un factor  $p = 0,95$  y  $p = 1$  implica una diferencia en la vida útil de 20 años aproximadamente.

Actualmente en la planta de chancado, no se tiene una política de overhauls programados, solo existe una parada de planta general, donde se realizan las mismas tareas que en un overhaul. Esta parada se realiza una vez al año, el 2 de enero.

A la luz de los resultados obtenidos, se observa que realizar overhaul periódicos extiende la vida útil del equipo en 5 años, en relación a los resultados obtenidos en el capítulo *Frecuencia Optima de Reemplazo*.

## 25. Periodos de Garantía y Mantenimiento Preventiva.

### 25.1. Evaluación de Estrategia de Mantenimiento

En esta sección se desarrollará un modelo para determinar la estrategia de mantenimiento preventiva óptima, considerando los puntos de vista de los dos actores en el tema de garantías, comprador y fabricante.

Para el desarrollo del modelo, se considerarán los siguientes parámetros:

Tiempo de garantía  $T_w = 3$  años.

Tiempo de vida  $T_l = 24$  años.

Por otro lado, se necesitan los parámetros de Weibull, dado que se trabajará en base al componente crítico del equipo, el eje principal, los parámetros del modelo Weibull, son los siguientes:

$$\eta_o = 229.$$

$$\beta = 1,2553.$$

Con el fin de calcular los costos de mantenimiento correctiva, se considerarán los valores máximos y mínimos para este tipo de mantenimiento. Estos valores luego se parametrizaran para que el costo sea una función del parámetro  $m$ .

Dado que el vendedor no cubre los costos de falla, el modelo debe ser corregido, tal como se ve en [1]. Así, se deben separar el análisis para comprador y vendedor.

Ya que se deben considerar ambos escenarios, comprador y fabricante, se estimarán los costos de mantenimiento correctiva por separado, no considerando para el segundo el costo de falla asociado, ya que en empresas de minería este es muy alto y los fabricantes no cubren este aspecto.

#### 25.1.1. Costo de mantenimiento correctiva para comprador

El valor  $C_r(m = 0)$  corresponde a la mantenimiento correctiva para el modo de falla crítico. En este caso tiene un valor de 47000 USD.

Para un alto nivel de mantenimiento preventiva ( $m=10$ ), se obtiene como costo, el costo de realizar un overhaul, por lo tanto,  $C_r(m = 10) = 120200 USD$ .

Obteniendo una recta para ambos puntos extremos, se obtiene:

$$C_r(m) = 7320 \cdot m + 47000 \quad (23)$$

#### 25.1.2. Costos de mantenimiento correctiva para vendedor

Ya que este no cubre el costo de falla, y usando las relaciones anteriores, se obtiene lo siguiente:

$$C_r(m) = 7320 \cdot m + 31000 \quad (24)$$

Para la determinación de los costos de mantenimiento preventiva por unidad de tiempo, se considerará que al aumentar el nivel de mantenimiento  $m$ , mejorará la calidad de las mantenciones y no aumentará la periodicidad, esta suposición se hace con el fin de simplificar los cálculos.

Los costos en función del nivel de mantenimiento, son los siguientes:

Para el mínimo nivel de mantención ( $m=0$ ), se considera solo un cambio de aceite de lubricación, el costo por H.H.(2 operarios con detención), y el costo de falla asociado(2000USD/hr.). Por lo tanto:

$$C_m(m = 0) = 600 + 2 * 4 * 1 + 2000 * 1$$

$$C_m(m = 0) = 2608USD.$$

Para el máximo nivel de mantenimiento ( $m=10$ ), se considera un reemplazo del componente críticos bujes y pernos de carcasa superior-inferior(100000 USD), más el cambio de aceite de lubricación (600).Para esta tarea, se necesitan 5 operarios y se ocupan 10 horas( $5*4*10$ ), por lo tanto:

$$C_m(m = 10) = 100000 + 600 + 200$$

$$C_m(m = 10) = 100800USD$$

Del capítulo *Período óptimo entre mantenciones preventivas* se obtuvo un período de 42 días, por lo tanto, se obtiene

$$C_m(m = 0) = 62$$

$$C_m(m = 10) = 2400$$

Linealizando entre ambos puntos, se obtiene la siguiente recta:

$$Cm(m) = 234m + 62 \tag{25}$$

Considerando  $\alpha = 1$ , el parámetro de escala  $\eta_m$  resulta:

$$\eta_m = \eta_o \cdot \left( \frac{10}{10 - m} \right) \tag{26}$$

En la ecuación 25. se ha considerado que  $\eta$  varía linalmente( $\alpha = 1$ ) en función del nivel de mantención ( $m$ ). Este supuesto se ha hecho en base a la no existencia de datos tan precisos que permitan la correcta estimación del comportamiento.

Dado que se tiene el comportamiento de los costos al variar  $m$ , se pueden calcular los costos esperados para comprador y fabricante en los siguientes tres escenarios:

- Sin mantenimiento Preventivo (a)
- Mantenimiento Preventivo durante toda la vida del equipo ( $0, T_l$ ) (b)
- Sin mantenimiento preventivo sobre ( $0, T_w$ ) (c)

Los resultados se ven en la tabla 17., y las figuras 16. y 17., muestran gráficamente el comportamiento de los costos tanto para vendedor y para el comprador, respectivamente.

Cuadro 17: Costos para distintos escenarios

<b>m</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>9</b>
$C_{B,a}$ (MUSD)	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22
$C_{B,b}$ (MUSD)	6,29	9,39	12,56	15,82	19,23
$C_{B,c}$ (MUSD)	6,33	9,62	12,92	16,26	19,63
$C_{M,a}$ (MUSD)	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
$C_{M,b}$ (MUSD)	0,29	0,21	0,14	0,07	0,02
$C_{M,c}$ (MUSD)	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34

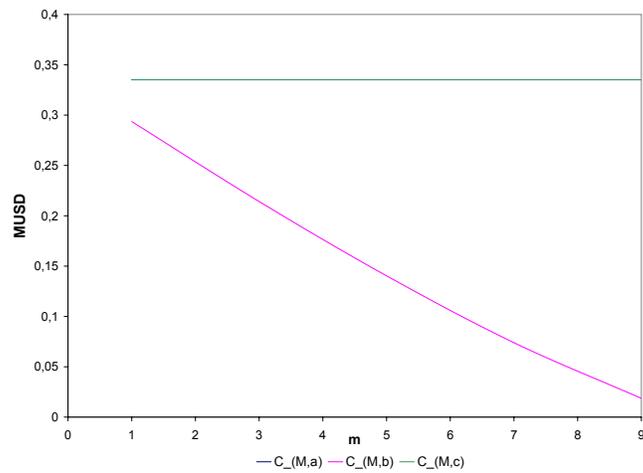


Figura 16: Costos para distinto escenarios(Fabricante)

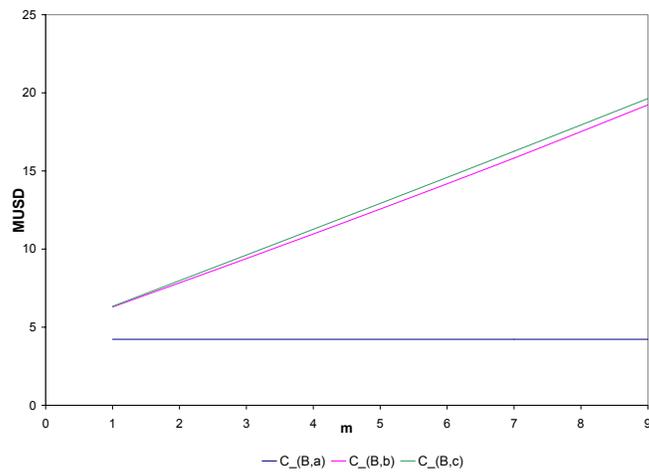


Figura 17: Costos para distinto escenarios (Comprador)

## 25.2. Comentarios

A partir de los resultados se observa que para el comprador no le conviene hacer mantención preventiva, y si opta por realizarla el aumentar la calidad de la mantención aumenta los costos. Pero al fabricante le conviene que el comprador realice mantenciones preventivas ya que bajan sus costos en reparaciones en el período de garantía.

## 26. Planificación PERT para Plan Preventivo Completo del Equipo.

En esta sección se realizará la planificación PERT para las tareas de mantención preventiva referente al modo de falla principal: *Revisar el eje principal* y componentes relacionados. Las tareas a seguir se basan en el árbol de mantención realizado en el capítulo 2 de la segunda entrega de este trabajo.

### 26.1. Planificación de Tiempos.

Las tareas a realizar con su respectiva designación son las siguientes:

#### **Verificación juego buje araña-eje.**

- Remover pernos de remoción de unión carcasa superior y carcasa inferior (A).
- Levantar la carcasa superior utilizando estrobos y grúas adecuadas (B).
- Inspeccionar la corrosión posible u otros daños (C).
- Verificar que juego entre buje y eje principal no supere los 3.5 mm (D).

#### **Revisar buje de araña.**

- Retirar pernos de fijación de tapa del buje (E).
- Retirar O-ring (F).
- Desmontar buje usando estrobos y grúa (G)

#### **Revisar lana.**

- Retirar camisa del eje principal (H)
- Insertar cáncamos en los hoyos de levante de la camisa para levante con grúa o gata (I).
- Rápidamente, calentar un espacio longitudinal alrededor de 50mm alrededor (J).
- Realizar inspección visual de estado de lana de desgaste, considerar aspectos como deformación, ruptura, signos de agripamiento (K).

#### **Revisar cono de apoyo.**

- Cortar anillo de corte de tuerca exterior y retirarla (L)
- Retirar lana usando cáncamos de levante y una grúa o gata (M).
- Revisar estado de tuerca interior que fija cono de apoyo, si esta está suelta, removerla y reemplazarla (N).
- Revisar inspección visual del cono de apoyo, tomar en cuenta aspectos como desgaste excesivo (Ñ).
- Utilizar un feeler entre cono de apoyo y eje principal para ver si está suelto (O).

**Revisar platos de presión.**

- Utilizar gancho de levante especial suministrado en el juego de herramientas para levantar el plato de presión intermedio y el plato de presión del pistón del hydroset (P).
- Realizar inspección visual del estado de los platos de presión (Q).

**Revisar excéntricas (R).**

- Verificar excentricidades y tolerancias.
- Realizar inspección visual del estado del buje excéntrica.

**Revisar sellos de polvo.**

- Remover todos los pernos, incluyendo los pernos cortos enroscados en el collar de polvo (S).
- Levantar el collar de polvo con 4 cáncamos de levante (T).
- Realizar inspección visual del estado del sello de polvo (U).

**Revisar buje excéntrica.**

- Remover anillos de sello interno (V).
- Remover buje utilizando cáncamos y gata de levante (W).
- Realizar inspección (X).

Todas estas tareas y sus tiempos de realización, eslabonadas a sus tareas predecesoras se muestran en la tabla 18.

Cuadro 18: Tareas, predecesoras y tiempos asociados

Tarea	Predecesores	Tiempo (Horas)
A	-	0,5
B	A	0,5
C	B	0,25
D	B,C	0,5
E	D	0,25
F	E	0,2
G	F	0,5
H	D,G	0,5
I	H	0,5
J	H,I	0,2
K	J	0,2
L	J	0,25
M	L	0,5
N	M	0,25
Ñ	M	0,25
O	L	0,25
P	M	0,5
Q	P	0,25
R	P	0,5
S	Q	0,5
T	S	0,2
U	T	0,2
V	T	0,25
W	V	0,5
X	W	0,25

La figura 18. muestra el diagrama Pert para la tarea a realizar, en cuadros rojos se muestra el camino crítico. Este entrega un tiempo de 7.2 horas.

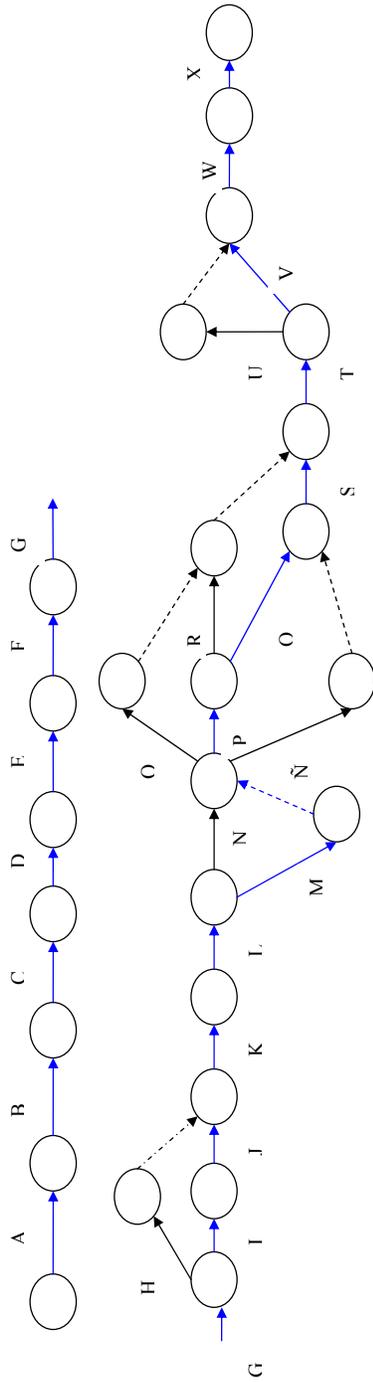


Figura 18: Diagrama Pert

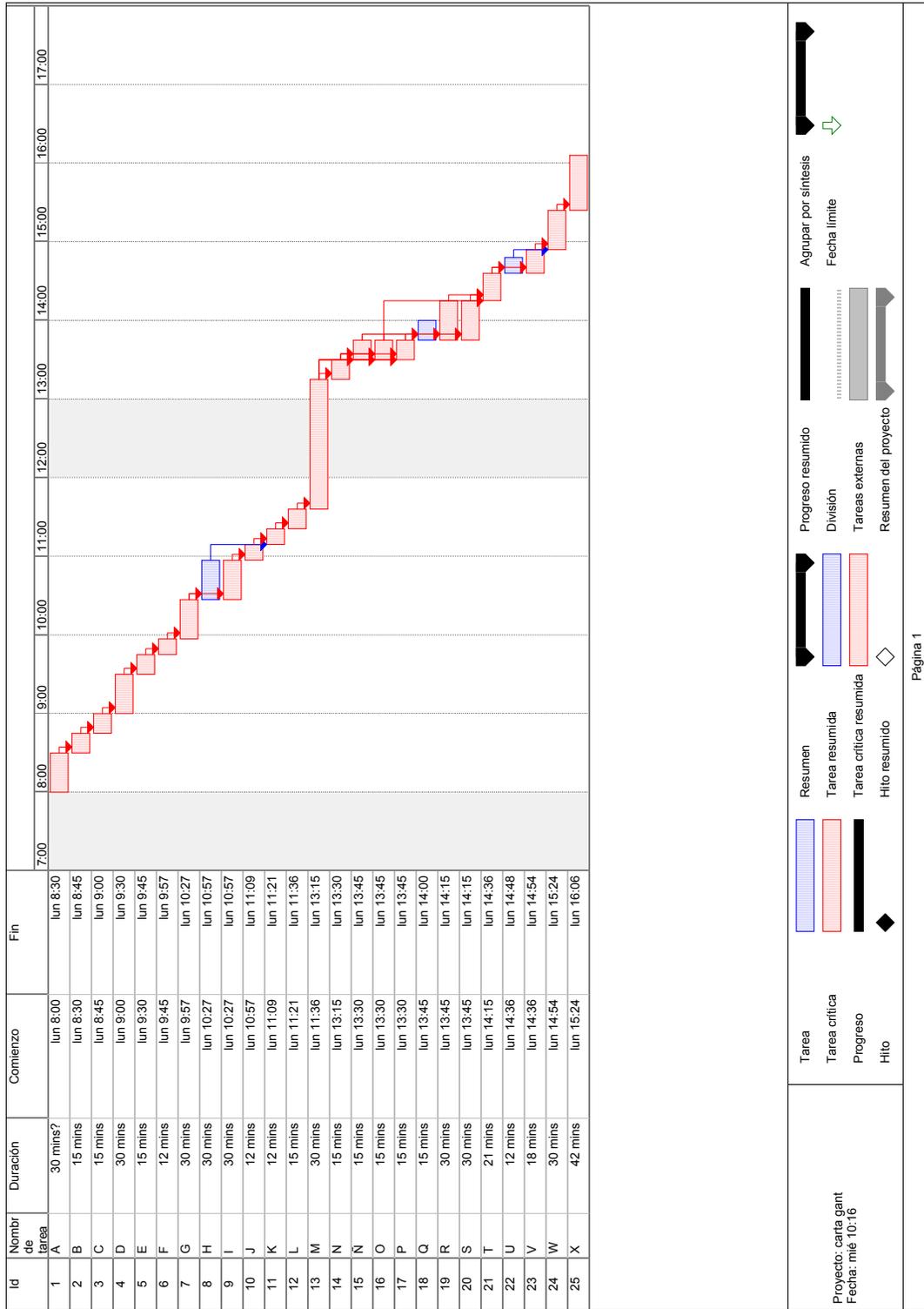


Figura 19: Carta Gantt

## 26.2. Planificación de Cargas.

La figura 19. muestra la carta Gantt para la programación de realización de actividades, en este caso, la mantención preventiva del eje principal, el componente crítico del equipo. La carta Gantt de realizó con *MICROSOFT PROJECT*.

## 26.3. Planificación de Tareas

Para realizar la modelación probabilística se ocupó el camino crítico para estudiar las desviaciones. Los resultados se muestran en la tabla 19.

Cuadro 19: Modelación probabilística

Tarea	Tiempo (Horas)			T	sigma2
	Pesimista	Realista	Optimista		
A	0,3	0,5	0,7	0,50	0,0044
B	0,4	0,5	0,6	0,50	0,0011
C	0,2	0,25	0,4	0,27	0,0011
D	0,3	0,5	0,6	0,48	0,0025
E	0,1	0,25	0,3	0,23	0,0011
F	0,1	0,2	0,25	0,19	0,0006
G	0,4	0,5	0,7	0,52	0,0025
I	0,4	0,5	0,7	0,52	0,0025
J	0,2	0,2	0,3	0,22	0,0003
K	0,15	0,2	0,3	0,21	0,0006
L	0,2	0,25	0,3	0,25	0,0003
M	0,4	0,5	0,7	0,52	0,0025
P	0,4	0,5	0,6	0,50	0,0011
Q	0,2	0,25	0,3	0,25	0,0003
R	0,3	0,5	0,6	0,48	0,0025
S	0,3	0,5	0,6	0,48	0,0025
T	0,5	0,7	0,9	0,70	0,0044
V	0,15	0,3	0,4	0,29	0,0017
W	0,2	0,5	0,6	0,47	0,0044
X	0,5	0,7	0,8	0,68	0,0025
				<b>8,26</b>	<b>0,0391</b>

## 26.4. Comentarios

La planificación de tiempos permite visualizar el tiempo real necesario para desarrollar el trabajo completo considerando la opción de realizar tareas en paralelo y también el orden correcto de acuerdo a las necesidades de piezas con el avanzar del proceso.

Se ha realizado la planificación de tareas solamente para el modo de falla principal, se sugiere realizar este mismo procedimiento para los diferentes modos de fallas agrupados de modo de optimizar el tiempo total ocupado en las labores de mantención.

La carta Gantt permite observar claramente el orden de realización de las tarea y las cargas asociadas en los momentos peak, para poder así establecer la cantidad de recursos a utilizar.

De los resultados de la carta Gantt (figura 19.) muestran un ahorro de 50 minutos en la realización de las tareas para el componente específico, que implica una disminución del CGM.

Para la realización de la modelación probabilística se utilizó el camino crítico obtenido del diagrama Pert(fig. 18), ya que el tiempo total de realizar completamente la tarea depende principalmente de este. Este supuesto no es totalmente cierto, pero dada las desviaciones estándar de los caminos secundarios, es correcto realizar este estudio en base a esto.

## 27. Gestión de Repuestos.

### 27.1. Determinación de Cantidad Óptima de Pedido

En el caso de la chancadora, el repuesto crítico es el eje principal, como ya se ha visto en los capítulos anteriores. Se realizará la gestión de repuestos con el fin de minimizar el CGM. Los parámetros importantes a considerar en la gestión son los siguientes: Costo de falla, dada por la no disponibilidad del repuesto:

$C_f=2000$  USD

Precio del Repuesto:

$P_u=8000$  USD

Tasa de interés (dada por interés bancario):

$i=10\%$

Costo de adquisición del pedido:

$C_a=8500$  USD

Este costo ha sido estimado considerando el costo de compra, el almacenamiento, la contabilidad del repuesto y su manejo. El objetivo es obtener la gestión de repuestos óptima con el fin de minimizar el CGM, esta gestión está dada por la cantidad a pedir y cuando pedir.

El costo global para el repuesto está dado por la ecuación 27.

$$C_g(\alpha^*) = k \cdot P_u + \frac{q}{q^*} \cdot C_a + \frac{1}{2} \cdot \alpha^2 q^* P_u i + \frac{1}{2} (1 - \alpha)^2 q^* C_f \quad (27)$$

Donde alpha, está dado por:

$$\bar{\alpha} = \left( \frac{C_f}{C_f + P_u \cdot i} \right) \quad (28)$$

Y la cantidad óptima de pedido dado por:

$$q^* = \sqrt{\frac{2qC_a}{\bar{\alpha}P_u \cdot i}} \quad (29)$$

Reemplazando los valores en la ecuación 28., se obtiene un valor  $\bar{\alpha} = 0,962$ , y usando la ecuación 29. se obtiene un valor para la cantidad EOQ,  $q^* = 14$ . Este resultado quiere decir que la cantidad a pedir debe ser igual a 14 unidades, y la orden de pedido se debe realizar cada  $T = q^*/q = 1,55$  años, es decir, cada año y medio.

Reemplazando estos valores en la ecuación 27., se obtiene un costo global, para el período T de 825 KUSD. Este valor representa el costo total del repuesto para un año y medio, y considera la estructura de costos antes mencionada.

### 27.2. Comentarios

Este análisis de gestión de repuestos se ha hecho en base al estudio de la cantidad óptima de pedido (EOQ) para inventarios, sin considerar una aleatoriedad en el tiempo de llegada del pedido.

Además no se ha considerado el hecho de que la bodega no tenga abasto para el almacenamiento de los repuestos, si este aspecto fuese considerado, se debe asignar un factor de castigo al costo de almacenamiento,

para tomar en cuenta este fenómeno. Por otro lado, en el estudio desarrollado no se consideró la existencia de máquinas similares presentes en la planta, por lo que el modelo no refleja totalmente la cantidad de repuestos a pedir.

La empresa no realiza una gestión de repuestos según este modelo, sino que compra el repuesto en base a la experiencia, con el fin de no tenerlo en bodega mucho tiempo, así, mientras un repuesto se ocupa se va pidiendo a los proveedores. Esta forma de manejar inventario se hace por la restricción de espacio disponible.

## 28. Redundancia Optima.

Como ya se ha mencionado en los informes anteriores, en la planta de chancado el concepto de redundancia no es aplicable desde el punto de vista del curso, ya que si bien existe más de un equipo operando, estos operan a máxima capacidad y no detienen su producción salvo la falta de mineral proveniente de chancado primario.

Es por esto que el enfoque que se le dará a esta sección, es el de evaluar si la medida está bien tomada o es necesario tener una cantidad de equipos en paralelo que sean capaces de absorber la carga en caso de que falle uno de los sistemas presentes en la planta de chancado secundario. Dado esto, se considerará el estudio de redundancia activa.

### 28.1. Estudio de Redundancia en Planta de Chancado

En la planta de chancado secundario se cuenta con 8 chancadores en paralelo que procesan el mineral y lo entregan a la próxima línea de producción que es la planta de concentración de mineral. Para el desarrollo del modelo se asumirá una suposición fuerte que es el hecho que basta con que una máquina opere para que el nivel de producción no se vea afectado, en el caso de la empresa en cuestión esta hipótesis no se cumple.

Para el desarrollo de este modelo se requieren los siguientes valores:

Costo de falla  $C_f$ .

Costo de operación por unidad de tiempo de la máquina  $C_o$ .

MTBF y MTTR considerando el equipo completo.

La estimación de ambos valores es la siguiente:

El costo de falla tiene un valor de 2000 USD/hr., valor estimado anteriormente y usado en todas las secciones.

La estimación del costo de operación se hace en base a los costos asociados al consumo eléctrico del chancador y a las H.H de los operarios a cargo del funcionamiento de la máquina, este es de 4 USD/hr., sumando este costo al primero, se obtiene un total de 100 USD/hr.

Para la estimación de MTBF y MTTR, se usó el historial de fallas presentado anteriormente, usando estos valores, se obtienen los siguientes tiempos:

MTBF=850 hr.(35 días)

MTTR=3 hr.

Suponiendo la existencia de n máquinas en paralelo, se tiene la proporción esperada en que una etapa no opera:

$$D(n) = \frac{\rho^n}{(1 + \rho)^n} \quad (30)$$

Donde  $\rho = \frac{MTTR}{MTBF} = 0,0035$

Por otro lado, se tiene la función de costo global asociado a la redundancia de máquinas, según la ecuación 31.

$$C_g(n) = n \cdot c_o + D(n) \cdot c_f = 100 \cdot n + 2000D(n) \quad (31)$$

Cuadro 20: Costos globales para distintos números de máquinas

<b>n</b>	<b>D(n)</b>	<b>Cg(n) USD</b>
1	3,52E-03	107
2	1,24E-05	200
3	4,35E-08	300
4	1,53E-10	400
5	5,38E-13	500
6	1,89E-15	600
7	6,66E-18	700
8	2,34E-20	800
9	8,23E-23	900
10	2,90E-25	1000

## 28.2. Comentarios

Usando las ecuaciones 30. y 31., se obtienen los valores mostrados en la tabla 20., en esta se observa que el costo varía linealmente según el número de máquinas, por lo tanto, no habría inconvenientes en instalar más máquinas en la planta.

Sin embargo, este modelo no considera restricciones de presupuesto y espacio, si bien en la empresa no se tienen mayores restricciones de presupuesto, si las hay de espacio, por lo cual el hecho de ampliar la capacidad de planta, no es solo instalar un chancador más en paralelo.

Este estudio concuerda con el hecho que la empresa se encuentra dentro de un plan de ampliación de capacidad de beneficio (ACB), donden dentro de los proyectos a desarrollar se encuentra el desplazar los equipos de chancado secundario de la planta de chancado terciario y así tener el espacio para la instalación de nuevos equipos en la planta. Este estudio demuestra que la existencia de más chancadores en paralelo aumentan el  $C_g$ , pero a la vez hay mayor producción, y dado que un chancador reporta utilidades (Beneficios-costos), es conveniente aumentar la cantidad de equipos.

## 29. Tamaño de Cuadrillas.

### 29.1. Esfuerzo Optimo de una Cuadrilla.

En este apartado se verá la conveniencia de colocar cierto tamaño de cuadrilla para realizar las tareas de mantención de la planta.

Actualmente la planta funciona dirigida por una superintendencia que define las tareas a realizar y que luego entrega una planilla de tareas a ingeniero en ejecución encargado quien define el tamaño de cuadrillas y asigna las tareas. Son quince operarios quienes trabajan en la planta que consiste en el "buzón grueso" que recibe las rocas provenientes del chancador primario. Las correas transportadoras que llevan el chancado hasta los chancadores secundarios, terciarios y al buzón. Aproximadamente son cinco operarios que se encargan regularmente de las tareas de mantención preventiva y Overhaul de un chancador.

Hay que recordar que cuando se entra a realizar una labor de mantención sobre el chancador se incurre en un costo promedio de falla  $C_f = 2000$  USD/hr.

#### 29.1.1. Descripción del Modelo

- A través de los datos aportados por la empresa, se ha considerado todos los modos de fallas presentes en el historial y se ha obtenido un promedio de fallas con las que un equipo de cinco personas trabaja normalmente.

Tasa de arribos:

$$\lambda = 1 \text{ falla/día} = 0,042 \text{ falla/hora.}$$

Se ha considerado que la tasa de arribos tiene una distribución de Poisson.

- De la misma forma el tiempo de servicio promedio es:

$$t = 2,7 \text{ hora/laboreshombre}$$

- La tasa de servicio para una persona es

$$\mu^* = 1/2,7 = 0,37 \text{ labores/hora}$$

La cual se ha modelado con una exponencial negativa.

- La tasa de servicio es una función proporcional al número de personas  $n$ . así

$$\mu = n\mu^*$$

- El costo de falla es la mencionada anteriormente:

$$C_f = 2000 \text{ USD/hora.}$$

- $C_m$  se asume en función de la tasa de servicio y es de la forma

$$C_m = k^* \mu$$

$C_m$  se estima de una aproximación del costo de intervención de todos los modos de fallas esto es:

$$C_m = 12,5 \text{ USD/hora.}$$

- El valor de k es entonces:  $k = 33.78$ .
- Con todos estos datos es posible estimar un tamaño óptimo para la cuadrilla usando la ecuación 32.:

$$\mu_{opt} = \sqrt{\frac{C_f \cdot \lambda}{K \cdot \mu}} + \lambda \quad (32)$$

De la relación 32., se obtiene un valor de  $\mu_{opt} = 2,63$  labores/hr., lo que da un total de 8 operarios.

## 29.2. Comentarios

Como se puede apreciar, este modelo aconseja aumentar la cuadrilla actual de cinco personas. Lo que a primera vista puede ser poco rentable (aumentar el personal), en realidad se traduce en una disminución de los costos globales, debido al mejoramiento de los tiempos de trabajo y con esto la disminución de los costos de fallas.

La opción de subcontratar no ha sido considerada ya que por políticas de la empresa no se externaliza el servicio de mantenimiento, si el de otros, como limpieza o eléctricos. Ya que si se considera la pérdida de control en la mantención y el hecho de que la gente subcontratada tiene menos compromiso con la empresa que los trabajadores estables, se desvirtúa la posible implementación de estrategias de mantenimiento del tipo RBM o TPM.

## 30. Plan de Mantenimiento RBM.

El sistema de Mantenimiento Basado en la Confiabilidad RBM (*Reliability Centered Maintenance*) es una estrategia holística que permite optimizar programas de mantenimiento, considerando distintos criterios, entre los que se encuentran la disponibilidad, seguridad, calidad de producción o costo de mantenimiento.

Dado que el RBM es un proyecto a nivel de empresa, los actores incluidos en este son el personal de mantención, producción, servicios económicos y dirección.

Las herramientas utilizadas por RBM son las matrices de criticidad, análisis de modos de fallas y árboles de fallas, para la implementación de estas tareas se necesita un gran conocimiento de los equipos, tanto de sus fallas como de su funcionamiento.

En esta sección se abarcarán los puntos necesarios para el desarrollo de un plan de mantenimiento RBM, dentro de la planta.

### 30.1. Constitución de Grupos.

Para el desarrollo de un plan RBM, se deben crear 3 grupos interdisciplinarios, estos son:

- **Grupo de gestión:** responsables de los servicios de mantención.
- **Grupo de análisis:** prepara el detalle del análisis a realizar.
- **Grupo de información:** Recolectan los datos de terreno, evalúan los análisis hechos.

En la planta de chancado, la aplicación del RBM es factible desde el punto de vista que se cuenta con el personal requerido para la formación de grupos. Existe una superintendencia de mantención, que está encargada de las 4 principales zonas productivas de la división (Mina, Chancado, molienda y concentración, y fundición) donde se cuenta ingenieros que pueden separarse para formar el grupo de gestión y de análisis, mientras que el grupo de información se puede formar a partir de los mecánicos de mantención de la planta, previa capacitación sobre el funcionamiento del sistema RBM.

### 30.2. Etapa I: Estudio del sistema.

Esta etapa busca conocer la máquina, sus componentes, su ubicación dentro de la línea de producción y las condiciones en la cual esta opera en la actualidad. En este proyecto, se realizó una descripción del equipo, junto con detallar las condiciones actuales de operación. Ambos puntos fueron desarrollados en el informe 1, capítulos 4 a 6.

### 30.3. Etapa II: Análisis de Fallas.

Esta es la etapa más crítica del RBM, esta etapa debe ser resultado del trabajo conjunto de toda la gente relacionada a la máquina, operarios, mecánicos e ingenieros se deben unir a este estudio que busca el análisis de los modos de falla y jerarquizarlos por criticidad. En el proyecto que se desarrolla, el Análisis de modos de fallas, efecto y criticidad (FMECA), se realizó en el capítulo 9. Además se utilizaron herramientas

como Diagramas funcionales (cap. 6). En los cuales, cualquier falla de una de las flechas que unen cada componentes, implica una falla en el equipo.

### 30.4. Elaboración del Plan Técnico.

Esta etapa busca mejorar el actuar del equipo de mantención en el momento de suceder una falla, para esto son útiles los arboles de falla (cap.10), que dada una falla permiten llegar al origen de la falla. Además se desarrollan arboles de mantenimiento (cap2, inf.2), que muestran la ruta a seguir para actuar sobre la falla de un componente, en el caso del proyecto se realizó para el modo de falla crítico determinado con las herramientas antes mencionadas. El desarrollo de planificación de tareas y diagramas PERT, es de gran utilidad para asignar tareas al personal de mantenimiento.

A modo de ejemplo, la figura 20. muestra la matriz equipo v/s modo de falla, en base al FMECA desarrollado anteriormente. Esta tabla muestra la falla asociada con el sistema del cual pudo ser originada.

Dada la tarea de mantención preventiva asociada a la cuadrilla, esta tendrá el conocimiento de que seguir paso a paso según el árbol de mantención, que indica en orden secuencial las tareas a realizar.

En caso de un acción de mantenimiento correctivo, el modo de actuar es dado el modo de falla ir rápidamente a los componentes que tanto el FMECA como los arboles de falla indican como posibles, para esto también es útil el uso de la matriz.

Sistema	Modos de Fallas							
	Eje no gira	Eje gira con régimen excéntrico	Eje y lánas con fracturas	Buje quemado	Chancador no mantiene ranura	Desagate prematuro en diferentes parte	Motor no funciona	
Eje Principal	↙	↙	↙	↙	↙			
Excéntrico		↙	↙	↙				
Hydroset					↙			
Eje-Piñón	↙							↙
Sistema de lubricación			↙			↙		
Motor	↙							↙

Figura 20: Matriz Componente v/s Modo de fallas

### **30.5. Comentarios**

La implementación de un plan RBM requiere del compromiso de toda la empresa, ya que es un proyecto que la abarca por completo, sin embargo, la división El Teniente es muy amplia, pero RBM es aplicable ppor sectores de producción, en la actualidad se está comenzando con la implementación de este sistema en la planta de chancado.

Como se ha dicho en el desarrollo de esta sección, en la planta se cumplen las condiciones para desarrollar RBM, como son la constitución de grupos, y la construcción de herramientas que faciliten el conocimiento del equipo por parte de mantenedores.

Durante el desarrollo del informe semestral, se han ido abarcando los distintos puntos para la implementación de este sistema como son los diagramas funcionales, la hoja FMECA, árboles de falla junto con la descripción del equipo. Todas estas herramientas buscan el conocimiento del equipo y la forma de actuar al momento de presentarse una falla.

## 31. Mantenimiento TPM.

El tomar a la división El Teniente como empresa productora, implica tomar una gran cantidad de agentes involucrados en la producción del producto final, el cobre. Sin embargo, la implementación del Mantenimiento Productivo Total (TPM) en la planta de Chancado secundario es totalmente factible.

Para que equipos y personal sean uno solo, se necesita que los segundos conozcan a cabalidad el funcionamiento de los primeros, además se necesita que operación y mantenimiento trabajen en conjunto. En la planta, esto es un problema a solucionar ya que mediante operaciones se busca lograr la producción, a veces no considerando posibles fallas que se puedan originar por una sobrecarga en el sistema. Mediante capacitaciones y formando una conciencia de trabajo, se puede lograr la cohesión entre estos dos departamentos.

### 31.1. Hoja de Inspección.

Uno de los puntos importantes para que el mantenimiento TPM sea efectivo, es el hecho que máquinas y personal sean uno sólo, las tareas indicadas en Checklist son de gran ayuda para el personal de mantenimiento. La figura 21., muestra una hoja con las labores a desarrollar en una tarea de mantención preventiva en el eje principal.

Si bien los estados *bueno*, *regular* y *malo* son cualitativos, el carácter de cuantitativos está dado por la descripción de los *checklist* realizada en el capítulo *Arbol de Mantención*.

CheckList Eje Principal - Sandvik H-8000						
Mantencion Preventiva						
Tarea a Realizar	Estado			Acciones	Tiempo usado	Comentarios
	Bueno	Regular	Malo			
Verificar Juego Buje Araña						
Revisar Buja-Araña						
Revisar Laina						
Revisar Cono de Apoyo						
Revisar Platos de Presión						
Revisar Excéntrica						
Revisar sellos de polvos						
Revisar Buje excéntrica						

Figura 21: Hoja de Inspección para eje principal

### 31.2. Indicadores TPM.

Mediante los indicadores, se pueden medir pérdidas de tiempo normalizadas. Las tablas 21. y 22., muestran el valor de estos indicadores.

Cuadro 21: Tiempos usados para determinación de parámetros TPM

Tiempos (min/día)	
Jornada	1440
Parada Planificada	120
Configuración	60
Perdido	30
Para reprocesar	40
Turno diario	24
Configuración	20
Reprocesar por fallas	30
Parada por fallas	30
De trabajo	1440
Operativo Bruto	1320
Operativo Neto	1230
Operativo usable	1200
Productivo Neto	1160
RT	1320

Cuadro 22: Indicadores TPM

Indicadores TPM		
Utilización del equipo	EU	0,92
Disponibilidad teórica	PA	0,98
Eficiencia de operación	PE	0,98
Razón de calidad	RQ	0,97
Tpo. de operación efectivo	UT	0,98
Disponibilida A	A	0,96
Efectividad global del equipo	OEE	0,91
Efectividad total del equipo	TEEP	0,84
Efectividad neta del equipo	NEE	0,93

Al ver los resultados de la tabla 22., se puede observar que la efectividad global del equipo OEE es elevada, alcanzando un valor de 91 %. Este valor esta dado principalmente por el hecho de que los equipos se usan las 24 horas del día, en tres distintos turnos, además, los tiempos de configuración son bajos ya que se hacen por medio de los equipos ASR.

### 31.3. Comentarios

Un mantenimiento del tipo TPM, se ve justificado en la medida que disminuya los tiempos para reparar las fallas, disminuyendo así el tiempo entre fallas, junto con esto, se pueden disminuir los tiempos de paradas

planificadas, con el fin de mejorar el indicador OEE, por ejemplo, una disminución en media hora por día en las paradas planificadas trae consigo un aumento de 2 puntos porcentuales en la efectividad total del equipo TEEP.

La implementación de TPM, debe ir enfocada al trabajo conjunto entre mantenedores y operadores, ya que cuando existen paradas planificadas o no, después de la intervención, operaciones pone a trabajar la máquina a capacidad nominal, lo que muchas veces acarrea fallas no previstas. El compromiso entre mantenimiento y operaciones es de vital importancia al implementar TPM.

Este compromiso, en caso de implementar TPM, se logra en base a la capacitación y creando una conciencia de empresa en la cual no solo baste cumplir con los objetivos de producción sino que se debe minimizar costos para aumentar las ganancias.

## 32. Conclusiones Finales

En la primera entrega del trabajo se hizo una descripción general del equipo, para conocer su funcionamiento y sus componentes principales. A partir de este estudio se crearon herramientas como los diagramas funcionales, árboles de falla y mantenimiento, análisis FMECA. Con esto, se logró relacionar los distintos componentes del chancador con el fin de tener un diagnóstico inicial al momento de presentarse una falla.

Mediante el Análisis de Pareto se determinó el componente crítico del chancador, que es el eje principal. La determinación de este componente es crucial en el desarrollo del proyecto ya que todo el programa de mantenimiento está basado en el comportamiento de este modo de falla.

En la segunda entrega, en base al historial de fallas, se modeló el modo de falla crítico usando la distribución de Weibull. Con los parámetros obtenidos, se determinó el MTBF, la curva de tasa de fallas, el intervalo entre inspecciones, el tiempo de reemplazo del equipo, entre otros. Todos estos parámetros buscan la minimización del *CGM* que es el objetivo primordial de todo plan de mantenimiento.

En el tercer informe se determinó el tiempo entre overhauls, una de las tareas más importantes en la mantenimiento de equipos. Por otro lado, se abarcaron diversos puntos relacionados con la gestión dentro de la planta de Chancado secundario, entre estas se puede nombrar la gestión de repuestos, determinación de tamaño de cuadrillas, planificación de tareas.

Además se realizó un estudio de redundancia de equipos dentro de la planta donde el resultado obtenido concuerda con la política actual de la división El Teniente (plan *ACB*).

Durante el desarrollo del proyecto anual, se vio que uno de las grandes dificultades para desarrollar los modelos fue el obtener una estimación del costo de falla ( $C_f$ ). Dado que la planta trabaja en procesos en serie, se ve en la necesidad de tener *pulmones* entre procesos productivos, la existencia de uno de estos entre la planta de chancado y concentración llevó a la necesidad de simular el comportamiento de los equipos, y así lograr una mejor estimación de  $C_f$ .

Muchos de los resultados propuestos en el Proyecto son de fácil aplicación en la planta de chancado secundario, entre estas destacamos el agrupamiento de tareas preventivas o la planificación de tiempos y cargas. Ambas solo requieren la capacitación del personal y no implica una gran inversión en dinero, como sería el caso de *convencer* a una empresa a hacer la gestión de repuestos que se muestra, que pese a ser correcta, en general las empresas se guían por la experiencia.

Finalmente se realizó un análisis técnico/económico con los ahorros que trae consigo la implementación del plan visto en el proyecto, este ahorro es de 192.86 KUSD/año.

## Referencias

- [1] Pascual, R.; *El Arte de Mantener*; Universidad de Chile, Santiago, 2003
- [2] Evertsson, CM; *Out prediction of cone crushers*; Minerals Engineering, 11(3:215-231 MAR 1998
- [3] Evertsson, CM; *Pressure Distributions and Power Draw in Cone Crushers*; Internal Report, Machine and Vehicle Systems, Chalmers University of Technology, 2002
- [4] *Mantenimiento de Chancador Sandvik H-8000*; Sandvik Rock Processing, Suecia.
- [5] *Information, Customers magazine*; Sandvik Rock Processing.