

**PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO DE PLANTA MINERA DE COBRE
MINISTRO HALES, MEDIANTE ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD, UTILIZANDO LA METODOLOGÍA
FMECA**

**A PROPOSAL FOR THE MAINTENANCE OPTIMIZATION OF MINISTRO HALES COPPER MINING
PLANT, BASED ON RELIABILITY ANALYSIS, USING FMECA METHODOLOGY**

Oscar Cordero y Edgar Estupiñan

*Escuela Universitaria de Ingeniería Mecánica,
Universidad de Tarapacá, Arica-Chile*

eestupin@uta.cl

(Recibido el 2 enero 2018, aceptado para publicación el 10 de junio 2018)

RESUMEN

El fin del superciclo de precios del cobre ha dejado de manifiesto el desafío de ser más rigurosos en el control de costos de producción en la industria minera, por lo cual se deben explorar nuevas estrategias que permitan contener y bajar los costos asociados a la gestión de activos físicos de mantenimiento. La División Ministro Hales de Codelco, se ha propuesto estar comparativamente en el primer cuartil de costos, lo que implica necesariamente dirigir esfuerzos en aquellos procesos que presentan baja disponibilidad y altos costos de mantenimiento, como lo es el proceso de tostación. El presente trabajo demuestra mediante un análisis de sensibilidad, la conveniencia de implementar un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad, utilizando la metodología FMECA con el apoyo de herramientas matemáticas y estadísticas que permiten tener información más precisa sobre el estado de los equipos, así como en la identificación de brechas y oportunidades de mejora de manera priorizada.

Palabras Clave: Confiabilidad, Gestión de mantenimiento, RCM, Minería.

ABSTRACT

The end of the copper price supercycle has shown the challenge of being more rigorous in the control of production costs in the mining industry, therefore, new strategies must be explored in order to control and lower the costs associated with the management of physical assets of maintenance. The Minister Hales Division of Codelco has established as a goal being in the first quartile of costs. Thus, by means of reliability analysis, it was carried out a study focused on maintenance cost control. In this way, a maintenance proposal based on reliability has been developed, using the FMECA methodology, and with the support of mathematical and statistic tools, that allow to get more precise information about the condition of machines, as well as, to identify gaps and opportunities for improvement in a prioritized way.

Keywords: Reliability, Maintenance management, RCM, Mining.

1. INTRODUCCIÓN

Dado el contexto global del mercado, en donde la variación de precios puede tener grandes fluctuaciones, particularmente cuando se trata de minerales, dependiendo de diversas situaciones, que van más allá del ámbito del desarrollo industrial, tales como factores globales y regionales de contexto geopolítico, condiciones climáticas, cambio en políticas económicas, entre otros aspectos, las industrias se ven cada vez más obligadas a optimizar sus costos de producción, optimizando los procesos y operación de los equipos, y consecuentemente disminuyendo los gastos asociados a mantenimiento. En este contexto, el indicador de disponibilidad de los activos físicos, juega un rol clave, por cuanto los directivos o encargados de la toma de decisiones, lo consideran frecuentemente dentro de los KPI's (key performance indicators).

El presente estudio tiene lugar en una industria minera, particularmente en la División Ministro Hales de Codelco (Chile). Siendo esta empresa un referente a nivel mundial en el rubro de producción de cobre, la Gerencia de Tostación, se ha propuesto alcanzar un nivel de disponibilidad por parte de sus equipos sobre el 95%. Esto, considerando que en la actualidad se mantiene una disponibilidad por parte de mantenimiento bajo un 85 %, lo cual, a pesar de poder mantener la producción dentro de lo presupuestado, los costos asociados al mantenimiento están sobre un 17 % de lo establecido según el proyecto original. De esta manera, se requiere realizar ajustes a la estrategia de mantenimiento, de tal manera de poder incrementar la disponibilidad y su vez disminuir los costos del mantenimiento, manteniendo los niveles de producción actuales.

La disponibilidad actual la planta de Tostación, se debe principalmente a detenciones imprevistas que impactan en el desempeño del horno tostador. De esta manera, se ha propuesto llevar a cabo un estudio que permita implementar

cambios en el plan de gestión de mantenimiento, utilizando la metodología FMECA-RCM¹, buscando obtener una reducción de los costos asociados al mantenimiento, como también mejora en los indicadores de confiabilidad y disponibilidad de los equipos críticos que más impactan en el proceso.

2. METODOLOGIA

La metodología utilizada, consiste en análisis FMECA-RCM [1], y también la utilización de la distribución de Weibull para la estimación del comportamiento de la tasa de fallas y el nivel de confiabilidad.

El análisis FMECA es una potente herramienta de análisis para determinar funciones y modos de falla, como también, establecer un plan de gestión de mantenimiento y de repuestos acorde con los verdaderos requerimientos.

La metodología FMECA utiliza la funcionalidad del equipo para determinar sus modos de falla, y a su vez los jerarquiza para elaborar unos planes de mantenimiento focalizados en los modos de fallas críticos de los equipos.



Figura 1: Relación entre FMECA y Plan Matriz [2].

La implementación del FMECA consta de 5 etapas, las cuales se detallan a continuación.

(1) Conocimiento del contexto del equipo

En esta etapa se deben identificar claramente la filosofía de operación de los equipos analizados, también se consideran las nuevas necesidades del usuario. También se deben conocer todos los parámetros del equipo en el contexto operacional.

(2) Análisis Funcional.

Basados en la función completa del equipo, se pueden identificar las fallas que provocan pérdida de función o funciones. Todos los enunciados deben tener un verbo y un objeto y un estándar de desempeño.

(3) Identificación de los modos de fallas

Se identifica la forma en que el equipo pierde su función, cada modo de falla corresponde a una tarea de mantenimiento.

(4) Efectos y consecuencias de una falla

En esta etapa se considera como la falla se manifiesta, y las consecuencias pueden ser de producción personales o ambientales.

(5) Jerarquización del Riesgo

Esta etapa permite optimizar las acciones a tomando en cuenta que los recursos en mantenimiento siempre son limitados.

Para la jerarquización se utiliza la norma IEC 60812 mediante el Número Probabilístico de Riesgo (NPR) [4]. Donde NPR es:

$$NPR = D * O * S \tag{1}$$

donde D: Detectabilidad, O: Ocurrencia y S: Severidad.

Una vez priorizadas las actividades, a las de mayor ponderación se les aplica la metodología RCM, la cual consiste en aplicar una secuencia lógica conforme a una hoja de decisión, como la propuesta por Moubray [1].

La distribución de Weibull [3] es una de las herramientas más utilizadas en mantenimiento para estimaciones de probabilidad de falla, en este caso, es usada en relación a las fallas aparecidas en equipos de alta criticidad. Tiene la ventaja de ser muy flexible y adaptable a una variedad de observaciones experimentales, su función general es:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \times \left[\frac{(t-\gamma)}{\eta} \right]^{\beta-1} \times e^{-((t-\gamma)/\eta)^\beta} \tag{2}$$

¹ FMECA: Failure Mode Effect Cause Analysis; RCM; Reliability Centered Maintenance

donde $f(t) \geq 0$, $t \geq \gamma$, $\beta > 0$, $\eta > 0$, $-\infty < \gamma < \infty$, η es el parámetro de escala, β el parámetro de forma (o pendiente) y γ el parámetro de ubicación.

En la práctica β varía entre el intervalo 1/3 a 5. El parámetro de escala η se relaciona con lo puntiagudo de la curva es decir conforme η cambia la curva es más plana o más puntiaguda. El parámetro de localización γ es el valor más pequeño de X , con frecuencia se supone que éste es 0, lo que simplifica la ecuación, pero debe ser calculado experimentalmente.

En la práctica $\gamma > 0$ es la duración de la vida a la cual el 63,2% de la población fallará.

De la función de distribución acumulada de fallas se obtiene:

- Función de Confiabilidad:

$$R(t) = 1 - F(t) \tag{3}$$

- Distribución de Falla $\lambda(t)$:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \tag{4}$$

3. RESULTADOS OBTENIDOS

Las detenciones del complejo, son registradas por el sistema de eventos planta. A partir de dicha base de datos se obtienen los datos de detenciones desde julio 2015 a julio 2016. Para el estudio se utilizan las detenciones imprevistas asignadas a mantenimiento mecánico, de los equipos críticos que detienen el proceso de tostación. Para comenzar con el análisis basado en confiabilidad, primero se deben definir los equipos críticos.

- *Determinación de Equipos Críticos:*

El Complejo de Tostación, es la planta que más baja disponibilidad ha tenido dentro de la División, siendo ésta de un 85%. Para determinar la criticidad de los equipos, se utiliza el criterio propuesto por la empresa Hatch, la cual definió originalmente la criticidad de los equipos del Proyecto Ministro Hales, contando con un total de 269 equipos críticos para la planta de Tostación.

Debido a la alta cantidad de equipos críticos, y basados en las detenciones imprevistas, se desarrolla el diagrama de Pareto para determinar los equipos que más impactan en las detenciones del complejo de tostación, según se muestra en Figura 2.

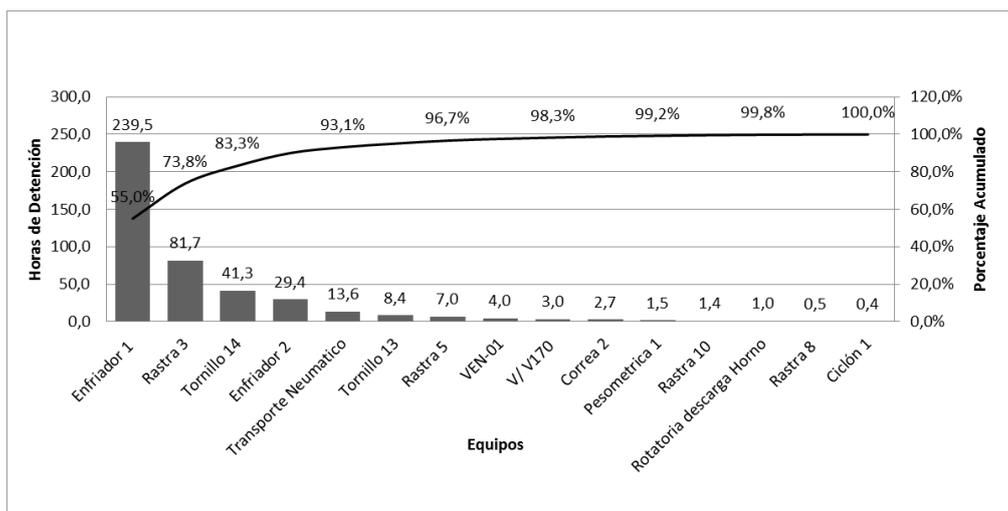


Figura 2: Pareto detenciones planta de tostación.

Del análisis de Pareto se puede observar que seis equipos concentran alrededor del 95 % de las detenciones del complejo de Tostación. Los equipos que acumulan el 95 % de las horas de detención se listan en la Tabla 1.

TABLA 1 - EQUIPOS QUE ACUMULAN 95% DE HORAS DE DETENCIÓN

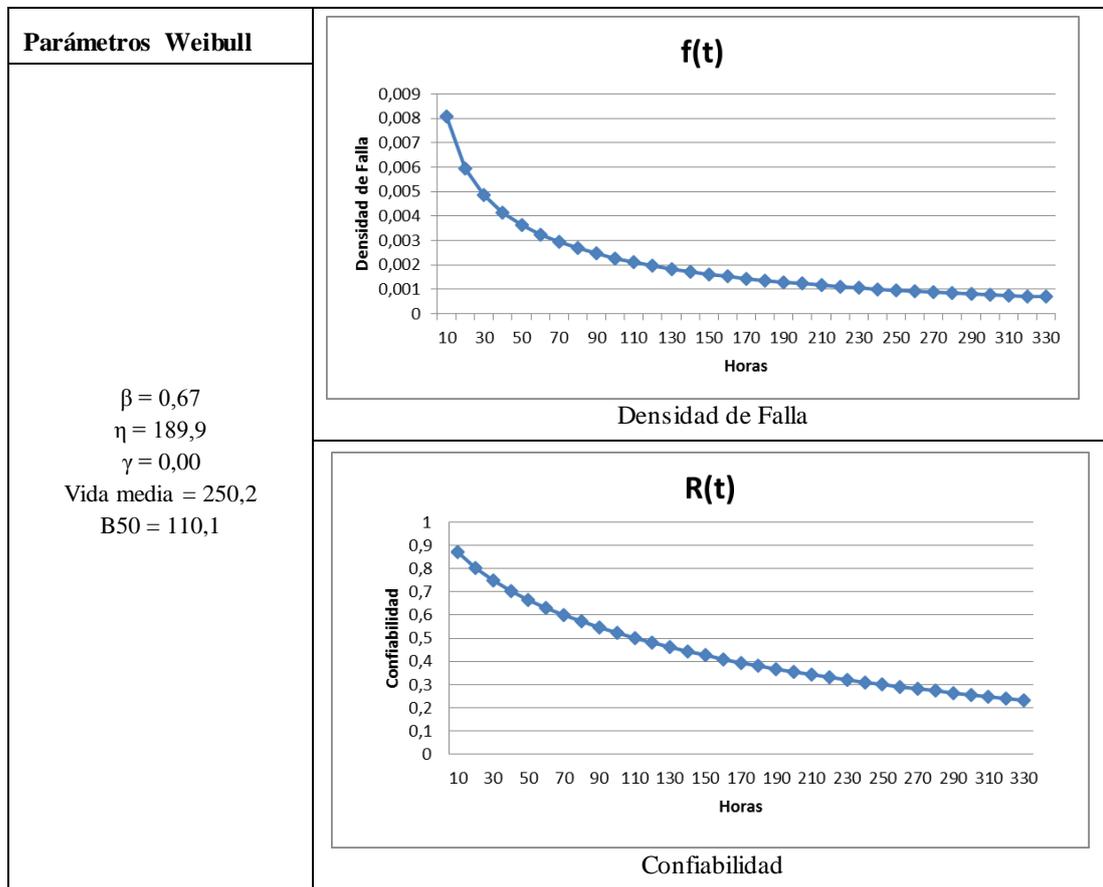
| Equipo | Horas Detención | Porcentaje Acumulado |
|----------------------|-----------------|----------------------|
| Enfriador 1 | 239,451 | 55,0% |
| Rastra 3 | 81,71 | 73,8% |
| Tornillo 14 | 41,26 | 83,3% |
| Enfriador 2 | 29,448 | 90,0% |
| Transporte Neumático | 13,55 | 93,1% |
| Tornillo 13 | 8,4 | 95,1% |

▪ *Nivel de Confiabilidad de los Equipos Principales Tostación:*

Para determinar el nivel de confiabilidad de los equipos principales se utiliza la distribución de Weibull de 2 parámetros [5], siendo éste, el modelo de distribución de probabilidad que mejor se adapta a equipos electromecánicos. De esta manera, se obtienen las curvas de densidad de falla y probabilidad para cada uno de los equipos principales, como se muestra en las Tablas 2 al 7.

De los gráficos de densidad de falla y confiabilidad en la Tabla 2, se deduce que para el Enfriador 1 la densidad de fallas tiene una forma decreciente, esto también se ve en el factor $\beta = 0,67$, que indica que la tasa de falla es decreciente, lo cual implica que el equipo está en una fase de fallas prematuras.

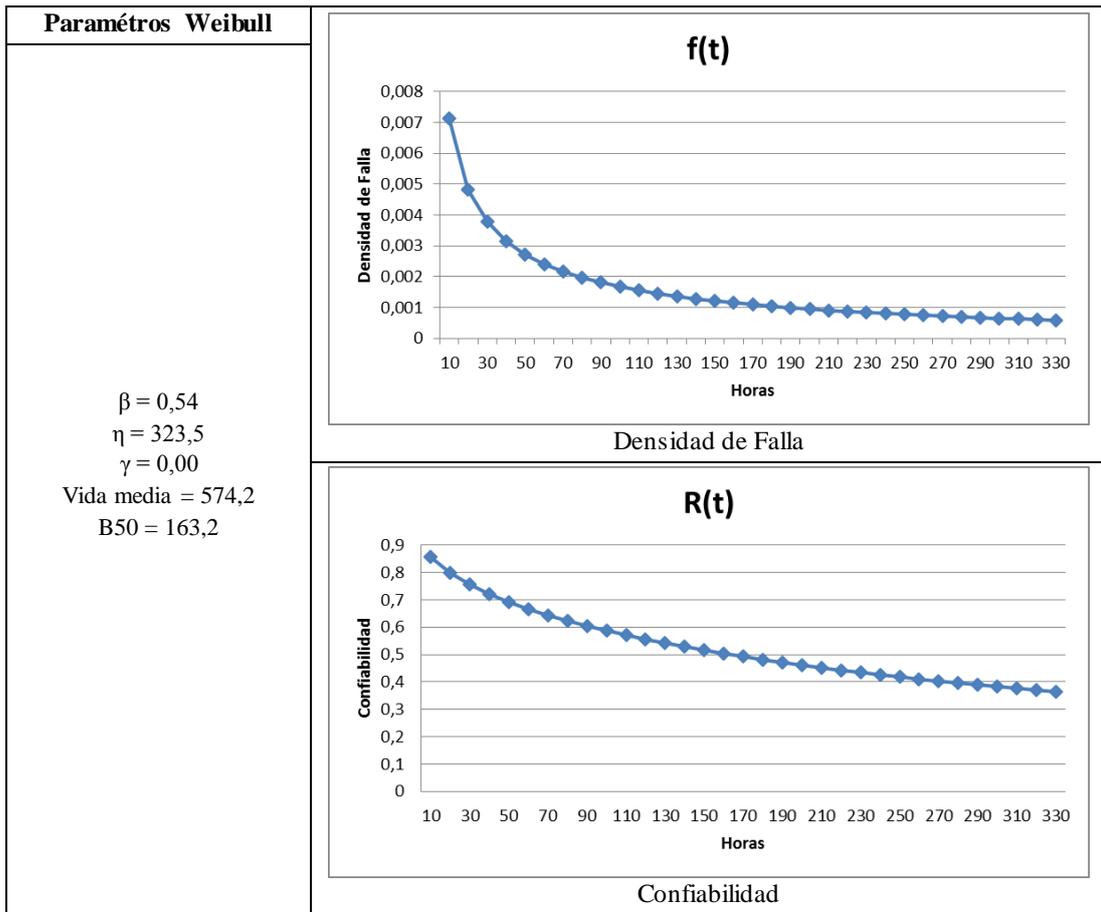
TABLA 2 - ENFRIADOR 1: PARAMETROS DE WEIBULL Y CURVAS DE DENSIDAD DE FALLA Y CONFIABILIDAD



El tiempo medio entre fallas es de 250,2 horas, sin embargo, para alcanzar este valor existe solo un 30% de probabilidad. El factor $\eta = 189,9$, implica que sobre este número de horas se concentra el 63,2% de las fallas. La probabilidad de falla de un 50% está en las 110 horas, esto se denota por el valor de B50.

De los gráficos de la Tabla 3, se deduce que para la rastra 3 la densidad de fallas tiene una forma decreciente, esto también se ve en el factor $\beta = 0,54$, el cual indica que la tasa de falla es decreciente, esto implica que el equipo está en una fase de fallas prematuras. El tiempo medio entre fallas es de 574,2 horas, sin embargo, para alcanzar este valor existe solo un 25,7 % de probabilidad. El factor esta es de 323,5 horas, esto quiere decir, que sobre este número de horas se concentra el 63,2% de las fallas. La probabilidad de falla de un 50% está en las 110 horas, esto se denota por el valor de B50.

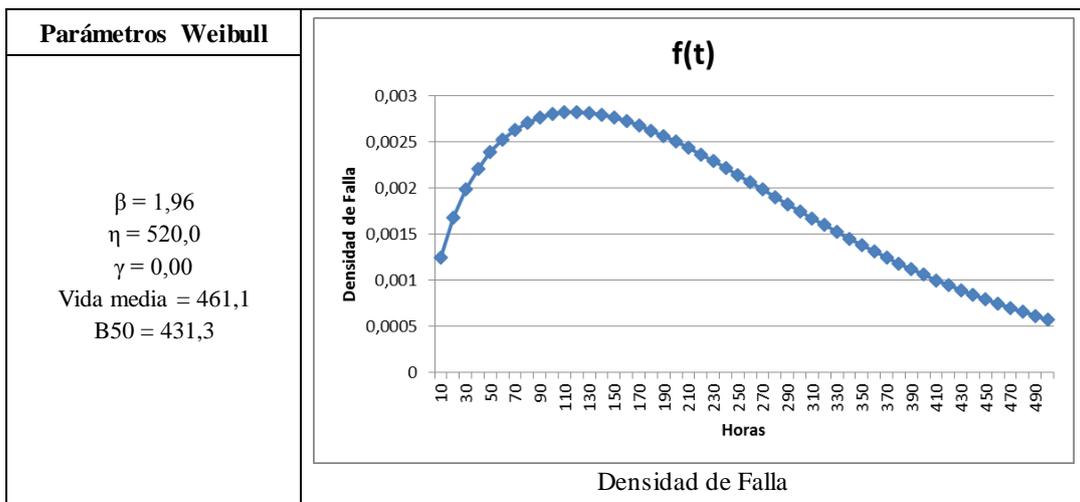
TABLA 3 - RASTRA 3: PARAMETROS DE WEIBULL Y CURVAS DE DENSIDAD DE FALLA Y CONFIABILIDAD



De los gráficos de la Tabla 4, se deduce que para el Tornillo 14 la densidad de fallas tiene una forma de campana, esto también se ve en el factor $\beta = 1,96$ el cual, al ser mayor que 1, indica que la tasa de falla es creciente, y por tanto, el equipo está en una fase de fallas por vejez.

El tiempo medio entre fallas es de 461,1 horas, sin embargo, para alcanzar este valor existe un 45,4 % de probabilidad. El factor $\eta = 520,0$ horas, quiere decir, que sobre este número de horas se concentra el 63,2% de las fallas. La probabilidad de falla de un 50% está en las 431,3 horas, esto se denota por el valor de B50.

TABLA 4 - TORNILLO 14: PARAMETROS DE WEIBULL Y CURVAS DE DENSIDAD DE FALLA Y CONFIABILIDAD



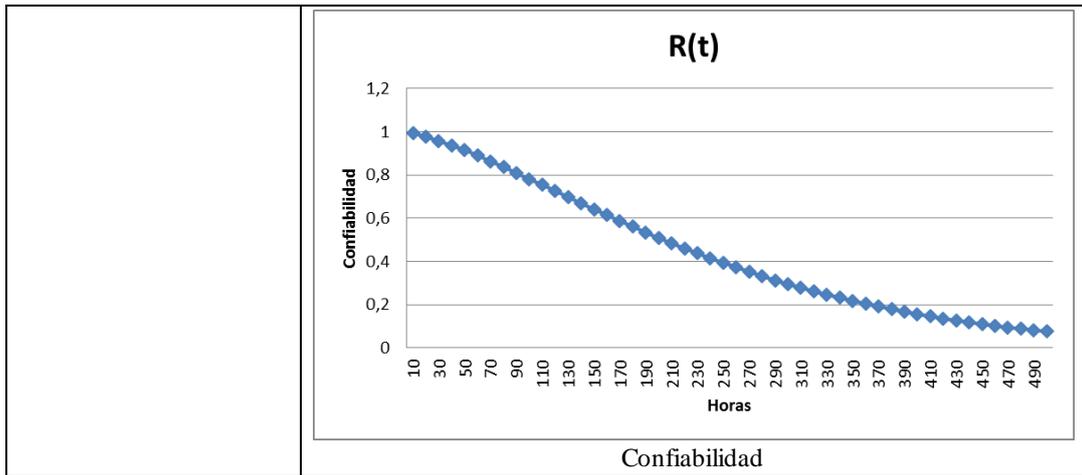
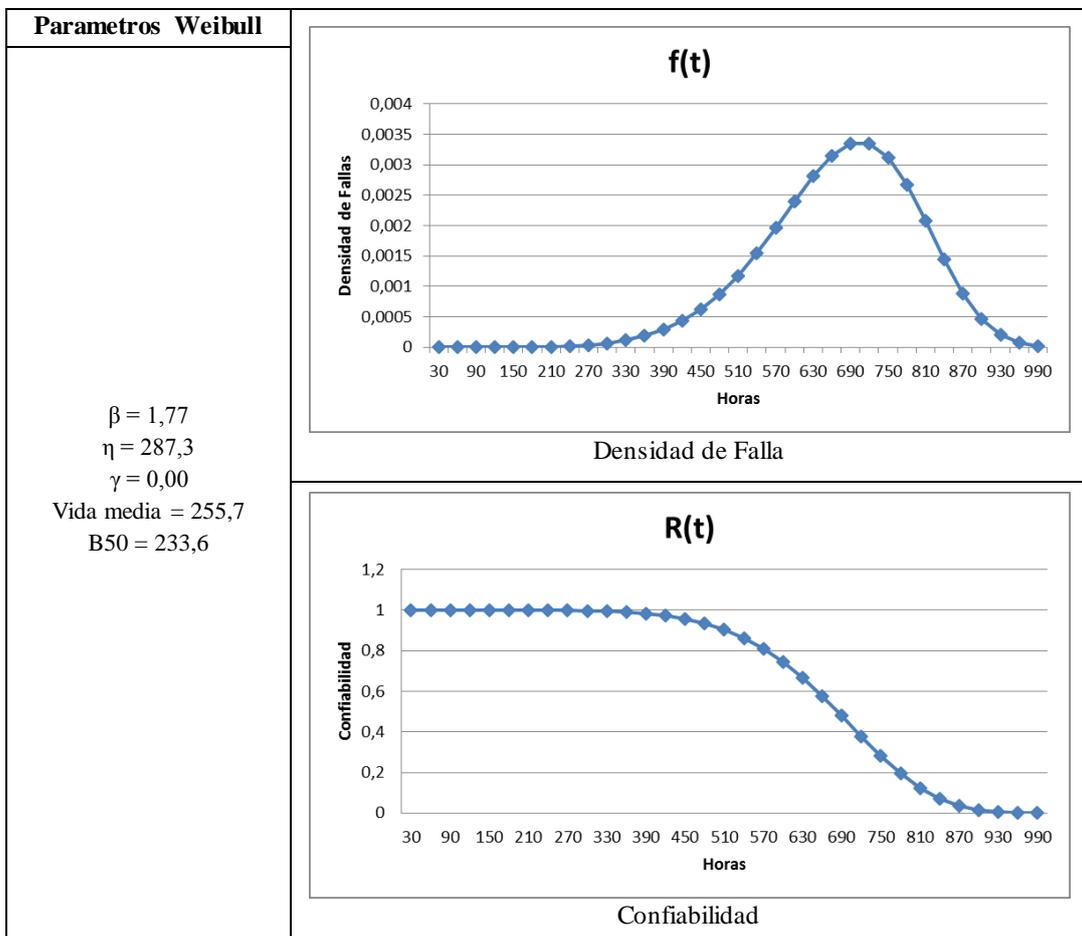


TABLA 5 - ENFRIADOR 2: PARAMETROS DE WEIBULL Y CURVAS DE DENSIDAD DE FALLA Y CONFIABILIDAD



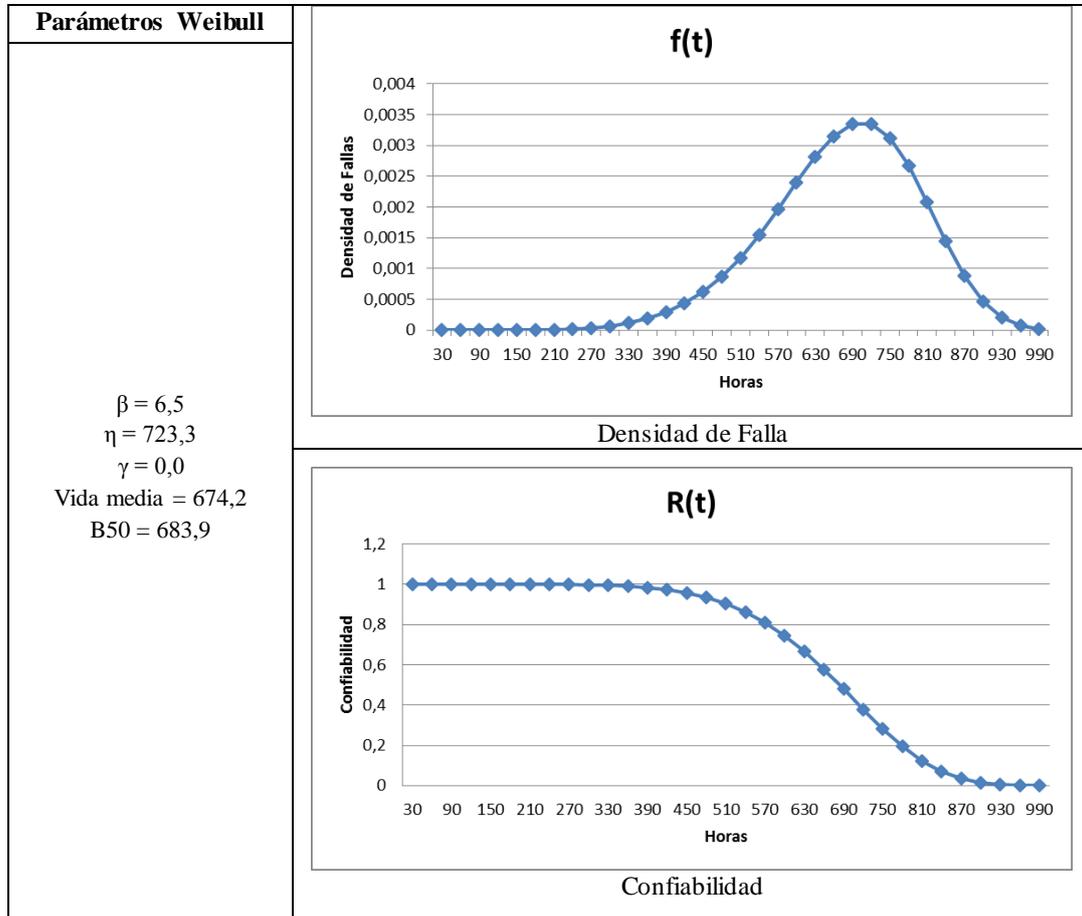
De los gráficos de la Tabla 5, se deduce que para el Enfriador 2 la densidad de fallas tiene una forma de campana, esto también se ve en el factor $\beta = 1,77$, el cual indica que la tasa de falla es creciente, y por tanto el equipo está en una etapa de fallas por vejez:

- El tiempo medio entre fallas es de 255,7 horas, sin embargo, para alcanzar este valor existe un 44,4 % de probabilidad.
- El factor $\eta = 287,3$ horas, quiere decir, que sobre este número de se concentra el 63,2% de las fallas.
- La probabilidad de falla de un 50% está en las 233,6 horas, esto se denota por el valor de B50.

De los gráficos de la Tabla 6, se deduce que para el Transporte Neumático, la densidad de fallas tiene una forma de campana, esto también se ve en el factor $\beta = 6,5$ el cual, al ser mayor que 1, indica que la tasa de falla es creciente, y por tanto el equipo está en una fase de fallas por vejez.

- El tiempo medio entre fallas es de 674,2 horas, sin embargo, para alcanzar este valor existe un 53,2 % de probabilidad.
- El factor $\eta = 723,3$ horas, significa que sobre este número de horas se concentra el 63,2 % de las fallas.
- La probabilidad de falla de un 50 % está en las 683,9 horas, esto se denota por el valor de B50.

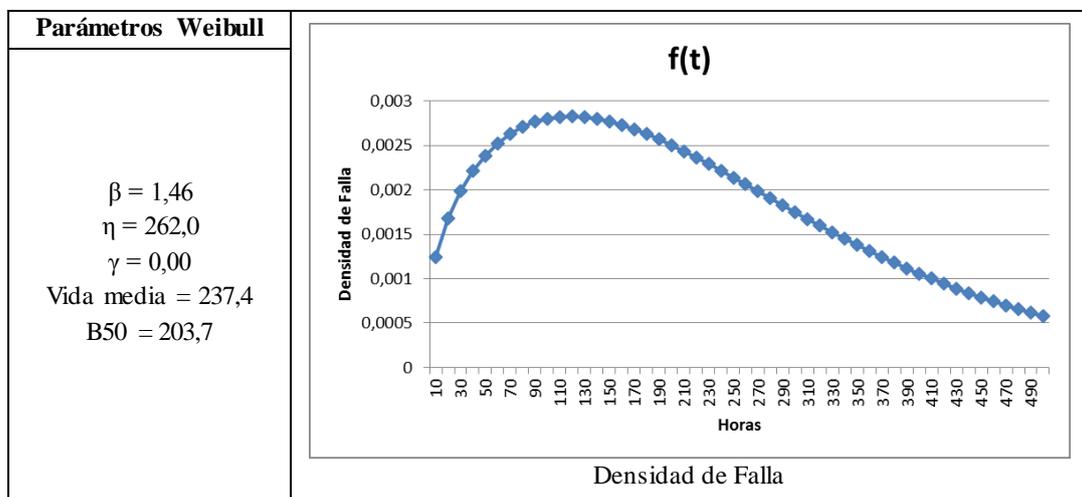
TABLA 6 - TRANSPORTE NEUMÁTICO: PARAMETROS DE WEIBULL Y CURVAS DE DENSIDAD DE FALLA Y CONFIABILIDAD

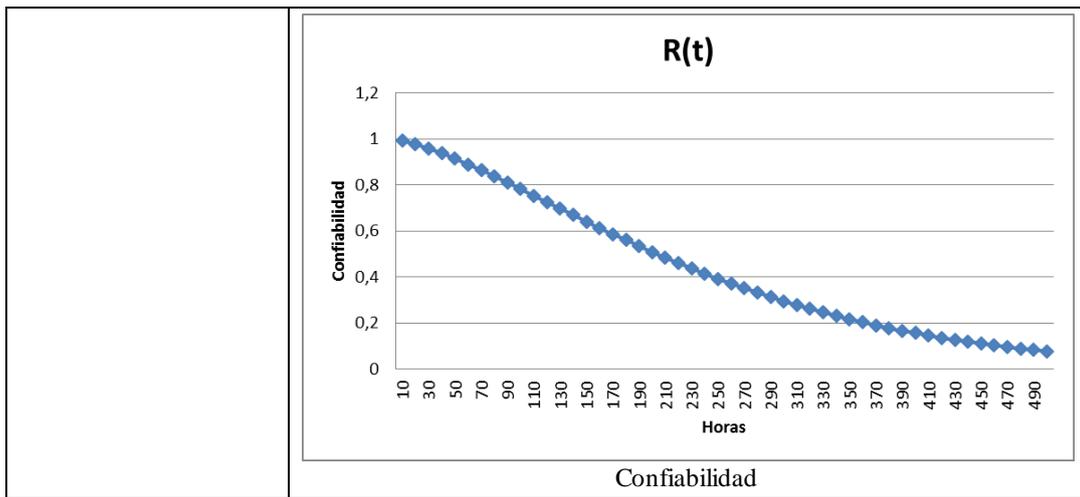


De los gráficos de la Tabla 7, se deduce que para el Tornillo 13 la densidad de fallas tiene una forma de campana, dado que $\beta = 1,46$, indica que la tasa de falla es creciente, por tanto el equipo está en una fase de fallas por vejez.

- El tiempo medio entre fallas es de 237,4 horas, sin embargo, para alcanzar este valor existe un 42% de probabilidad.
- El factor $\eta = 262,0$ horas, quiere decir, que sobre este número se concentra el 63,2% de las fallas.
- La probabilidad de falla de un 50% está en las 203,7 horas, esto se denota por el valor de B50.

TABLA 7 - TORNILLO 13: PARAMETROS DE WEIBULL Y CURVAS DE DENSIDAD DE FALLA Y CONFIABILIDAD





En resumen, la Tabla 8, lista los principales parámetros de confiabilidad para los equipos principales.

TABLA 8 - PARÁMETROS DE CONFIABILIDAD: EQUIPOS PRINCIPALES

| Equipo | Horas Detención | Porcentaje Acumulado | Número Detenciones | Disponibilidad | MTTR (horas) | TMEF (horas) | Beta | Etha (horas) | B50 |
|----------------------|-----------------|----------------------|--------------------|----------------|--------------|--------------|------|--------------|-------|
| Enfriador 1 | 239,5 | 55% | 35 | 97,27% | 6,8 | 250,2 | 0,67 | 189,9 | 110,1 |
| Rastra 3 | 81,7 | 74% | 26 | 99,07% | 3,1 | 574,1 | 0,54 | 323,5 | 163,2 |
| Tornillo 14 | 41,3 | 83% | 7 | 99,53% | 5,9 | 461,1 | 1,96 | 520,0 | 431,3 |
| Enfriador 2 | 29,4 | 90% | 7 | 99,66% | 4,2 | 255,7 | 1,77 | 287,3 | 233,6 |
| Transporte Neumatico | 13,6 | 93% | 6 | 99,85% | 2,3 | 674,2 | 6,50 | 723,3 | 683,9 |
| Tornillo 13 | 8,4 | 95% | 5 | 99,90% | 1,7 | 237,4 | 1,46 | 262,0 | 203,7 |

▪ *Implementación de Mantenimiento Basada en Confiabilidad:*

Dentro de los seis equipos principales, se puede notar desde el punto de vista de diseño y funcionalidad que el enfriador 1 es equivalente al enfriador 2; y el tonillo 13 es equivalente al tornillo 14; lo cual permite simplificar el análisis a cuatro equipos principales distintos.

A continuación se utiliza la metodología FMECA-RCM para optimizar el plan de mantenimiento.

▪ *Enfriadores de Calcina*

Son los encargados de enfriar la calcina desde los 550°C en la entrada, hasta los 80°C en la salida, a razón de 40 ton/hr, girando a 4 RPM al 100% de la velocidad, sin pérdidas internas ni externas de agua, y con un delta de temperatura de 20° en el agua de refrigeración sin sobrepasar los 60 °C a la salida y evacuando 3500 KW de calor, sin pérdidas hacia el exterior de calcina. Los modos de fallos funcionales, se pueden clasificar como:

- Enfriador no gira
- Enfriador no enfría
- Temperatura de salida agua de enfriamiento alta
- Pérdida de agua de refrigeración
- Fuga de calcina hacia el exterior

Actualmente los enfriadores de calcina poseen una estrategia de mantenimiento basada en la inspección de componentes críticos. Dentro de las inspecciones se encuentra la medición de vibraciones de elementos rodantes como rodillos y motor eléctrico. También se realiza una ruta de lubricación la cual consiste en lubricadores automáticos para los rodillos, motor, reductor y cadena de transmisión. Dentro de plan de mantenimiento también existe la inspección visual y el monitoreo de comportamiento de corriente y pérdida de nivel del estanque de agua desmineralizada. Más allá de los puntos anteriores, cuando existen componentes críticos en falla que impiden la operación de los enfriadores, se realiza detención no programada para solucionar la falla y seguir operando.

Los componentes críticos de mayor tasa de falla son los “cassettes”. Durante el presente estudio, se han cambiado 24 cassettes en mantenencias programadas y 18 cassettes en mantenencias no programadas. Sin embargo existen otros componentes críticos, tales como los sellos, los cuales se cambian solamente cuando fallan.

Para optimizar el plan de mantenimiento se realiza el análisis FMECA, una metodología ampliamente utilizada para reconocer la naturaleza de las fallas, las necesidades del mantenimiento y las áreas de mejoras potenciales. Del análisis

FMECA, se concluye que todos los modos de fallas son críticos, y a través del árbol de decisión de la metodología RCM se obtienen las actividades de mantenimiento y listado de repuestos críticos para un enfriador, según se muestra en Tabla 9.

▪ *Rastra 3*

Equipo encargado de transportar de manera continua calcina a 80°C desde la rastra 9 y rastra 10 hacia el chute de descarga hacia el harnero vibratorio, a razón de 100 Ton/Hr, sin pérdida de calcina. Los fallos funcionales principales de la Rastra son:

- Rastra no transporta calcina
- Fuga de calcina hacia el exterior

TABLA 9 - ENFRIADOR DE CANCINA: PLAN DE MANTENIMIENTO, RESULTADO DE ANÁLISIS FMECA Y RCM

| MODO DE FALLA | ESTRATEGIA | Sustitución Preventiva | Reacondicionamiento Cíclico Preventivo | Inspeccion MONCON | Reparación a la condición | Reparación a la falla | Repuesto Critico | Cantidad |
|---|------------|---|--|-------------------|--|-----------------------|------------------------------------|-----------|
| CORTE CADENA TRANSMISIÓN | | 1 vez al año | No aplica | 1 vez por semana | Si existen saltos de cadena | No aplica | Cadena transmisión | 1 |
| FALLA MACHON ACOPLÉ | | 1 vez al año | No aplica | 1 vez por semana | Si hay aumento en vibración de sistema | No aplica | Machon de Acoplamiento | 1 |
| FALLA REDUCTOR | | 1 vez cada 2 años | No aplica | 1 vez por semana | Si hay aumento en vibración de sistema | No aplica | Reductor | 1 |
| FALLA EN MOTOR ELÉCTRICO | | 1 vez al año | No aplica | 1 vez por semana | Si hay aumento en vibración de sistema/Temperatura/Corriente | No aplica | Motor Eléctrico | 1 |
| FALLA SPROCKET MOTRIZ O TENSOR | | 1 vez cada 2 años cambiar sprocket motriz | Sprocket tensor repara 1 vez al año buje | 1 vez por semana | Si existe soltura en ajuste | No aplica | Sprocket Motriz/Tensor | 1 |
| RODILLOS TRANCADOS | | 1 vez cada 2 años | No aplica | 1 vez por semana | Si existe soltura/Temperatura/vibración/Desgaste | No aplica | Rodillos Soporte y Axiales | 4 |
| CASSETTE OBSTRUIDO | | No Aplica | No aplica | Todos los días | Si existe alta temperatura en cabezal de cassette y salida de agua | No aplica | Cassette | - |
| BAJO CAUDAL AGUA REFRIGERACIÓN POR ROTURA INTERNA | | 1 vez al año | No aplica | Todos los días | Si existe Fuga de Agua | No aplica | Flexibles de entrada/salida /manto | 72 |
| BAJO CAUDAL AGUA REFRIGERACIÓN POR BAJA EFICIENCIA BOMBAS | | 1 vez al año | No aplica | 1 vez por semana | Si hay aumento en vibración de sistema/Baja eficiencia | No aplica | Bombas de agua desmineralizada | 1 |
| OBSTRUCCIÓN INTERCAMBIADOR DE | | No aplica | Cada 6 meses | 1 vez por semana | Por baja Eficiencia | No aplica | Placas Intercambiador | 1 |
| ROTURA INTERNA DE CASSETTE | | Cada 4 Meses | No aplica | Todos los días | Perdida brusca de agua desmineralizada/Humedad en la calcina | No aplica | Cassette | 18 |
| ROTURA INTERNA PIPING DE AGUA REFRIGERACIÓN | | 1 vez al año | No aplica | Todos los días | Perdida brusca de agua desmineralizada/Humedad en la calcina | No aplica | Manifold Agua | 1 |
| ROTURA SELLOS ENTRADA/SALIDA | | cada 15 días | No aplica | Todos los días | Si hay Polución de calcina | No aplica | Sellos polvo entrada /salida | 24 |
| ROTURA SELLO TROMEL | | 1 vez al año | No aplica | Todos los días | Si hay Polución de calcina | No aplica | Sello Grafito Tromel | 1 |
| ROTURA MANTO ENDRIADOR | | No aplica | No aplica | Todos los días | Si hay Polución de calcina | No aplica | No aplica | No aplica |
| CANDADOS SUELTOS CASSETTE | | No aplica | cada 15 días | Todos los días | Si hay Polución de calcina | No aplica | Candados | 108 |

Actualmente la rastra 3 posee una estrategia de mantenimiento basada en la inspección de componentes críticos. Dentro de las inspecciones se encuentra la medición de vibraciones de elementos rodantes como descansos y motor eléctrico. También se realiza una ruta de lubricación la cual consiste en lubricadores automáticos para los descansos, cadena de

transmisión y reductor. Dentro de plan de mantenimiento también existe la inspección visual y el monitoreo de comportamiento de corriente. Más allá de los puntos anteriores, cuando existen componentes críticos en falla que impiden la operación de la rastra, se realiza detención no programada para solucionar la falla y seguir operando. Los componentes críticos de mayor tasa de falla son la cadena motriz, pasadores y rastra. Los componentes señalados anteriormente en la mayoría de los casos se han cambiado cuando estos fallan.

Después de realizar el análisis FMECA, se desprenden las actividades de mantenimiento listadas en la Tabla 10.

TABLA 10 - RASTRA 3: PLAN DE MANTENIMIENTO, RESULTADO DE ANÁLISIS FMECA Y RCM

| MODO DE FALLA | ESTRATEGIA | Sustitución Preventiva | Reacondicionamiento Cíclico Preventivo | Inspeccion MONCON | Reparación a la condición | Reparación a la falla | Repuesto Crítico | Cantidad |
|----------------------------------|------------|------------------------|--|-------------------|--|-----------------------|----------------------------|-----------|
| CORTE CADENA TRANSMISIÓN | | Cada 3 meses | No aplica | Todos los días | Si existen saltos de cadena | No aplica | Cadena transmisión | 4 |
| CORTE/FALLA DE RASTRA | | 1 vez al año | No aplica | Todos los días | Si existen saltos de cadena/Paletas dobladas/ruidos. | No aplica | Cadena de rastra | 1 |
| CORTE PASADOR | | No aplica | No aplica | Todos los días | No aplica | Sustituir si falla | Pasador | 12 |
| FALLA EN MOTOR ELÉCTRICO | | 1 vez al año | No aplica | 1 vez a la semana | Si existe aumento en vibraciones/temperatura | No aplica | Motor Eléctrico | 1 |
| FALLA EN REDUCTOR | | 1 vez al año | No aplica | 1 vez a la semana | Si existe aumento en vibraciones/temperatura | No aplica | Reductor | 1 |
| FALLA SPROCKET MOTRIZ | | 1 vez al año | No aplica | 1 vez a la semana | Si existen saltos de cadena | No aplica | Sprocket Motriz | 1 |
| FALLA SPROCKET CONDUCIDO | | 1 vez al año | No aplica | 1 vez a la semana | Si existen saltos de cadena | No aplica | Sprocket Conducido | 1 |
| ROTURA EJE MOTRIZ | | 1 vez cada 2 años | No aplica | 1 vez a la semana | Si hay discontinuidad en eje | No aplica | Eje motriz | 1 |
| ROTURA EJE CONDUCIDO | | 1 vez cada 2 años | No aplica | 1 vez a la semana | Si hay discontinuidad en eje | No aplica | Eje Conducido | 1 |
| FALLA SPROCKET INTERNO CONDUCIDO | | 1 vez cada 2 años | No aplica | 1 vez a la semana | Si hay soltura o dientes gastados | No aplica | Sprocket Interno conducido | 1 |
| FALLA SPROCKET INTERNO MOTRIZ | | 1 vez cada 2 años | No aplica | 1 vez a la semana | Si hay soltura o dientes gastados | No aplica | Sprocket Interno Motriz | 1 |
| GUIA FUERA DE POSICIÓN | | 1 vez al año | No aplica | 1 vez a la semana | Si hay ruido golpe o sobrecorriente | No aplica | Guías internas | 12 |
| FALLA DESCANSOS | | 1 vez cada 2 años | No aplica | 1 vez a la semana | Si existe aumento en vibraciones/temperatura | No aplica | Descansos | 6 |
| ROTURA ESTRUCTURA DE RASTRA | | No aplica | No aplica | Todos los días | Si existe fuga de calcina | Aplicar soldadura | No aplica | No aplica |

▪ *Tornillos.*

Cumplen la función principal de transportar de manera continua calcina a 500°C desde ciclón primario hacia el chute de descarga hacia el enfriador, a razón de 50 Ton/hr, sin que haya pérdida de calcina, sin pérdida de agua de refrigeración, y sin humedad en calcina.

Actualmente los tornillos 13 y 14 poseen una estrategia de mantenimiento basada en la inspección de componentes críticos. Dentro de las inspecciones se encuentra la medición de vibraciones de elemento rodante como descansos, reductor y motor eléctrico. También se realiza una ruta de lubricación la cual consiste en lubricadores automáticos para los descansos, cadena de transmisión y reductor. Dentro de plan de mantenimiento actual también existe la inspección visual y el monitoreo de comportamiento de corriente.

Más allá de los puntos anteriores, cuando existen componentes críticos en falla que impiden la operación del Tornillo, se realiza detención no programada para solucionar la falla y seguir operando.

Los componentes críticos de mayor tasa de falla son packing de estopa, cadena motriz, descanso motriz. Los componentes señalados anteriormente en la mayoría de los casos se han cambiado cuando estos fallan. Las principales fallas funcionales son:

- Tornillo no transporta calcina
- Pérdida de agua de refrigeración
- Fuga de calcina hacia el exterior

Después de realizar el análisis FMECA, se desprenden para el tornillo, las actividades de mantenimiento listadas en la Tabla 11.

TABLA 11 - TORNILLO: PLAN DE MANTENIMIENTO, RESULTADO DE ANÁLISIS FMECA Y RCM

| MODO DE FALLA | ESTRATEGIA | Sustitución Preventiva | Reacondicionamiento Cíclico Preventivo | Inspección MONCON | Reparación a la condición | Reparación a la falla | Repuesto Crítico | Cantidad |
|----------------------------------|------------|------------------------|--|-------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------|----------|
| CORTE CADENA TRANSMISIÓN | | 1 vez al año | No aplica | Todos los días | Si existen saltos de cadena | No aplica | Cadena transmisión | 1 |
| ROTURA SIN FIN | | 1 vez al año | No aplica | Todos los días | Si hay agua en calcina | No aplica | Tornillo completo | 1 |
| FALLA DESCANSO MOTRIZ | | 1 vez al año | No aplica | 1 vez a la semana | si hay vibraciones/Temperatura | No aplica | Descanso lado motriz | 1 |
| FALLA DESCANSO LADO LIBRE | | 1 vez al año | No aplica | 1 vez a la semana | si hay vibraciones/Temperatura | No aplica | Descanso lado Libre | 1 |
| FALLA SPROKET MOTRIZ | | 1 vez al año | No aplica | 1 vez a la semana | Si hay saltos de cadena | No aplica | Sproket motriz | 1 |
| FALLA SPROKET CONDUCTIDO | | 1 vez al año | No aplica | 1 vez a la semana | Si hay saltos de cadena | No aplica | Sproket Conducido | 1 |
| FALLA MOTOR ELÉCTRICO | | 1 vez al año | No aplica | 1 vez a la semana | Analisis de corriente | No aplica | Motor Eléctrico | 1 |
| FALLA REDUCTOR | | 1 vez al año | No aplica | 1 vez a la semana | si hay vibraciones/Temperatura | No aplica | Reductor | 1 |
| FUGA DE AGUA POR FLEXIBLES | | No aplica | No aplica | Todos los días | Si hay fuga de agua | cambio de flexibles | Flexibles | 2 |
| FUGA DE AGUA INTERNA POR SIN FIN | | 1 vez al año | No aplica | Todos los días | Si hay calcina húmeda | No aplica | Tornillo completo | 1 |
| FUGA DE AGUA POR JUNTA ROTATORIA | | Cada 6 meses | No aplica | Todos los días | Si hay fuga de agua | No aplica | Junta rotatoria de agua | 4 |
| DESGASTE DE PACKING EN ESTOPA | | cada mes | No aplica | Todos los días | Si hay fuga de calcina | No aplica | Packing Estopa | 3 |

TABLA 12 - TRANSPORTE NEUMÁTICO: PLAN DE MANTENIMIENTO, RESULTADO DE ANÁLISIS FMECA Y RCM

| MODO DE FALLA | ESTRATEGIA | Sustitución Preventiva | Reacondicionamiento Cíclico Preventivo | Inspección MONCON | Reparación a la condición | Reparación a la falla | Repuesto Crítico | Cantidad |
|--|------------|------------------------|--|-------------------|----------------------------|------------------------|---------------------------------|----------|
| ROTURA DE CODO LÍNEA | | 1 vez al año | No Aplica | Todos los días | Si hay Fuga de Calcina | Aplicar Soldadura | Codo de Línea | 4 |
| ROTURA JUNTA EXPANSIÓN LÍNEA | | 1 vez al año | No Aplica | Todos los días | Si hay Fuga de Calcina | Cambio de Junta | Junta de Expansión de Línea | 4 |
| ROTURA BIFURACACIÓN | | 1 vez al año | No Aplica | Todos los días | Si hay Fuga de Calcina | Aplicar Soldadura | Bifurcación | 1 |
| ROTURA CODO 45° LÍNEA X | | 1 vez al año | No Aplica | Todos los días | Si hay Fuga de Calcina | Aplicar Soldadura | Codo 45° | 1 |
| ROTURA CODO 90° LÍNEA X | | 1 vez al año | No Aplica | Todos los días | Si hay Fuga de Calcina | Aplicar Soldadura | Codo 90° | 1 |
| ROTURA CODO 90° LÍNEA Y | | 1 vez al año | No Aplica | Todos los días | Si hay Fuga de Calcina | Aplicar Soldadura | Codo 90° | 1 |
| ROTURA LÍNEA SOBRE BIFURCACIÓN | | 1 vez al año | No Aplica | Todos los días | Si hay Fuga de Calcina | Si hay Fuga de Calcina | Carrete 1200 mm | 1 |
| ROTURA SELLO V/V DOMO 200 mm | | Cada 3 meses | No Aplica | 1 vez a la semana | Baja Presión aire de sello | cambio de sello | Sello de 200 mm | 16 |
| ROTURA SELLO V/V DOMO 150 mm | | Cada 6 meses | No Aplica | 1 vez a la semana | Baja Presión aire de sello | cambio de sello | Sello de 150 mm | 8 |
| ROTURA SELLO V/V DOMO 80 mm | | Cada 6 meses | No Aplica | 1 vez a la semana | Baja Presión aire de sello | cambio de sello | Sello de 80 mm | 6 |
| ROTURA TRIDENTE DESCARGA VASOS | | 1 vez al año | No Aplica | Todos los días | Si hay Fuga de Calcina | Aplicar Soldadura | Tridente descarga de Vasos | 1 |
| FUGA VASOS PRESURIZADOS | | No Aplica | 1 vez al año | Todos los días | Si hay Fuga de Calcina | Aplicar Soldadura | No Aplica | - |
| FALLA V/V GUILLOTINA BIFURCACIÓN | | Cada 6 meses | No Aplica | Todos los días | Si hay Fuga de Calcina | No Aplica | Guillotina 6" | 2 |
| ABRAZADERA JUNTA EXPANSIÓN DESCARGA DE VASOS | | Cada 3 meses | No Aplica | Todos los días | Si hay Fuga de Calcina | No Aplica | Abrazadera para junta expansión | 12 |
| FALLA V/V GUILLOTINA DESCARGA VASOS | | Cada 6 meses | No Aplica | Todos los días | Si hay Fuga de Calcina | No Aplica | Guillotina 6" | 6 |

▪ *Transporte Neumático.*

Transporta de manera continua calcina a 80°C desde rastra 3 hacia tolvas de despacho de calcinas, a razón de 100 Ton/hr., sin pérdida de calcina. Su principal falla funcional es que no haya transporte de calcina.

Actualmente el transporte neumático posee una estrategia de mantenimiento basada en la inspección de componentes críticos. Dentro de las inspecciones se encuentra inspección visual por fugas en línea. Existe una línea única de transporte, solo se cambia un componente cuando esté esta en falla o detiene la línea. Los componentes críticos de mayor tasa de falla son rotura de línea, sellos de válvulas domo. Los componentes señalados anteriormente en la mayoría de los casos se cambian cuando fallan.

Del análisis FMECA se desprende las actividades de mantenimiento para este equipo, según se muestra en Tabla 12.

4. ANALISIS DE SENSIBILIDAD

De los análisis y metodología utilizada en secciones anteriores, se realiza el análisis de sensibilidad para estimar el aumento en la confiabilidad de los activos principales, así como también, la estimación en la posible reducción de costos utilizando la nueva propuesta de mantenimiento. Considerando los datos acerca de producción y mantenimiento (según Tabla 13) se calcula la pérdida ocasionada por detenciones imprevistas, tomando en particular el caso del Enfriador 1.

TABLA 13 - DATOS DE PRODUCCIÓN Y MANTENIMIENTO

| Producción | | |
|------------------------|---|--------|
| Producción de Calcina | 69 | Ton/Hr |
| Costo Tonelada Calcina | 1200 | USD |
| Mantenimiento | | |
| Mano de Obra | Invariante ya que hay personal día y noche a costo fijo | |
| Repuestos | Sobre consumo de repuestos | |

Para el análisis se calculan las pérdidas reales, causadas tanto por pérdidas de producción, como por sobrecostos en repuestos y mano de obra, obteniendo un total de pérdidas por 20.092.042 dólares, según se detalla en Tablas 14 y 15, respectivamente.

TABLA 14 - PÉRDIDAS POR PRODUCCIÓN

| Equipo | Horas Detención | Costo unitario USD | Toneladas por Hora | Costos producción USD |
|---------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Enfriador 1 | 239,451 | 1.200 | 69 | 19.826.542 |

TABLA 15 - PÉRDIDAS POR SOBRECOSUMO DE REPUESTOS

| Repuesto | Cantidad | Costo Unitario USD | Costo Total USD |
|---------------------------|-----------------|---------------------------|------------------------|
| Cassette | 16 | 15.000 | 240000 |
| Sellos entrada/ salida | 6 | 500 | 3000 |
| Motor eléctrico rotatoria | 1 | 1.000 | 1000 |
| Reductor | 1 | 20.000 | 20000 |
| Polín axial | 1 | 1.500 | 1500 |
| Total | | | 265.500 |

De esta manera, utilizando el plan de mantenimiento propuesto, el recambio de componentes debe disminuir la probabilidad de falla imprevista de estos, sin embargo, analizando las detenciones, se encuentran modos de fallas que no se pueden prever, es por esto que se modifica la base de detenciones utilizando el criterio anterior. Cabe decir, que si bien el reapriete de candados puede mejorar el desempeño del enfriador, las características de su modelo, año de

fabricación, como también calidad y precisión en la instalación y modo de operación, hacen que algunos componentes puedan fallar. Por ejemplo, los pernos del “backplate” del enfriador, debido a las horas de uso, pueden presentar falla por fatiga, sin previo aviso.

Por lo tanto, con esta nueva base de datos basados en los criterios anteriores, se puede realizar el análisis de confiabilidad y costos por pérdidas operacionales. Bajando de 33 a 13 las detenciones imprevistas se tienen las pérdidas y sobrecostos, según se muestra en Tablas 16 y 17, respectivamente. De esta manera, los costos totales serian equivalentes a 3.006.640 dólares

TABLA 16 - PÉRDIDAS POR PRODUCCIÓN (CON MENOR NÚMERO DE IMPREVISTOS)

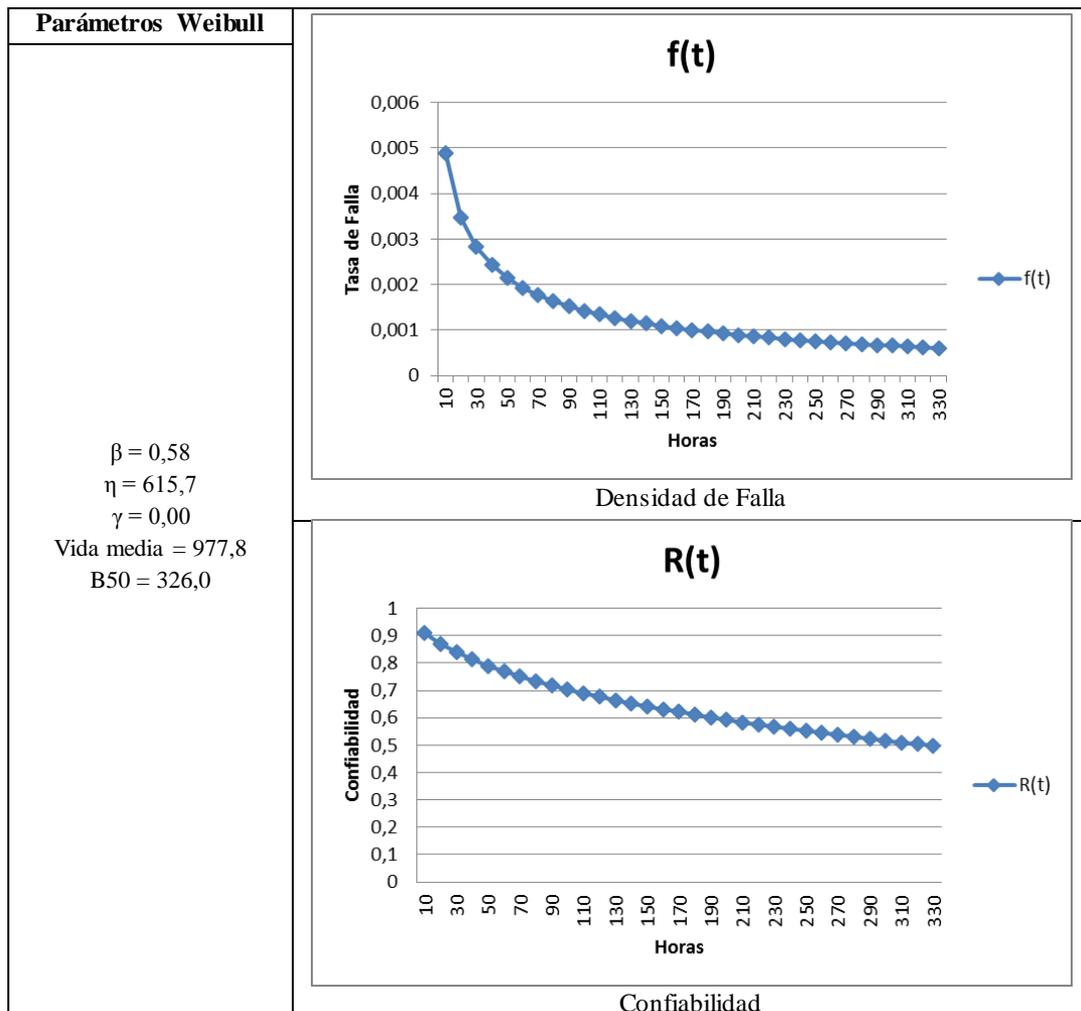
| Equipo | Horas Detención | Costo unitario USD | Toneladas por Hora | Costos producción USD |
|-------------|-----------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| Enfriador 1 | 36,3 | 1.200 | 69 | 3.005.640 |

TABLA 17 - PÉRDIDAS POR SOBRECONSUMO DE REPUESTOS (CON MENOR NÚMERO DE IMPREVISTOS)

| Repuesto | Cantidad | Costo Unitario USD | Costo Total USD |
|-----------------------|----------|--------------------|-----------------|
| Sellos entrada/salida | 2 | 500 | 1000 |
| Total | | | 1000 |

Recalculando los parámetros de confiabilidad basados en la nueva base de datos de detenciones, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 18.

TABLA 18 - ENFRIADOR 1: PARAMETROS DE WEIBULL Y CURVAS DE DENSIDAD DE FALLA Y CONFIABILIDAD, BASADOS EN NUEVA BASE DE DATOS DE DETENCIONES, CON PLAN PROPUESTO



Como se puede observar de los gráficos y resultados mostrados en la Tabla 18, y comparándolos con los gráficos y parámetros de la Tabla 2; aunque $\beta = 0,58$, sigue siendo menor que 1, se aprecia una mejora en los valores de vida media y tiempo en probabilidad de falla al 50% que suben de 250 a 977,8 horas para el caso de vida media, y de 110 a 326 horas en el caso del B50. También se aprecia mejora en el valor de η , parámetro que concentra el 62,3% de la fallas, y que cambia de 189 a un nuevo valor de 615 horas. En resumen se puede apreciar con los criterios señalados un aumento en la confiabilidad del equipo así como también una disminución en las pérdidas por 17.085.402 dólares.

Utilizando esta metodología y análisis a los demás equipos principales de la planta de tostación, y comparando las pérdidas actuales con las perdidas proyectadas, se muestran los resultados en la Tabla 19.

TABLA 19 - EQUIPOS PLANTA DE TOSTACIÓN: COMPARACIÓN PÉRDIDAS ACTUALES CON PÉRDIDAS PROYECTADAS UTILIZANDO FMECA-RCM

| Pérdidas actuales | Valor [USD] | Pérdidas Proyectadas | Valor [USD] |
|--------------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|
| Enfriador 1 | 20.092.042 | Enfriador 1 | 3.006.640 |
| Rastra 3 | 6.929.260 | Rastra 3 | 1.888.340 |
| Tornillo 14 | 3.538.860 | Tornillo 14 | 0 |
| Enfriador 2 | 2.471.820 | Enfriador 2 | 0 |
| Transporte Neumático | 1.120.800 | Transporte Neumático | 0 |
| Tornillo 13 | 698.020 | Tornillo 13 | 0 |
| Total Pérdidas | 34.850.802 | Total Pérdidas | 4.894.980 |

Respecto de los parámetros de confiabilidad, se obtuvo un aumento importante en los valores η , B50 y vida media. También se apreció un incremento en la Disponibilidad de 83,25 %, a 87,28 %; y una mejora significativa en el tiempo medio para reparar, pasando de 10,44 Horas a 2,4 Horas.

5. CONCLUSIONES.

Debido a la naturaleza de la operación del Tostador, se pudo constatar que es muy conveniente emplear la metodología FMECA – RCM, con el objeto de optimizar la gestión del mantenimiento, principalmente en cuanto a que se disminuyen las detenciones imprevistas, las cuales producen como consecuencia daño progresivo a la integridad del lecho del horno de tostación.

Un enfoque de mantenimiento basado en confiabilidad, permite además acortar el tiempo de las detenciones, y disminuir las pérdidas asociadas a las mismas. Se pudo constatar mediante el estudio, que las pérdidas asociadas a costos de producción y sobreconsumo de repuestos por fallas imprevistas de equipos son muy cuantiosas alcanzando el valor de 34.850.802 dólares. Lo anterior, considerando solamente seis equipos, que abarcan el 95% de las detenciones imprevistas durante un año de estudio, en el Complejo de Tostación de la División Ministro Hales de Codelco.

Luego de realizar el análisis de sensibilidad y utilizando la metodología y planes propuestos se estima alcanzar una reducción de costos de 29.955.822 dólares, asociados a pérdidas de producción y sobre-consumo de repuestos. Adicionalmente, se logra un aumento en el nivel de confiabilidad tanto del enfriador 1, como de la rastra 3, los cuales acumulan la mayoría de las detenciones por imprevistos.

6. BIBLIOGRAFIA.

[1] P. Luthra, "FMECA: an integrated approach", Annual Reliability and Maintainability Symposium. Proceedings, Orlando, FL, 1991, pp. 235-241, 1991.
 [2] J. Moubroy, "RCM Reliability Centred Maintenance", *Industrial Press Inc.*, 2001.
 [3] A. E. Quintana, M.V. Pisani, R. N. Casal, "Desempeño de cartas de control estadístico con limites bilaterales de probabilidad para monitorear procesos Weibull en mantenimiento", *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol.16 (1), pp.143-156, 2015.
 [4] ISO 17359, "Condition monitoring and diagnostics of machines -- General guidelines", (2011)
 [5] L. Y. Waghmode and A. D. Sahasrabudhe, "Modelling maintenance and repair costs using stochastic point processes for life cycle costing of repairable systems". *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 25, Issue 4/5, pp. 353-367, 2012.