UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTA MENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO - CHILE

Análisis Técnico Económico para Reemplazo de Equipos Críticos en Plantas de Chancado de Gran Empresa Minera. Codelco Chile – División Andina

Mauricio Andrés Rodríguez Urrea

U.T.F.S.M.
BIBLIOTECA CENTRAL

Trabajo de Titulación para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:	Dr. Ing. Pedro Sariego Pastén
Profesor Correferente:	Ing. René Valdenegro Oyaneder
Tutor Empresa:	Ing. Gonzalo Kusch Seguel
	Ing. Roberto Medinelli Cantzen

Valparaíso, Diciembre 2010

Resumen

El siguiente trabajo ha sido desarrollado dentro del Proceso de Chancado Grueso de Codelco Chile – División Andina, donde actualmente existe el interés de analizar el reemplazo de ciertos equipos que debido a su antigüedad, superior a 20 años en algunos casos, han sufrido la falta de repuestos originales y de proveedores, lo que se traduce en un deterioro creciente a lo largo del tiempo, con el consiguiente aumento de los costos asociados a la mantención de estos equipos y la falta de productividad.

Teniendo en cuenta lo anterior este Trabajo de Título pretende llevar a cabo una evaluación técnica económica sobre las distintas alternativas posibles para mejorar la situación actual al interior del Proceso de Chancado.

La parte técnica está orientada a identificar en que etapa de su vida útil se encuentran estos equipos, mediante la identificación las causas principales y secundarias de falla, la determinación de niveles de disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad.

En esta etapa se plantearán posibles alternativas que supongan mejoras desde el punto de vista técnico, ya sea disminución en los tiempos de mantención, aumento en los niveles de disponibilidad, aumento de niveles de confiabilidad, facilidad para realizar mantenciones, etc.

Desde el punto de vista económico se determinarán los costos asociados a la mantención de los equipos, falta de disponibilidad y niveles de eficiencia de estos equipos y su respectivo impacto a los costos globales de la empresa. También se propondrán y analizarán alternativas con el objetivo de seleccionar aquella que genera mayores beneficios a lo largo del tiempo, utilizando herramientas de solución de problemas técnicos.

Índice

I.- Introducción....6
II.- Objetivos y alcances....7
II.I- Objetivo general....7
II.I- Objetivos específicos....7
II.III- Alcances....7
III Desarrollo del Trabajo....8
1.- ANTECEDENTES GENERALES....9
1.1- Ubicación de la empresa....9
1.2- Acceso....10
1.3- Disponibilidad de energía y suministros....10
1.4- Plan Estratégico....11
1.4.1- Misión de la Empresa....11
1.4.2- Descripción del Producto....12
1.4.3- Clientes....13
1.5- Planta Objetivo....14
1.5.1- Planta Sur....14
1.5.2- Planta Norte....15
2.- MARCO TEÓRICO....17
2.1.- Introducción....17
2.2- Teoría de la Confiabilidad....19
2.2.1- Confiabilidad de Sistemas....23
2.2.2- Sistemas en Serie....24
2.2.3- Sistemas en paralelo....25
2.3- Disponibilidad de componentes y sistemas....28
2.4- Utilización....29
2.5- Teoría para Resolución de Problemas Inventivos, TRIZ....30
2.6- Análisis económico....35
2.6.1- Costos globales....35
3.- METODOLOGÍA DE ANÁLISIS....39

3.1- Recopilación de base de datos 39
3.2- Obtención de confiabilidad 40
3.3- Metodología Weibull 41
3.4- Confiabilidades 51
3.4.1- Plataforma R-MES 51
3.4.2- Planta Norte 54
3.4.3- Planta Sur 57
3.4.4- Resultados 60
4.- ANÁLISIS DE DATOS 61
4.1- Disponibilidades 61
4.1.1- Planta Norte 61
4.1.2- Planta Sur 66
4.1.3- Resultados 70
5.- ANÁLISIS DEL EQUIPO Y PROPUESTAS DE MEJORA 71
5.1- Análisis del equipo 71
5.2.- Aplicación de la metodología TRIZ 75
5.2.1- Resultados de aplicación de metodología TRIZ 78
5.3- Alternativas propuestas 80
5.4- Evaluación de las alternativas propuestas 88
5.4.1- Evaluación Técnica - Matriz de Evaluación 88
5.4.2- Matriz de Evaluación Técnica de Aspectos Imprescindibles 88
5.4.3- Matriz de Evaluación Técnica Detallada 89
6.- ANÁLISIS ECONÓMICO 92
7.- RESULTADOS 102
IV.- Conclusiones 103
V.- Bibliografía 104

I.- Introducción

La globalización de los mercados impone a las empresas el desafío de obtener, a corto plazo, estándares superiores de calidad y productividad, para de esta forma asegurar la supervivencia en un ambiente cada vez más competitivo.

En términos de productividad, el logro de resultados cada vez mejores en una empresa depende entre otros factores de un aumento del funcionamiento de las unidades industriales, a través de la optimización y la reducción de varias pérdidas relacionadas con el proceso de producción.

Este Trabajo de Titulación ha sido desarrollado en la División Andina de Codelco, específicamente en las Plantas de Chancado Grueso Norte y Sur, donde existen equipos con antigüedades cercanas a 20 años, implicando la inexistencia de repuestos originales y el consecuente aumento en la tasa de fallas, esta situación tiene como resultado la disminución de la disponibilidad y utilización de los equipos, dificultando el cumplimiento de los planes de producción, que año tras año son más elevados ya que la demanda por el cobre sigue en aumento.

Además se debe considerar que la Division Andina de Codelco está pasando por procesos de expansión con el fin de aumentar su capacidad productiva, comenzando con el Plan de Desarrollo Andina Fase 1 que lleva la producción desde las 70.000 tpd hasta las 94.000 tpd para luego seguir con el Plan de Desarrollo Andina Fase 2 que aumentará la producción a 240.000 tpd para el año 2016.

Debido a lo anterior es necesario identificar él o los equipos que resultan más críticos con el fin de determinar si resulta necesario llevar a cabo alguna acción que mejore su estándar actual y de esta forma optimizar la productividad de las plantas de chancado.

Para lograr esto, se utilizará información sobre las detenciones de los equipos proveniente de SAP, para luego de ser analizada, obtener indicadores tales como utilización, disponibilidad, MTBF, que permitan definir cuales los equipos críticos y que por lo tanto deben recibir la mayor atención.

También se buscará una solución conceptual al problema detectado utilizando la Metodología para la Resolución de Problemas de Inventiva **TRIZ**, método sumamente eficaz que permite dar solución a una gran variedad de problemas mediante la aplicación de la matriz de contrariedades y de los principios de inventiva.

Finalmente se propondrán alternativas que permitan dar solución al problema en cuestión y serán evaluadas desde el punto de vista económico a fin de determinar su conveniencia para la organización.

II.- Objetivos y alcances

II.I- Objetivo general

- Realizar análisis técnico económico para reemplazo de equipos críticos en Plantas de Chancado.

II.I- Objetivos específicos

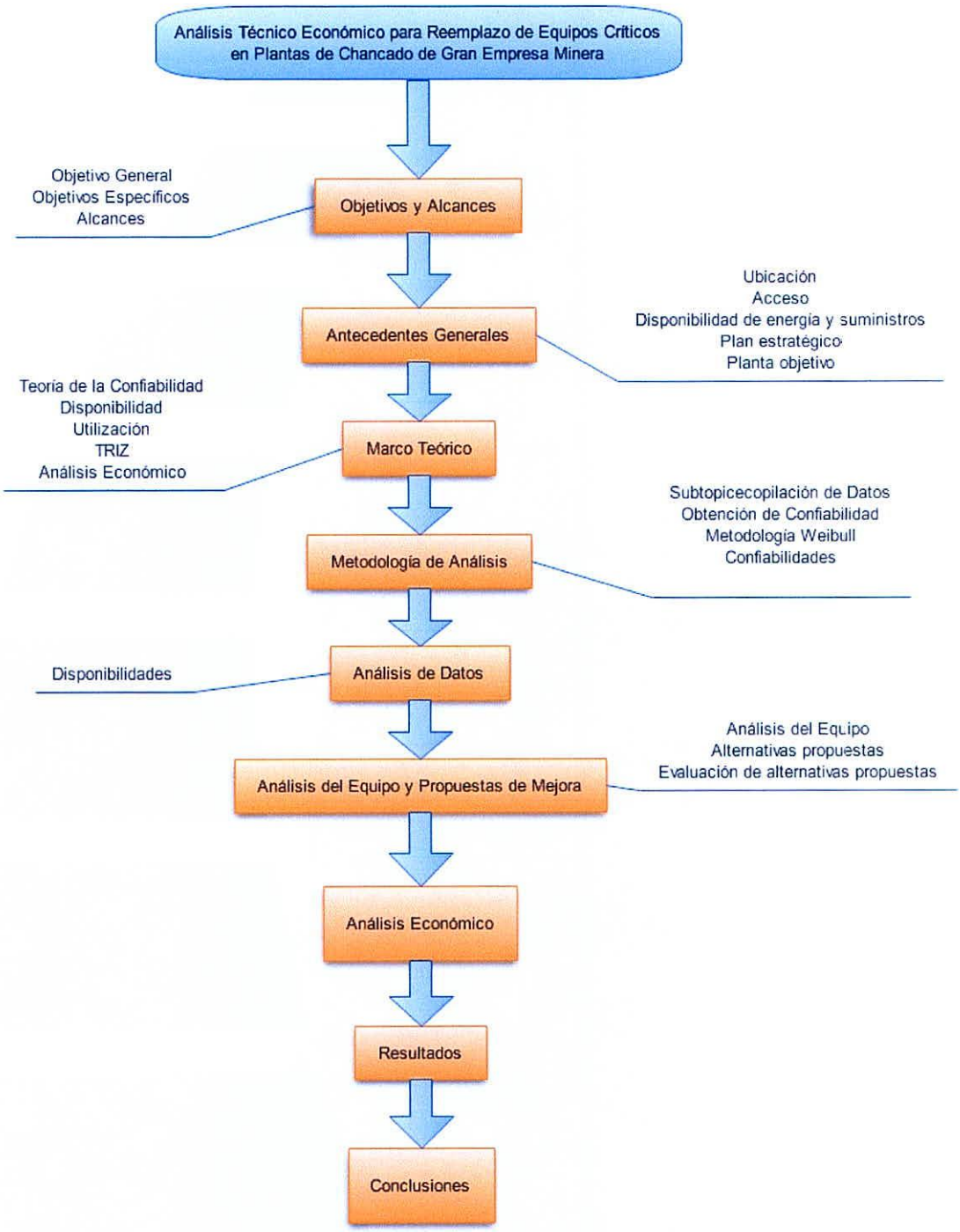
- Determinar causas principales y secundarias de falla en los equipos.
- Determinar niveles de eficiencia de los equipos.
- Determinar niveles de disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad de los equipos.
- Determinar costos asociados a la falta de disponibilidad y niveles de eficiencia de los equipos.
- Especificación de Equipos críticos.
- Establecer alternativas a los equipos críticos mediante el análisis técnico económico pertinente.

II.III- Alcances

Este estudio está enfocado en la Planta de Chancado Grueso de la División Andina de Codelco, en las Plantas de Chancado Norte y Sur. De estas plantas se recopilará información real referente a las fallas de los equipos que forman parte del proceso productivo, a partir de esta información se llevará a cabo el análisis de confiabilidad y disponibilidad.

Para obtener la información referente a los equipos se trabajará en conjunto con el personal encargado del área de mantenimiento y analistas, a fin de asegurar que esta información sea confiable.

III Desarrollo del Trabajo



1.- ANTECEDENTES GENERALES

1.1- Ubicación de la empresa

Extraído de Intranet de Codelco

Codelco Chile - División Andina se encuentra ubicada en la parte alta de la cordillera de la Región de Valparaíso, en el Cajón del Río Blanco, a 38 kilómetros de la ciudad de Los Andes y a 50 kilómetros al noreste de Santiago. (Ver figura 1)



Fig. 1: Ubicación geográfica, extraído de *www.codelco.cl*

Sus operaciones se encuentran entre los 3.700 y los 4.200 metros sobre el nivel del mar, en la actualidad esta división realiza la explotación de minerales en la mina subterránea de Río Blanco, La Unión, Don Luis y en la mina a rajo abierto Sur Sur.

Andina actualmente procesa 94.000 toneladas diarias, las que se traducen en una producción de 300.000 toneladas métricas anuales de concentrado de cobre, el cual es la materia prima fundamental para obtener el cobre refinado, además produce 2.800 toneladas métricas de concentrado de molibdeno al año.

1.2- Acceso

La principal vía de acceso es el camino internacional, del que sale un ramal de 3 kilómetros hacia Saladillo denominado Camino Industrial, ciudad campamento de la mina. Desde Saladillo, se continúa por el borde del Río Blanco a lo largo de 31 kilómetros, hasta llegar al portal de ingreso a la mina subterránea. De este punto se recorren 7 kilómetros, de túnel hasta llegar a lo que se denomina frente mina. Para llegar a la mina a rajo abierto es necesario recorrer 28 kilómetros, desde el portal de ingreso a la mina subterránea en dirección sur oeste, internándose por el cajón del Río Blanco.

Cuando las condiciones climáticas no permiten el tránsito normal por el Camino Industrial, y los trabajadores llevan aislado mucho tiempo se utilizan helicópteros de rescate; cuando el aislamiento es por poco tiempo, se ocupan las dependencias del Hotel Hilton que se encuentra en la entrada de la mina.

1.3- Disponibilidad de energía y suministros

En cuanto a la energía, ésta se compra al SIC (Sistema Interconectado Central) y de los generadores propios de la División, también se cuenta con una pequeña central en Saladillo.

Con respecto al recurso hídrico, este se obtiene del Río Blanco, muy próximo a la mina.

También se cuenta con servicios de telefonía, televisión, comunicación vía microondas, internet y radios VHF.

1.4- Plan Estratégico

1.4.1- Misión de la Empresa

"La Misión de la División Andina de Codelco Chile es producir concentrados de Cobre y Molibdeno y participar en su comercialización, conociendo al cliente y apoyando la gestión para satisfacer las necesidades de fundiciones de Cobre y transformadores de concentrado de Molibdeno, en el mundo entero, pero se concentran principalmente en Chile, Brasil y Asia.

La División Andina busca competir y ser reconocida por producir productos con muy bajas impurezas, cuya composición mineralógica y leyes sean homogéneas, todo ello técnicamente certificado.

Igualmente, la División busca ser oportuna y puntual en la entrega de sus productos, y flexible para adaptarse a los requerimientos de sus clientes dentro de ciertos márgenes definidos por la División.

En el futuro, la División Andina de Codelco Chile buscará producir y comercializar más activamente, cobre, oro, plata y subproductos en las formas que resulten más rentables para la compañía. Dentro de los subproductos se considera la venta de tecnología derivada del conocimiento interno de la División.

Por lo tanto, la División Andina buscará competir y ser reconocida por la calidad certificada en el desarrollo de sus procesos, cuidado por el medio ambiente y por proveer productos con mínimas impurezas. Lo anterior, manteniendo los atributos anteriormente señalados por cuanto ellos constituirán condiciones esenciales para competir en el mercado"

Referencias: Extraído del sitio web de CODELCO: www.codelco.cl

1.4.2- Descripción del Producto

Los recursos de Andina provienen principalmente del yacimiento Río Blanco, que geológicamente corresponde a un yacimiento tipo pórfido cuprífero (Andina es propietaria de la parte oriental de este yacimiento). El yacimiento Río Blanco se explota mediante un sistema mixto que incluye la mina Subterránea Río Blanco III Panel y la minería a Cielo Abierto que contempla las operaciones de:

- Mina Sur-Sur.
- Mina Don Luis.
- La Unión.

Los productos comerciales de División Andina son:

1. Concentrado de Cobre: El concentrado de cobre de Andina, es una mezcla de súlfuros, compuesto principalmente de calcopirita [CuFeS2] (73% en peso), pirita (13,2% en peso) y en menor proporción, calcosina (Cu2S), bornita (Cu5FeS4), covelina (CuS) y otros. Este concentrado tiene una ley media entre 29 y 30% de cobre y una humedad promedio cercana al 9%. Posee además, aproximadamente 74 gramos de plata y 0,4 gramos de oro por tonelada en el concentrado. El contenido de arsénico y plomo es bajo, y se mueve en niveles de 0.2% y 0.06% respectivamente, característica que lo hace especialmente atractivo para los negocios de fundición y refinación. Estos además poseen contenidos de sílice, alúmina, óxidos de calcio, magnesio y cromo que en conjunto son menores a 10%, contenidos de fierro en torno a 29% y de azufre de 35%. Esto unido a la mineralogía y alta homogeneidad de su producción, se traduce en concentrados de alta fusibilidad resultando en una fusión homogénea y estable.

2. Concentrados de Molibdeno: Este producto tiene una ley media de 50% de molibdeno a una humedad máxima de 8% y bajos niveles de cobre menor al 4,3 %. El concentrado de molibdeno [MoS2], es posteriormente transformado a Oxido de Molibdeno [MoO3] o vendido directamente como Sulfuro. El Oxido de Molibdeno finalmente es comercializado a clientes representados fundamentalmente por la industria siderúrgica, utilizándolo como elemento de aleación en la fabricación de aceros especiales.

3. Cemento de Cobre: Este producto tiene una ley media entre 60 y 80% de cobre y 5% de molibdeno.

1.4.3- Clientes

Los concentrados de cobre, del orden de 820.000 toneladas anuales, tienen clientes tanto internacionales como nacionales y son comercializados por la Vicepresidencia Corporativa de Comercialización de Codelco Chile.

Los clientes nacionales son fundamentalmente las fundiciones de Potrerillos y la fundición de Ventanas. Los principales clientes en el extranjero son la fundición de Caraiba en Brasil y fundiciones en Asia (China, Corea y Japón) Los concentrados de molibdeno, del orden de 6.900 toneladas/año, son descobrizados internamente por medio de un proceso de lixiviación (proceso LR) y enviados posteriormente a Molymet para su transformación a óxido de molibdeno grado técnico. La comercialización también la realiza en forma centralizada, la Vicepresidencia Corporativa de Comercialización de Codelco Chile.

A su vez, División Andina procesa los concentrados de molibdeno de División El Teniente, descobrizando aproximadamente 6.000 toneladas por año; concentrados que también son transformados a óxidos de molibdeno grado técnico.

Extraído del sitio web de CODELCO: www.codelco.cl

1.5- Planta Objetivo

El proceso Chancado Grueso contempla las siguientes etapas: Planta Don Luis, Planta Norte y Planta Sur, pero este trabajo de título se centrará en las plantas Norte y Sur, las cuales alimentan a la molienda convencional y unitaria.

1.5.1- Planta Sur

La Planta Sur, como se muestra en la figura 2, tiene un Apron Feeder, que es un equipo con de velocidad de alimentación variable y es aquí donde comienza el proceso.

Los alimentadores de placas (Apron feeder) alimentan a la correa de 72" de ancho 72A, luego el mineral continua hacia un Harnero de 6´x 14´. El sobre-tamaño del harnero es entregado a un chancador de mandíbulas Allis Chalmers, de 48" x 60" (200 HP). El bajo tamaño del harnero, en conjunto con la descarga del chancador, alimentan una tolva intermedia de 150 toneladas.

A través de un alimentador vibratorio Jeffrey de 6´x 10´ (Alimentador 6), se extrae el mineral desde la tolva intermedia y se entrega a la correa 1B, de 72" de ancho, que posteriormente, vía buzón de traspaso, descarga hacia la correa 2B, de 42" de ancho, y que almacena el mineral en una tolva reguladora de 3.000 toneladas (Tolva 2B).

Desde la tolva reguladora de 3000 ton (2B), un alimentador vibratorio Jeffrey de 6´x 10´ alimenta la correa 4B, de 42" de ancho, y que está provista de pesómetro para regular el tonelaje procesado por el lado sur. La descarga de la correa 4B es llevada a la correa 3, de 42" de ancho, y que posteriormente alimenta al harnero secundario de 8' x 16'. El sobre-tamaño del harnero alimenta al chancador de cono estándar Symons de 7' (300 HP). El bajo tamaño del harnero, en conjunto con la descarga del chancador, son traspasados mediante la correa 4, de 42" de ancho, hacia la correa 5 como productos finales. Es importante destacar que existe la correa 3B que permite la alternativa de alimentar el producto de la correa 2B

directamente hacia el Pique de traspaso 4 – 4A. De esta manera se puede enviar mineral desde el lado sur a procesar en el circuito norte.

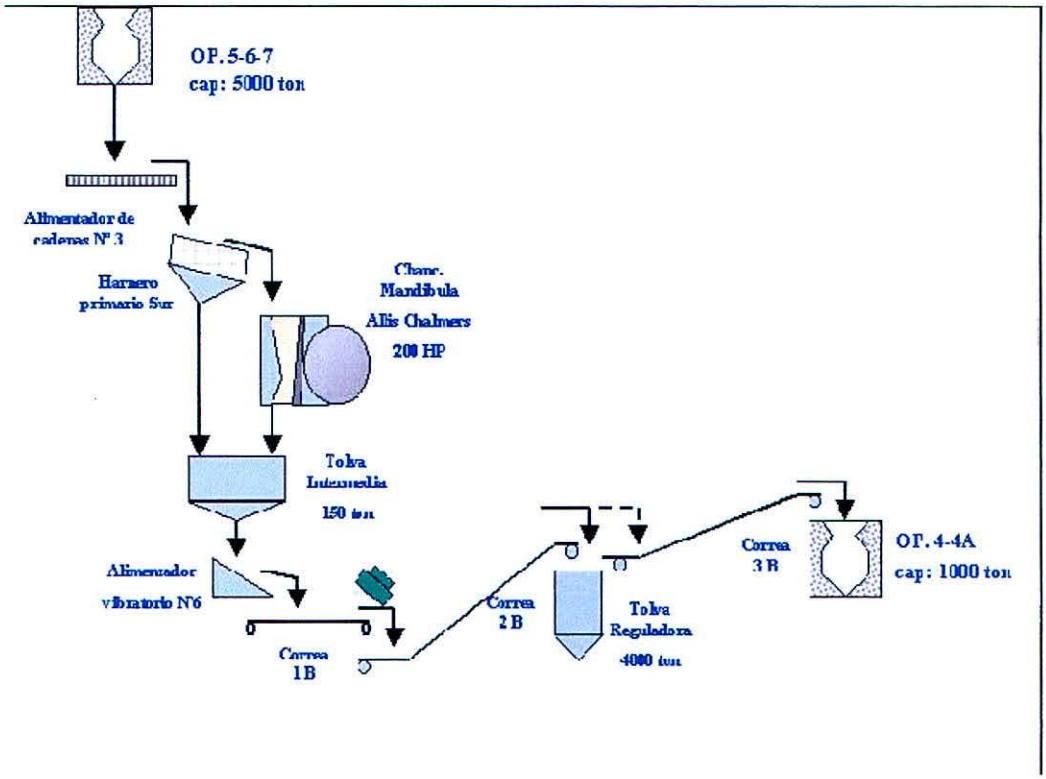


Fig. 2: Diagrama Planta Sur, extraído de Intranet de Codelco

1.5.2- Planta Norte

El Chancado primario norte (mostrada en la figura 3), se alimenta con mineral proveniente de la mina subterránea a través de los Piques de Traspaso 1, 2 y 4, 4 A (Op1). El mineral proveniente de los Piques de Traspaso 1 y 2 es descargado, a través de un alimentador de cadenas Ross, de 60", a la correa 1, de 72" de ancho. Esta correa alimenta a un harnero primario Tyler, de 6´x 14´. El sobre-tamaño es llevado al chancador Traylor, de 42" x 48" (150 HP) y el bajo-tamaño, vía dos correas de traspaso 4A y 4, es transportado a la correa 5 como producto final.

La descarga del chancador Traylor llega a la correa 2, de 42" de ancho, a través de la cual se alimenta una tolva intermedia de aproximadamente 1.000 toneladas. Mediante dos alimentadores de 6`x 10´ se extrae mineral hacia la corea 3 que alimenta al harnero secundario de 8´x 16´. El sobre-tamaño va al chancador de cono estándar Symons de 7´

donde su descarga, de la misma manera que el bajo-tamaño del harnero, son enviados por la correa 4 hacia la correa 5 como producto final.

De la misma manera el mineral proveniente de la tolva Norte 4 y 4 A (Op4), se extrae también con un alimentador de cadenas de 60", que descarga en la correa 1A, de 72" de ancho. La descarga de esta cinta alimenta al harnero primario de 8´x 20´. El sobretamaño del harnero es descargado hacia la correa 2 A, de 48" de ancho, que alimenta al chancador de mandíbulas Traylor. Continuando posteriormente el circuito ya descrito en el Pique de Traspaso 1 y 2 (Op1). El bajo-tamaño del harnero es ya producto final y se tiene la alternativa con la correa reversible 4C, de 36" de ancho, De ser enviado directo a la correa 5 o bien ser almacenado en una tolva reguladora de 3.000 toneladas.

El producto final de la planta de chancado grueso es transportado al área Concentradora, ubicado a una distancia aproximada de 5,5 kilómetros, a través de la correa 5, correa transportadora de 36" de ancho y 5.335 metros de largo entre ejes.

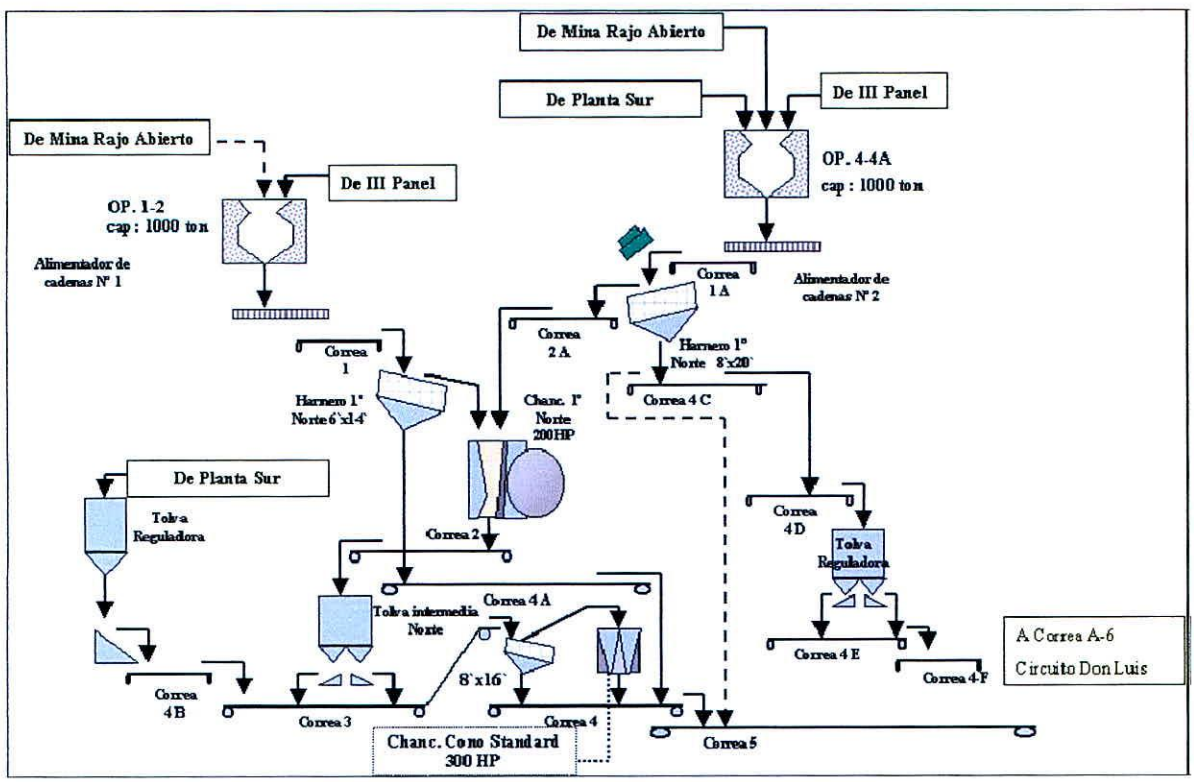


Fig. 3: Diagrama Proceso de Chancado Grueso, extraído de Intranet de Codelco

2.- MARCO TEÓRICO

2.1.- Introducción

En este capítulo (Ver figura 4) se profundizará en la teoría de la Confiabilidad, particularmente en sistemas mecánicos, se demostrará la relación que existe entre ciertas distribuciones probabilísticas y el comportamiento de las fallas asimismo se definirá su aplicación tanto en sistemas en serie como sistemas en paralelo.

Posteriormente se analizarán los conceptos de disponibilidad y utilización y los respectivos usos que tienen dentro del análisis de equipos y sistemas.

Luego se definirá la Teoría para la Resolución de Problemas de Inventiva **TRIZ**, herramienta de suma utilidad que permite agilizar el proceso de encontrar solución a un problema, utilizando los principios de inventiva y la matriz de contradicciones.

Finalmente se realizará un análisis económico con el propósito de determinar el nivel de costos que se encuentran asociados a mantener en servicio él o los equipos críticos y se determinará alguna solución que represente un nivel de costos inferior.

Diagrama Marco Teórico

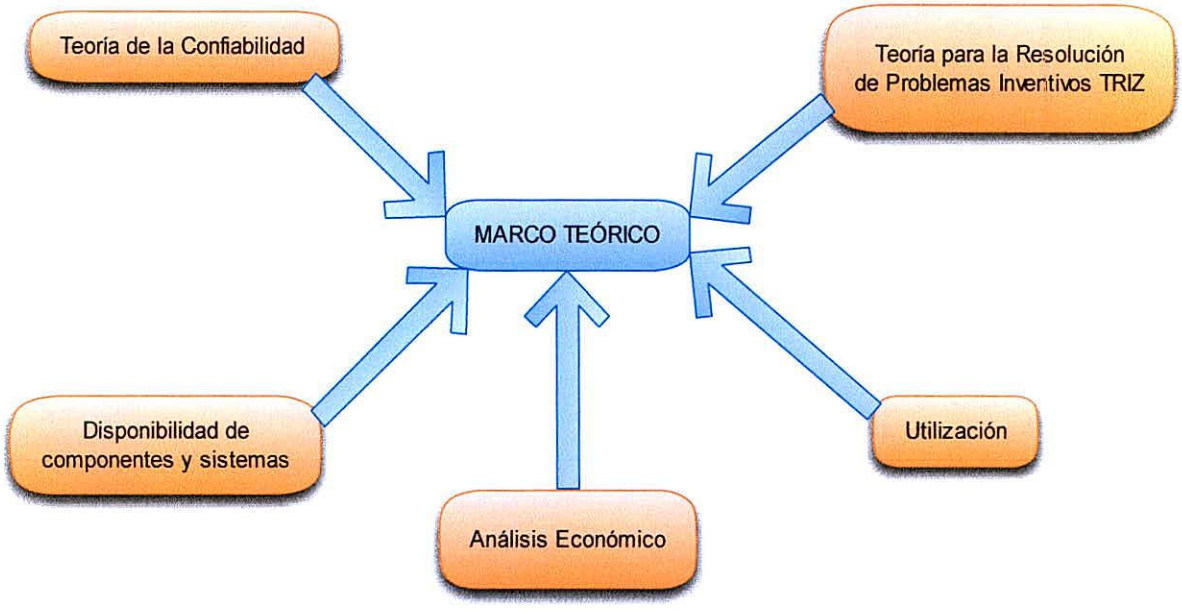


Fig. 4: Diagrama Marco Teórico

2.2- Teoría de la Confiabilidad

Referencia: Gestión de Activos & Mantenimiento Arata, L. Furlanetto

Las fallas de un equipo en una instalación industrial no necesariamente se presentan por causas claras y asignables a condiciones preestablecidas, más bien muestran un comportamiento aleatorio con características propias de cada componente, equipo o sistema. Lo anterior queda de manifiesto al analizar las distintas fallas en equipos similares de una instalación industrial sometidos a condiciones de operación comparables.

Las fallas pueden ser provocadas por causas asignables o causas aleatorias. Las fallas por causas asignables tienen un estudio y solución a través del control de los hechos que las provocaron. En cambio las fallas aleatorias son propias del componente, equipo o sistema y requieren de un análisis más complejo.

Reconociendo que el tiempo al cual un elemento falla puede ser modelado como variable aleatoria, es posible establecer lo siguiente:

"La Confiabilidad se define como la probabilidad que un elemento funcione, sin fallar, durante un tiempo determinado bajo condiciones ambientales y de entorno preestablecidas"

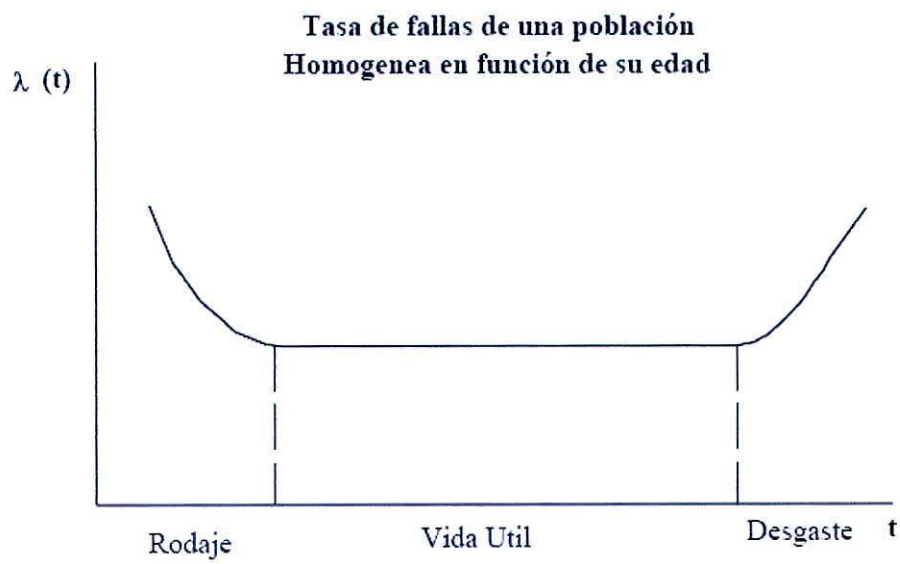


Fig. 5: Representación de vida de un componente o sistema

A partir de la definición anterior se desprende la premisa que dice que a lo largo de su vida útil un equipo puede estar sólo en dos estados; en funcionamiento o en falla (detenido), bajo condiciones externas conocidas. Se debe destacar que no siempre es sencillo detectar el estado de funcionamiento de un equipo o sistema. En el caso de los equipos eléctricos y electrónicos es muy fácil esta identificación dadas las características binarias entre operación y fallas. Por el contrario, en los sistemas mecánicos es más difícil hacer esta diferencia, ya que existen estados intermedios entre la falla y el buen funcionamiento que pueden afectar la producción en términos de calidad, cantidad y tiempo.

Fijadas las condiciones en las que se reconoce que el equipo o sistema está en falla bajo un entorno establecido, la confiabilidad de un elemento es función solamente del tiempo, cuyas características dependen única y exclusivamente de la distribución de probabilidades con la que la falla pueda darse en el tiempo.

Ecuaciones básicas de confiabilidad:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Probabilidad acumulada de falla:

$$F(t) = \int_0^{\infty} f(t)dt$$

La confiabilidad está dada por:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt = 1 - \int_0^{t} f(t)dt = 1 - F(t)$$

**Mientras más extenso es el horizonte temporal "t", mayor es la probabilidad de falla y por lo tanto menor es la confiabilidad del equipo o sistema.*

Una vez conocida la Ley de Probabilidad que permite explicar el comportamiento sobre la falla de un componente, es posible describir otro indicador importante sobre la seguridad de funcionamiento de un sistema. Este concepto es el tiempo medio entre fallas

para equipos reparables o tiempo medio hasta la falla en equipos no reparables. Por definición el MTTF (Mean Time To Failure) o MTBF (Mean Time Between Failure) viene dado por:

$$\text{MTBF (o MTTF)} = \int_0^\infty t * f(t)dt = \int_0^\infty R(t)dt$$

La confiabilidad de un elemento puede ser caracterizada a través de distintos modelos de probabilidades. Este modelamiento está condicionado a la etapa de vida en que se encuentre el elemento. (Ver figura 5)

Para muchas clases de equipos, la evolución en el tiempo de la tasa de falla puede ser representada por la "curva de la bañera", que muestra en su inicio una alta tasa de falla que disminuye con el tiempo. Esta etapa es conocida como zona de mortalidad infantil o de rodaje, debido a que en la etapa inicial de la operación del equipo pueden existir componentes que no se encuentren dentro de las especificaciones necesarias para el correcto funcionamiento del mismo.

Una vez reemplazados los elementos que se encuentran fuera de las especificaciones requeridas para un buen funcionamiento del equipo comienza la llamada madurez o vida útil, en esta etapa el equipo tiene una tasa de falla constante.

A medida que el equipo va envejeciendo, sus componentes comienzan a desgastarse y nuevamente dejan de cumplir las especificaciones que se requieren para un buen funcionamiento, provocando un aumento sostenido en el tiempo de la tasa de falla. Esta etapa es llamada vejez o desgaste.

Para calcular la confiabilidad de un equipo se necesita conocer cualquiera de las siguientes funciones: $f(t)$, $R(t)$, $F(t)$, una vez conocida una de ellas es posible calcular las demás.

Utilizando la curva de la bañera se puede modelar el comportamiento en las tres etapas de la tasa de falla mediante leyes conocidas de probabilidad.

Para la fase de rodaje la tasa de falla es decreciente y el modelo matemático que se adapta a esta situación se representa mediante la distribución Weibull donde:

$\lambda = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right) * \left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1}$; Donde $\beta < 1$

La confiabilidad está dada por la siguiente ecuación

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

La distribución de probabilidad Weibull permite modelar todos los estados en la vida de un elemento mediante la variación de los parámetros (α, β, γ). (Ver figura 6)

Se debe recordar que el análisis de confiabilidad toma como supuesto que el elemento queda como nuevo posterior a una detención.

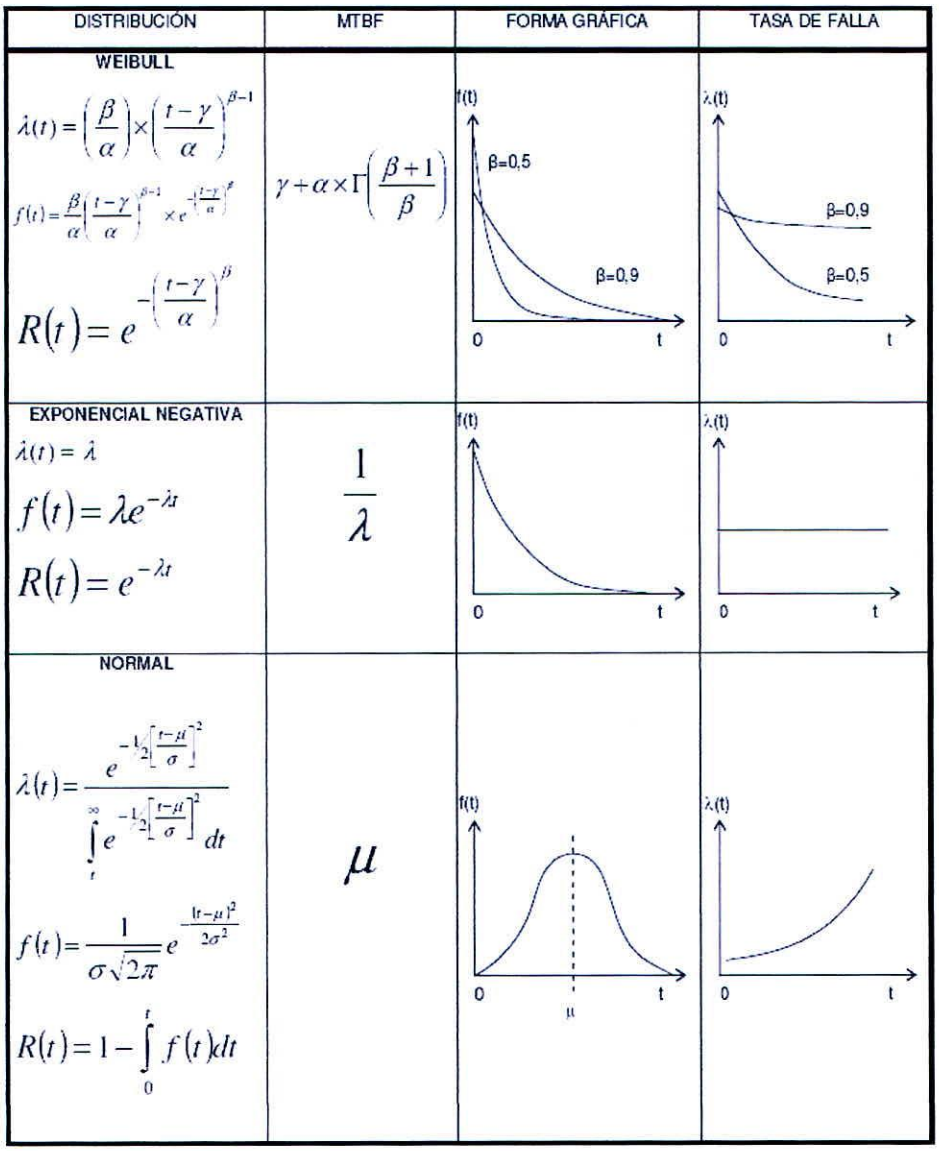


Fig. 6: Modelación vida útil de un elemento

2.2.1- Confiabilidad de Sistemas

La confiabilidad es función de la complejidad del sistema. Por lo tanto es fundamental determinar una relación para cada configuración. En otras palabras se trata de definir la forma en que cada componente, de forma individual, afecta el buen funcionamiento del sistema:

$$R_S(t) = f(R_i(t)) \qquad i = 1,2,3,\dots,n$$

Donde $R_S(t)$ representa la confiabilidad del sistema y $R_i(t)$ la de cada uno de los n elementos componentes del sistema.

La confiabilidad de un sistema representa la probabilidad de ocurrencia del acontecimiento "no falla", que es resultado de los componentes individuales, por lo tanto, las reglas que se aplican en confiabilidad a sistemas son las mismas que se aplican a elementos individuales.

Es importante para el análisis de sistemas el grado de independencia o de dependencia entre los distintos elementos que lo componen, por lo que es necesario considerar los dos casos siguientes:

- La falla de un elemento constituyente de un sistema es causal y estadísticamente independiente del hecho de que se produzca una falla en otro elemento del sistema.
- La definición entre el estado de funcionamiento y el de falla es dependiente (o no) del modo en que funcionen las otras partes del sistema.

Estos casos obligan a establecer cuidadosamente la subdivisión del sistema. El funcionamiento de un sistema desde el punto de vista de la confiabilidad se representa gráficamente mediante esquemas de bloque adecuadamente conectados entre sí, en los que cada bloque representa un subsistema o un componente.

2.2.2- Sistemas en Serie

Se define como sistema en serie cuando la falla de cualquiera de sus elementos determina la falla del sistema. (Ver figura 7)

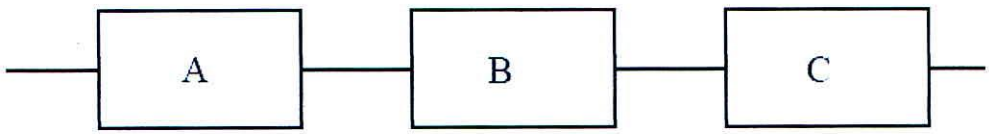


Fig. 7: Sistema en serie

La confiabilidad del sistema en serie corresponde a la probabilidad de que todos los elementos no fallen en un tiempo determinado. Esta probabilidad viene dada por la multiplicación de las probabilidades de un buen funcionamiento de todos los elementos en un período de tiempo dado.

Si consideramos un sistema con n elementos, tenemos:

$$R_s(t) = R_1(t)R_2(t) \dots R_n(t) = \prod_{i=1}^{n} R_i(t)$$

Donde R_s (t) y R_i (t) indican la confiabilidad del sistema y de cada elemento respectivamente. Desarrollando la expresión podemos escribir:

$$R_s(t) = e^{-\int \lambda_s(t)dt} = \prod_{i=1}^{n} R_i(t) = \prod_{i=1}^{n} e^{-\int \lambda_i(t)dt}$$

Donde $\lambda_s(t)$ y $\lambda_i(t)$ representan respectivamente la tasa de falla del sistema y de cada elemento en particular.

$$\lambda_s(t) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i(t)$$

Si las tasas de fallas de los elementos fuesen constantes, también lo sería la del sistema completo. Así la relación sería la siguiente:

$$R_s(t) = e^{-\lambda_s t} = e^{-\sum_{i=1}^{n} \lambda_i t}$$

Además, para λ_i constante, se tiene:

$$\text{MTBF}_i = \frac{1}{\lambda_i}; \text{MTBF}_s = \frac{1}{\lambda_s}$$

Los cálculos se facilitan en gran medida cuando un elemento o sistema se encuentra en la etapa de madurez (tasa de falla constante).

2.2.3- Sistemas en paralelo

Otra configuración común desde la perspectiva lógica de falla, es la configuración en paralelo. Estos sistemas forman parte de los llamados sistemas redundantes, en donde algunas funciones están duplicadas o multiplicadas con el fin de obtener una mayor confiabilidad de los sistemas. (Ver figura 8)

En términos generales existen dos tipos de redundancias en paralelo:

- La redundancia total, es decir el sistema en el cual un elemento por sí solo es capaz de soportar el buen funcionamiento del sistema.
- La redundancia parcial, en la cual un grupo de elementos es capaz de soportar el buen funcionamiento del sistema.

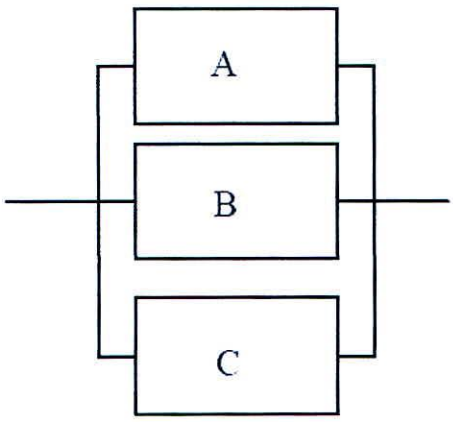


Fig. 8: Sistema el paralelo.

Para determinar la confiabilidad del sistema con redundancia total, al igual que los sistemas en serie, se basa en las leyes del cálculo de las probabilidades, es decir, evaluando los escenarios de buen funcionamiento del sistema.

A continuación se representan los eventos del buen funcionamiento de un sistema en paralelo con redundancia total de los elementos A y B:

A	B	Probabilidad del sistema
1.- Funciona	Funciona	Funciona R_A R_B
2.- Funciona	No funciona	Funciona R_A (1-R_B)
3.- No funciona	Funciona	Funciona (1-R_A) R_B

Debido a que los escenarios de buen funcionamiento son independientes entre sí, la probabilidad de buen funcionamiento del sistema queda definida por la suma de los eventos antes mencionados.

$$Rs = R_A\,R_B + R_A(1 - R_B) + R_B(1 - R_A) = R_A + R_B - R_AR_B$$

Una forma de simplificar estos cálculos y de mucha utilidad cuando existen más de dos elementos constituyentes del sistema, es analizar la probabilidad de falla del mismo.

La probabilidad de falla (F(t) = 1- R(t)) de un sistema en paralelo, de acuerdo a las definiciones dadas anteriormente (considerando independencia entre los elementos de un

sistema), considera que la falla del sistema ocurre cuando fallan simultáneamente todos los elementos que lo componen.

Por lo tanto se tiene:

$$F_s(t) = F_1(t)F_2(t) \dots F_n(t) = \prod_{i=1}^{n} F_i(t)$$

De acuerdo a lo anterior la confiabilidad del sistema se puede escribir como:

$$R_S(t) = 1 - F_S(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} Fi(t)$$

En el caso particular de un sistema en paralelo con redundancia total de dos elementos iguales (A y B):

$$R_A = R_B = e^{-\lambda t}$$

$$R_s(t) = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}$$

$$MTBF_S = \int_0^{\infty} R_s(t)dt = \frac{3}{2\lambda}$$

Por lo tanto, el tiempo de falla del sistema es superior en un 50% al de sus componentes individuales.

En el caso de los sistemas con redundancia parcial, a diferencia del anterior que considera que para que el sistema falle debe fallar todos los elementos componentes del sistema, una cierta combinación mínima de los elementos debe estar en operación para que el sistema funcione.

2.3- Disponibilidad de componentes y sistemas

Un indicador muy utilizado y de fácil comprensión es la disponibilidad. La disponibilidad refleja la posibilidad de utilización de una instalación desde el punto de vista técnico, es decir excluyendo las detenciones no originadas por fallas del sistema. La disponibilidad se define como la razón o cuociente del tiempo en que la instalación se puede ocupar y el tiempo total que incluye al anterior más el tiempo de reparación.

De acuerdo a lo anterior, la disponibilidad viene dada por la relación porcentual entre el tiempo de funcionamiento y el tiempo total. Lo que para Andina se expresa de la forma:

$$A = 1 - \frac{HPM}{HMes}$$

Donde HPM son las Horas Por Mantención, en donde se consideran además de las horas por mantenciones no programadas, las horas por mantenciones programadas. HMes corresponde al total de horas del mes.

Otra forma de calcular la disponibilidad es la siguiente:

$$A = \frac{UT}{UT + DT}$$

Donde UT (up time) es el tiempo en que el sistema está realmente disponible para el funcionamiento y DT (down time) es el tiempo fuera de servicio producto de causas técnicas.

2.4- Utilización

La utilización es un indicador que entrega el porcentaje del tiempo en que se utilizó realmente el equipo. Esto contempla, además de las horas por mantención programada y no programada, las horas de parada del equipo por otros motivos; es decir, se consideran también las horas que paró el equipo en cuestión por haber parado otros equipos que hagan imposible la operación de éste.

En un sistema en línea (como las plantas Norte y Sur), esta definición toma especial importancia ya que la detención de cualquiera de sus componentes o subsistemas implica la detención del sistema completo.

2.5- Teoría para Resolución de Problemas Inventivos, TRIZ

Referencia: ***www.triz-journl.com, www.triz40.com, www.triz,net***

La Teoría para Resolver Problemas de Inventiva o TRIZ (acrónimo ruso para *"Tieoriya Riesheniya Izobrietatielskij Zadach"*), es un método sistemático para incrementar la creatividad, está basado en el estudio de los modelos de evolución de patentes y en otros tipos de soluciones a problemas. Las personas que resuelven problemas de forma intuitiva, encontrarán que el método TRIZ les proporciona ideas adicionales. Las personas que resuelven problemas de forma estructurada encontrarán que el método TRIZ les proporciona estructuras adicionales.

El creador del método TRIZ fue Genrich Altshuller, un ingeniero ruso que desarrolló la teoría a través del análisis de un millón y medio de patentes de invención a 1990. Se percató de que a pesar de que los inventos que analizó resolvían problemas diferentes en campos también muy diferentes, las soluciones aplicadas podían obtenerse a partir de un conjunto relativamente reducido de ideas básicas o principios de invención.

Altshuller publicó su primer artículo sobre TRIZ en 1956. Entre 1961 y 1979 escribió los libros básicos, exponiendo el método en forma ordenada e introduciendo el nombre TRIZ en el texto "La creatividad como una ciencia exacta". Este último libro fue el primero que se tradujo al inglés y se publicó fuera de la Unión Soviética en el año 1984, aunque no llamó mucho la atención por la complejidad de la teoría expuesta y porque la traducción era deficiente.

Altshuller y el TRIZ lograron reconocimiento internacional en el año 1990, al publicarse en Estados Unidos el libro "Y de pronto apareció el inventor", en el que el método se explica de forma mucho más comprensible. El método TRIZ había ya sido reconocido en la Unión Soviética como un aporte muy valioso en 1970. El primer seminario sobre TRIZ se realizó en 1969, la primera escuela se creó en Leningrado (actualmente San Petersburgo) en el año 1974 y la asociación rusa de TRIZ se constituyó en 1989.

Uno de los conceptos más importantes dentro de TRIZ es el de las contradicciones, que se consideran como el origen de todo problema técnico.

Una contradicción surge cuando dos necesidades de un producto o proceso están en conflicto y sin embargo están asociadas para alcanzar un objetivo. En todos los procesos industriales donde se detecta un problema hay al menos una contradicción.

Las contradicciones se clasifican fundamentalmente en técnicas, físicas y humanas, el objetivo es eliminar estas contradicciones.

Una contradicción técnica representa el conflicto entre dos elementos de un mismo sistema. Una contradicción física implica condiciones contradictorias de un mismo elemento físico, donde parece obvio que una cierta característica no puede ser y no ser a la vez. Las contradicciones humanas se deben a lo que Altshuller llamó "Inercia sicológica" que consiste en un bloqueo o resistencia a aceptar un cambio, producto de la creatividad. Altshuller también diseñó herramientas para disminuir esta dificultad.

Aunque hay más tipos de contradicciones, estas tres son las que dominan cualquier sistema industrial. La mayoría de los problemas técnicos están llenos de contradicciones, cuyos síntomas se reflejan en los problemas de producción, de calidad, del proceso, etc. Estos problemas, difíciles de resolver, casi nunca están bien definidos y rara vez se resuelven de manera correcta. En TRIZ se tienen procedimientos sistemáticos para poner en evidencia dónde se encuentra la causa principal del problema y luego plantearlo en función de sus contradicciones. Un problema así definido se convierte en un problema simple, TRIZ utiliza herramientas técnicas para eliminar estas contradicciones y así considerar a la situación problemática como resuelta de una forma creativa.

Un problema inventivo es donde la solución causa otros problemas, es decir que cuando algo se mejora, otras condiciones empeoran, y a esto se lo llamó contradicción técnica.

Si deseamos reducir el costo de una pieza metálica estampada, lo mejoramos reduciendo el espesor de la chapa, pero como resultado se resiente su resistencia mecánica. Para alcanzar una solución ideal se deben eliminar las soluciones de compromiso o trade off, es decir eliminar totalmente las causas.

Los parámetros que generan contradicciones encontradas por Altshuller a partir del estudio de las patentes son las siguientes:

1. Peso de un objeto en movimiento	21. Potencia
2. Peso de un objeto sin movimiento	22. Desperdicio de energía
3. Longitud de un objeto en movimiento	23. Desperdicio de sustancia
4. Longitud de un objeto sin movimiento	24. Pérdida de información
5. Área de un objeto en movimiento	25. Desperdicio de tiempo
6. Área de un objeto sin movimiento	26. Cantidad de substancia
7. Volumen de un objeto en movimiento	27. Confiabilidad
8. Volumen de un objeto sin movimiento	28. Precisión de mediciones
9. Velocidad	29. Precisión de manufactura
10. Fuerza	30. Factores perjudiciales actuando en un objeto
11. Tensión, presión	31. Efectos secundarios dañinos
12. Forma	32. Manufacturabilidad
13. Estabilidad de un objeto	33. Conveniencia de uso
14. Resistencia	34. Reparabilidad
15. Durabilidad de un objeto en movimiento	35. Adaptabilidad
16. Durabilidad de un objeto sin movimiento	36. Complejidad de un mecanismo
17. Temperatura	37. Complejidad de control
18. Brillo	38. Nivel de automatización
19. Energía gastada por un objeto en movimiento	39. Productividad
20. Energía gastada por un objeto sin movimiento	

El método del TRIZ, tiene una extensa base teórica con algunos postulados. Los tres principales de ellos son.

Primer Postulado: "La mayoría de los sistemas hechos por el hombre evolucionan siguiendo pautas predeterminadas, en vez de modo aleatorio. Estas pautas se pueden conocer a través del estudio de la evolución de varios sistemas y el conocimiento adquirido y se las puede utilizar para acelerar la evolución de otros sistemas".

Segundo Postulado es una versión del principio de mundo cerrado y dice: "La mayoría de los sistemas técnicos que existen tienen recursos redundantes, es decir, tienen más recursos de los necesarios para realizar las funciones para las que fueron concebidos. Como consecuencia, casi todos los sistemas pueden realizar su función de forma más efectiva o realizar funciones adicionales, sin necesidad de ser modificados".

Tercer postulado dice: "Se pueden encontrar formas comunes de resolver problemas o de mejorar un sistema, basadas en las etapas de evolución predeterminadas, mediante el

análisis histórico de las invenciones. Esto permite que el conocimiento para la innovación pueda ser recogidos y transferidos".

La teoría de TRIZ está basada en las siguientes condiciones:

- Ser un procedimiento sistemático paso a paso.
- Ser una guía a través de amplios espacios de solución para dirigir los pasos a la solución ideal.
- Ser repetible y confiable y no dependiente de las herramientas psicológicas.
- Debe permitir el acceso al cuerpo del conocimiento inventivo.
- Debe permitir agregar elementos al cuerpo de conocimiento inventivo.
- Ser lo suficientemente amigable para los diseñadores siguiendo la aproximación general para la resolución de los problemas inventivos.

Altshuller catalogó 1.500.000 patentes, quedándose con 200.000 de ellas tratando de buscar solo los problemas inventivos y la forma en que fueron resueltos. De estas solo 40.000 patentes fueron consideradas por inventivas al año 1990. Actualmente se estiman en más de dos millones las patentes catalogadas por TRIZ. Siguen siendo solo unas 45000 las patentes inventivas (que incluyen un nuevo fenómeno) y el resto son solo mejoras rutinarias ó conceptos nuevos.

U.T.F.S.M.
BIBLIOTECA CENTRAL

Todas las patentes inventivas analizadas se clasificaron en 5 niveles:

Nivel	Grado inventiva	Origen conocimientos	*%Solución*
1	Soluciones aparentes	Conocimiento individual	32%
2	Mejoras menores	Conocimiento dentro de la empresa	45%
3	Mejoras mayores	Conocimiento dentro de la empresa	18%
4	Nuevos conceptos	Conocimiento exterior a la empresa	4%
5	Descubrimiento de nuevos fenómenos	Todo lo que es conocible	1%

En general un 90 % de los problemas que los profesionales enfrentan fueron ya resueltos en algún lugar bajo un cierto tipo de Conocimiento, de modo que si se pudiese seguir un camino hacia la solución ideal, arrancando desde el nivel más bajo de su experiencia y conocimiento personal y llegar a trabajar hacia los niveles más altos, la mayoría de las soluciones podrían ser deducidas rápidamente.

2.6- Análisis económico

Referencia: Aspectos Financieros del Mantenimiento, Fernando Espinoza Fuentes.

2.6.1- Costos globales

Todo sistema tiene un indicador de disponibilidad condicionado por la confiabilidad y mantenibilidad del mismo. La falta de disponibilidad genera costos de ineficiencia por dejar de producir en condiciones normales. En algunos procesos industriales estos costos de ineficiencia son sumamente elevados, a tal punto que es conveniente tener equipos de respaldo o en redundancia, para lograr la disponibilidad "óptima" del sistema que lleva a cabo el proceso, estos equipos adicionales respaldan a los equipos más críticos del sistema.

Para decidir cual o cuales equipos deben ser cambiados o bien apoyados mediante redundancia es útil obtener la Curva de Costos Globales. (Ver figura 9)

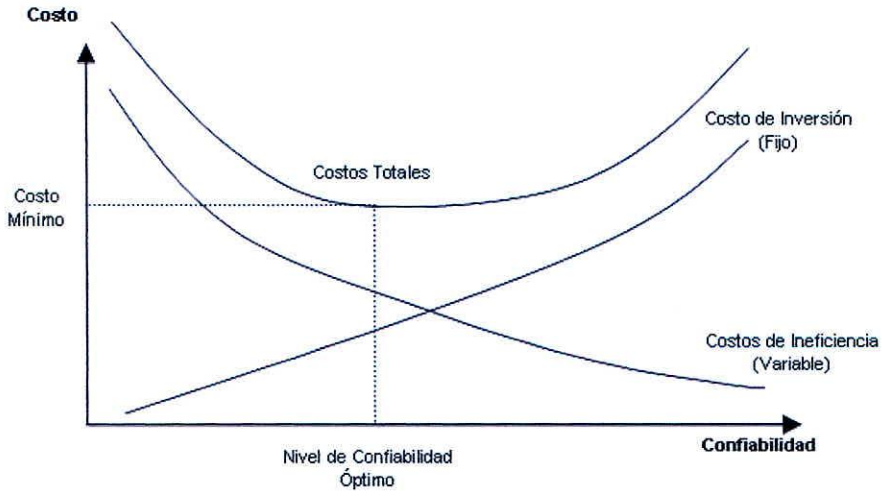


Fig. 9: Curva de Costos Globales

Los costos globales son la cuantificación de todos los costos incurridos en el ciclo de vida de un proyecto o instalación, y pueden ser descritos mediante la siguiente relación:

Costo Global = CtoInversión + CtoOperacional + CtoIneficiencia

Costo de inversión

Los costos de inversión quedan determinados por el costo de los equipos e instalaciones asociados al proyecto. También puede considerarse el capital de trabajo requerido para la operación. Se puede representar como:

$$C_{inversión} = \sum_{i=1}^{n} (N * C_e)_i$$

Donde $(N * C_e)_i$ es el costo de inversión para el equipo i (C_e, costo del equipo y N, número de equipos comprados).

Costo operacional

Se define mediante la cuantificación de todos aquellos elementos propios de la operación de un sistema: insumos, repuestos, energía, etc.

Costo de ineficiencia

Está dado por el costo asociado a la indisponibilidad de la instalación durante el periodo de evaluación.

Se puede expresar de la siguiente forma:

$$C_{ineficiencia} = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{(1+i)^k} * H * C_i * (1 - A_{sistema})$$

Donde:

C_i= Costo de ineficiencia horario = Costo productivo – Costos variables

H= Periodo de evaluación dentro del horizonte del proyecto

$A_{sistema}$= Disponibilidad del sistema

i= Tasa de capital de la empresa

n= Años de operación

La sumatoria es la actualización de los flujos de dinero producto de los costos de ineficiencia por cada periodo H de análisis. Si se tiene que los periodos son iguales se puede utilizar un factor:

$$f = \frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^n * i}$$

Una vez definidos los costos globales se pueden analizar distintas alternativas de equipos, donde la más conveniente será aquella que tenga el mínimo costo global.

Indicadores Económicos

Tasa de descuento o costo de capital

Debe corresponder a la rentabilidad exigida por el inversionista a los recursos involucrados, porque renuncia al uso alternativo de esos fondos en proyectos con niveles de riesgo similares. En definitiva la tasa de descuento o costo de capital debe reflejar el costo de oportunidad de los recursos invertidos en un proyecto.

Valor Actual Neto (VAN)

Consiste en actualizar a tiempo presente todos los flujos de un proyecto, es decir, corresponde al valor monetario de la diferencia entre los flujos de ingresos y egresos de caja, restada la inversión inicial, todo descontado al momento de inicio del proyecto.

Interpretación:

VAN > 0 Alternativa Recomendable

VAN = 0 Alternativa No Recomendable

VAN < 0 Alternativa No Recomendable

Mientras mayor sea el VAN de una alternativa, mejor es desde el punto de vista económico.

Para utilizar el VAN se debe utilizar la misma tasa de descuento y el mismo número de períodos en todos los proyectos.

Se supone que los flujos netos de fondos son valores conocidos desde el momento inicial, es decir, se ignora las alteraciones que podrían tener los flujos debido a las adaptaciones que podría tener el proyecto a lo largo del tiempo.

El VAN supone que la tasa de descuento es conocida y constante para todo el horizonte de evaluación.

Se supone que se reinvierten en el proyecto todos los beneficios obtenidos.

Cálculo de VAN: $VAN = \sum_{j=0}^{n} \frac{FN_j}{(1+i)^j}$

FN_j= Flujo Neto período j

i = Tasa de interés Efectiva en el período (Tasa de Descuento).

n = Número de períodos Payment

Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE)

El CAUE, también conocido como "promedio financiero", o como "costo anual uniforme equivalente", es un indicador económico que se utiliza para comparar 2 o más alternativas, la premisa del CAUE es que todos los ingresos y desembolsos deben convertirse en una cantidad anual equivalente que es la misma para cada período, la alternativa a seleccionar será aquella que presente el menor CAUE.

El procedimiento general para calcular el CAUE es consiste en llevar el VAN a un Payment, mediante la siguiente fórmula:

$$CAUE = VAN * \left(\frac{(1+i)^n * i}{(1+i)^n - 1}\right)$$

n= Número de períodos

i= Tasa de descuento

3.- METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Para analizar las diferentes alternativas de mejora se realizarán los siguientes pasos:

1. Recopilación de base de datos existente de falla de equipos.
2. Obtención de disponibilidades para los equipos.
3. Determinación horas de mantención correctiva y programada
4. Determinación de disponibilidades
5. Obtención de la confiabilidad de los equipos de las plantas.
6. Determinación de equipo(s) a reemplazar
7. Análisis económico

3.1- Recopilación de base de datos

Para llevar a cabo esta etapa se recopilará toda la información disponible para las plantas de chancado grueso: Planta Norte y Planta Sur.

Existe una alta probabilidad de encontrar datos repetidos o redundantes, por lo tanto se debe revisar la información para asegurar que el análisis a realizar sea fiel a la realidad. Los datos repetidos deben ser eliminados en los cálculos posteriores.

Se trabajará en colaboración al personal encargado de mantener la parte estadística de la Planta de chancado Grueso.

Los datos a utilizar corresponden a los tomados dentro del periodo que comprende desde el 01/01/2009 al 31/12/2009.

3.2- Obtención de confiabilidad

Para obtener la confiabilidad se debe distinguir entre las detenciones producidas por fallas y las generadas por mantención preventiva.

Los datos a obtener son:

1. Fecha
2. Hora de comienzo
3. Duración
4. Tipo
5. Gplan
6. Pwork
7. Costo
8. Equipo
9. Modo de falla
10. Parte objeto
11. Síntoma
12. Orden
13. Impacto
14. Detención de sistema

A partir de los datos anteriores se obtienen los tiempos entre fallas, que finalicen con una intervención por mantención preventiva. Con este arreglo de datos es posible determinar el comportamiento de la tasa de falla y de este modo deducir en que etapa de su vida se encuentra el equipo.

La metodología Weibull será la utilizada para llevar a cabo este análisis, ya que dependiendo del valor que tome su parámetro β se asemejará a las distribuciones que modelan el comportamiento de falla de los equipos mecánicos.

3.3- Metodología Weibull

Dado que es muy común que los datos de los cuales se dispone tienen además de la información sobre el tiempo en que un elemento operó hasta la falla, información sobre los tiempos en los cuales dicho elemento fue reemplazado en un momento previo a una falla, se utilizará el **Cálculo del ranking ajustado con datos censurados a la derecha.**

Este método se utiliza ya que en este caso nos encontramos con datos que se encuentran censurados a la derecha, es decir, el tiempo de operación del elemento fue suspendido, por la acción preventiva, sin ser conocido el tiempo que hubiese funcionado adicionalmente hasta la falla.

Debido a este motivo, los elementos que se asignan a la falla y su ranking se deben ajustar teniendo en cuenta que no se sabe cuánto habría funcionado el elemento hasta la falla en el momento de una mantención preventiva.

El ajuste del ranking de las fallas se realiza determinando la posición media de estos eventos (median rank position), que consiste en ajustar el ranking de fallas de acuerdo a las posiciones probables de los datos suspendidos y asociando la posición media a las fallas que se han observado.

El cálculo de la posición media ajustada de falla se calcula de la siguiente forma:

$$r_j = r_{j-1} + \frac{N + 1 - r_{j-1}}{N + 1 - (k_j - 1)}$$

Donde,

$$r_j: Posición\ Media\ de\ la\ falla\ j\ (Median\ Rank\ Position)$$

$$k_j: Ranking\ Global\ de\ eventos$$

$$N: Número\ de\ eventos\ totales\ (Correctivas\ y\ Preventivas)$$

$$r_0 = 0$$

Con el nuevo ranking de fallas se obtiene la probabilidad de falla acumulada.

Para calcular los parámetros de la distribución de Weibull, el procedimiento es el siguiente:

El primer paso es construir la función en su forma lineal. Para la distribución de Weibull de dos parámetros (Alfa y Beta), la distribución acumulada de fallas es:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad (1)$$

Aplicando logaritmo natural a ambos lados:

$$Ln\left(1 - F(t)\right) = -\left(\frac{t}{\alpha}\right) \quad (2)$$

Aplicando logaritmo natural nuevamente a ambos lados:

$$Ln\{Ln[1 - F(t)]\} = \beta * Ln\left(\frac{t}{\alpha}\right) \quad (3)$$

$$Ln\{-Ln[1 - F(t)]\} = -\beta\, Ln(\alpha) + \beta\, Ln(t) \quad (4)$$

Luego consideramos:

$y = Ln\{-Ln[1 - F(t)]\}$ (5)

$a = -\beta\, Ln(\alpha)$ (6)

$$b = \beta$$

Que forman la ecuación de la recta del tipo:

$$y = a + bx$$

A continuación se calcula la confiabilidad de un equipo utilizando el método explicado anteriormente:

Paso 1: Obtención de datos

Fecha	Duración	Tipo	Tiempos de funcionamiento entre eventos hrs
21-1-05 20:45	1,8	Preventiva	
30-1-05 19:33	5,68	Correctiva	213
15-2-05 19:13	2,24	Correctiva	378
9-3-05 17:28	2,65	Preventiva	524
14-3-05 20:07	0,56	Correctiva	120
28-3-05 3:40	2,04	Correctiva	319
18-4-05 1:43	3,28	Preventiva	500
19-4-05 19:00	3,34	Correctiva	38
10-5-05 18:20	4,87	Preventiva	500
11-8-05 9:12	4,31	Correctiva	2218
18-8-05 10:31	5,83	Correctiva	165
15-9-05 23:21	2,87	Correctiva	679
4-11-05 18:13	4,12	Correctiva	1192
25-11-05 18:20	0,57	Preventiva	500
14-12-05 5:54	5,24	Correctiva	443
25-12-05 11:09	5,45	Correctiva	264
15-1-06 12:36	2,47	Preventiva	500
5-2-06 11:04	1,93	Preventiva	500
8-2-06 19:00	3,13	Correctiva	78
5-3-06 13:07	0,94	Correctiva	591
6-4-06 23:04	1,89	Correctiva	777
17-6-06 1:57	4,58	Correctiva	1705
8-7-06 2:32	3,67	Preventiva	500
20-8-06 1:12	2,96	Correctiva	1027
10-9-06 0:10	5,44	Preventiva	500
7-11-06 18:36	1,41	Correctiva	1405
15-12-06 0:01	4,37	Correctiva	892
5-1-07 0:23	1,25	Preventiva	500
26-1-07 10:38	3,49	Correctiva	513

Utilizando la información obtenida se construye la función de fallas acumulada F(t). Para construir la función de fallas se debe considerar que hay información correspondiente a reemplazos preventivos, es decir, se suspendió la vida del elemento, se hace aconsejable

ajustar en ranking de la fallas de la forma que se muestra en la última columna de la tabla siguiente.

De los antecedentes del caso se debe indicar que del total de los 28 eventos, los que corresponden a reemplazos a la falla son 19, de estos últimos en los nueve primeros no hay diferencia entre el ranking general de fallas y el ajustado dado que no hay reemplazos preventivos hasta ese momento. Desde la falla N° 9 en adelante comienza a ser relevante el ajuste, por ejemplo la falla 18 en el ranking inicial de fallas, en el ranking ajustado correspondería a la falla 25,3 considerando que son en total 28 observaciones y en 9 de ellas el elemento "sobrevivió" hasta su reemplazo preventivo.

Paso 2: Ajuste de ranking utilizando datos censurados

Tipo	Tiempos de funcionamiento entre eventos hrs	Ranking global de eventos Kj	Ranking inicial de fallas	Ranking ajustado de fallas rj [Ecuación (2)]
Correctiva	38	1	1	1,0
Correctiva	78	2	2	2,0
Correctiva	120	3	3	3,0
Correctiva	165	4	4	4,0
Correctiva	213	5	5	5,0
Correctiva	264	6	6	6,0
Correctiva	319	7	7	7,0
Correctiva	378	8	8	8,0
Correctiva	443	9	9	9,0
Preventiva	500	10		
Preventiva	500	11		
Preventiva	500	12		
Preventiva	500	13		
Preventiva	500	14		
Preventiva	500	15		
Preventiva	500	16		
Preventiva	500	17		
Correctiva	513	18	10	10,7
Preventiva	524	19		
Correctiva	591	20	11	12,5
Correctiva	679	21	12	14,3
Correctiva	777	22	13	16,2
Correctiva	892	23	14	18,0
Correctiva	1027	24	15	19,8
Correctiva	1192	25	16	21,7
Correctiva	1405	26	17	23,5
Correctiva	1705	27	18	25,3
Correctiva	2218	28	19	27,2

Una vez obtenido el ranking ajustado de fallas, se debe calcular la función acumulada de fallas F(t):

Paso 3: Cálculo de probabilidad de fallas acumuladas.

Tiempos de funcionamiento entre eventos hrs	Ranking global de eventos Kj	Ranking ajustado de fallas rj	F(t) [Ecuación (1)]	R(t)
38	1	1,0	0,02	0,98
78	2	2,0	0,06	0,94
120	3	3,0	0,10	0,90
165	4	4,0	0,13	0,87
213	5	5,0	0,17	0,83
264	6	6,0	0,20	0,80
319	7	7,0	0,24	0,76
378	8	8,0	0,27	0,73
443	9	9,0	0,31	0,69
513	18	10,7	0,37	0,63
591	20	12,5	0,43	0,57
679	21	14,3	0,49	0,51
777	22	16,2	0,56	0,44
892	23	18,0	0,62	0,38
1027	24	19,8	0,69	0,31
1192	25	21,7	0,75	0,25
1405	26	23,5	0,82	0,18
1705	27	25,3	0,88	0,12
2218	28	27,2	0,95	0,05

Obtenidas la función de fallas acumulada y función de confiabilidad, se calculan los parámetros de la distribución Weibull (alfa y beta) de la forma descrita anteriormente:

Paso 4: Obtención de parámetros Weibull a través de linealización.

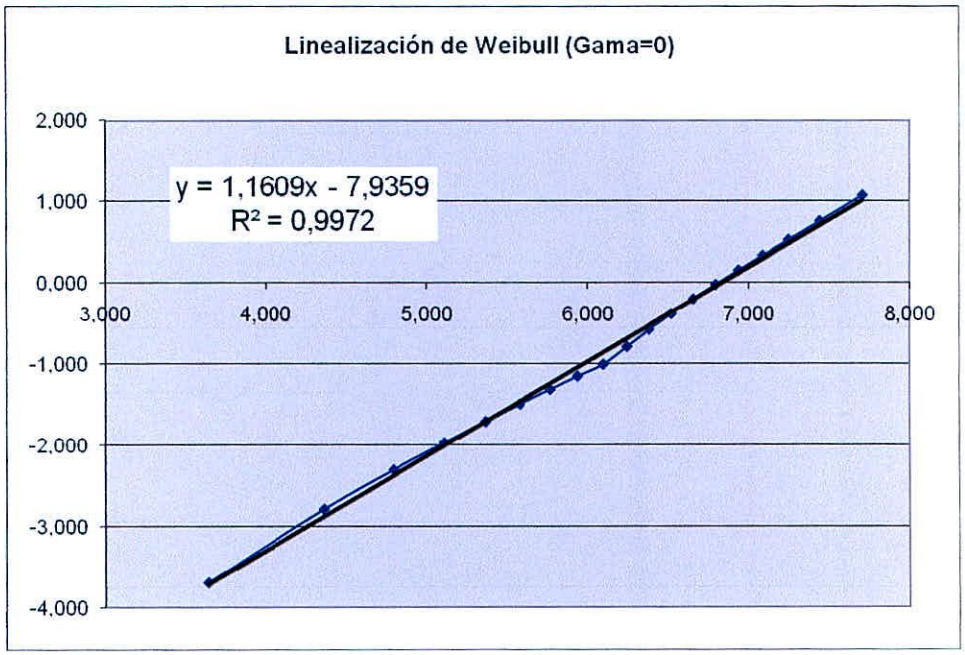
Ln(t)	Ln(-Ln(R(t)))
3,638	-3,691
4,357	-2,785
4,787	-2,304
5,106	-1,969
5,361	-1,710
5,576	-1,496
5,765	-1,313
5,935	-1,151
6,094	-1,006
6,240	-0,789
6,382	-0,577
6,521	-0,383
6,655	-0,201
6,793	-0,024
6,934	0,152
7,083	0,333
7,248	0,529
7,441	0,757
7,704	1,071

Los valores anteriores quedan representados mediante la siguiente recta:

$$y = 1{,}1609x - 7{,}9359$$

Los parámetros obtenidos son los siguientes:

Parámetros de Weibull	
Beta	1,16
Alfa	930,69
Gama	0,00
MTBF	883,34
Correlación	0,9986



También es posible encontrar los valores de los parámetros maximizando la correlación a partir de un cambio de variables incluyendo gama de Ln(t) a Ln(t-gama):

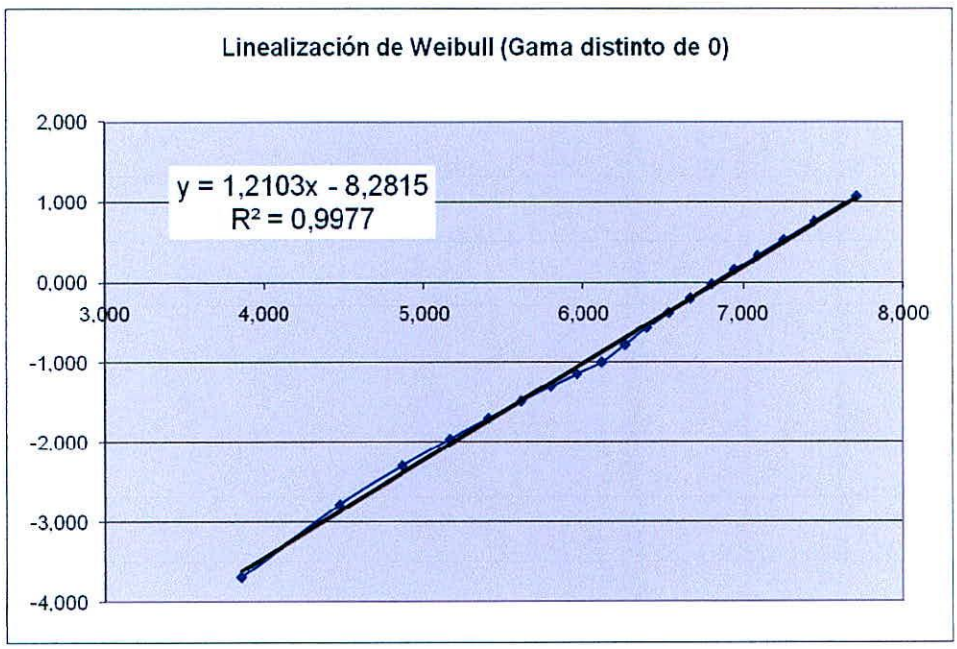
Ln(t-gama)	Ln(-Ln(R(t)))
3,854	-3,691
4,468	-2,785
4,861	-2,304
5,160	-1,969
5,403	-1,710
5,610	-1,496
5,794	-1,313
5,959	-1,151
6,114	-1,006
6,258	-0,789
6,397	-0,577
6,534	-0,383
6,667	-0,201
6,804	-0,024
6,943	0,152
7,091	0,333
7,254	0,529
7,447	0,757
7,708	1,071

Los valores anteriores quedan representados mediante la siguiente recta:

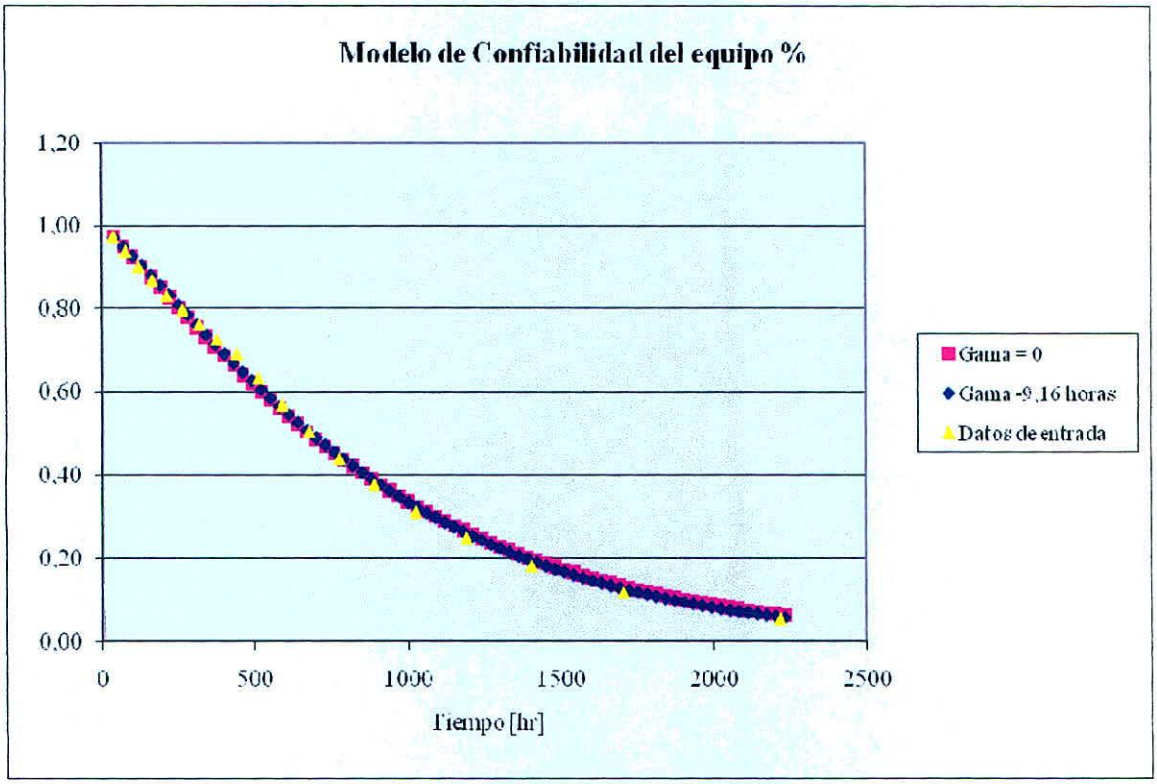
$$y = 1{,}2103x - 8{,}2815$$

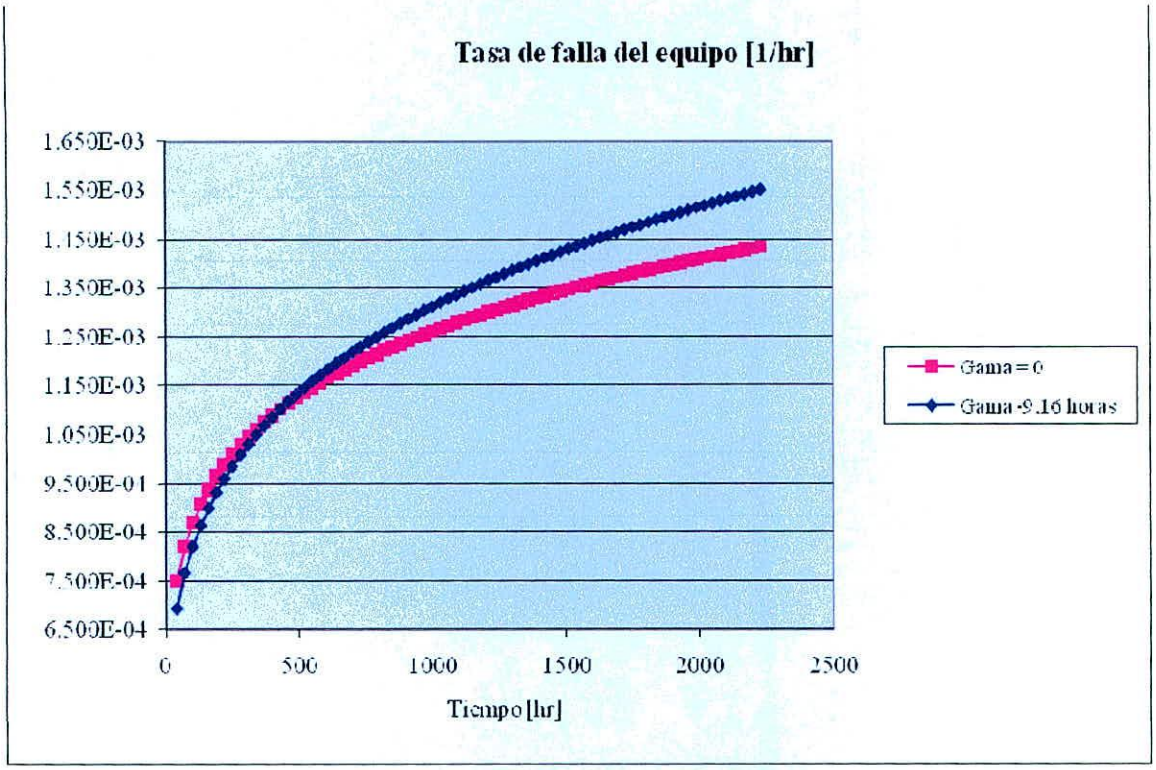
Los parámetros obtenidos son los siguientes:

Parámetros de Weibull	
Beta	1,21
Alfa	936,70
Gama	-9,16
MTBF	870,03
Correlación	0,9989



Utilizando los parámetros encontrados se puede modelar la confiabilidad del equipo y su tasa de fallas como se muestra en los siguientes gráficos:


Modelo de Confiabilidad del equipo %
1,20
1,00
0,80
0,60
0,40
0,20
0,00
0
500
1000
1500
2000
2500
Tiempo [hr]
Gama = 0
Gama -9,16 horas
Datos de entrada


Tasa de falla del equipo [1/hr]
1.650E-03
1.550E-03
1.150E-03
1.350E-03
1.250E-03
1.150E-03
1.050E-03
9.500E-01
8.500E-04
7.500E-04
6.500E-04
0
500
1000
1500
2000
2500
Tiempo [hr]
Gama = 0
Gama -9.16 horas

3.4- Confiabilidades

A continuación se realiza el análisis de Confiabilidad para los equipos de la Planta Norte y Sur, este análisis será realizado mediante la plataforma R-MES Reliability & Maintenance Engineering System.

3.4.1- Plataforma R-MES

Extraído de Manual R-MES

A partir del diagrama de procesos y de la determinación del impacto de cada equipo sobre la continuidad operacional de la planta a modelar, se da inicio al proceso de diagramación lógico funcional mediante la plataforma R-MES.

El diagrama resultante representa la seguridad de funcionamiento del proceso, lo que permite generar indicadores clave sistémicos en las dimensiones de históricas y probabilísticas.

Metodología RBD (Reliability Blocks Diagram)

La metodología utilizada por la plataforma R-MES, corresponde a Diagramas de Bloques de Confiabilidad (RBD), mediante la cual cada equipo es representado por un bloque, el que forma parte de sistema bajo diversas configuraciones lógico funcionales, que buscan representar la seguridad de funcionamiento de un proceso industrial.

Actualmente la plataforma R-MES considera cinco tipos de configuraciones lógico funcionales. Cuatro de ellas (Serie, Paralelo, Stand By y Redundancia Parcial) de uso frecuente en modelamiento de plantas complejas y una configuración llamada "Fraccionamiento".

A continuación se explica cada configuración:

- **Serie:** La configuración en Serie implica que la falla de cualquier equipo o subsistema constituyente provoca una detención del sistema al que pertenece.
  Particularmente esta configuración implica la inexistencia de Redundancia lo que se traduce en una relación 1-1 entre la detención de los equipos constituyentes y sistema que conforman, siempre que no existan anidamientos ni traslapes.

- **Paralelo:** La configuración en Paralelo relaciona a dos o más equipos siendo cada uno de ellos capaz de soportar la carga total de la etapa del proceso. Por lo tanto se trata de sistemas totalmente redundantes.
  La configuración implica una redundancia total en el sistema, puesto que cada elemento por sí solo puede desarrollar la función exigida al sistema. De otra forma una detención del sistema solamente se verifica en caso que todos los elementos constituyentes se encuentren detenidos.

- **Stand By:** La configuración de subsistemas en Stand By se compone de dos equipos, uno primario y otro secundario. El equipo primario opera hasta su falla y tras este evento lo reemplaza el equipo secundario, capaz de soportar en un 100% la capacidad del primario. La falla en el subsistema se verifica cuando los equipos se encuentran en un estado de falla de manera simultánea.
  Complementariamente se señala que la configuración Stand By, es similar a la de Paralelo con la diferencia que bajo un régimen normal de operación un equipo se encuentra funcionando y el otro en reserva, lo que implica un sistema más confiable pero a la vez duplicación de las instalaciones.

- **Redundancia parcial:** El subsistema en configuración de redundancia parcial está compuesto por un conjunto de equipos, de los cuales se requiere un mínimo en disponible para que el sistema se encuentre en esa condición.
  La configuración de Redundancia Parcial, exige que se cumpla una condición de un mínimo de equipos disponibles para que el sistema tenga la capacidad de operar con normalidad.

- **Fraccionamiemto:** Esta configuración implica que la producción total es alcanzada por 2 o más equipos, cada uno de estos equipos puede tener igual o distinta capacidad. Esto implica que ante la falla de algún equipo, él o los restantes solo podrán absorber una parte de la producción total, llevando a una pérdida parcial en la producción.

A continuación se muestra el Diagrama Lógico Funcional del proceso, donde se especifican los equipos pertenecientes a las Plantas de Chancado Norte y Sur, el proceso está dado por una configuración en línea (como se puede apreciar en la imagen), lo que trae consigo la inexistencia de redundancia y por lo tanto la falla de cualquier equipo puede desencadenar la detención total del sistema hasta que la falla sea reparada. Para aminorar los efectos de alguna falla se aprovechan las tolvas intermedias que proveen un "colchón" de tiempo que permite realizar las reparaciones y/o mantenciones correspondientes, de esta forma los equipos que se encuentren después de la tolva pueden seguir operativos hasta que el mineral de las tolvas sea consumido por completo.

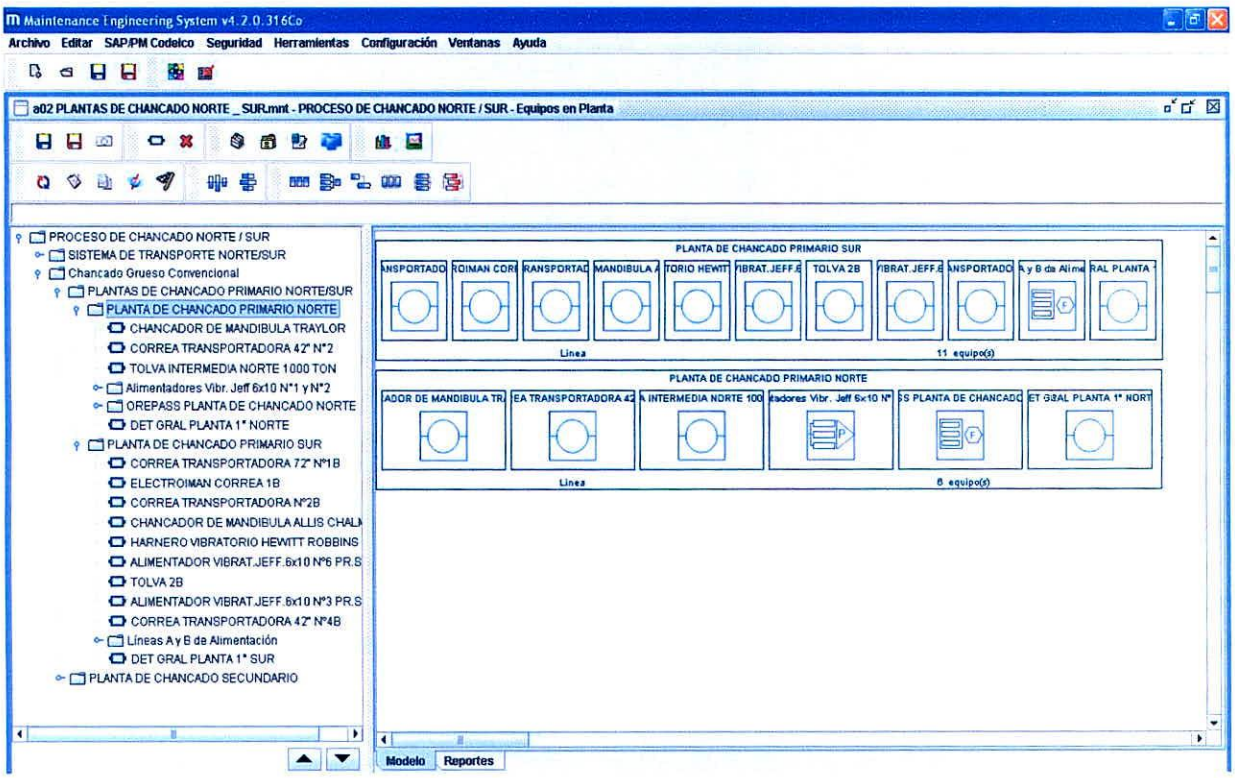
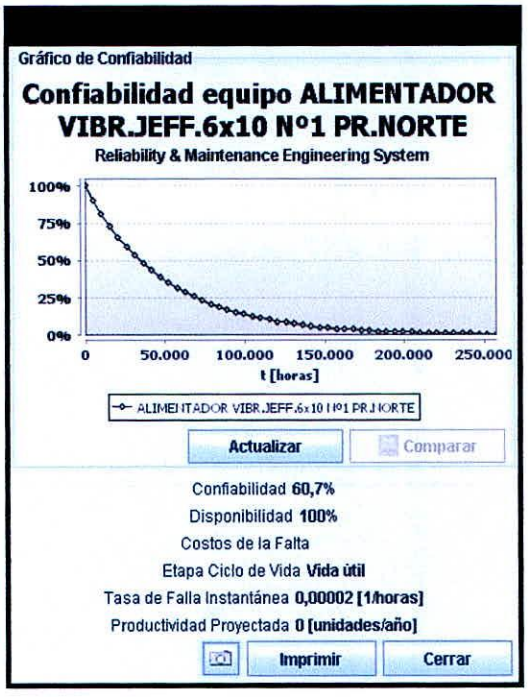
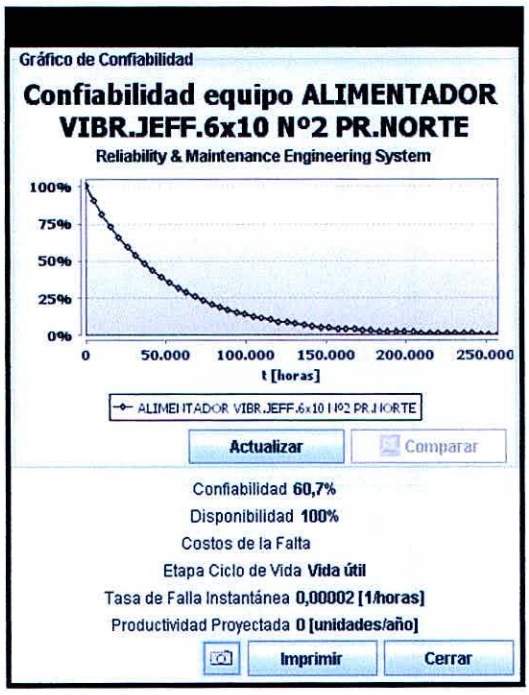


Fig. 6: Captura de pantalla de R-MES, con modelación de Planta de Chancado Primario Sur y Norte

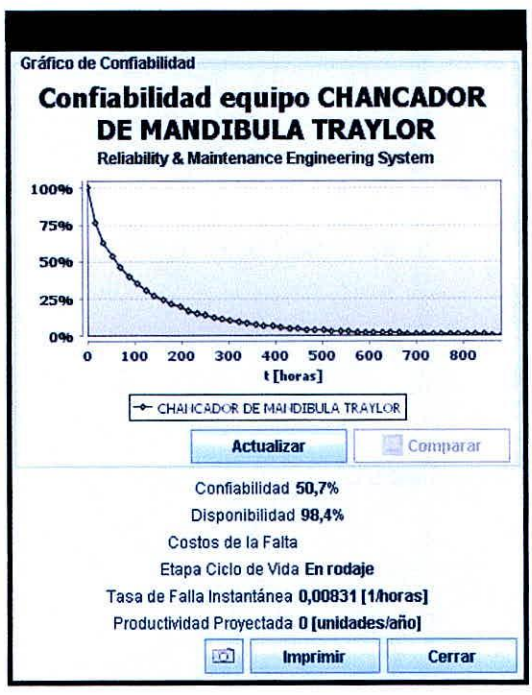
3.4.2- Planta Norte



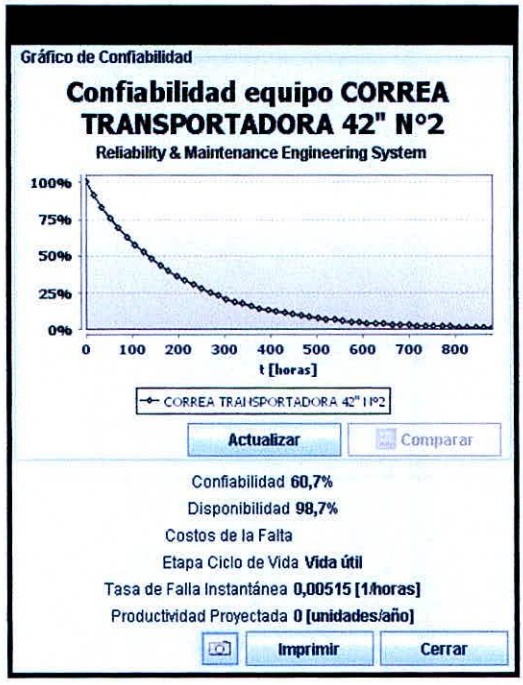
Del gráfico de confiabilidad para el Alimentador vibratorio Jeffrey N°1 se obtiene una tasa de falla instantánea de 0,00002 [1/hr], es decir el Tiempo medio entre fallas es de 50000 [hr], con un tiempo de operación de 25000 [hr] para una confiabilidad del 60,7%



Del gráfico de confiabilidad para el Alimentador vibratorio Jeffrey N°2 se obtiene una tasa de falla instantánea de 0,00002 [1/hr], es decir el Tiempo medio entre fallas es de 50000 [hr], con un tiempo de operación de 25000 [hr] para una confiabilidad del 60,7%

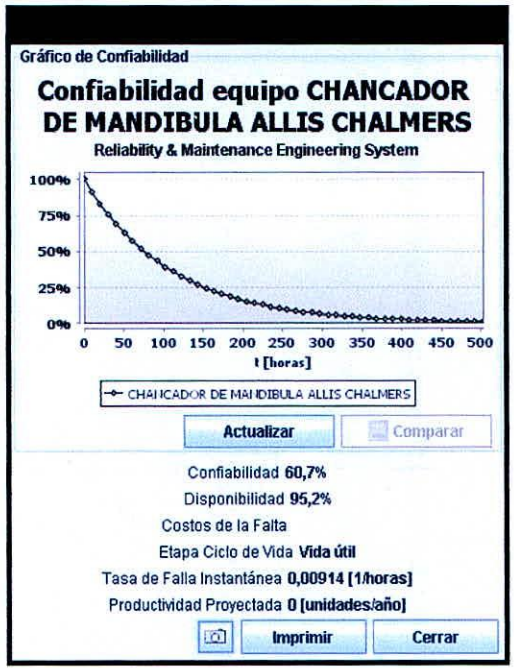


Del gráfico de confiabilidad para el Chancador de mandíbula Traylor se obtiene una tasa de falla instantánea de 0,00831 [1/hr], es decir el Tiempo medio entre fallas es de 120,33 [hr], con un tiempo de operación de 60,16 [hr] para una confiabilidad del 50,7%

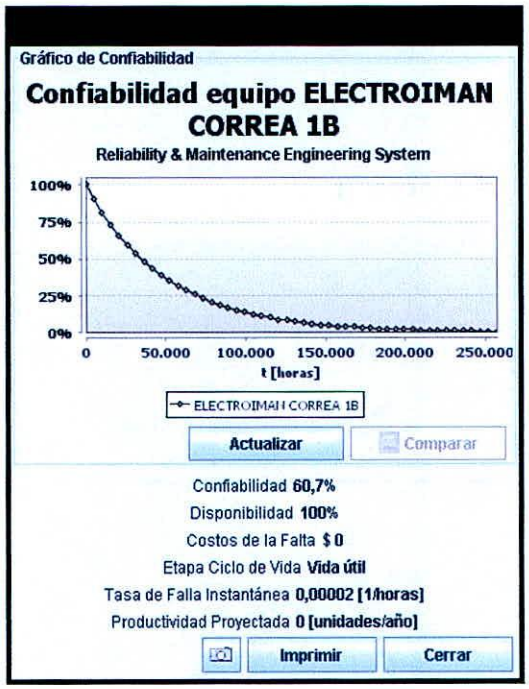


Del gráfico de confiabilidad para la Correa N°2 se obtiene una tasa de falla instantánea de 0,00515 [1/hr], es decir el Tiempo medio entre fallas es de 194,17 [hr], con un tiempo de operación de 97,08 [hr] para una confiabilidad del 60,7%

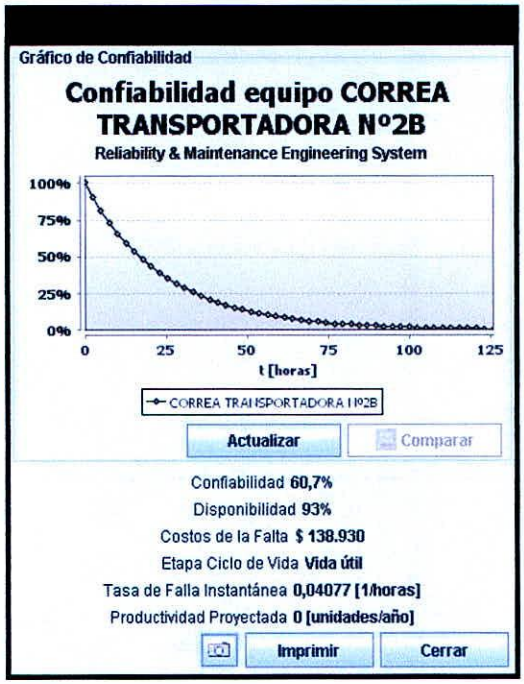
3.4.3- Planta Sur



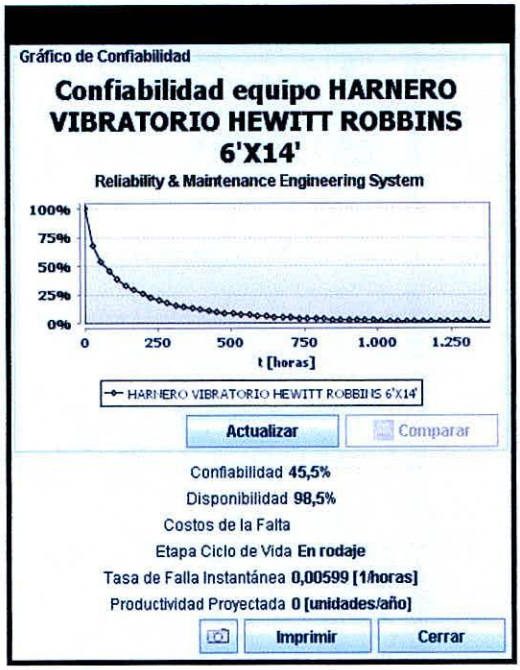
Del gráfico de confiabilidad para el Chancador de Mandíbula se obtiene una tasa de falla instantánea de 0,00914 [1/hr], es decir el Tiempo medio entre fallas es de 109,4 [hr], con un tiempo de operación de 54,7 [hr] para una confiabilidad del 60,7%



Del gráfico de confiabilidad para el Electroimán de la Correa 1B se obtiene una tasa de falla instantánea de 0,00002 [1/hr], es decir el Tiempo medio entre fallas es de 50000 [hr], con un tiempo de operación de 25000 [hr] para una confiabilidad del 60,7%



Del gráfico de confiabilidad para la Correa 72B se obtiene una tasa de falla instantánea de 0,04077 [1/hr], es decir el Tiempo medio entre fallas es de 24,52 [hr], con un tiempo de operación de 12,26 [hr] para una confiabilidad del 60,7%



Del gráfico de confiabilidad para el Harnero Hewitt Robins se obtiene una tasa de falla instantánea de 0,00599 [1/hr], es decir el Tiempo medio entre fallas es de 166,94 [hr], con un tiempo de operación de 83,47 [hr] para una confiabilidad del 45,5%

3.4.4- Resultados

Los resultados obtenidos muestran que los equipos tienen en su mayoría tiempos entre fallas que son relativamente bajos, teniendo poco sentido desde el punto de vista de las conclusiones que se puedan obtener, como es el caso de la Correa 2B, Correa 2 y Chancador Traylor, que no superan las 200 [hr], se atribuye este resultado a que en las Plantas de Chancado Grueso los equipos operan en línea, esto significa que la detención de cualquiera de ellos implica la detención de los demás equipos que forman parte del proceso de chancado.

A lo mencionado anteriormente se suma que estos equipos tienen una antigüedad superior a los 20 años como es el caso del Chancador Traylor, implicando una inexistencia de repuestos originales, lo que se traduce en fallas constantes y tiempos de reparación elevados.

4.- ANÁLISIS DE DATOS

4.1- Disponibilidades

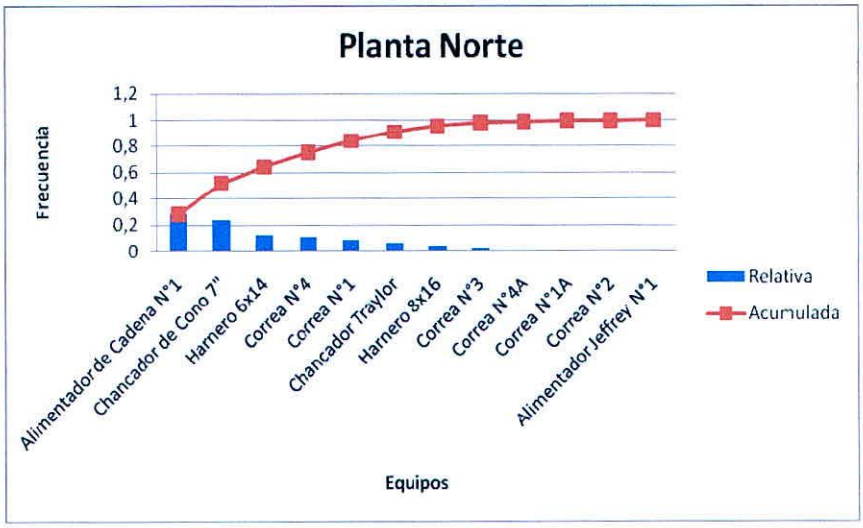
A partir de los datos obtenidos de SAP se realiza el cálculo de disponibilidades y utilizaciones para las Plantas de Chancado Norte y Sur.

Las fórmulas utilizadas para realizar estos cálculos se encuentran en el capítulo **2.3** y **2.4**

4.1.1- Planta Norte

A continuación se determinan los equipos que tienen la mayor incidencia en el tiempo total de detención de la Planta Norte.

Equipo	Horas	fi	Fi2
Alimentador de Cadena N°1	35,3333	0,29	0,28533
Chancador de Cono 7''	29,3333	0,24	0,52221
Harnero 6x14	15,2167	0,12	0,64509
Correa N°4	13,6000	0,11	0,75491
Correa N°1	10,7833	0,09	0,84199
Chancador Traylor	8,2833	0,07	0,90888
Harnero 8x16	5,6333	0,05	0,95437
Correa N°3	3,4000	0,03	0,98183
Correa N°4A	0,8333	0,01	0,98856
Correa N°1A	0,6667	0,01	0,99394
Correa N°2	0,5000	0	0,99798
Alimentador Jeffrey N°1	0,2500	0	1,00000



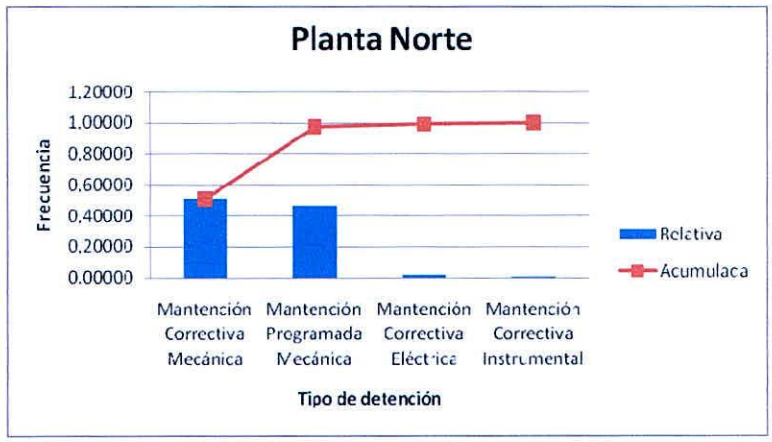
Cálculo de Disponibilidad

El cálculo de la disponibilidad se realiza utilizando las horas totales de las mantenciones correctivas y mantenciones programadas, donde las mantenciones correctivas son aquellas que tienen como función la de corregir o reparar una falla en algún equipo, mientras que las mantenciones programadas siguen un Plan de Mantenimiento y por lo tanto tienen fechas y duraciones pre-establecidas.

Tipo de detención	Horas	fi	Fi
Mantención Correctiva Mecánica	37,700	0,51038	0,51038
Mantención Programada Mecánica	34,333	0,46480	0,97518
Mantención Correctiva Eléctrica	1,300	0,01760	0,99278
Mantención Correctiva Instrumental	0,533	0,00722	1,00000
Disponibilidad	0,900716846		

fi: Frecuencia relativa, representa la incidencia propia dentro del total de horas de detención.

Fi: Frecuencia acumulada, representa la acumulación de las frecuencias relativas.

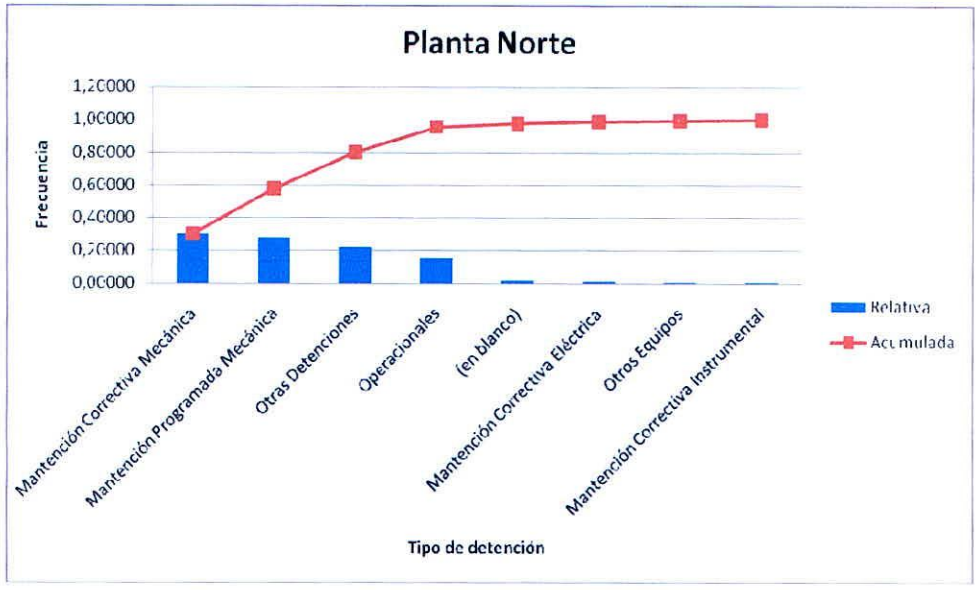


A diferencia del cálculo de la disponibilidad, la utilización requiere que se tomen en cuenta todas las detenciones que se han dado en un sistema, ya que lo que se quiere saber es el tiempo que el equipo efectivamente ha estado en funcionamiento, por lo tanto se consideran detenciones de tipo operacionales, detenciones producto de otros equipos y detenciones provocadas por otros factores.

Tipo de detención	Horas	fi	Fi
Mantención Correctiva Mecánica	37,700	0,30444	0,30444
Mantención Programada Mecánica	34,333	0,27725	0,58170
Otras Detenciones	27,433	0,22153	0,80323
Operacionales	19,217	0,15518	0,95841
(en blanco)	2,567	0,02073	0,97914
Mantención Correctiva Eléctrica	1,300	0,01050	0,98964
Otros Equipos	0,750	0,00606	0,99569
Mantención Correctiva Instrumental	0,533	0,00431	1,00000
Utilización	0,833557348		

fi: Frecuencia relativa, representa la incidencia propia dentro del total de horas de detención.

Fi: Frecuencia acumulada, representa la acumulación de las frecuencias relativas.



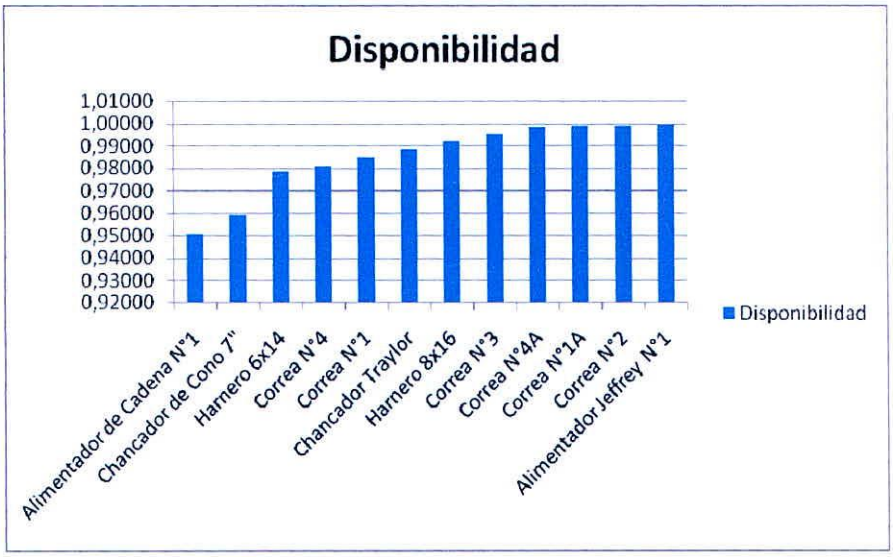
Comparando los indicadores de disponibilidad y utilización se puede notar que la utilización es menor que la disponibilidad y son: Disponibilidad = 90,07% > Utilización = 83,35%, esto se debe a que existen tiempos de detención que no se toman en cuenta para calcular la disponibilidad de los equipos, pero que se deben tomar en cuenta para el cálculo de la utilización, por ejemplo las paradas de Planta debidas a la falta de mineral, etc.

A continuación se calculan disponibilidades por equipo.

Equipo	Horas	Disponibilidad
Alimentador de Cadena N°1	35,33	0,95093
Chancador de Cono 7"	29,33	0,95926
Harnero 6x14	15,22	0,97887
Correa N°4	13,60	0,98111
Correa N°1	10,78	0,98502
Chancador Traylor	8,28	0,98850
Harnero 8x16	5,63	0,99218
Correa N°3	3,40	0,99528
Correa N°4A	0,83	0,99884
Correa N°1A	0,67	0,99907
Correa N°2	0,50	0,99931
Alimentador Jeffrey N°1	0,25	0,99965

fi: Frecuencia relativa, representa la incidencia propia dentro del total de horas de detención.

Fi: Frecuencia acumulada, representa la acumulación de las frecuencias relativas.



De acuerdo a su disponibilidad, los equipos que resultaron más críticos para la Planta de Chancado Norte son:

1. Alimentador de Cadena N°1
2. Chancador de Cono 7"
3. Harnero 6` x 14`

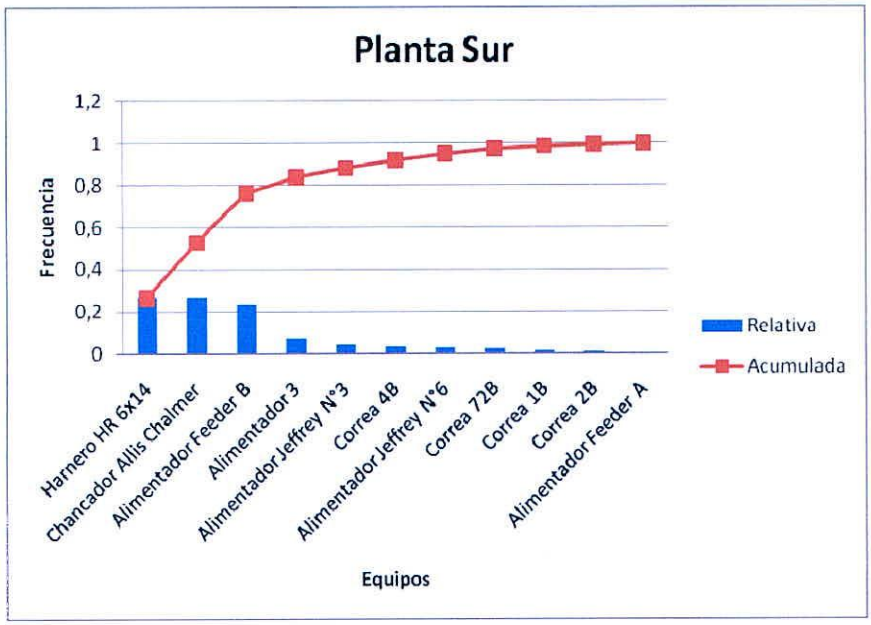
4.1.2- Planta Sur

A continuación se determinan los equipos que tienen la mayor incidencia en el tiempo total de detención en la Planta Sur.

Equipo	Horas	fi	Fi
Harnero HR 6x14	49,050	0,27	0,26552
Chancador Allis Chalmer	48,833	0,26	0,52986
Alimentador Feeder B	43,250	0,23	0,76398
Alimentador 3	13,667	0,07	0,83796
Alimentador Jeffrey N°3	8,000	0,04	0,88127
Correa 4B	6,683	0,04	0,91745
Alimentador Jeffrey N°6	5,667	0,03	0,94812
Correa 72B	4,500	0,02	0,97248
Correa 1B	2,500	0,01	0,98602
Correa 2B	1,583	0,01	0,99459
Alimentador Feeder A	1,000	0,01	1,00000

fi: Frecuencia relativa, representa la incidencia propia dentro del total de horas de detención.

Fi: Frecuencia acumulada, representa la acumulación de las frecuencias relativas.



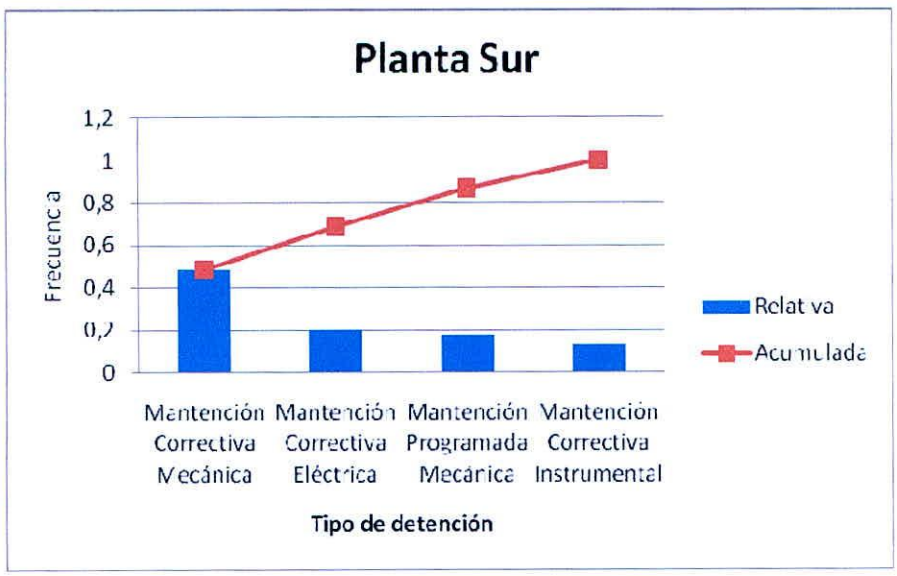
Al igual que en el caso de la planta Norte, el cálculo de la disponibilidad se realiza utilizando las horas totales de las mantenciones correctivas y mantenciones programadas, donde las mantenciones correctivas son aquellas que tienen como función la de corregir o

reparar una falla en algún equipo, mientras que las mantenciones programadas siguen un plan de mantenimiento y por lo tanto tienen fechas y duraciones pre-establecidas.

Tipo de detención	Horas	fi	Fi
Mantención Correctiva Mecánica	65,3	0,48622487	0,48622487
Mantención Correctiva Eléctrica	27,33333333	0,203524448	0,689749317
Mantención Programada Mecánica	24,08333333	0,179324895	0,869074212
Mantención Correctiva Instrumental	17,58333333	0,130925788	1
Disponibilidad	0,833557392		

fi: Frecuencia relativa, representa la incidencia propia dentro del total de horas de detención.

Fi: Frecuencia acumulada, representa la acumulación de las frecuencias relativas.

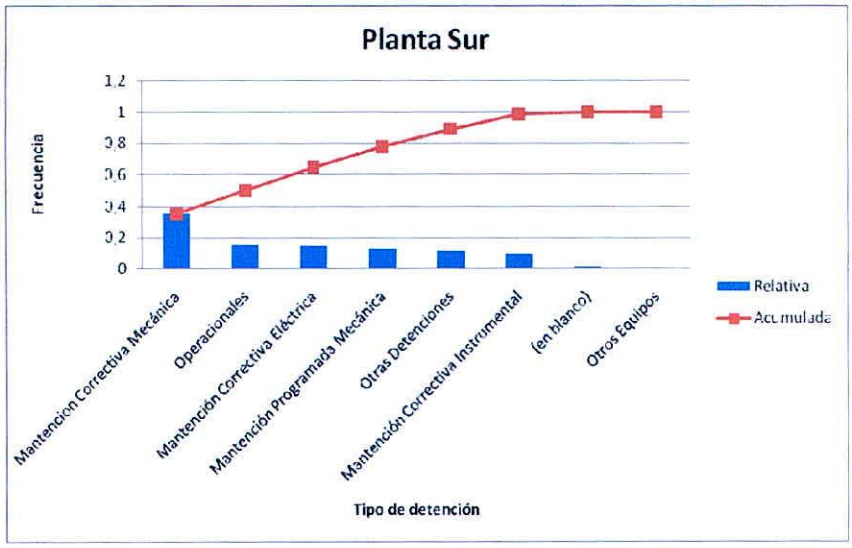


A diferencia del cálculo de la disponibilidad, la utilización requiere que se tomen en cuenta todas las detenciones que se han dado en un sistema, ya que lo que se quiere saber es el tiempo que el equipo efectivamente ha estado en funcionamiento, por lo tanto se consideran detenciones de tipo operacionales, detenciones producto de otros equipos y detenciones provocadas por otros factores.

Tipo de detención	Horas	fi	Fi
Mantencion Correctiva Mecánica	65,3	0,353482497	0,353482497
Operacionales	27,5	0,148863226	0,502345724
Mantención Correctiva Eléctrica	27,33333333	0,147961025	0,650306748
Mantención Programada Mecánica	24,08333333	0,130368098	0,780674847
Otras Detenciones	20,43333333	0,110609888	0,891284735
Mantención Correctiva Instrumental	17,58333333	0,095182245	0,986466979
(en blanco)	2	0,010826416	0,997293396
Otros Equipos	0,5	0,002706604	1
Utilización	0,751702509		

fi: Frecuencia relativa, representa la incidencia propia dentro del total de horas de detención.

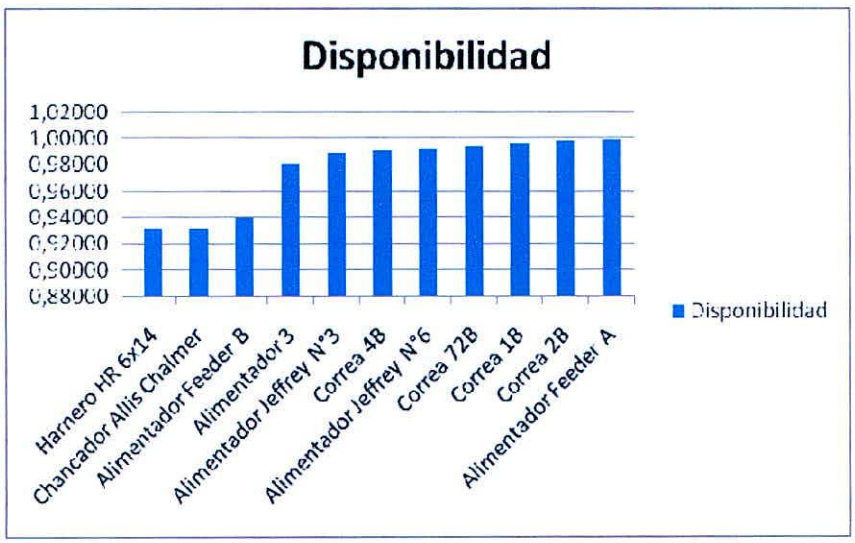
Fi: Frecuencia acumulada, representa la acumulación de las frecuencias relativas.



Para el caso de la Planta Sur, los indicadores de disponibilidad y utilización son: Disponibilidad = 83,35% > Utilización = 75,17%

A continuación se calculan las disponibilidades por equipo.

Equipo	Horas	Disponibilidad
Harnero HR 6x14	49,05	0,93188
Chancador Allis Chalmer	48,83	0,93218
Alimentador Feeder B	43,25	0,93993
Alimentador 3	13,67	0,98102
Alimentador Jeffrey N°3	8,00	0,98889
Correa 4B	6,68	0,99072
Alimentador Jeffrey N°6	5,67	0,99213
Correa 72B	4,50	0,99375
Correa 1B	2,50	0,99653
Correa 2B	1,58	0,99780
Alimentador Feeder A	1,00	0,99861



Los equipos que resultaron más críticos para la Planta de Chancado Sur son:

1. Harnero HR 6 x 14
2. Chancador Allis Chalmer
3. Alimentador B siendo la menor de todas la del Harnero HR

4.1.3- Resultados

Para ambas Plantas los mayores tiempos de detención están ligados a mantenciones correctivas mecánicas, este tipo de mantención es el que se realiza cuando se produce la falla de un equipo.

Una vez calculados los indicadores de disponibilidad y utilizaciones para ambas Plantas de Chancado, se realiza su comparación:

Disponibilidad Planta Norte= 90,07% > Disponibilidad Planta Sur = 83,35%
Utilización Planta Norte = 83,35% > Utilización Planta Sur = 75,17%

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se puede concluir que la Planta a la cual se deben aplicar las mejoras es la Planta Sur, ya que posee menores indicadores de disponibilidad y utilización que la Planta Norte, el equipo más crítico es el Harnero Hewitt Robins 6` x 14`.

5.- ANÁLISIS DEL EQUIPO Y PROPUESTAS DE MEJORA

5.1- Análisis del equipo

A partir de los resultados obtenidos y de la experiencia del grupo de mantenedores de la Planta de Chancado Grueso, se proponen alternativas que permitan mejorar el funcionamiento del proceso de clasificación del mineral que viene desde la Correa 72B y 72A, particularmente del Harnero Hewitt Robins 6` x 14`, este harnero realiza la primera separación del mineral que proviene desde la correa 72B, el mineral de menor granulometría es enviado a la tolva intermedia de 150 toneladas que se encuentra bajo el harnero, el mineral grueso es enviado al Chancador de Mandíbulas Allis Chalmers que se encuentra a continuación del harnero para ser triturado.

En la siguiente figura se muestra la ubicación del equipo:

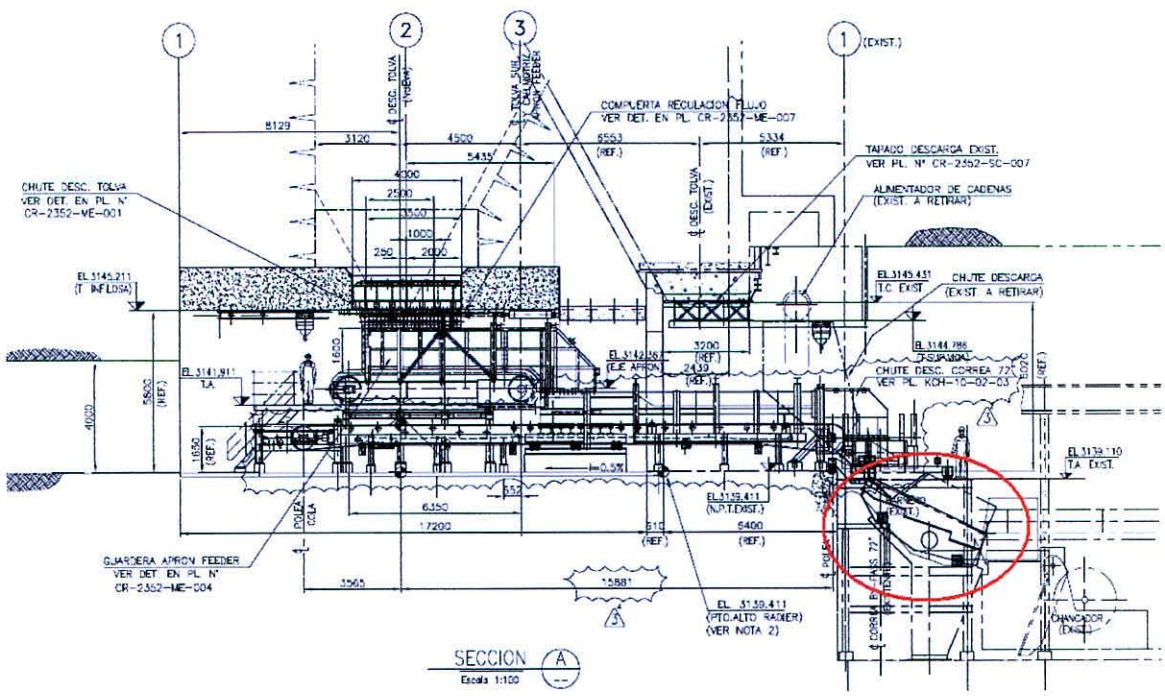


Fig. 10: Plano referencial de disposición física de harnero

Este equipo presenta múltiples problemas producto de la energía con que el mineral, específicamente las colpas, impacta en la primera fila de parrillas que es donde se produce la clasificación, los problemas que más se dan en este equipo son de agrietamiento y

fracturas en los paneles laterales fijos, fracturas de las vigas porta parrillas, además de el excesivo desgaste de las parrillas (que si bien son elementos concebidos para el desgaste, su duración es corta).

Estos problemas se presentan debido a la alta diferencia de altura que existe entre la descarga de la correa 72B y la primera fila de parrillas del Harnero, esta diferencia de altura es de 3000 [mm]



Fig. 11: Harnero Hewitt Robins

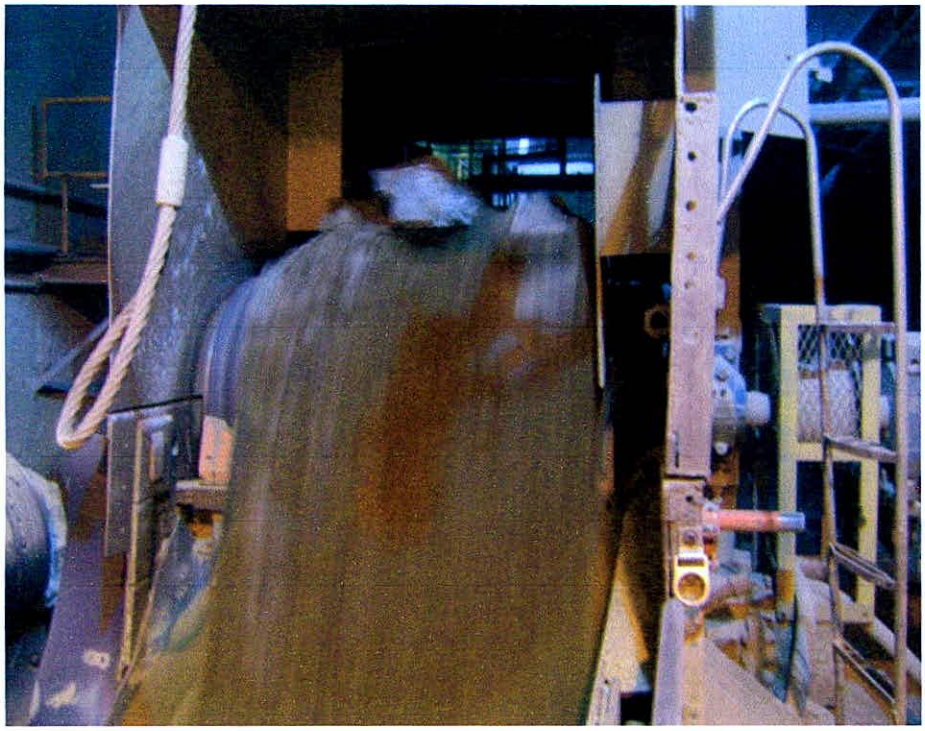


Fig. 12: Descarga de correa 72B



Fig. 13: Grieta en panel lateral de Harnero



Fig. 14: Grieta panel en lateral.



Fig. 15: Grieta en lateral, producida por fatiga debido a los impactos de las colpas contra las parrillas.

5.2.- Aplicación de la metodología TRIZ

A continuación se utiliza la metodología TRIZ para dar solución en forma conceptual al problema del equipo en cuestión (Hro. Hewitt Robins).

De las observaciones realizadas al equipo en funcionamiento, se aprecia los siguientes problemas que deben ser resueltos:

- El harnero sufre fracturas en los paneles laterales debido al impacto de las colpas en las parrillas.
- La distancia vertical (altura) recorrida por el mineral desde el momento en que abandona la correa es excesiva.

A partir de los problemas observados en el harnero, se quiere mejorar las siguientes condiciones:

- Resistencia
- Longitud de un objeto en movimiento (energía con que el mineral impacta en las parrillas del harnero)
- Durabilidad de un objeto en movimiento

Se deduce que las condiciones a mejorar entrarían en contradicción con las siguientes características del harnero:

- Peso de un objeto en movimiento

En base a los parámetros anteriores se realiza la comparación buscando en la matriz de Altshuller los principios de inventiva que nos permitan resolver los conflictos encontrados.

Conflicto 1: **Resistencia v/s Peso de un objeto en movimiento**

Principios de inventiva asociados:

- **Segmentación:** Divida un objeto en partes independientes. Cree un objeto seccionado, incremente el grado de segmentación de un objeto.

- **Contrapeso:** Compensar el peso de un objeto uniéndolo con otro que tenga una fuerza de empuje.

- **Dinamicidad:** Haga características de un objeto, o un ajuste automático del ambiente externo para el desempeño óptimo en cada estación de operación. Divida un objeto en elementos que puedan cambiar de posición relativa con cada uno. Si un objeto es inamovible, hágalo movible o intercambiable.

- **Materiales compuestos:** Reemplace materiales homogéneos por compuestos.

Conflicto 2: **Longitud de un objeto en movimiento v/s Peso de un objeto en movimiento**

Principios de inventiva asociados:

- **Contrapeso:** Compensar el peso de un objeto uniéndolo con otro que tenga una fuerza de empuje.

- **Dinamicidad:** Haga características de un objeto, o un ajuste automático del ambiente externo para el desempeño óptimo en cada estación de operación. Divida

un objeto en elementos que puedan cambiar de posición relativa con cada uno. Si un objeto es inamovible, hágalo movible o intercambiable.

- **Uso de una construcción neumática o hidráulica:** Reemplace las partes sólidas de un objeto por gas o líquido, estas partes pueden usar aire o agua para inflarse o utilizar cojines hidrostáticos.

- **Restauración y regeneración de partes:** Después de completar una función o hacerse inútil, rechazar o modificar un componente de un objeto. Restaurar completamente cualquier parte usada de un objeto.

Conflicto 3: **Durabilidad de un objeto en movimiento v/s Peso de un objeto en movimiento**

Principios de inventiva asociados:

- **Combinando:** Combine en un espacio objetos homogéneos u objetos destinados a operar contiguamente. Combine en tiempo operaciones homogéneas o contiguas.

- **Acción periódica:** Reemplace una acción periódica por una acción continua o por impulsos. Si una acción es periódica cambie su frecuencia. Use pausas entre impulsos para dar acción adicional.

- **Uso de material poroso:** Haga un objeto poroso o use elementos porosos adicionales (insertos, cubiertas, etc.) Si un objeto ya es poroso, llene sus poros con alguna sustancia.

- **Restauración y regeneración de partes:** Después de completar una función o hacerse inútil, rechazar o modificar un componente de un objeto. Restaurar completamente cualquier parte usada de un objeto.

5.2.1- Resultados de aplicación de metodología TRIZ

A partir de los principios de inventiva encontrados, se seleccionan aquellos que se consideran más apropiados para resolver el problema en cuestión:

Segmentación: Divida un objeto en partes independientes. Cree un objeto seccionado, incremente el grado de segmentación de un objeto.

Este principio nos indica que se podría dividir la estructura de los paneles laterales de modo que a medida que se van deteriorando se puedan ir reemplazando de forma rápida sin necesidad de desarmar la estructura completa del harnero, en caso de un reemplazo total del equipo facilitaría la extracción del conjunto completo desde su posición de trabajo.

Dinamicidad: Haga características de un objeto, o un ajuste automático del ambiente externo para el desempeño óptimo en cada estación de operación. Divida un objeto en elementos que puedan cambiar de posición relativa con cada uno. Si un objeto es inamovible, hágalo movible o intercambiable.

Aplicando el principio de dinamicidad, se podría diseñar las parrillas y los paneles laterales para que sea posible modificar la geometría del harnero, de esta forma sería posible aumentar la altura de las parrillas donde se produce el impacto del mineral, disminuyendo la energía asociada al impacto y por lo tanto aumentando la vida útil del equipo.

Materiales compuestos: Reemplace materiales homogéneos por compuestos.

El uso de materiales compuestos permitiría obtener mejoras en lo referente a aplicaciones que tengan mejor comportamiento frente al impacto que el acero utilizado en las parrillas, de esta forma podrían existir materiales que dependiendo de su dureza permitan absorber una fracción de la energía con que el mineral impacta al harnero.

Uso de una construcción neumática o hidráulica: Reemplace las partes sólidas de un objeto por gas o líquido, estas partes pueden usar aire o agua para inflarse o utilizar cojines hidrostáticos.

La aplicación de este principio es de suma utilidad ya que en este caso se podrían reemplazar los resortes, que si bien no son sólidos, por elementos que tengan un mejor comportamiento frente al impacto de una masa, como sistemas que se comporten como la suma de un resorte y un amortiguador y de esta forma se logra disipar mejor la energía del impacto del mineral.

5.3- Alternativas propuestas

Las alternativas propuestas son:

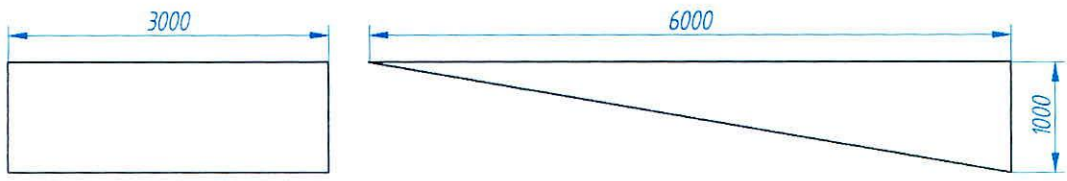
1. No realizar cambios.
2. Aplicar mejoras al equipo existente.
3. Cambiar el equipo existente.

No realizar cambios

- Implica que se mantiene la situación actual de funcionamiento, se mantiene el número de mantenciones anuales al equipo, las horas hombre invertidas en mantención, los insumos que consume el equipo, etc.

Aplicar mejoras al equipo existente y al lugar físico donde se encuentra

- Modificar la zona de descarga de la correa 72B con el fin de disminuir la distancia vertical o altura desde el pulley de cola de la correa hasta la zona de impacto con el harnero Hewitt Robins, implica realizar modificaciones a la loza de concreto donde se soporta este equipo y reformar la caja del cerro que la contiene. Estas modificaciones implican sacar una "cuña" de concreto, donde la altura que se retira de la loza debe tener por lo menos 1 [m] en la parte más gruesa, ancho de 3[m] y un largo de 6 [m].



- Rediseñar la estructura que soporta al equipo: levantando el equipo aproximadamente 1 [m] a fin de disminuir la diferencia de altura entre la descarga de la correa y la zona de impacto del mineral en las parrillas del harnero (disminuir la energía del impacto del mineral sobre las parrillas), se debe considerar que la altura máxima desde la que se puede alimentar el chancador de mandíbulas no debe exceder 1[m]
- Comprende realizar modificaciones a nivel de diseño del equipo, estas consideran: agregar planchas de refuerzo en las zonas donde van montadas las vigas porta parrillas, disminuir la distancia que debe recorrer el mineral en caída libre (desde la descarga de la correa 72B hasta la parrilla) levantando la estructura que soporta el harnero.
- Aplicar mejoras en el proceso de fabricación del equipo con el fin de mejorar sus estándares de calidad: aumentar el largo de los cordones de soldadura, aplicar tratamientos para alivio de tensiones a las soldaduras (tratamiento térmico, vibraciones)

Se debe considerar que el tiempo requerido para realizar las modificaciones a nivel estructural de la zona de descarga desde la correa 72B hacia el harnero Hewitt Robins sería sumamente elevado, aproximadamente 14 días, esto se debe a que es necesario desarmar y retirar completamente la estructura que soporta a la correa 72B con el fin de modificar la loza de concreto como se explica en el primer punto, también se debe levantar la estructura que soporta al harnero como máximo 1[m], estos trabajos no se pueden realizar en paralelo debido a que se pueden provocar interferencias entre ambos.

Cambiar el equipo existente

- Contempla además de cambiar el equipo, calcular la resistencia de la estructura existente en la actualidad, con el fin de determinar las cargas máximas que podría soportar y en caso de estar subdimensionada rediseñar la estructura que lo soporta.

- Para cambiar el equipo existente se llamará a concurso a 3 empresas fabricantes de alternativas al equipo en cuestión y se compararán de acuerdo a las características técnicas de los equipos que presenten.

Cálculo de estructura soporte de Harnero

Los cálculos que se presentarán a continuación no incluyen un Marco Teórico, ya que se asume que el conocimiento acerca de los conceptos que se utilizan es básico dentro de la especialidad de Ingeniería Civil Mecánica.

A continuación se desarrolla el cálculo de la estructura que soporta al harnero Hewitt Robins 6` x 14` con el fin de determinar su rigidez y minimizar la propagación de vibraciones hacia las instalaciones existentes.

La estructura que soporta al harnero Hewitt Robins está formada por dos vigas IN 35 x 93,1 [kgf/m] de 4440 [mm] de largo; cada viga está apoyada y soldada en sus extremos a 2 columnas HN 20 x 46 [kgf/m] de 3000 [mm] de largo que se encuentran empotradas al suelo y se encuentran dispuestas de la forma que se muestran a continuación: (Ver figura 16)

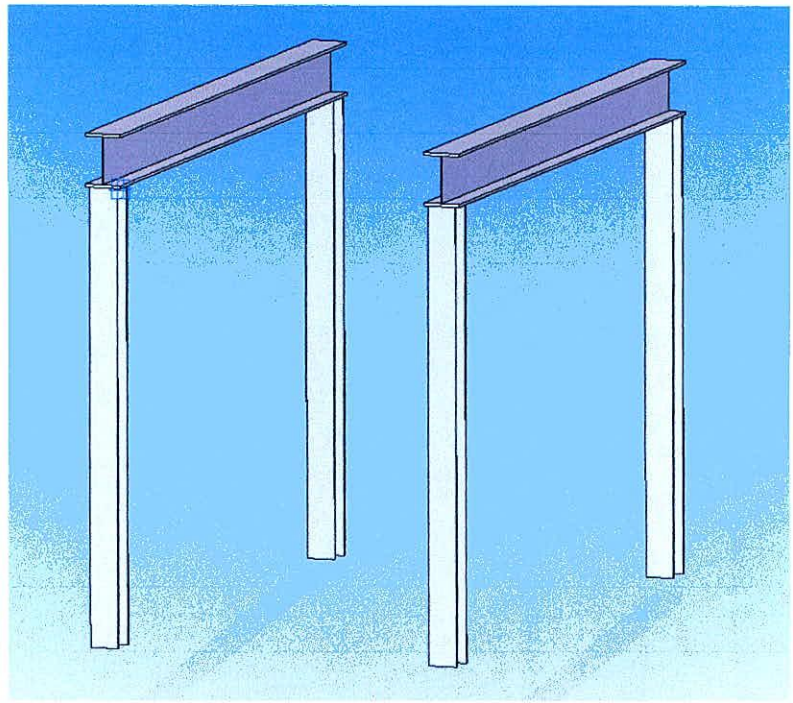
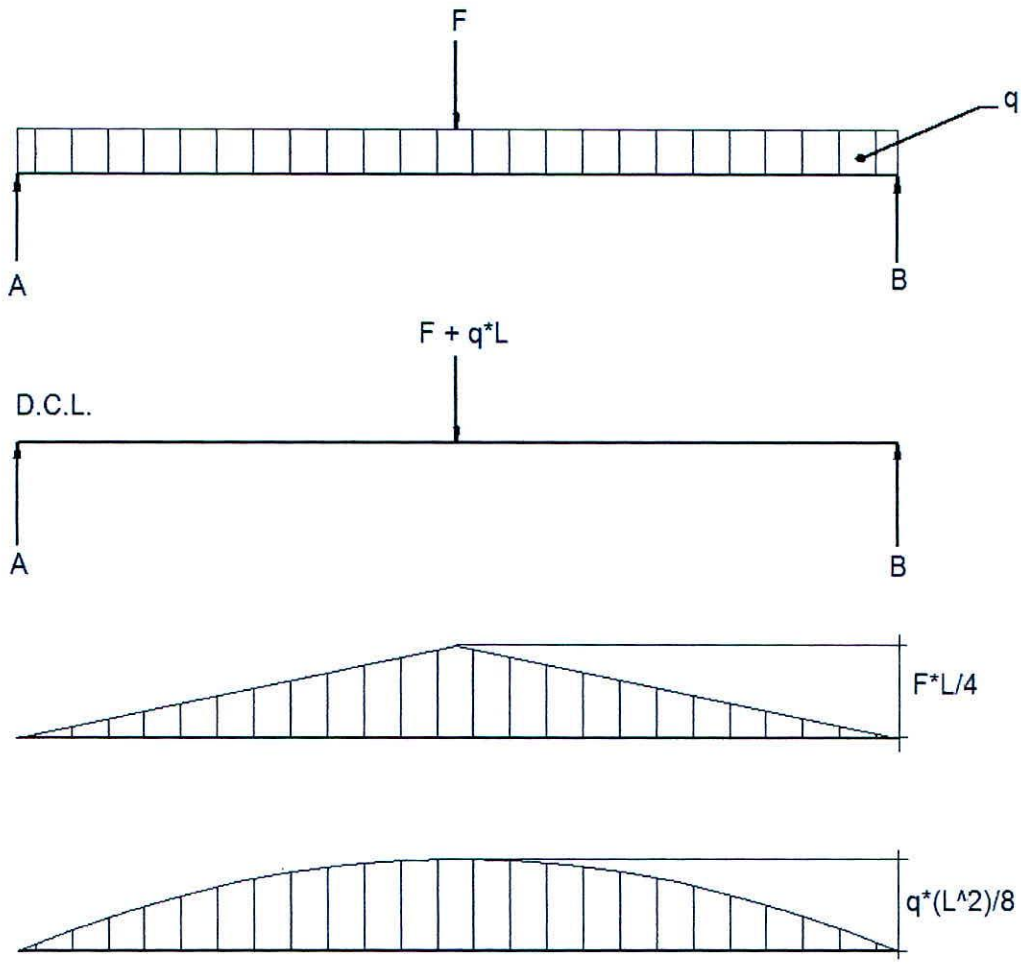


Fig. 16: Modelación de estructura que soporta al harnero mediante Solid Edge

Cálculo de carga máxima para las vigas:

Para calcular la carga máxima que pueden soportar las vigas IN 35 x 93,1 [kgf/m] se considera la viga apoyada en sus extremos con una carga puntual en el centro, además de la carga distribuida producto de la propia masa de la viga.

A continuación se muestra el esquema de las fuerzas que actual en las vigas junto al diagrama de cuerpo libre y diagramas de momentos flectores.



A partir del diagrama de cuerpo libre se obtiene la sumatoria de fuerzas en el eje Y resultando:

$$\sum Fy = 0$$

$$A + B = F + q * L \; ; \quad A = F/2 \; ; \quad B = F/2$$

A partir de los diagramas de momento flector se obtiene el momento flector máximo para la viga:

Momento Flector máximo:

$$M_f\,máx = q * \frac{L^2}{8} + \frac{F*L}{4} = F * 111 + 22941{,}7\ [kgf]$$

El esfuerzo de fluencia se obtiene a partir de la denominación del acero:

$$\sigma_{trab} = \sigma_f = 2700\ \left[\frac{kgf}{cm^2}\right] \quad \text{Ec. 1}$$

$$\omega_\Theta = 1640\ [cm^2] \quad \text{Ec. 2}$$

$$M_{máx} = (111 * F + 22941{,}7)\ [kgF] \quad \text{Ec. 3}$$

Igualando ecuaciones 1, 2 y 3 se obtiene:

$$2700 * 1640 = 111 * F + 22941{,}7$$

Y la fuerza máxima que se puede aplicar a cada viga es:

$$F = 39685\ [kgf]$$

Cálculo de carga máxima para las columnas:

La carga máxima que pueden soportar las columnas HN 20 x 46 [kgf/m] de 3000 [mm] es obtenida a partir del esfuerzo máximo antes del pandeo por flexión.

$$Á = 58{,}4\ [cm^2]$$

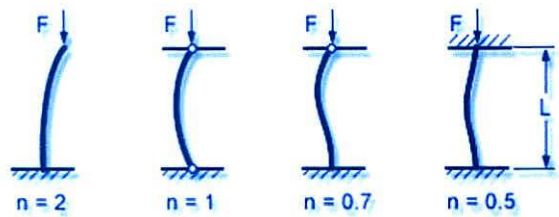
$$Ixx = 4520\ [cm^4]$$

$$Iyy = 1600\ [cm^4]$$

$$Kx = \sqrt{\frac{I\theta_x}{A_0}} = \sqrt{\frac{4520}{58,4}} = 8,7975$$

$$Ky = \sqrt{\frac{I\theta_y}{A_0}} = \sqrt{\frac{1600}{58,4}} = 5,2342$$

Los largos de Euler se representan a continuación:



Dependiendo del plano desde el cual se observa la columna se tienen dos largos de Euler:

Eje Y-Y: $le_y = 2 * 300 = 600$ (empotrado-libre)

Eje X-X: $le_x = 0,7 * 300 = 210$ (empotrado-articulado)

La esbeltez mecánica se calcula a continuación:

$$\lambda_x = \frac{le_x}{K_x} = \frac{210}{8,7975} = 23,8704$$

$$\lambda_y = \frac{le_y}{K_y} = \frac{600}{5,2342} = 114,6306$$

La esbeltez crítica se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\lambda_c = \pi * \sqrt{\frac{2 * 2{,}1 * 10^6}{2200}} = 137{,}266$$

Luego se compara la esbeltez con respecto a cada eje con la esbeltez crítica, si la esbeltez crítica es mayor, entonces la columna es corta, si la esbeltez crítica es menor se tiene columna esbelta.

$\lambda_x = columna\ corta$

$\lambda_y = columna\ Corta$

Finalmente se calcula el esfuerzo crítico para la columna a partir de la fórmula que sigue a continuación:

$$\sigma_c = \sigma_f * \left\{1 - \frac{\sigma_f}{E} * \left(\frac{\lambda\_x}{2\pi}\right)^2\right\} = 2200 * \left\{1 - \frac{2200}{2{,}1 * 10^6} * \left(\frac{23{,}87}{2\pi}\right)^2\right\} = 2166\ [\text{kgf/cm\^2}]$$

A partir del esfuerzo crítico y el área de la sección transversal de la columna se puede obtener la fuerza máxima que se puede aplicar a la columna:

$$F = 2166 * 58{,}4 = 126494{,}4\ [kgf]$$

Por lo tanto, a partir de la comparación entre las fuerzas máximas admisibles, los elementos que se encuentran bajo una mayor solicitación son las vigas IN 35 x 93,1 [kgf/m]

Como la carga máxima que se puede aplicar a cada viga es de 39685 [kgf] la carga total para ambas vigas es de $39685 * 2 = \mathbf{79370}\ [\boldsymbol{kgf}]$

Aplicando Factor de Seguridad de 3,174 la carga admisible total es de **25000 [kgf]**

5.4- Evaluación de las alternativas propuestas

5.4.1- Evaluación Técnica - Matriz de Evaluación

Una matriz de evaluación es un listado de criterios específicos y fundamentales que permiten medir con objetividad el nivel de cumplimiento de ciertos requisitos que son definidos por quien demanda un servicio.

Este método será aplicado para determinar el equipo que reúna la mayor cantidad de competencias desde el punto de vista técnico y que por lo tanto reemplazará al que se encuentra actualmente en funcionamiento.

5.4.2- Matriz de Evaluación Técnica de Aspectos Imprescindibles

Existen ciertos criterios que se pueden considerar obligatorios o imprescindibles desde el punto de vista de la mantención y de la operación. Debido a que cada fabricante podría presentar equipos con distintas características desde el punto de vista del diseño, sólo se debiese evaluar que el equipo cumpla con los parámetros que permitan que la planta opere con normalidad, respetando ciertas características relacionadas con el espacio físico del lugar donde será instalado, alimentación de energía y condiciones ambientales.

En base a esto, a continuación se detalla una lista con los criterios a evaluar mediante una matriz de Evaluación de Aspectos imprescindibles, en esta matriz el criterio de evaluación es Cumple o No Cumple para cada criterio definido:

1. Ancho máximo del equipo [mm]
2. Largo máximo del equipo [mm]
3. Altura máxima del equipo [mm]
4. Eficiencia de clasificación
5. Capacidad máxima de tratamiento hora
6. Tipo de Harnero
7. Peso máximo

8. Energía
9. Mantenibilidad (tasa de mantención)
10. Costo de repuestos
11. No prototipo
12. Construcción abierta

EVALUACIÓN ASPECTOS IMPRESCINDIBLES HARNERO GRIZZLY

Criterios	Estándar exigido	LUDOWICI			METSO			HEWITT ROBINS		
		Cumple	No cumple	Observaciones	Cumple	No cumple	Observaciones	Cumple	No cumple	Observaciones
Ancho máximo del equipo	2400 [mm]	X			X			X		
Largo máximo del equipo	4600 [mm]	X			X			X		
Altura máxima del equipo	5000 [mm]	X			X			X		
Eficiencia de clasificación	>92%	X			X			X		
Capacidad máxima de tratamiento hora	1500 - 1600 [ton/hr]	X			X			X		
Tipo de harnero	Harnero Grizzly	X			X			X		
Peso máximo	25 [ton]	X			X			X		
Energía	50 [Hp] 380 [V] 50 [Hz]	X			X			X		
Mantenibilidad	Normal, inspecciones periódicas	X			X			X		
No prototipo	SI	X			X			X		
Construcción abierta	SI	X			X			X		

Fig. 17: Matriz Técnica de aspectos imprescindibles

5.4.3- Matriz de Evaluación Técnica Detallada

La Evaluación Técnica Detallada se orienta a calificar aquellos elementos que relacionan al equipo con su función operativa, entorno de trabajo y del operador y servicios post venta presentados en la oferta.

Las características principales a ser evaluadas son:

- Características Técnicas Operacionales, tales como rendimiento, dimensiones, ergonomía y mantenibilidad.
- Características de Servicio de mantención, como asesoría, asistencia técnica, capacitación para personal de operación y mantención y planes matrices de mantenimiento.
- Características de Servicio post venta, desarrollado por el oferente o a través de un tercero.

Los oferentes del servicio que aprueben la Evaluación Técnica Detallada, pasarán a la siguiente fase que corresponde a la Evaluación Económica.

EVALUACIÓN TÉCNICA HARNERO GRIZZLY

Criterios	Estándar exigido	LUDOWICI			METSO			HEWITT ROBINS		
		Cumple	No cumple	Observaciones	Cumple	No cumple	Observaciones	Cumple	No cumple	Observaciones
Incluye manuales de mantenimiento, partes, operación y planos	SI	X			X			X		
Asistencia en Chile por parte de oferente con infraestructura	SI	X			X				X	No posee instalaciones
Asistencia del fabricante para montaje, pruebas y puesta en marcha del equipo.	SI	X			X			X		
Suministro de repuestos	SI	X			X			X		
El proveedor indica la cantidad mínima de repuestos críticos y de uso frecuente, junto a plazo de entrega	SI	X			X			X		
Garantía mínima de 12 meses a partir de puesta en marcha	SI	X		18 meses de garantía	X			X		
Equipos testeados y certificados en fábrica	SI	X			X			X		
Capacitación de personal operador y mantenedor	SI	X			X			X		
Nivel de servicio del equipo	Servicio pesado + polvo en suspensión	X			X			X		
Ancho máximo del equipo	2400 [mm]	X			X			X		
Largo máximo del equipo	4600 [mm]	X			X			X		
Altura máxima del equipo	5000 [mm]	X			X			X		
Eficiencia de clasificación	>92%	X			X			X		
Capacidad máxima de tratamiento hora	1500 - 1600 [ton/hr]	X			X			X		
Tipo de harnero	Harnero Grizzly	X			X			X		
Peso máximo	25 [ton]	X			X			X		
Energía	50 [Hp] 380 [V] 50 [Hz]	X			X			X		
Mantenibilidad	Normal, inspecciones periódicas	X			X			X		
No prototipo	SI	X			X			X		
Construcción abierta	SI	X			X			X		

Fig. 15: Matriz de Evaluación Técnica Detallada

Con respecto a la mantenibilidad resulta más conveniente el Harnero Metso, modelo LH1848G ya que ofrece similares características en lo que respecta a la posición del motor con respecto al equipo, es decir el acceso es por el lado del motor y por lo tanto se puede levantar con un monorriel, no es el caso con el Harnero Hewitt Robins, modelo V-Line V-11, cuya caja excitadora se ubica por debajo de la parte trasera del equipo y por lo tanto su reemplazo se ve dificultado, considerando que tienen un peso cercano a los 500 [kg] y no es posible acceder con un tecle.

Adicionalmente se debe considerar la existencia de un contrato llamado "Servicio de mantención general de equipos planta", que en este momento se encuentra bajo la responsabilidad de la empresa Metso, esto implica ventajas desde el punto de vista de la respuesta ante eventualidades con respecto a la obtención de repuestos y las mantenciones del equipo.

Desde el punto de vista de la seguridad, ningún equipo presenta desventajas, ya que la zona de la tolva donde se encuentran los sistemas excitadores están completamente cerradas con una plataforma y por lo tanto no representan mayor inconveniente.

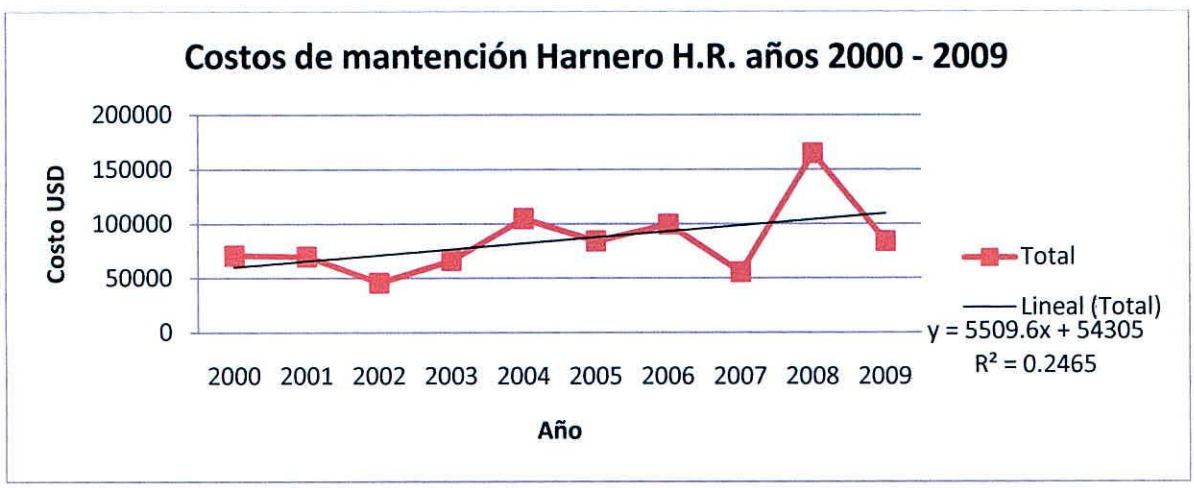
6.- ANÁLISIS ECONÓMICO

Para determinar los costos de mantención destinados al equipo, se utilizó la base de datos del sistema SAP, desde el año 2000 hasta el año 2009, primero se obtuvieron los costos asociados a las ordenes de trabajo.

Desde el año 2000 hasta fines del año 2009 se gastaron USD 846.075, con un costo promedio de USD 84.607 por año como se muestra a continuación:

Año	Total
2000	71035,02
2001	70039,55
2002	45782,06
2003	66218,68
2004	104844,45
2005	84109,62
2006	99513,56
2007	55639,11
2008	164900,74
2009	83992,8
Total	**846075,59**

Estos costos presentan una tendencia al alza, según el grafico que se muestra a continuación:



Si bien esta tendencia al alza está comprobada, para llevar a cabo los cálculos se utilizará solo el promedio de los costos que van desde el año 2000 hasta el 2009 y no se utilizará la proyección de los costos dentro de los 5 años que se planea evaluar, esto es debido a que los costos que se prevén resultan demasiado elevados y podrían inclinar bastante el resultado de los cálculos.

El precio del Harnero fabricado y armado en Maestranza interna, sin incluir medición de amplitud y balanceo es de **USD 42.800**, a continuación se presenta el desglose de este valor de acuerdo a los repuestos que son utilizados, todas las cifras son el USD.

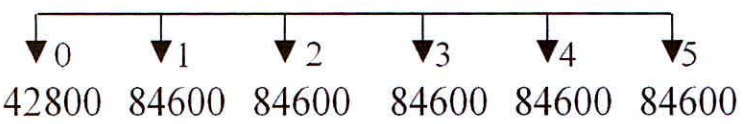
Fabricación de harnero	22000
Vigas 6 [un]	10200
Eje	5000
Camisa eje	1700
Armado	1700
Revisión	1700
Pernos y tuercas	300
Golillas	200
Total	**42800**

Adicionalmente se debe considerar que las parrillas tienen un valor de USD 800 las parrillas cortas y USD 1200 las parrillas largas, el harnero utiliza 8 parrillas cortas y 4 parrillas largas, lo que totaliza USD 13200.

Cálculo de costos Alternativa 1: No realizar cambios

A continuación se presenta de forma independiente el cálculo del Valor Actual Neto (VAN) de los costos de reparación del Harnero para los 5 años de evaluación sin incluir las pérdidas que se encontraron en la molienda, este cálculo servirá para obtener el Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE) , para realizar estos cálculos se considera una tasa de descuento de 10%

De acuerdo a lo anterior, el flujo de los costos queda expresado mediante un primer gasto en el periodo 0, que es el costo del harnero fabricado en maestranza y cinco gastos desde el periodo 1 hasta el 5, todos de USD 84600, que es el promedio de los costos de mantenimiento, desde el año 2000 hasta el 2009.



Una vez armado el flujo de costos, se calcula el VAN,

$$VAN = 42.800 + \frac{84.600}{1{,}1^1} + \frac{84.600}{1{,}1^2} + \frac{84.600}{1{,}1^3} + \frac{84.600}{1{,}1^4} + \frac{84.600}{1{,}1^5}$$

$$VAN = 42.800 + \frac{84.600}{1{,}1} + \frac{84.600}{1{,}21} + \frac{84.600}{1{,}331} + \frac{84.600}{1{,}4641} + \frac{84.600}{1{,}61051}$$

Resultando: $VAN = 363.500{,}561$

A partir del VAN obtenido se calcula un Payment de 5 periodos, que es equivalente al CAUE.

Luego el costo anual para la alternativa de no realizar cambios es:

$$CAUE = 363.500{,}561 * \left(\frac{1{,}1^5 * 0{,}1}{1{,}1^5 - 1}\right) = \boldsymbol{USD\ 95.890{,}53}$$

Con respecto a las pérdidas de la molienda asociadas a las detenciones del equipo, se realiza el siguiente supuesto:

- Se identificarán las detenciones del equipo que han sido más significativas durante el período de análisis.

- Se determinará la producción de la molienda para cada uno de esos períodos.

- Se calculará el promedio de la producción dentro del total de los períodos

- A partir de la diferencia entre el promedio de producción normal y el promedio en período de detención se calcula las pérdidas utilizando el valor promedio de la libra de Cobre para el año 2009 con una Ley de Cobre del 1% y recuperación del 87%.

- Teniendo en cuenta que el comportamiento del equipo a lo largo de los últimos 10 años ha sido relativamente constante en lo referente a las fallas, se asumirá que se mantendrá constante durante el período de evaluación y por lo tanto las pérdidas de producción en la molienda serán similares.

En base a lo explicado anteriormente, los parámetros a utilizar para calcular las pérdidas son los siguientes:

Parámetros Planta Sur

Periodo de Evaluación [años]	5
Nivel de Producción [ton/hr]	1491,66
Ley de Cobre	1%
Precio del Cobre [U/lb]	3,123
Recuperación	87%
Tasa de descuento	10,00%
1 [kg]	2,2046 [lb]

La producción en [ton/hr] de la Molienda Convencional por hora de detención de Harnero Hewitt Robins 6x14` y los respectivos promedios son los que se muestran a continuación:

Producción

1262,08898	1561,78628	1483,59912	753,2485435	1154,88624
1550,46871	1593,26848	1389,76786	236,8046081	1236,96448
1544,98394	1585,45459	1033,37899	476,2638561	1409,84732
1519,43528	1578,504	1391,69038	1226,351555	1409,04917
1580,79455	1587,22588	1483,27102	1469,016359	1361,05636
1487,44949	1600,86754	1483,10713	1464,691284	1363,04957
1550,16363	1613,71392	1405,71969	1438,460499	1325,86968
1613,82892	1611,88384	1518,46105		
1617,62114	1617,35301			
1621,22575	1618,0918			
1366,54147	1560,69499			
1464,5806	1608,43706			
1608,14517				

Promedios

1522,10213	**1594,77345**	**1398,6244**	**1009,262387**	**1322,9604**

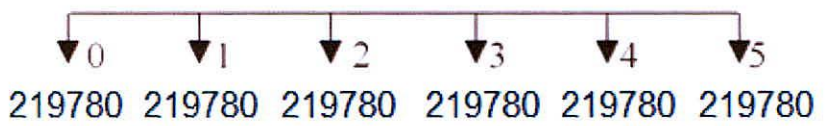
El promedio general de la producción para las horas de detención del equipo es de **1413,59 [ton/hr]**, luego la producción estándar de la Molienda es de **1491,66 [ton/hr]**, por lo tanto se ha dejado de producir **78,06 [ton/hr]**.

A partir de la diferencia de producción obtenida anteriormente se calcula las pérdidas por hora y por la totalidad del tiempo de detención:

Año 2009		
Pérdidas	**Kg**	**USD**
Por Hora	78067,44	4676,17722
Total	3669169,55	219780,33

Por lo tanto la pérdida del año 2009 para Molienda producto de la detención del equipo es de **USD 219.780**

Adicionalmente, el VAN de las pérdidas en la molienda se calcula a continuación, al igual que en los costos calculados para el harnero, la tasa a utilizar es del 10% se considera pérdida en el periodo 0.



El VAN queda expresado de la siguiente forma:

$$VAN = 219.780 + \frac{219.780}{1{,}1^1} + \frac{219.780}{1{,}1^2} + \frac{219.780}{1{,}1^3} + \frac{219.780}{1{,}1^4} + \frac{219.780}{1{,}1^5}$$

$$VAN = 219.780 + \frac{219.780}{1{,}1} + \frac{219.780}{1{,}21} + \frac{219.780}{1{,}331} + \frac{219.780}{1{,}4641} + \frac{219.780}{1{,}61051}$$

$$VAN = 1.052.919{,}12$$

Luego el costo anual equivalente de las pérdidas en molienda es:

$$CAUE = 1.052.919,12 * \left(\frac{1,1^5 * 0,1}{1,1^5 - 1}\right)$$

$$CAUE = \boldsymbol{USD\ 277.757,41}$$

Por lo tanto el costo de no realizar cambios es de 95.890,53 + 277.757,41 = **USD 373.647,94** anuales, que suman un total de **USD 1.416.419,68** para un período de 5 años.

Cálculo de costos alternativa 2: Aplicar mejoras al equipo existente y al lugar físico donde se encuentra

Pérdidas en molienda producto de modificación en Planta Sur, teniendo en cuenta que Planta Oeste produce 1100 [ton/hr] y OP1 500 [ton/hr] y la detención es de 14 días.

Pérdidas	Ton	USD
Por hora	100,00	5989,92
Por día	2400,00	143758,09
Total	33600,00	2012613,20

El costo total estimado es cercano a **USD 2.000.000**

Calculo de costos alternativa 3: Cambiar el equipo existente

El criterio para realizar la comparación desde el punto de vista económico es analizar los posibles costos que tendrían para la mantención los equipos propuestos para reemplazar el que se encuentra actualmente en uso, por lo tanto se dará valor a las mantenciones indicadas por los fabricantes, es decir se deben tener en cuenta las piezas y partes que el fabricante indique que se deben reemplazar, también se debe considerar las tasas de mantención recomendadas, de este modo el equipo que tenga menores tasas de mantención y utilice una menor cantidad de materiales resultará más conveniente.

Se supondrá que los equipos propuestos por los fabricantes no generarán detenciones de alta duración que impliquen pérdidas, esto debido a que son completamente nuevos, además de estar probados por el fabricante.

Con respecto a los precios de compra de los equipos, se trabajará utilizando una estimación a partir de los precios de otros equipos similares comprados con anterioridad por la división.

A continuación se presentan las alternativas propuestas por los 3 oferentes, se incluye un estimativo del precio del equipo (que por tratarse de equipos con características similares en cuanto a dimensiones y potencias, se asumirá tienen el mismo precio de mercado), las recomendaciones por parte del fabricante y la tasa anual de mantenciones.

Alternativa 1: Harnero Ludowici, modelo BRU 180/405-1xUE80

Precio estimado: USD 200.000

Se recomienda también comprar: Excitador UE80 precio estimado en USD 15.000, barras de clasificación (Bisalloy 360)

Mantenciones proyectadas anuales: Se recomienda realizar cambio de barras de clasificación cada 2 meses.

Adicionalmente se reemplazará el excitador a mediados del período de análisis, es decir en el tercer año.

Total a invertir: USD 215.000

Alternativa 2: Harnero Metso, modelo LH1848G

Precio estimado: USD 200.000

Se recomienda también comprar: Mecanismo vibrador estimado en USD 15.000

Mantenciones proyectadas anuales: Cambio de barras de clasificación de acuerdo a desgaste observado en inspecciones periódicas.

Adicionalmente se reemplazará el excitador a mediados del período de análisis, es decir en el tercer año.

Total a invertir: USD 215.000

Alternativa 3: Harnero Hewitt Robins, modelo V-Line V-11

Precio estimado: USD 200.000

Se recomienda también comprar: Rodamientos y sellos estimados en USD 4.000

Mantenciones proyectadas anuales: Se debe chequear el estado del aceite cada 300 [hr] y llevar a cabo cambio de aceite cada 1000 [hr], adicionalmente se recomienda realizar inspecciones periódicas.

El fabricante asegura la continuidad en la operación del excitador a lo largo del período de análisis.

Total a invertir: USD 204.000

El cambio de barras de clasificación o parrillas se considera similar para las tres alternativas ya que las condiciones de trabajo son exactamente las mismas (factores ambientales, granulometría del mineral, dureza del mineral, flujo de alimentación), por lo tanto no se utilizará ya que no representa una forma de diferenciar los equipos.

La comparación desde el punto de vista económico de los tres equipos se realiza en forma directa, debido a que en los tres casos la compra de algún elemento adicional se debe efectuar al comienzo del período de evaluación y por lo tanto no se debe actualizar su valor ya que no es afectada por la tasa de descuento, por lo tanto se comparan los precios obtenidos anteriormente.

El precio final para el Harnero Hewitt Robins, modelo V-Line V-11, es de **USD 204.000**, los Harneros Ludowici, modelo BRU 180/405-1xUE80 y Metso, modelo LH1848G resultan tener precios similares de **USD 215.000**, por lo tanto el modelo más conveniente desde el punto de vista económico es el ofrecido por Hewitt Robins.

7.- RESULTADOS

Del análisis técnico se concluye que el equipo más conveniente es el Harnero Metso, modelo LH1848G ya que ofrece ciertas ventajas desde el punto de vista de la mantenibilidad, principalmente la posición del motor que es lateral y se puede instalar tanto a la derecha como a la izquierda del equipo, esto facilita los trabajos de mantención ya que permite izar el motor utilizando un tecle montado a un monorriel que se ubique por sobre el motor, también facilita la extracción de los ejes excéntricos.

Otro punto a tener en consideración es la existencia de un contrato llamado "Servicio de mantención general de equipos planta", que en este momento se encuentra bajo la responsabilidad de la empresa Metso, esto implica ventajas desde el punto de vista de la respuesta ante eventualidades con respecto a la obtención de repuestos y las mantenciones del equipo que serían efectuadas por personal de Metso.

El análisis económico indica que la mejor alternativa para solucionar la situación actual de la Planta Norte es el cambio del Harnero Hewitt Robins 6` x 14`, ya que las otras alternativas resultan demasiado costosas dentro del horizonte analizado.

El equipo que resulta más conveniente desde el punto de vista económico es el Harnero Hewitt Robins, modelo V-Line V-11, que se encuentra por debajo de las otras dos opciones por un monto de **USD 11.000**

Finalmente en base a lo mencionado anteriormente se recomienda realizar el cambio del Harnero Hewitt Robins 6` x 14` que actualmente se encuentra en funcionamiento por el Harnero Metso, modelo LH1848G.

IV.- Conclusiones

Este Trabajo de Titulación ha sido desarrollado íntegramente en la Planta de Chancado Grueso de la División Andina de Codelco, el objetivo planteado fue desarrollar un estudio técnico a las plantas de chancado Norte y Sur que alimentan a la molienda convencional, determinando el estado de los equipos en cuanto a su confiabilidad y disponibilidad con el objetivo de establecer alguna mejora que implique obtener beneficios desde el punto de vista de la mantención y de la economía que se podría lograr en un plazo de 5 años.

En general se puede observar que cualquier mantención o cambio en alguna de las plantas que implique una detención de días, resulta muy costosa ya que se ve mermada la producción de mineral chancado que va a molienda y por lo tanto, es válido analizar las alternativas que impliquen realizar cambios definitivos.

Con respecto a los datos analizados que fueron recogidos de SAP, se hace clave destacar la importancia de manejar información que sea clara y precisa, ya que esto permite tomar decisiones con mayor seguridad de obtener resultados que resulten provechosos para la organización.

La metodología para la Resolución de Problemas de Inventiva TRIZ es una herramienta sumamente útil, ya que permite agilizar el proceso de diseño y de mejoras a diseños ya existentes, se comprobó que las respuestas que nos permite obtener podrían dar solución definitiva al problema en cuestión, sin ser necesario un análisis de mucha complejidad y por lo tanto su aplicación debiese ser más difundida en todo ámbito.

En general cuando se desea evaluar un proyecto, o una mejora o modificación a alguno ya existente, se debe tener en consideración que si bien, una alternativa a desarrollar cumple con todos los requerimientos técnicos, puede no ser óptima desde el punto de vista económico y por lo tanto se debe evaluar más de una opción para finalmente determinar la que sea más satisfactoria tanto desde el punto de vista técnico, como económico.

V.- Bibliografía

1. Arata, L. Furlanetto, "Gestión de Activos & Mantenimiento", RIL editores, 2005.
2. José Miguel Gramsch, "Diseño e implementación de un sistema de cálculo automatizado de la confiabilidad de equipos", MAPLA 2006
3. Ana Eugenia Luna, "Teoría de la Confiabilidad", Universidad de Buenos Aires Febrero 2005
4. http://www.reliabilityweb.com/excerpts/excerpts_espanol/La_Cultura_de_Confiabilidad_8.PDF
5. http://www.mitecnologico.com/ia/Main/AnalisisDeReemplazo
6. Fernando Espinoza Fuentes, "Aspectos Financieros del Mantenimiento", Universidad de Talca
7. Diseño en Ingeniería mecánica – Shigley – 8va edición
8. Manual de diseño de acero ICHA
9. Apuntes Fundamentos de Diseño, Pedro Sariego P.
10. www.triz.net
11. www.triz-journal.com
12. www.codelco.cl