Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica – Eléctrica y Mecatrónica

IMPLEMENTACION DE UNA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO MEDIANTE RCM II AL AREA DE MOLIENDA DE UNA PLANTA CONCENTRADORA DE 140K TMD

Tesis presentada por el Bachiller:

Alex Buheso, Peter

Pachas Lovon, Victor Manuel

Para Optar el Título Profesional de:

Ingeniero Mecánico – Electricista

Asesor:

Ing. Jesús Donayre Cahua

AREQUIPA – PERU

2019

Universidad Católica de Santa María
(51 54) 382038 Fax:(51 54) 251213 ucsm@ucsm.edu.pe http://www.ucsm.edu.pe Apartado:1350
AREQUIPA - PERÚ

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECANICA, MECÁNICA ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA

INFORME DICTAMINATORIO

VISTO

EL BORRADOR DE TESIS TITULADO:

"IMPLEMENTACION DE METODOLOGIA RCM PARA EL AREA DE MOLIENDA DE PLANTA CONCENTRADORA DE 140,000 TMD DE CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO DE CONCENTRADO DE COBRE"

Presentado por el Bachiller:

PETER ALEX BUHESO

VICTOR MANUEL PACHAS LOVON

Nuestro **DICTAMEN** es:

APROBADO

OBSERVACIONES: Se sugiere corrección en el titulo "Implementación de una Estrategia de Mantenimiento mediante RCM II al área de Molienda de una Planta Concentradora de 140K TMD"

Arequipa, 05 Junio 2019

ING. MARCO CARPIO RIVERA

ING. JESUS DONAYRE CAHUA

DEDICATORIA

Esta tesis la dedico principalmente a mi familia; mi madre que siempre está pendiente de mí en cada paso de mi vida, a mi padre que es mi ejemplo a seguir y demostrarme que los sueños se pueden alcanzar; a mi hermano por motivarme a seguir adelante; ellos me han guiado en cada etapa de mi vida profesional y personal.

Peter Alex Buheso

Primero me gustaría dedicar la presente tesis hacia mi familia que ha sido el soporte todo este tiempo para poder seguir adelante en todos mis proyectos, manteniéndome siempre de pie.

Victor Manuel Pachas Lovon

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la vida y la salud que nos brinda para poder cumplir cada reto que nos pone. Gracias a mis padres por ser mi motivación para seguir adelante y cumplir cada reto que nos da la vida. Gracias a mi hermano por enseñarme que cuando uno quiere algo, todo es posible

A los amigos que han aportado tanto en mi crecimiento como persona y profesional, a los docentes de la universidad por los conocimiento y enseñanzas transmitidas, a los colegas y compañeros de trabajo que han aportado en el crecimiento y desarrollo de esta tesis

Peter Alex Buheso

Quisiera agradecer a Dios por acompañarme en este camino y darme la sabiduría para elegir esta carrera que tanto me apasiona

Victor Manuel Pachas Lovon

INTRODUCCION

Actualmente las empresas mineras buscan implementar diferentes estrategias de mantenimiento en todas sus áreas operativas, con el propósito de aumentar la disponibilidad de sus equipos, que afecta directamente la producción de planta.

La planta concentradora consta de cinco áreas: Chancado Primario, Molienda, Flotación, Filtros y Espesadores. Se analizará el área de molienda, ya que este es el área más crítica debido a que los equipos causan gran impacto a la producción, provocando pérdidas en costos por paralización total de la planta, altos costos en mantenimiento, deterioro de equipos muy caros, repuestos costosos y mucho tiempo de entrega de los mismos. Es por eso que es necesario la implementación de nuevas estrategias de mantenimiento para poder obtener una confiabilidad y disponibilidad alta.

El área de molienda consta de dos líneas de producción de 3963 t/h cada una. Cada línea consta de un molino SAG, un molino de bolas, cuatro alimentadores de placas, dos bombas de lodos, dos zarandas, dos nidos de ciclones.

RESUMEN

El siguiente trabajo "IMPLEMENTACION DE UNA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO MEDIANTE RCM II AL AREA DE MOLIENDA DE UNA PLANTA CONCENTRADORA DE 140K TMD" tiene como objetivo presentar una nueva metodología de mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM II); para mejorar la disponibilidad del área de molienda y por ende reducir costos de producción

Esta tesis se basó en la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad publicado por John Moubray RCM II que está basado para la norma SAE J1012,

En el capítulo I presentamos la metodología de investigación, problemática que tiene el área de molienda, para posteriormente plantearnos los objetivos generales y específicos, los alcances y limitaciones contemplados en esta tesis.

En el capítulo II se desarrolla el marco teórico empezando con una reseña histórica del mantenimiento, definición de las normas SAE JA1011 y JA 1012; así como conceptos utilizados en la metodología, como función, falla funcional, modo de falla, efectos de falla, selección de políticas de manejo de fallas, manejo de consecuencia de fallas y política de manejo de fallas.

En el capítulo III se realizó la descripción del área a analizar en este caso molienda. Empezando por el flow sheet para tener un mejor alcance y detalle de la operación; una descripción detalla de cada equipo que involucra la producción en el área de molienda (alimentador de placas, fajas trasportadoras, molinos de bolas y sag, bombas de pulpa, zarandas vibratorias y nido de ciclones)

En el capítulo IV se desarrolla el proceso de implantación del RCM II, iniciando con la determinación del equipo más crítico a analizar, el contexto operacional y los límites a ser analizados, con el AMEF y el árbol lógico de decisiones de tareas se procede con el análisis técnico económico que nos permitirá realizar un programa anual de mantenimiento que cumpla con aumentar la vida útil de los equipos, reducir los costos por pérdidas de producción, con una adecuada y pertinente toma de decisiones que esta soportado en un análisis de factibilidad técnico-económico.

Palabras claves: Estrategia, problemática y molienda

ABSTRACT

The following work "IMPLEMENTATION OF A MAINTENANCE STRATEGY THROUGH RCM II TO THE GRINDING AREA OF A CONCENTRATING PLANT OF 140K TMD" aims to present a new maintenance methodology based on reliability (RCM II); to improve the availability of the grinding area and therefore reduce production costs

This thesis was based on the reliability-centered maintenance methodology published by John Moubray RCM II which is based on SAE J1012,

In Chapter I we present the research methodology, problematic that the milling area has, to set out the general and specific objectives, the scope and limitations contemplated in this thesis.

Chapter II develops the theoretical framework starting with a historical review of maintenance, definition of SAE JA1011 and JA 1012 standards; as well as concepts used in the methodology, such as function, functional failure, failure mode, failure effects, selection of fault management policies, fault consequence management and fault management policy.

In chapter III the description of the area to be analyzed in this case was grinding. Starting with the flow chart to have a better scope and detail of the operation; a detailed description of each equipment that involves production in the grinding area (plate feeder, conveyor belts, ball and sag mills, pulp pumps, vibrating screens and cyclone nest)

Chapter IV develops the RCM II implementation process, starting with the determination of the most critical equipment to analyze, the operational context and the limits to be analyzed, with the AMEF and the logical task decision tree, proceed with the economic technical analysis that allows us to carry out an annual maintenance program that covers with increasing the useful life of the equipment, reducing the costs for production losses, with an adequate and adequate decision making that is supported in a technical-economic feasibility analysis .

Keywords: Strategy, problem and grinding

INDICE

INDICE DE CUADROS

INDICE DE TABLAS

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO I: GENERALIDADES

1.1. OBJETIVO GENERAL

Implementar el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM II) en el área de molienda, área más crítica de la planta, implementando nuevas estrategias de mantenimiento, analizando al equipo y sus componentes más críticos, reduciendo costos de mantenimiento y optimización de la planta.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Encontrar el equipo más crítico del área de Molienda.
- Analizar al equipo crítico del área de Molienda.
- Identificar los diferentes modos de falla del equipo crítico.
- Implementación de nuevas estrategias de mantenimiento.
- Reducir costos de mantenimiento

1.3. ALCANCES Y LIMITACIONES

1.3.1. Alcances

En el estudio de esta tesis se implementará el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM II) a los sistemas más críticos del equipo más crítico del área de Molienda vale decir el Molino SAG, empleando mejoras en las estrategias de mantenimiento una vez realizado el análisis de RCM II al equipo.

1.3.2. Limitaciones

- No se realizará el análisis RCM II a los sistemas eléctricos del molino SAG.
- Solo se aplicará la metodología RCM-II a los siguientes subsistemas: Estructura de protección del molino, Chute de alimentación del molino, Sistema de descarga del molino, sistema de accionamiento, sistema de lubricación y sistema de frenos.
- Se realizará cálculos de tiempos medios entre fallas con la data existente de la planta los cuales son limitados, ya que no se cuenta con una gran base de datos de falla, debido a que la planta tiene menos de 10 años de operación.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. HISTORIA RCM

Debido a que finales de los años cincuenta, el negocio de las aerolíneas sufría un alto índice de accidentes, dos accidentes por día, en cualquier parte del mundo. Donde dos tercios de estos accidentes eran producidos por fallas en los componentes del equipo. Así que era muy importante intervenir en una estrategia de mantenimiento que garantice la operatividad de los equipos.

Como el mantenimiento no era sostenible en aquellos años, y no había óptimos resultados, ya en la década de los 60, la Fuerza aérea americana y la industria de transporte aéreo formó un grupo para el estudio del mantenimiento preventivo.

Ya a mediados de 1970, el gobierno de los Estados Unidos quiso saber más sobre la nueva filosofía del mantenimiento de los aviones. Solicitando así un reporte a la industria aérea "United Airlines". Este reporte fue elaborado por Stanley Nowlan y Howard Heap titulándolo "RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE" (MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD), y fue publicado en 1978, siendo hasta el momento uno de los documentos más importantes en la historia del manejo de los activos.

Años más adelante Stan Nowlan continuó con su investigación y en 1983 con la colaboración de John Moubray dio lugar a RCM II. Queriendo evitar más el fracaso se basó en siete preguntas.

En 1999, SAE Internacional (SAE - Society of Automotive Engineers) Sociedad de Ingenieros automotrices introdujo la norma JA-1011, y más adelante la norma JA-1012 para definir los criterios del método RCM II y que estos se cumplan.

Actualmente el mantenimiento centrado en la confiabilidad - RCM es ampliamente aceptado por la industria aérea, siendo la forma más segura para viajar, reduciendo los índices de accidentes, un accidente cada tres o cuatro semanas en cualquier parte del mundo. Donde un sexto de estos accidentes es causado por fallas en los equipos.

2.2. NORMAS SAE

2.2.1. SAE - JA1011

La norma SAE JA1011 es utilizado para la adecuada selección de las políticas de manejo de fallas, bajo la suposición de que el activo y/o sistema haya sido ya seleccionado y definido. Esta no proporciona criterios de los procesos a ser utilizados en la selección y definición de activos o sistemas, ya que tales procesos tienden a ser

altamente dependientes del tipo de activo y/o sistema, para qué, y por quién están siendo usados.

2.2.2. SAE - JA1012

Amplifica y aclara cada uno de los criterios listados en SAE JA1011 y resume problemas adicionales que deben ser tomados en cuenta para aplicar RCM de manera más efectiva. Esta guía refleja las secciones de SAE JA1011 en la mayoría de su contenido explicando más detalladamente como se pueden combinar los elementos claves del proceso RCM para seleccionar políticas apropiadas de manejo individual de modos de falla y sus consecuencias.

2.3. MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD (RCM)

2.3.1. Concepto

El mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM – Reliability centered maintenance) es una de las estrategias de mantenimiento más utilizadas en las empresas de la actualidad con el fin de optimizar el proceso, reduciendo costos y aumentando el volumen de producción.

Esta técnica de mantenimiento nace en el campo aeronáutico, debido a la elevación de accidentes aéreos, cortos ciclos de vida de los equipos y altos costos en el mantenimiento. Ya superado estos tipos de problemas, el RCM fue trasladado a empresas industriales, después de comprobarse los excelentes resultados del RCM en el campo aeronáutico.

Se puede definir como la capacidad de un ISED (instalaciones, sistemas, equipos y dispositivos), de realizar su función de la manera prevista. De otra forma, la confiabilidad se puede definir también como la probabilidad en que un producto realizará su función prevista sin incidentes por un período de tiempo especificado y bajo condiciones indicadas.

2.3.2. Activo

"Para poder identificar las políticas del manejo de fallas de un activo o sistema, se tiene que definir al activo o sistema. Esto incluye la selección del activo, definir sus límites, y la identificación de detalle al cual se hará el análisis". (SAE JA1012, 2002, p.8)

2.3.3. Funciones

La función de un activo son los estándares de desempeño operacional deseados por el usuario de los cuales discute los siguientes conceptos:

a. Contexto Operacional
b. Funciones primarias y secundarias

c. Enunciado de una función
d. Estándares de desempeño

(SAE JA1012, 2002, pág. 27).

2.3.4. Fallas Funcionales

"Las fallas funcionales son todos los modos de falla de cada función del activo o sistema" (SAE JA1012, 2002, pág. 6).

2.3.5. Modos de Falla

"El RCM define al modo de falla como la causa de cada falla funcional. Es decir, el modo de falla es el que va a provocar la pérdida de la función operacional total o parcial de un activo.

Un modo de falla debe tener al menos un verbo y un pronombre. La descripción debe ser detallada de tal manera que facilite la selección de una política de manejo de fallas, pero no tan detallada ya que puede tomar demasiado tiempo poder realizar el análisis" (SAE JA1012, 2002, pág. 15).

2.3.6. Efectos de Falla

El efecto de falla es lo que puede pasar si ocurre el modo de falla, provocando una consecuencia operacional. En este punto se debe incluir toda la información necesaria para la evaluación de las consecuencias de la falla:

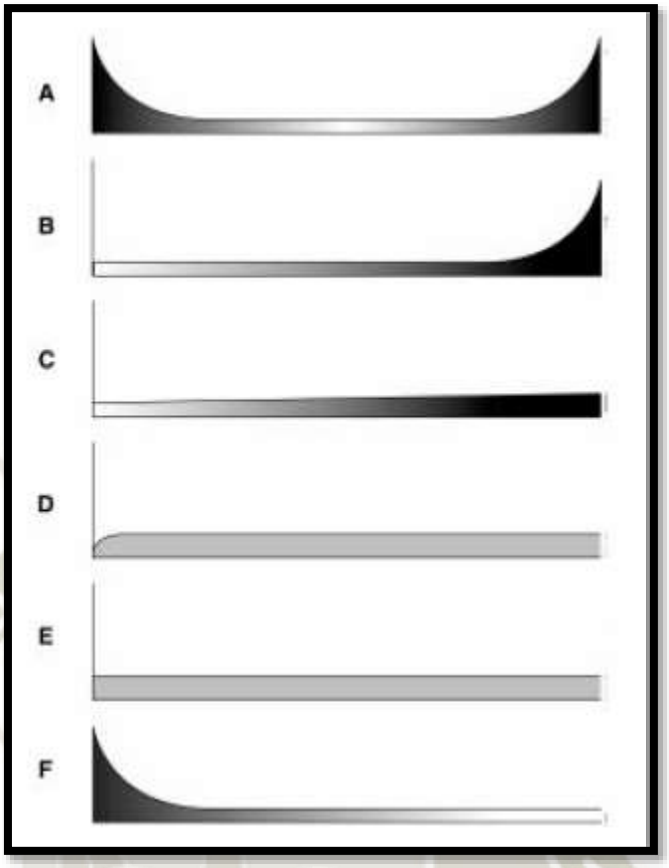
- Todas las evidencias de la falla.
- Daños para la seguridad o el medio ambiente.
- Daños físicos causados por la falla.
- Qué se debe hacer para reparar la falla.

2.3.7. Selección de políticas de Manejo de Fallas

"El proceso de selección de manejo de fallas debe tomar en cuenta el hecho de que la probabilidad condicional de algunos modos de falla se incrementará con el tiempo (o con la exposición al esfuerzo), que la probabilidad condicional de otros no cambiará con el tiempo y que la probabilidad condicional de otros tampoco decrecerá con el tiempo" (SAE JA1012, 2002, pág. 27).

Existen seis gráficos en las cuales la probabilidad de falla varía a medida que un elemento envejece, como se muestra en la Figura 1.

Figura N° 1 Diferentes probabilidades de falla en función al tiempo



Fuente: (SAE JA1012, 2002, pág. 27)

En las gráficas A y B hay un incremento veloz de la probabilidad condicional de falla, llamada también "zona de desgaste". En la gráfica C se mantiene un incremento en la probabilidad de falla, pero no se distingue una zona de desgaste. En la gráfica D muestra una probabilidad de falla baja cuando el componente es nuevo, entonces ocurre un incremento rápido hacia un nivel que crece lento o constante, mientras que el gráfico E muestra una probabilidad de falla constante para toda la longevidad (falla aleatoria). La gráfica F empieza con alta mortalidad infantil, cayendo a un decrecimiento constante o muy bajo de la probabilidad de falla (SAE JA1012, 2002, pág. 27).

2.3.8. Manejo de consecuencias de falla

"El manejo de consecuencias de falla es el manejo de la tarea hasta un punto de reducir la probabilidad del modo de falla a un nivel que sea tolerable para el usuario que no pueda causar consecuencias en seguridad, medio ambiente y económicas" (SAE JA1012, 2002, pág. 28).

2.3.9. Políticas de manejo de falla

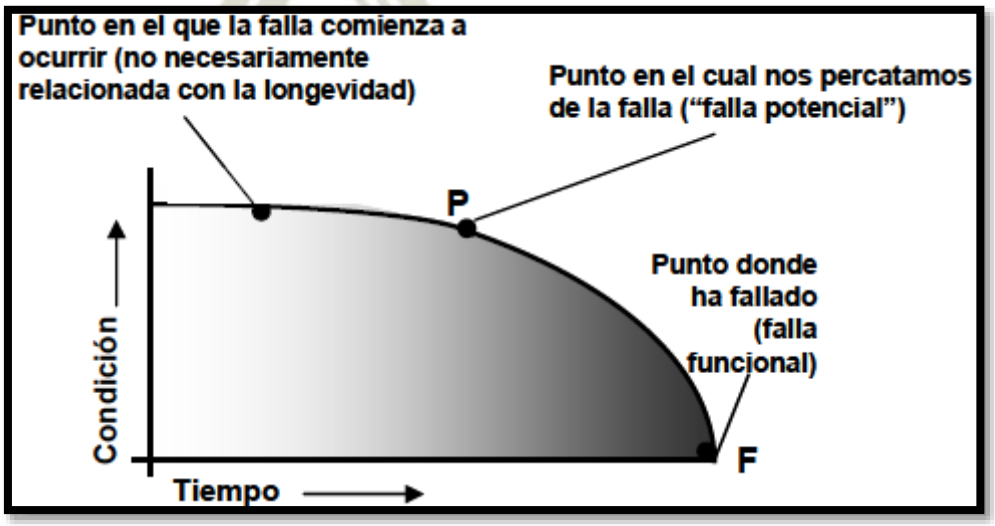
2.3.9.1. Tareas Basadas en la condición

Las tareas basadas en la condición que se seleccione sea predictiva, basada en condición, o de monitoreo de condición debe considerar los siguientes criterios:

a) Debe tener una falla potencial claramente definida.
b) Debe tener un intervalo P-F o período para el desarrollo de la falla.
c) El intervalo de la tarea debe ser menor que el intervalo P-F probable más corto.
d) Debe ser físicamente posible realizar la tarea en intervalos menores que el intervalo P-F.
e) "El tiempo entre la detección de una falla potencial y la ocurrencia de una falla funcional debe ser suficientemente largo para poder tomar una decisión a fin de evitar, eliminar o minimizar las consecuencias del modo de falla.

La mayoría de los modos de falla no ocurren instantáneamente del todo. En tales casos, es muy posible detectar que los elementos concernientes se encuentran en etapas finales de deterioro antes de alcanzar su estado de falla. "Esta evidencia de falla inminente se conoce como "falla potencial", la cual se define como "una condición identificable que indica que una falla funcional está a punto de ocurrir o está en un proceso de ocurrencia". Si esta condición puede ser detectada, podría ser posible tomar acción para prevenir que el elemento falle completamente y/o evitar las consecuencias del modo de falla" (SAE JA1012, 2002, pág. 27).

Figura N° 2 Condición vs Tiempo



Fuente: (SAE JA1012, 2002, pág. 33).

Si se detecta una falla funcional entre el punto P y el punto F de la Figura 2, este es el punto al cual podría ser posible tomar acción para prevenir la falla funcional y/o evitar sus consecuencias. Las tareas diseñadas para detectar las fallas potenciales se conocen como tareas basadas en condición (SAE JA1012, 2002, pág. 33).

Las tareas basadas en condición se llaman así porque los elementos se inspeccionan y se dejan en servicio bajo la condición de que continúen obteniéndose los estándares de operación especificados. Esto también se conoce como mantenimiento predictivo (porque nosotros estamos tratando de predecir si el elemento va a fallar en base a su comportamiento actual) o mantenimiento basado en condición (porque la necesidad de una acción correctiva o para evitar consecuencias está basada en una evaluación de la condición del elemento) (SAE JA1012, 2002, pág. 33).

2.3.9.2.Aproximación de diagrama de decisión

En todo el mundo se utilizan muchos diagramas de decisión. Algunos de los cuales están conformados muy cercanamente a los principios discutidos de la norma, mientras que otros diagramas se diferencian demasiado, tanto que no cumplen en absoluto con ninguna de las normas SAE JA011 y SAE JA012. Algunos de estos diagramas son propios, mientras que otros son del dominio público.

CAPITULO III

DESCRIPCION DE EQUIPOS AREA DE MOLIENDA

3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

"El presente proyecto está orientado al análisis de los equipos que conforman el sistema del área de Molienda de una Planta Concentradora, para ello haremos un análisis y descripción de cada equipo en el área de molienda, además requerimos describir el flow sheet del proceso productivo en el área de molienda donde aplicaremos el RCM" (Parra, Márquez, & Crespo, 2012).

3.1.1. Análisis de Flow Sheet del proceso

"El circuito de molienda está comprendido desde la descarga de la cuarta faja en el acopio de gruesos (stock pile de gruesos), hasta el envío de la pulpa hacia el área de flotación, desde los cajones disipadores de energía, ubicados después del rebose (overflow) del nido de ciclones de molienda. El límite del circuito cerrado con retorno al ingreso de los molinos SAG que está asociado al chancado de pebbles no comprenderá en este análisis" (Nowlan & Heap, 1978).

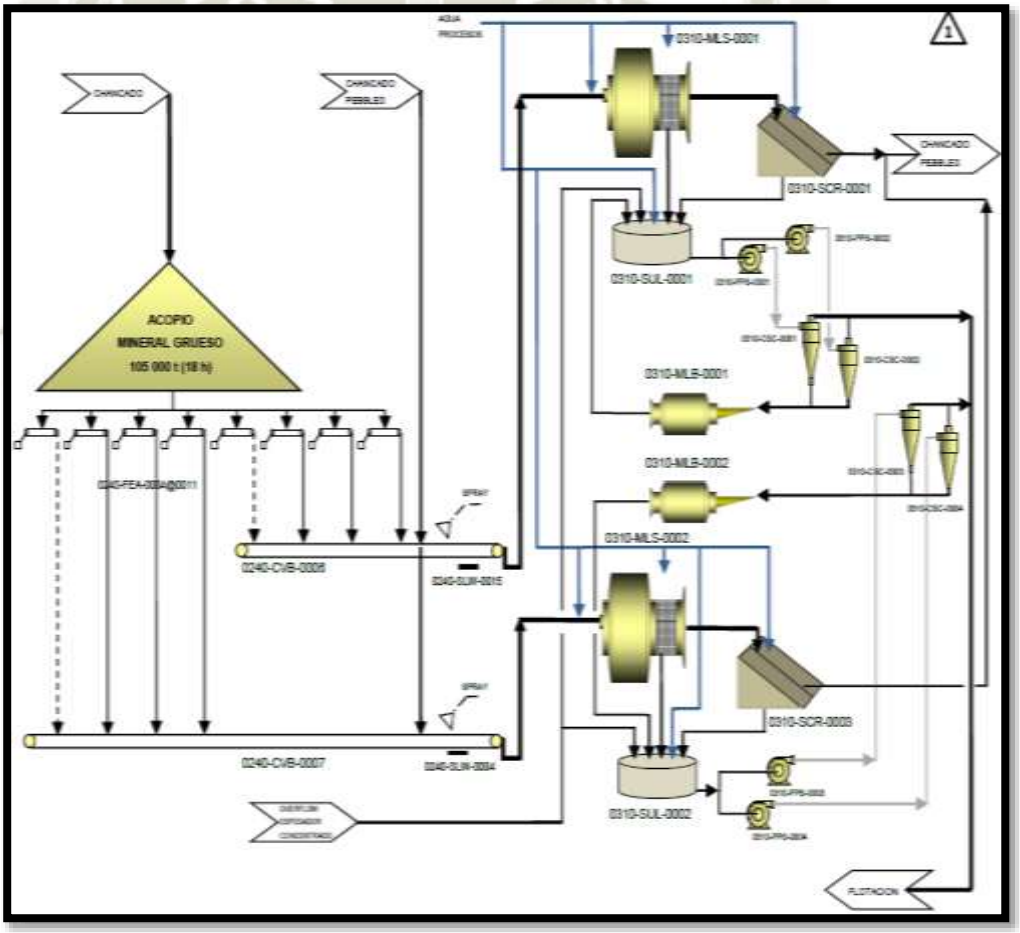
La planta de molienda contempla una autonomía de 18 horas de utilización, proporcionada por un acopio abierto de 105 000 t de capacidad viva. La descarga del acopio se realiza a través de ocho (08) alimentadores de placas (Apron feeders), que alimentan dos líneas independientes de molienda SAG (4 alimentadores por línea, 03 operando y 01 en stand by). La molienda, se compone de dos (02) molinos SAG operados en paralelo, cada uno provisto de un trommel corto, cuyo sobre-tamaño (over size) alimenta a la zaranda vibratoria que permite la clasificación de los pebbles. El producto grueso de la zaranda o sobre-tamaño, es conducido mediante fajas transportadoras a la planta de chancado de pebbles, mientras que el producto fino o bajo-tamaño (under size) es enviado al circuito de molienda de bolas, compuesto por cuatro (04) nido de ciclones y dos (02) molinos de bolas (dos nidos y un molino de bolas operando con cada línea de molienda SAG). La operación normal contempla el retorno de la totalidad de los pebbles chancados a la alimentación de la molienda SAG, y dicho circuito tiene una generación de pebbles equivalente a un 25 % de la alimentación fresca de la molienda SAG.

La molienda de bolas se realiza a través de 2 líneas paralelas independientes de molinos en circuito cerrado inverso, cada línea de molienda de bolas es alimentada desde una línea en específico de molienda SAG, además, cada línea de molienda tiene asociada 02 nidos de 12 ciclones cada una (04 nidos en total). El producto de bajo-tamaño de los

ciclones (overflow) es conducido a la alimentación de la flotación rougher previa clasificación y muestreo de la pulpa, en tanto que el sobre-tamaño (underflow) de los ciclones es retornado al circuito de molienda de bolas. Dicho circuito tiene una carga circulante equivalente a un 30 % con respecto a la alimentación del producto de la molienda SAG.

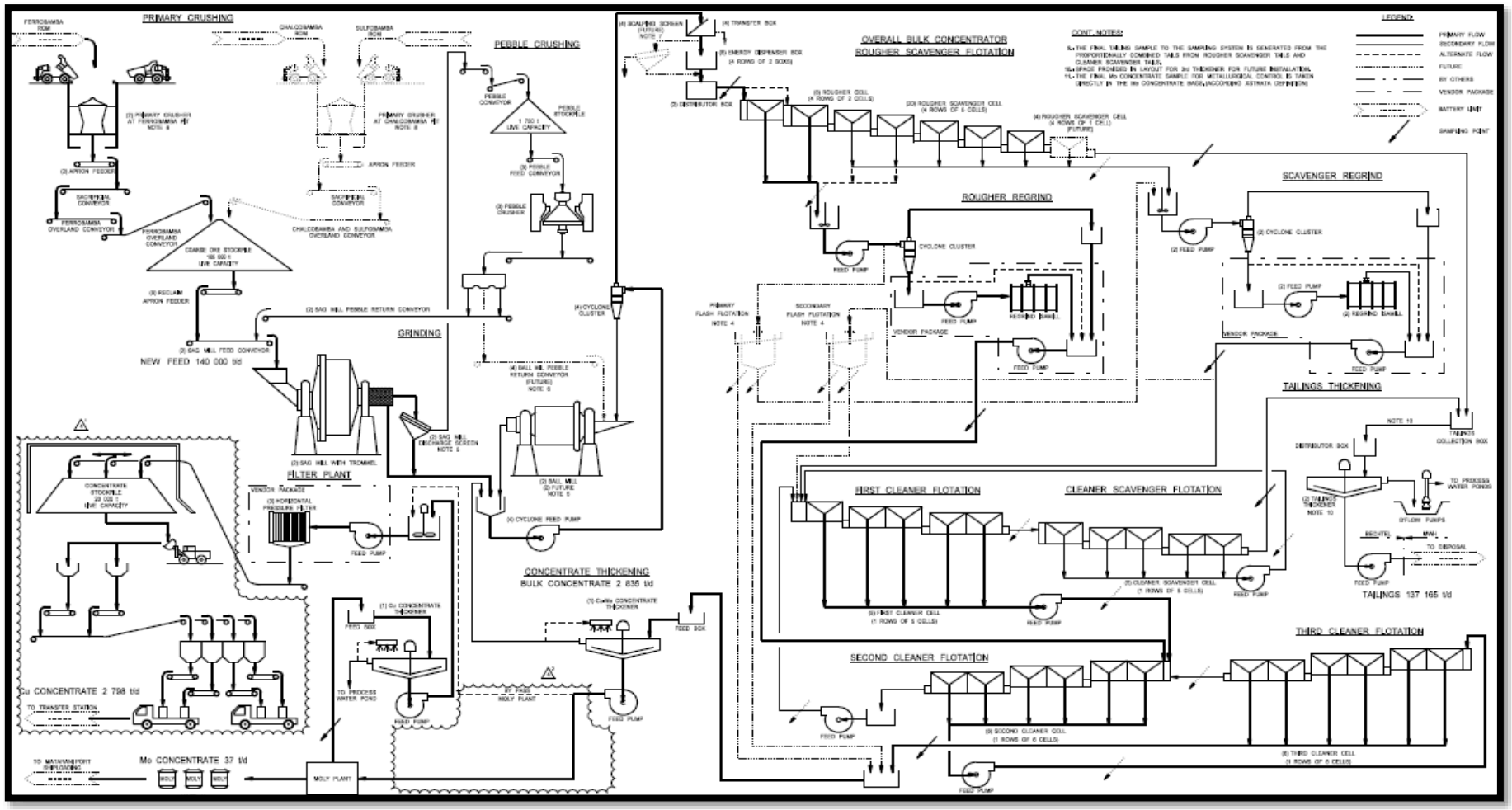
"El diseño de la planta ha considerado un tratamiento promedio de 140 000 t/d de mineral, con un esquema operacional de 365 días por año, 24 horas por día y 92 % de utilización efectiva. Se ha estimado un producto final de molienda que alimenta la etapa de flotación, con granulometría P80 de 240 micrones y 38 % de sólidos en peso" (Bechtel Chile LTDA., 2012).

Figura N° 3 Flow Sheet del área de Molienda



Fuente: (Bechtel Chile LTDA., 2012, pág. 11)

Figura N° 4 Flow Sheet Proceso de una planta concentradora de Cobre



Fuente: Elaboración Propia

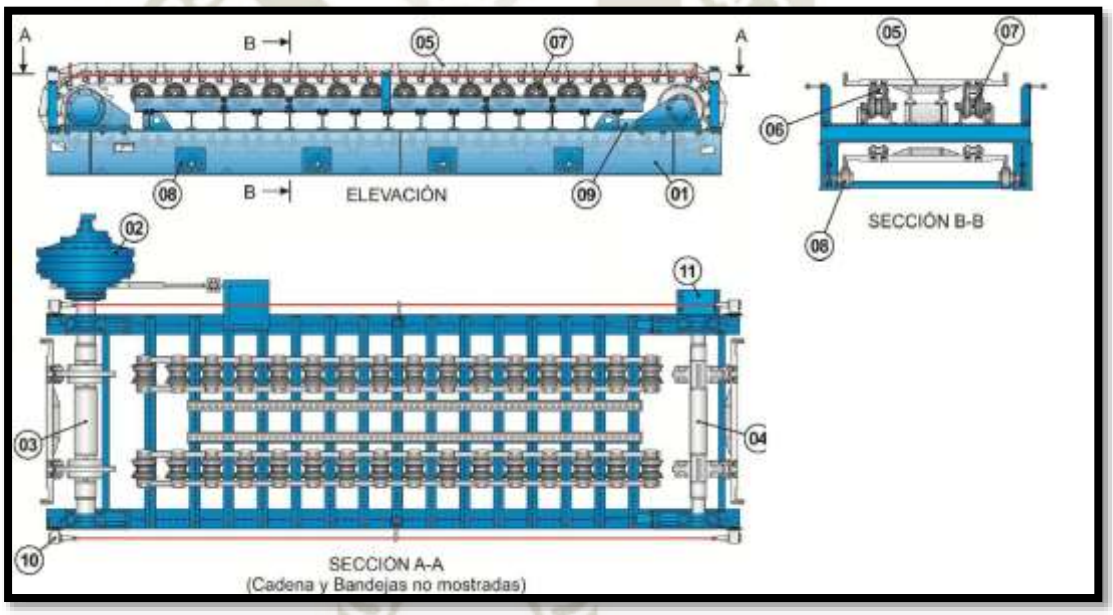
3.2. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS

3.2.1. Alimentador de Placas (Apron Feeder)

"El alimentador de placas (apron feeder) está diseñado para el desplazamiento gradual de mineral proveniente de chancado primario y almacenado en la pila de gruesos o stock pile de gruesos. Su construcción es reforzada con una base hecha de perfiles robustos de acero y componentes estándares similar a los equipos de línea amarilla (flota pesada o semi pesada) como cadenas y rodillos, lo que permite que el equipo sea usado para transportar material, de alta abrasión y con fuertes cargas de impacto. Se encuentran ubicados debajo de la pila de gruesos o stock pile de gruesos con la finalidad de soportar grandes impactos de rocas de 5" hasta 12" y abrasión constante para su posterior descarga a las fajas de alimentación a los molinos" (TECSUP , 2013, pág. 1) .

3.2.1.1.Componentes y partes del alimentador de placas

Figura N° 5 Partes del Alimentador de Placas.



Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro N° 1 Partes de Alimentador de Placas

PARTES DE ALIMENTADOR DE PLACAS	
N°	**COMPONENTES**
1	Estructura principal – Main Frame
2	Motor Hidráulico
3	Conjunto eje motriz (eje, chumaceras, sprockets)
4	Conjunto eje de cola (eje, chumaceras, sprockets)
5	Placas de acero al manganeso
6	Ramales de cadena AF-5
7	Rodillo de carga
8	Rodillo de retorno
9	Tensor de tornillo
10	Interruptor de emergencia (Pull Cord)
11	Sensor de velocidad

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro N° 2 Especificaciones técnicas del Alimentador de placas

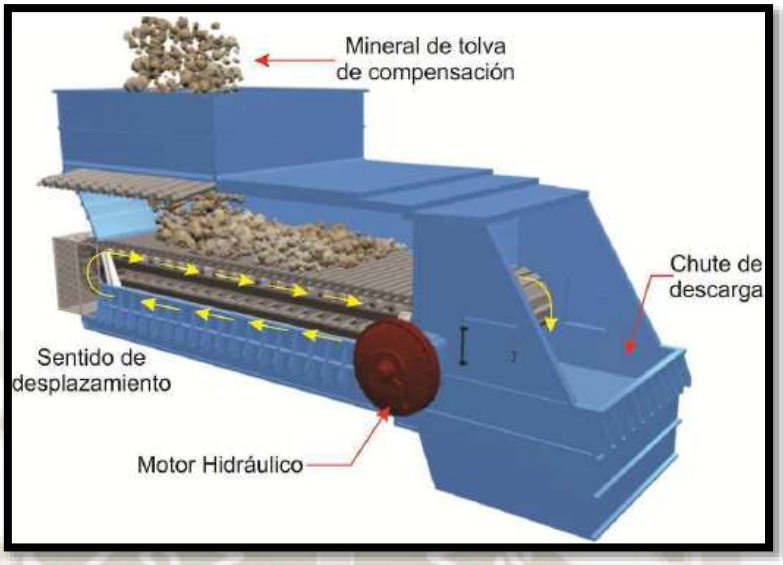
ESPECIFICACIONES TECNICAS	
DATOS GENERALES	
Fabricante	Metso
Longitud Horizontal	9.4 m
Capacidad Nominal	1279 t/h
Mineral a transportar	Cobre
Velocidad	Variador de Velocidad

Fuente: Catálogo vendor.

3.2.1.2.Función del Equipo

"Tiene como función desplazar o trasladar el material acopiado en la pila de gruesos o stock pile de grueso hacia las fajas de alimentación de los molinos sag. La capacidad nominal es de 1279 Tn/hr por cada alimentador" (TECSUP , 2013, pág. 1).

Figura N° 6 Alimentador de Placas.



Fuente: (TECSUP , 2013, pág. 2)

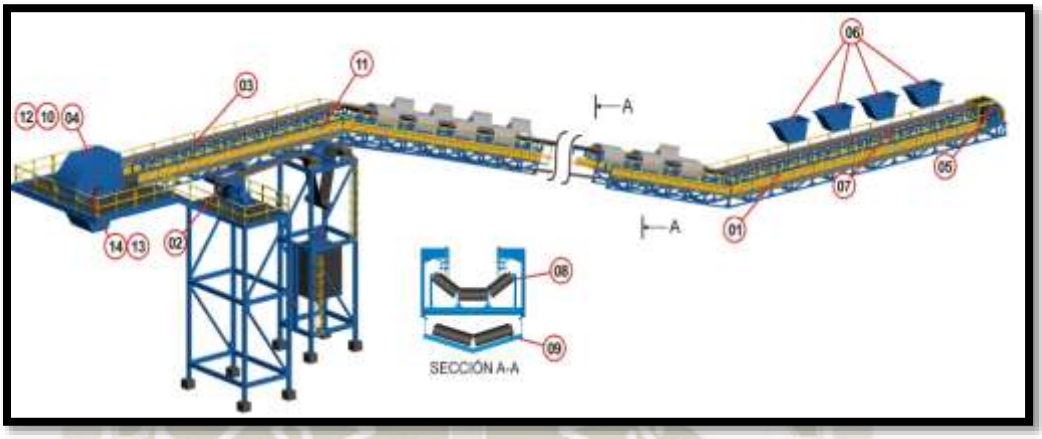
El mineral es recibido en las bandejas del alimentador, las cuales se encuentran empernadas a unas cadenas. Las cadenas se deslizan sobre rodillos de carga y retorno; dicho conjunto (cadena, bandejas y rodillos), es soportado en su parte media por rieles de impacto. "El conjunto de cadenas y bandejas, reciben energía desde las ruedas de tracción (sprokets), que se encuentran en el eje motriz; el cual es girado por acción de motor hidráulico. Con la acción del motor hidráulico se logra que el mineral que esta sobre las bandejas, sea transportado hasta el chute de descarga del alimentador, donde es descargado por gravedad, hacia la faja de alimentación de los molinos SAG" (TECSUP , 2013, pág. 1).

3.2.2. Faja de alimentación al molino SAG

"La faja de alimentación, transporta el mineral proveniente de los chutes de descarga de los alimentadores de placas (apron feeder), a velocidad constante. La alimentación de mineral al molino SAG, es realizada por la faja transportadora, también incluye las bolas de acero de 5", alimentadas por los carguíos de bolas que son utilizadas para el proceso de molienda; para mencionar que las bolas que van hacia los molinos son descargados por camiones en los Hopper (que son cajones de almacenamiento de bolas); los cuales tienen un sistema de alimentación por gravedad y tambores que van descargando en las fajas de alimentación al molino (cargada con mineral) el cual permite amortiguar la caída de las bolas que al caer se posicionan sobre el mineral y conjuntamente son alimentación al molino SAG" (TECSUP , 2013, pág. 1).

3.2.2.1.Componentes y partes de la faja de alimentación al molino SAG

Figura N° 7 Partes de faja de alimentación al molino SAG.



Fuente: (TECSUP Manual de Operación Planta concentradora, 2013, p. 4).

Cuadro N° 3 Partes de faja de alimentación al Molino SAG

PARTES DE FAJA DE ALIMENTACION AL MOLINO SAG	
N°	**COMPONENTES**
1	Bastidores (*Recordar que se tienen bastidores de carga y retorno)
2	Conjunto motor/reductor
3	Banda transportadora
4	Polea de cabeza (head pulley)
5	Polea de cola (tail pulley)
6	Chute de alimentación
7	Polines de impacto (impact polin)
8	Polines de carga (load polin)
9	Polines de retorno (return polin)
10	Chute de descarga (discharge chute)
11	Instrumentación (interruptor de emergencia, desalineamiento)
12	Raspadores (*Se puede tener más juegos de raspadores, terciario, etc)
13	Raspador primario
14	Raspador secundario
15	Limpiador en V (V-plow)

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro N° 4 Especificaciones técnicas de faja de alimentación al Molino SAG

ESPECIFICACIONES TECNICAS	
DATOS GENERALES	
Fabricante	STM
Capacidad	5905 TPH
Porcentaje de carga	74.89%
Ancho de faja	1829 mm (72 pulg.)
Velocidad máxima	3.2 m/s
Tensor	Contrapeso
Motor	
Tipo	Eléctrico
Potencia	500 kw.
Velocidad de giro	1800 RPM
Transmisión	
Tipo	Reductor/Acoplamiento
Velocidad de salida	Variable

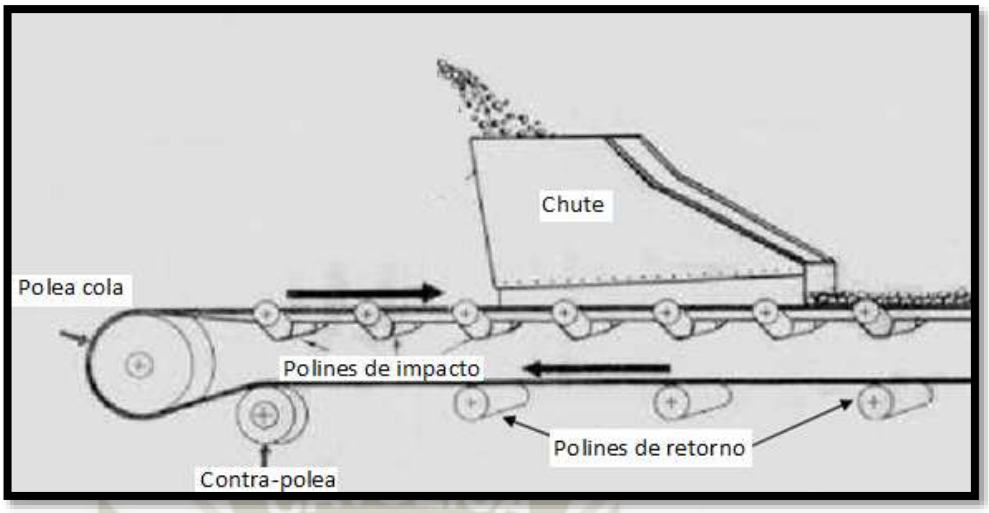
Fuente: Catálogo vendor.

3.2.2.2.Función del Equipo

"La faja transportadora, recibe el mineral de los alimentadores de placas; esta tiene una capacidad rango de 3170 a 3646 Tn/hr, con 1.8 metros (70.9") de ancho y 240 metros (9448.8") de largo y accionada por un motor eléctrico de 30 kW (40.2 HP) de potencia, conduce el mineral hasta la alimentación del molino SAG" (TECSUP , 2013, pág. 1)

En esta faja, encontramos una balanza, la cual permite registrar el peso de mineral que va pasando en una determina unidad de tiempo, este tiempo se regula por un sensor de velocidad ubicado en la polea de cola de la faja. "Esta faja transportadora, también se encarga de transportar el elemento de molienda usado en el SAG (bolas de acero), las cuales descargan en la faja, desde dos tolvas de almacenamiento, estas bolas tienen un diámetro de 5 pulgadas. El mineral descargado, cae sobre la faja en el punto de carga; en dicho punto, se encuentran los polines de impacto, los cuales amortiguan el impacto de la caída del mineral" (TECSUP , 2013, pág. 1).

Figura N° 8 Polines de Impacto.



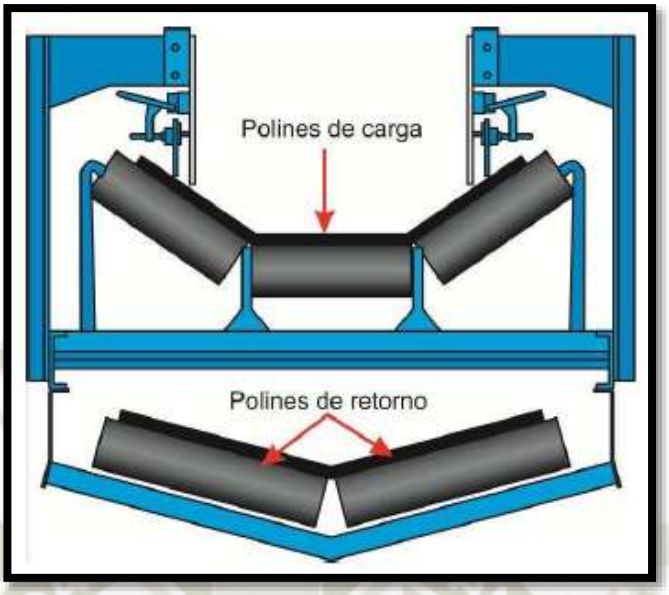
Fuente: Elaboración Propia.

La faja de alimentación se desplaza por fricción, por acción de la polea motriz, el cual recibe movimiento por medio del sistema de accionamiento, conformado por un motor-reductor.

Figura N° 9 Sistema de Accionamiento de la Faja de alimentacion al molino SAG.

Fuente: (TECSUP Manual de Operación Planta concentradora, 2013, p. 8).

Figura N° 10 Polines de carga y de retorno.



Fuente: Elaboración Propia.

De tal manera, la faja logra ser desplazada y por consiguiente el mineral que se encuentra en la superficie de la misma. El mineral transportado, cae por medio del chute de descarga de la faja al molino SAG. "Así mismo, durante el desplazamiento de la faja, esta se desplaza por medio de polines de carga, los cuales cumplen la función de soportar la faja y el mineral a transportar. El retorno de la faja, se logra por medio de polines de retorno, los que se encuentran ubicados debajo de los polines de carga" (TECSUP , 2013, pág. 1).

La faja cuenta con un tensador automático por gravedad (contrapeso), el cual está destinado a cumplir dos funciones:

- Proporcionar la tensión adecuada, para generar la adherencia de la faja a la polea motriz.
- Compensar el estiramiento de la faja, mediante la reubicación del contrapeso (tensador mecánico por gravedad).

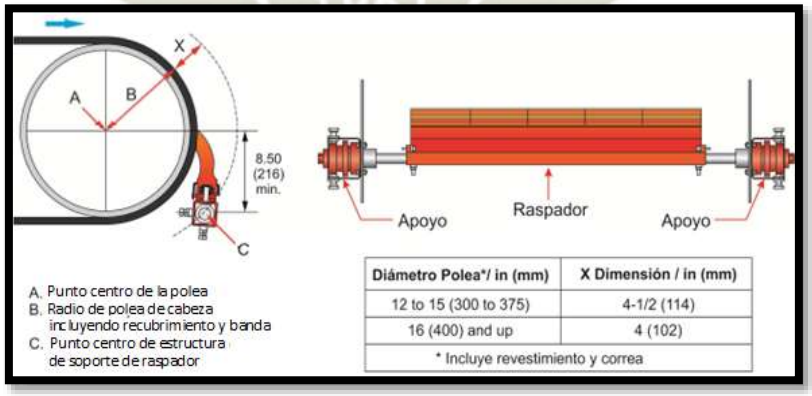
Figura N° 11 Tensador automatico faja de alimentacion al molino SAG.

Fuente: (TECSUP Manual de Operación Planta concentradora, 2013, p. 6).

"La limpieza de la faja de alimentación (faja transportadora), se realiza por medio de accesorios de limpieza, los cuales evitan que el mineral que no se descargó con el resto y que se encuentra adherido a la faja, no regrese por el tramo de retorno; ya que puede ocasionar desgastes excesivo o prematuro y hasta un daño mayor en la banda transportadora, los polines de retorno y las poleas" (TECSUP , 2013, pág. 6)

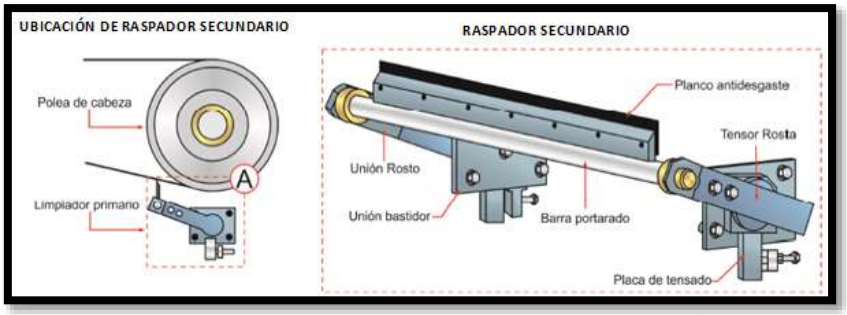
Dentro de estos accesorios se tienen instalados un limpiador primario, un limpiador secundario; que se encuentran ubicados en el retorno de la polea de cabeza y un limpiador en "V" o V-plow; que se encuentran ubicados en el retorno de la polea de cola (Ver Figura 11, figura 12 y figura 13) (TECSUP , 2013, pág. 7).

Figura N° 12 Accesorio de Limpieza – Raspador primario



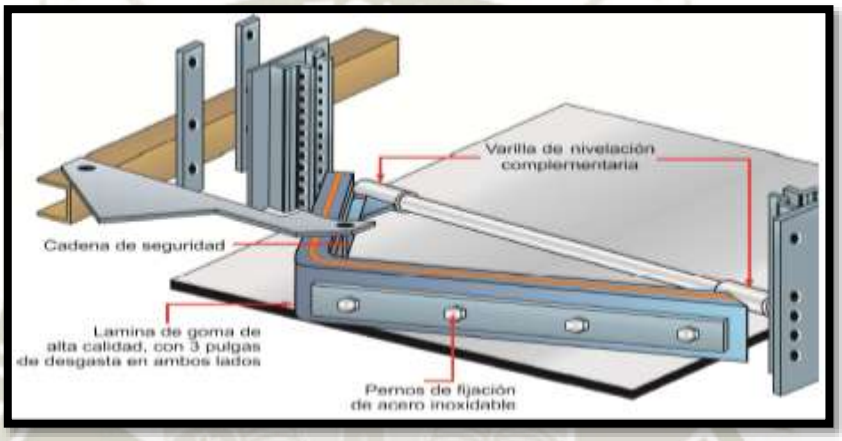
Fuente: (TECSUP Manual de Operación Planta concentradora, 2013, p. 7).

Figura N° 13 Accesorio de Limpieza – Raspador secundario.



Fuente: (TECSUP , 2013, pág. 6)

Figura N° 14 Accesorio de Limpieza – Limpiador en "V" (V-plow).

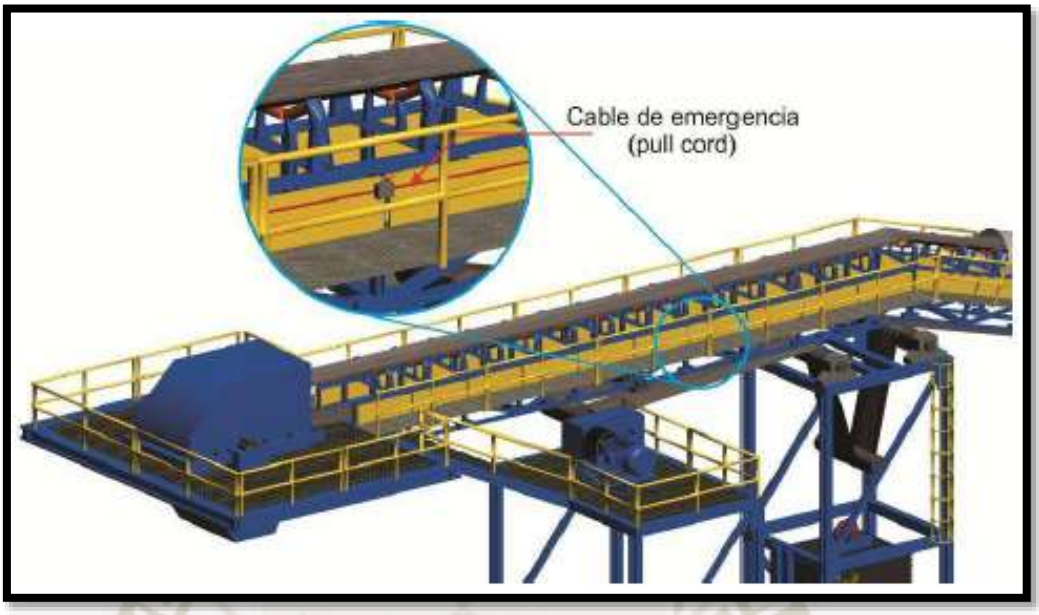


Fuente: (TECSUP , 2013, pág. 7)

Además de los accesorios de limpieza, en la faja transportadora se cuenta con sensores de velocidad (speed zero) el cual censa cuando este se encuentre en movimiento, cables de emergencia (pull cord), el cual es accionada por cualquier parada de emergencia que sea necesaria mientras esta en operación, el pull cord es un dispositivo que tienen un cable que va en todo el largo de la faja transportadora para ser accionada por cualquier persona en cualquier punto de esta; sensores de nivel (chutes), ayudan a verificar que la carga no se llene y genere un atoro en los chutes; y detectores de rotura de faja, el cual se encuentra ubicado a la salida de los chutes de descarga ya que al ser una zona de transición y descarga de mineral es el punto donde se generan los cortes, podrían generar cortes el mismo mineral con puntos filudos o algún metal proveniente de mina ya sea metal enterrado o metal de los mimos equipos de línea amarilla como pedazos de tolva de los camiones o uñas de las palas. (Ver Figura N° 14 y Figura N° 15). "La activación de cualquiera de estos dispositivos hace que se genere una señal

de alarma en el sistema de control y por consiguiente se logre detener la faja de alimentación al molino SAG" (TECSUP , 2013, pág. 6).

Figura N° 15 Cable de Emergencia (PULL CORD).



Fuente: (TECSUP , 2013, pág. 8)

Figura N° 16 Detectores de rotura de faja.

Fuente: Elaboración Propia.

3.2.3. Molino SAG

"Un molino semiautógeno (SAG) es un equipo creado para conminuir o pulverizar mineral mediante impacto, abrasión y fricción. Es utilizado en operaciones mineras con gran flujo másico y grandes potencias de accionamiento (hasta 28 MW). En términos

generales, la molienda utiliza como principio de conminución el impacto del mismo material aledaño es por eso que se denomina molienda autógena (AG), sin embargo, al incorporar una porción de bolas de acero (porcentualmente menor que en un molino de bolas), se llega a la categoría de molienda semiautógena (SAG). Estas bolas de acero, comúnmente de 5 pulgadas de diámetro, aportan a la trituración del material y a la eficiencia global del equipo" (TECSUP , 2013, pág. 6).

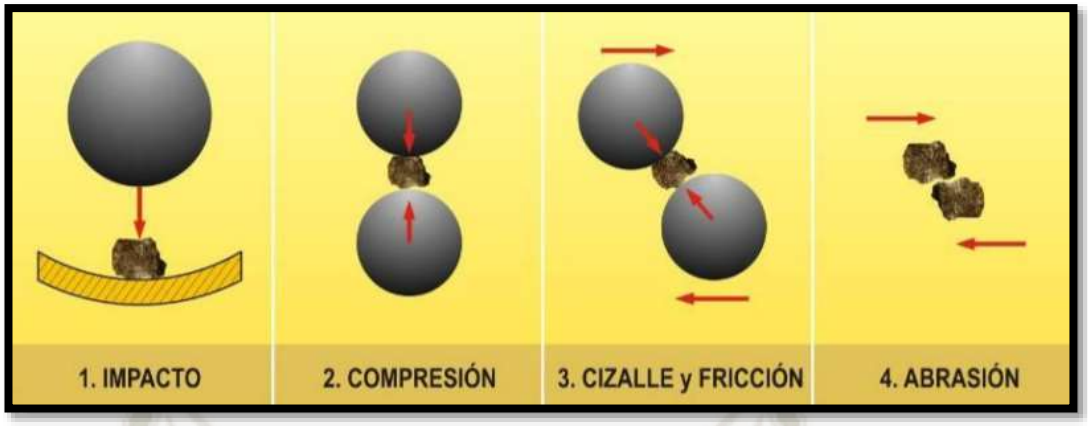
"El objetivo de la molienda radica en lograr un grado de liberación adecuado dentro de límites prestablecidos para conseguir una adecuada eficiente de recuperación. Los molinos generalmente son cilindros rotatorios protegidos o revestidos interiormente con forros (liners) de material de alta resistencia al impacto y la abrasión, en donde una fracción de su volumen de agua se carga con mineral y los elementos moledores (bolas), que al girar, producen el levantamiento e impacto del flujo másico de mineral y bolas, produciéndose la reducción de tamaños, cuyo correcto control será la llave de un buen procesamiento de minerales en términos de calidad del producto y recuperación del mineral." (TECSUP , 2013, pág. 6).

La molienda se puede efectuar por los siguientes mecanismos:

a) Impacto o Compresión: Aplicada a la superficie de la partícula (bolas-mineral-liner) o (bola-mineral-bola)
b) Cizalle: Debido a las fuerzas oblicuas o de corte (bola- mineral-bola)
c) c) Abrasión: Debido a las fuerzas que actúan paralelas a la superficie (mineral – mineral)

"Estos mecanismos disminuyen el tamaño de las partículas y cambian su forma más allá de ciertos límites determinados por su grado de elasticidad, causando su quiebre. La molienda comúnmente se efectúa vía húmeda. Cuando el molino se hace rotar, el agente de molienda, mineral y agua, se mezclan en forma íntima y el agente de molienda puede reducir de tamaño las partículas por cualquiera de los mecanismos anteriores, dependiendo de la velocidad de rotación del molino" (Moubray, 2004).

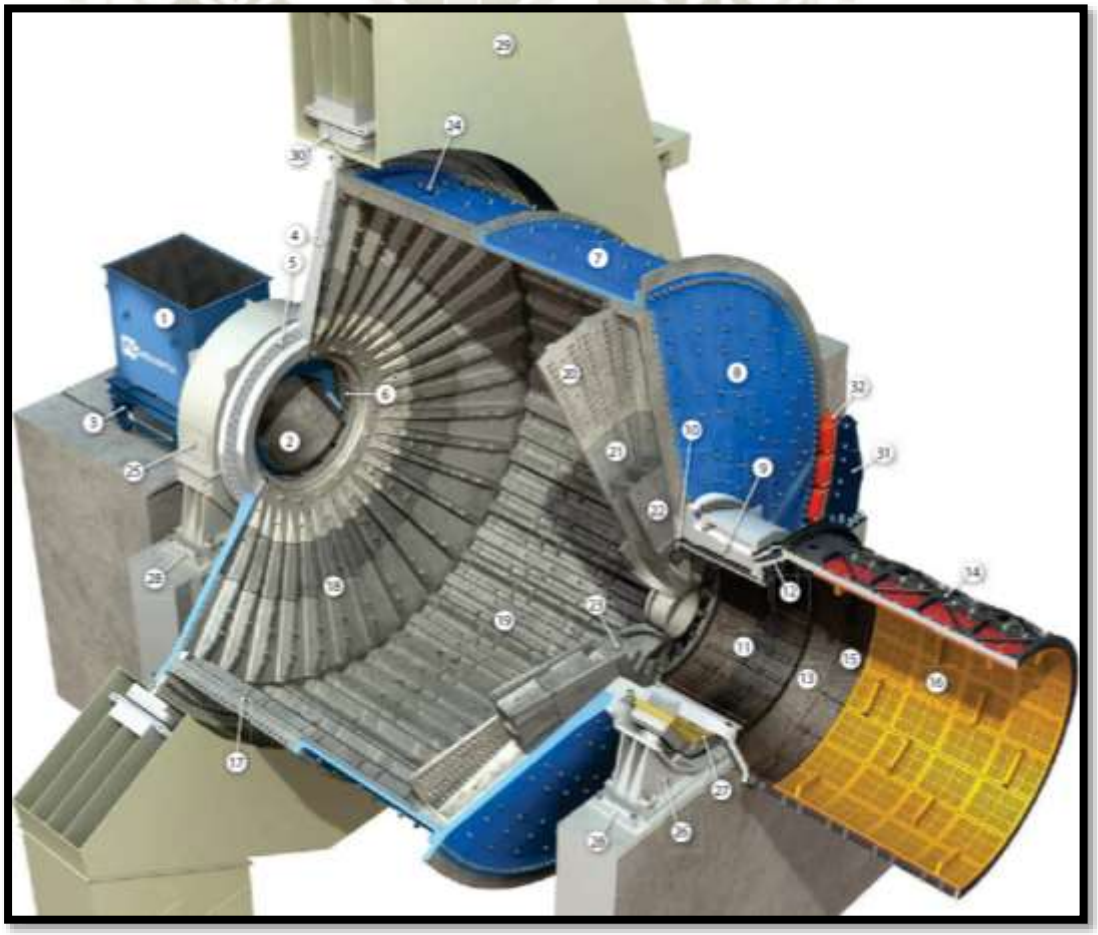
Figura N° 17 Tipos de fracturación de rocas de mineral



Fuente: Elaboración propia

3.2.3.1.Componentes y partes del Molino SAG

Figura N° 18 Componentes y partes del molino SAG.



Fuente: (FLSMIDTH , 2013).

Cuadro N° 5 Partes del molino SAG

PARTES DEL MOLINO SAG	
Nº	**COMPONENTES**
1	Chute de alimentación (feed chute)
2	Revestimiento del chute de alimentación (feed chute liner)
3	Base del chute de alimentación (feed channel base)
4	Tapa del lado de alimentación (side feed cap)
5	Trunnion del lado de alimentación (side feed trunnion)
6	Anillo de levante y sello (lifting ring and o-ring)
7	Coraza (Shell)
8	Tapa del lado de descarga
9	Trunion del lado de descarga
10	Sello de los revestimientos del trunnion
11	Revestimientos del trunnion del lado de descarga
12	Adaptador del trommel
13	Revestimientos de adaptador del trommel
14	Bastidor de los paneles del trommel
15	Placas del impacto del trommel
16	Panel del trommel
17	Revestimiento de hule
18	Revestimientos del cabezal de alimentación
19	Revestimientos
20	Parrillas de descarga
21	Revestimientos del cabezal de descarga
22	Barras elevadoras de pulpa
23	Descarga de la pulpa
24	Pernos de fijación
25	Cojinete del lado de empuje
26	Cojinete del lado de alimentación
27	Cojinetes tipo pad
28	Base de cojinetes
29	Estator del motor
30	Polos del motor
31	Freno del molino
32	Zapatas del freno del molino

Fuente: Catálogo FLsmidth**.**

Cuadro N° 6 Especificaciones técnicas del molino SAG.

ESPECIFICACIONES TECNICAS	
DATOS GENERALES	
Fabricante	FL Smidth
Tamaño	40 pies x 25 pies
Capacidad	4688 tph
Carga de Bolas	20 % del volumen máximo
Carga de Mineral	30 % del volumen máximo
Velocidad de Giro	9.04 RPM
Pulpa de alimentación	80 % pasante, 150 mm
Diámetro de Bolas	5 pulgadas (127 mm)

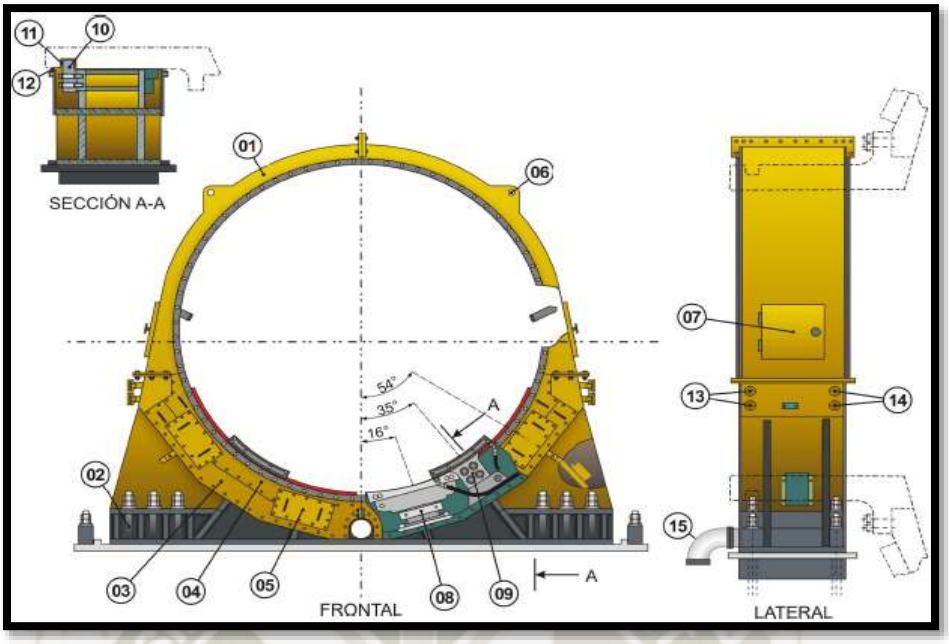
Fuente: Catálogo FLsmidth.

Cuadro N° 7 Especificaciones técnicas del molino SAG

ESPECIFICACIONES TECNICAS	
DATOS GENERALES	
Tromel	
Capacidad de diseño	5625 TPH
Oversize	2801 TPH
Undersie	3544 TPH
Apertura rejilla (ancho/largo)	13 mm x 50 mm
Agua de lavado	450 m3/h

Fuente: Catálogo FLsmidth.

Cuadro N° 8 Componentes y partes de Chumacera fija del Molino SAG.



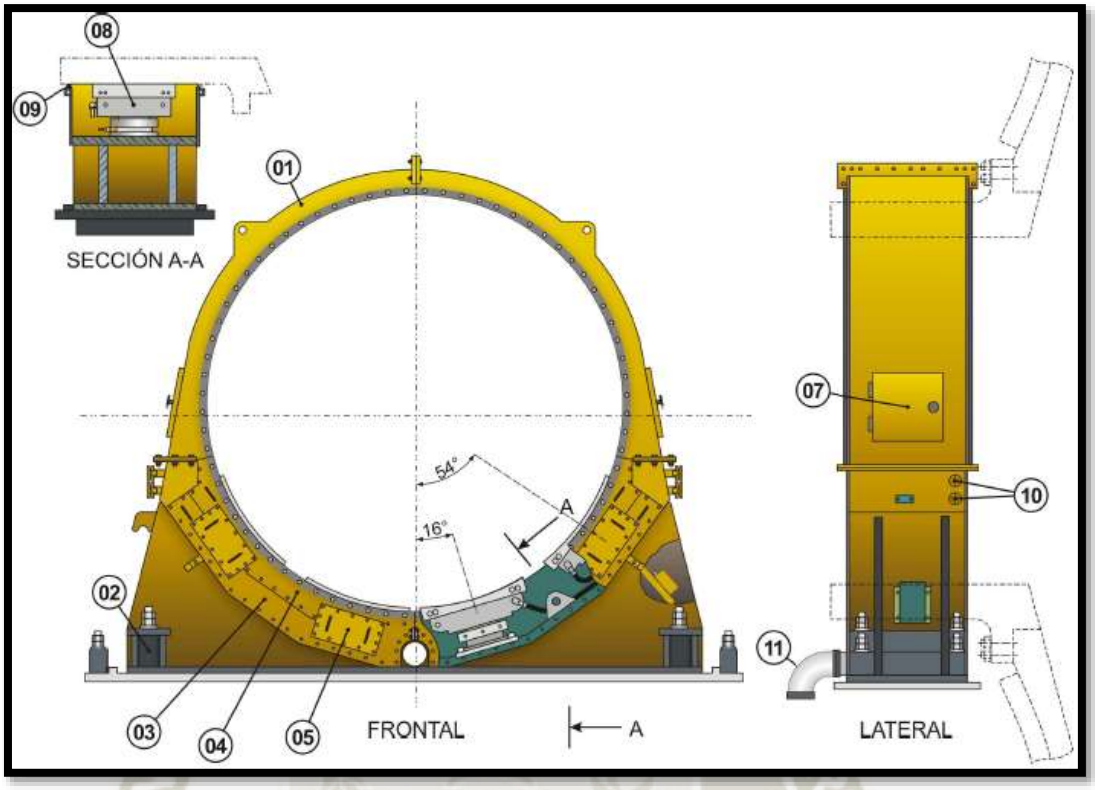
Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro N° 9 Componentes y partes de Chumacera fija del Molino SAG.

PARTES DE CHUMACERA FIJA DEL MOLINO SAG	
N°	**COMPONENTES**
1	Cubierta
2	Base
3	Tapa lateral inferior
4	Tapa lateral superior
5	Puerta de inspección de la pastilla
6	Oreja de elevación
7	Puerta de inspección lateral
8	Pastilla
9	Riel de empuje
10	Soporte de riel de empuje
11	Paquete de cuñas de empuje
12	Sistema de sello
13	Ingreso de aceite a los rieles de empuje
14	Ingreso de aceite a las pastillas
15	Tubería de retorno de aceite

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro N° 10 Componentes y partes de Chumacera móvil del Molino SAG.



Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro N° 11 Componentes y partes de Chumacera móvil del Molino SAG.

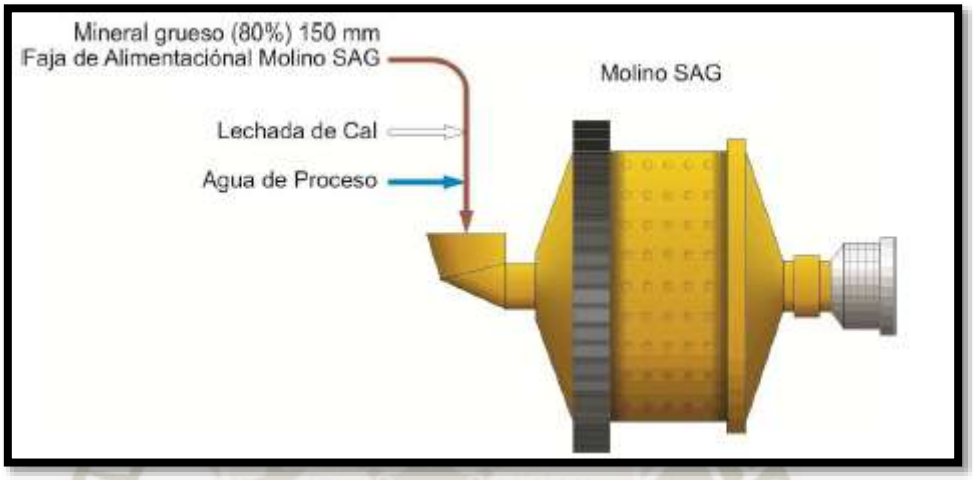
PARTES DE LA CHUMACERA MOVIL DEL MOLINO SAG	
N°	**COMPONENTES**
1	Cubierta
2	Base
3	Tapa lateral inferior
4	Tapa lateral superior
5	Puerta de inspección de pastilla
6	Oreja de elevación
7	Puerta de inspección lateral
8	Pastilla
9	Sistema de Sello
10	Ingreso de aceite a las pastillas
11	Tubería de retorno de aceite

Fuente: Elaboración Propia.

3.2.3.2.Funcionamiento

La carga proveniente de la faja de alimentación al molino SAG, compuesta de mineral grueso (proveniente del Stock pile de gruesos), bolas, y mineral proveniente de las chancadoras de pebbles; descargan en el chute de alimentación al molino donde se le agrega agua de proceso y lechada de cal (Ver Figura N° 19).

Cuadro N° 12 Chute de Alimentación del molino SAG.

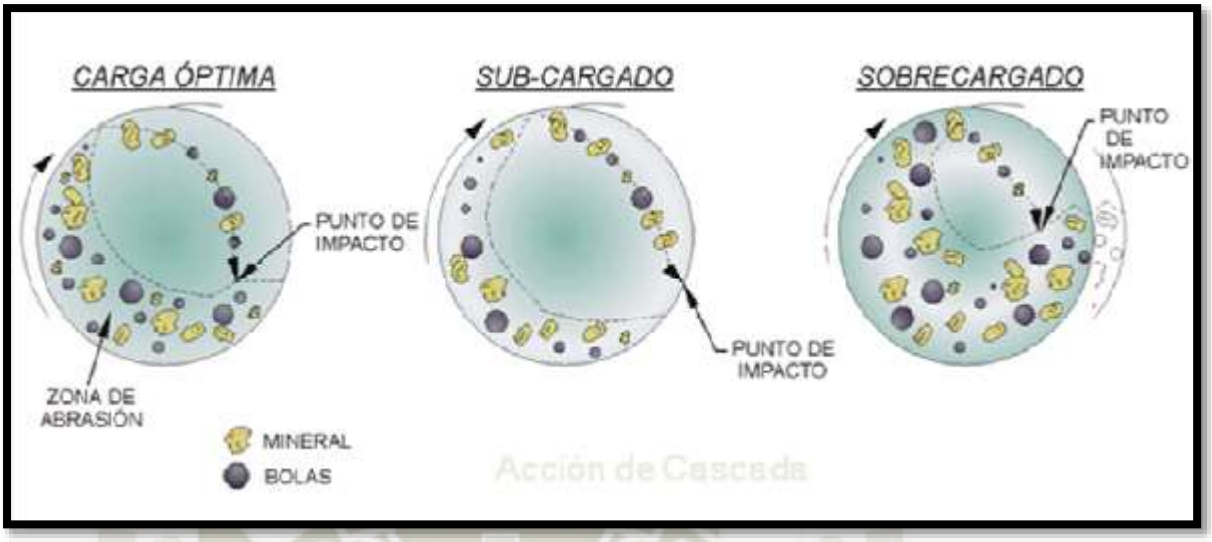


Fuente: Elaboración Propia.

"La carga pasa a través del trunnion de alimentación ocupando el 30% del volumen total del molino, las bolas llenan el molino a un 20% y la pulpa llena el vacío entre las bolas. Estos volúmenes de llenado son máximos, y los volúmenes óptimos dependerán de la producción de la planta. Cuando el molino gira por acción del motor sobre sus chumaceras, las bolas junto con el mineral son elevados por los liners (litfter-Placa), y suben hasta una altura determinada, de donde caen impactándose contra ellas y el mineral, para finalmente golpear bola-bola, bola-mineral, mineral-mineral; para no dañar las chaquetas. Luego vuelven a subir y caer, así sucesivamente, generando una cascada En cada vuelta del molino hay una serie de acciones combinadas de fricción, contracción y abrasión entre el propio mineral y las bolas; estas acciones combinadas son las que van fragmentando el mineral" (TECSUP , 2013, pág. 10).

En la Figura N° 22 se muestra un esquema con la forma y movimiento de la carga en los molinos SAG indicando las regiones donde se produce la rotura. Hay básicamente dos. La primera es una superficie en la región del talón donde se produce la rotura por impacto. La cantidad de rotura que se produce en esta región está influenciada por la frecuencia con la cual se vuelca la carga y la energía que se genera en el impacto" (TECSUP, 2013, pág. 10).

Figura N° 19 Movimiento del mineral al interior del molino SAG.

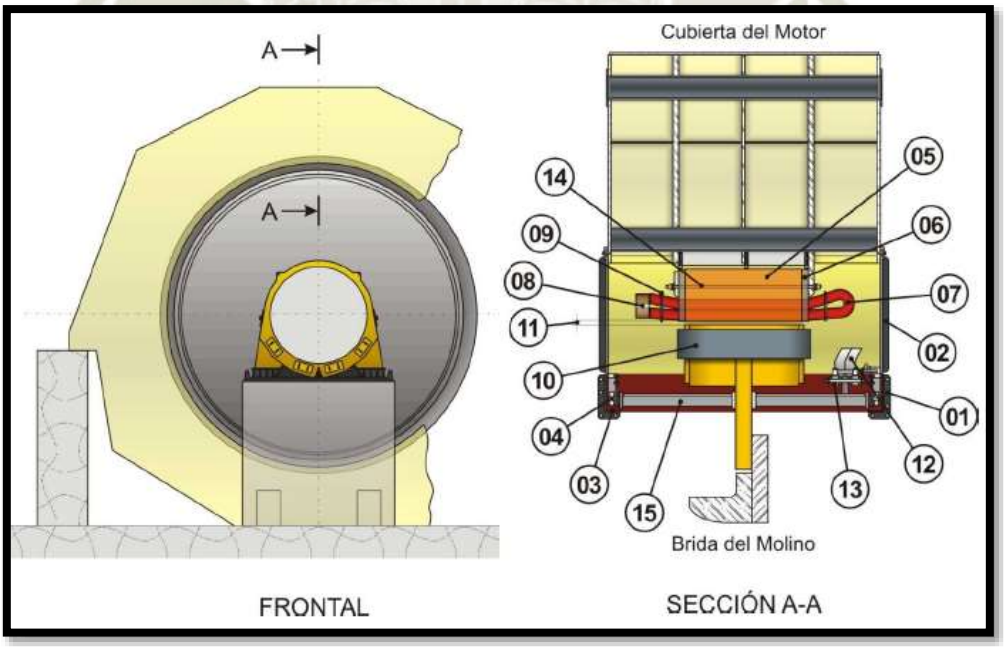


Fuente: Elaboración Propia.

3.2.3.3.Sistema de Accionamiento

"Es un sistema de accionamiento sin engranajes (Gearless Mill Drive o GMD), donde el molino se convierte en el rotor de un motor síncrono y el torque se transmite mediante el campo magnético entre el estator y el rotor" (TECSUP, 2013, pág. 13).

Figura N° 20 Partes del motor de accionamiento del molino SAG.



Fuente: Elaboración Propia.

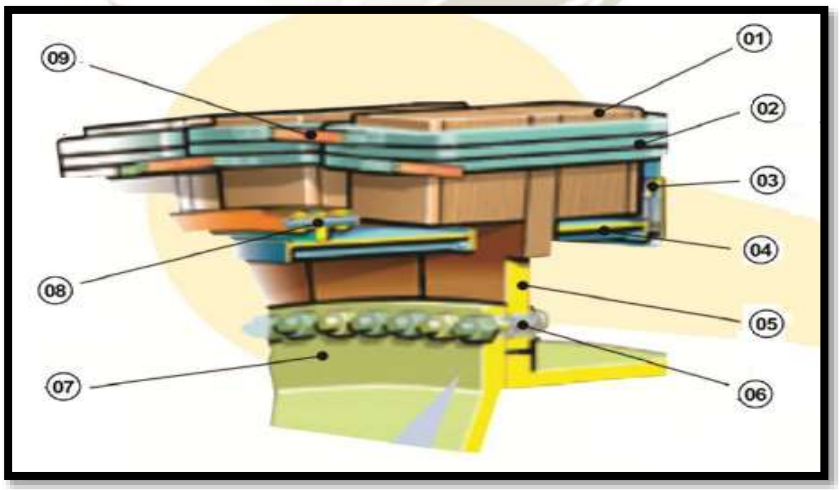
Cuadro N° 13 Partes del motor de accionamiento del Molino SAG.

PARTES DEL MOTOR DE ACCIONAMIENTO DEL MOLINO SAG	
ITEM	**COMPONENTES**
1	Sistema de Sellado
2	Cubierta del Estator
3	Protección de sellado
4	Soportes de sellado
5	Paquete Magnético
6	Dedos de presión
7	Bobina de estator
8	Interconexiones de bobinado
9	Cordón de vidrio
10	Polo

PARTES DEL MOTOR DE ACCIONAMIENTO DEL MOLINO SAG	
ITEM	**COMPONENTES**
11	Entrehierro
12	Soporte de escobilla
13	Anillos rodantes
14	Canales de ventilación
15	Anillo del rotor

Fuente: Elaboración Propia.

Figura N° 21 Partes de los polos del estator



Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro N° 14 Componentes de polos del motor

COMPONENTES DE POLOS DEL MOTOR	
ITEM	**COMPONENTES**
1	Láminas de polos
2	Bobina de los polos
3	Estator (parte fija)
4	Cubierta del rotor (parte giratoria)
5	Flange de soporte del polo
6	Perno encamisado de ajuste excéntrico para alineamiento de polo
7	Flange del molino para el montaje de polos
8	Fijación del anillo de deslizamiento
9	Interconexión eléctrica del polo (flexible)

Fuente: Elaboración Propia.

Las especificaciones técnicas del Sistema de Accionamiento del molino SAG, son detalladas en el siguiente cuadro:

Cuadro N° 15 Especificaciones tecnicas del Sistema de accionamiento del Molino SAG.

ESPECIFICACIONES TECNICAS	
DATOS GENERALES	
Marca	Siemens
Tipo	Motor de anillo síncrono
Modelo	-
Potencia (nominal)	24 MW
Tensión (nominal)	-
Intensidad (nominal)	-
Numero de polos/fases	-
Velocidad (nominal)	9.04 RPM
Tipo de ventilación	Forzada en circuito cerrado
Flujo de aire	-
Temperatura de salida	-

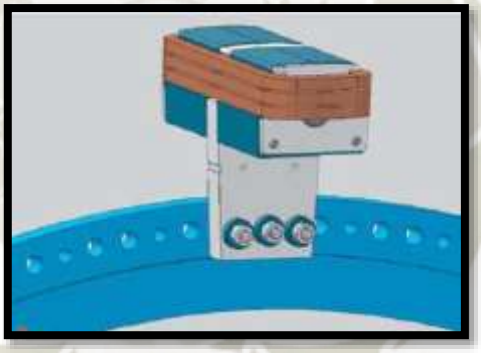
Fuente: Elaboración Propia.

"Se energiza al molino SAG con un accionamiento de velocidad variable que permite al molino arrancar sin problemas con una tensión mecánica mínima. Cuando el molino se encuentra en operación y por algún inconveniente para, al volver a hacer girar después de su intervención, se deberá realizar a 3 RPM, este acto es debido a que todo el mineral que se quedó en el molino se congela y una subida intempestiva podría generar la rotura o fractura de sus revestimientos al caer" (TECSUP, 2013, pág. 13).

El Sistema de Accionamiento del molino, se componen de un motor de anillo síncrono envuelto alrededor de la carcasa (shell) del molino, una fuente de alimentación al motor, un sistema de refrigeración y un sistema de control (e-house).

"El motor sin engranajes (también conocido como motor wrap around o motor de anillo) es un motor síncrono de enorme tamaño que está construido en segmentos. Los polos del motor son montados directamente en la brida de la carcasa del molino (Ver Figura N° 24), lo que significa que la carcasa se convierte en el rotor. El estator del motor está instalado alrededor del cuerpo del molino" (TECSUP, 2013, pág. 13).

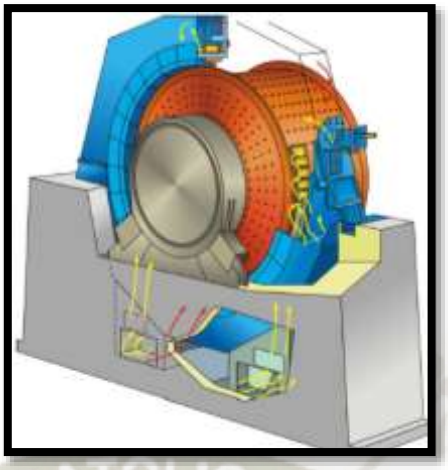
Figura N° 22 Ubicación de los polos del motor del molino SAG.



Fuente: Elaboración Propia.

"El estator está construido en cuatro segmentos iguales, cada segmento tiene su propio sistema de enfriamiento (el sistema de enfriamiento del motor que contiene intercambiadores de calor agua-aire y sus ventiladores de enfriamiento se encuentra ubicado en la parte inferior del motor). El aire de refrigeración es purificado a través de filtros, luego pasa a través de un intercambiador de calor para ser enfriado por agua (chillers), y se sopla a través del motor (Ver Figura N° 25). El motor está sellado contra cualquier elemento contaminante; como salpicaduras de agua de proceso; cuenta con un sistema de aire a presión para impedir la entrada de polvo" (TECSUP, 2013, pág. 13).

Figura N° 23 Sistema de refrigeración del motor del molino SAG.

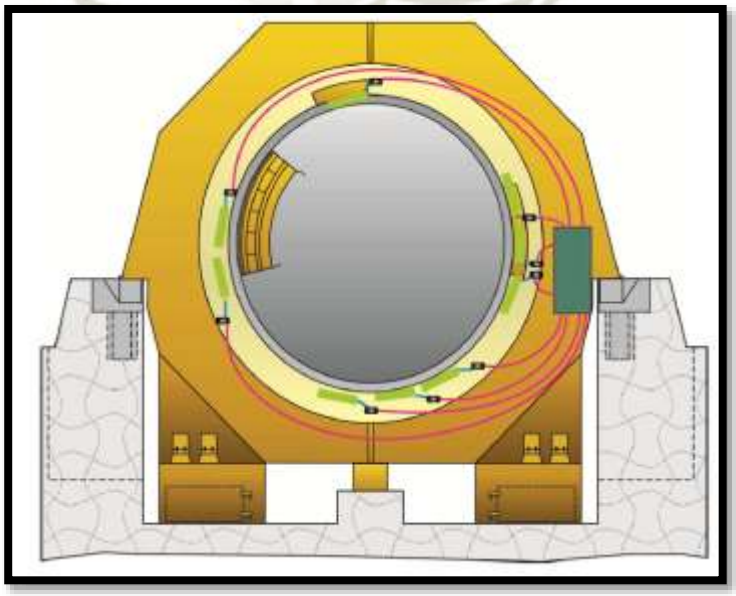


Fuente: Elaboración Propia.

"El diseño del sistema de sello mantiene una presión que evita la contaminación de partículas y fluidos desde y hacia el interior del estator. El sello tiene una vida de 16000-20000 horas de trabajo" (TECSUP, 2013, pág. 13).

"El espacio libre entre el rotor y el estator, llamado entrehierro, se monitorea muy estrechamente mediante dos tipos diferentes de sensores. El entrehierro tiene aproximadamente 16 mm de luz. Cuando estos sensores detectan cualquier movimiento de los componentes del sistema que haga que el entrehierro se haga más angosto, hay una alarma seguida de una parada del molino" (TECSUP, 2013, pág. 13).

Figura N° 24 Ubicación de sensores de desplazamiento.

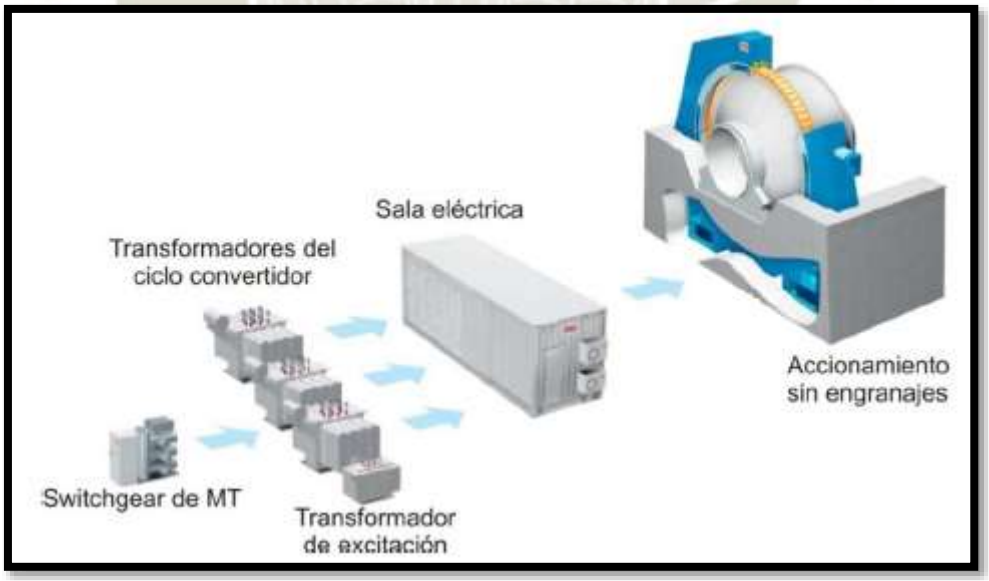


Fuente: Elaboración Propia.

"Para llevar el motor a su velocidad de sincronismo, este debe ser arrancado como motor de inducción. Primero, se desconecta el sistema de excitación y se aplica una tensión reducida en el estator, lo que produce un campo magnético giratorio alrededor del rotor. El campo giratorio induce corrientes en las caras polares del rotor y también en la bobina amortiguadora (bobina en cortocircuito). Gracias a que el entrehierro es relativamente grande y por efecto de las características de jaula de ardilla de la bobina amortiguadora se produce un par de arranque pequeño, que es suficiente para acelerar el motor próximo a su velocidad de sincronismo, luego se conecta la excitación para evitar perturbaciones. Una vez funcionando a la velocidad síncrona, el campo magnético está rotando a la misma velocidad que el rotor, así que no se inducirá ninguna corriente en la bobina amortiguadora y no tendrá ningún otro efecto en la operación del motor" (TECSUP, 2013, pág. 14).

"La velocidad del motor puede variar, pero está diseñado para trabajar a 9.04 RPM con una potencia de 24,000 kW. En modo de arrastre, el molino puede girar al 3% de su velocidad de diseño y, en el modo de avance lento, al 10%. El objetivo de los modos de arrastre y avance lento es que permitan facilitar las labores de mantenimiento y limpieza de carga congelada" (TECSUP, 2013, pág. 14).

Figura N° 25 Diagrama de sistema de accionamiento del molino SAG.



Fuente: Elaboración Propia.

Para variar la velocidad del motor, se varía la frecuencia de la fuente de corriente alterna. La energía proveniente de la subestación, a 60 Hz, se convierte a una menor frecuencia mediante un ciclo convertidor (el ciclo convertidor tiene un diseño sin

fusibles y se conecta a la red de media tensión a través de tres transformadores especiales). El ciclo convertidor convierte la energía de entrada a corriente continua y luego la vuelve a convertir a corriente alterna a la frecuencia que se requiera (el ciclo convertidor tiene una frecuencia nominal de salida de aproximadamente 5 Hz). "Finalmente, la corriente alterna a baja frecuencia es alimentada al estator del motor. Del mismo modo, se cuenta con un pequeño convertidor de excitación, que es usado para suministrar la excitación al rotor del motor a través de los anillos deslizantes como se muestra en la Figura N° 26" (TECSUP, 2013, pág. 15).

3.2.3.4.Sistema Estructural

El sistema estructural es el encargado de proteger al molino, cuerpo, coraza, los cabezales de desgaste, trommel, chutes de alimentación y de descarga.

"El chute de alimentación del molino SAG cuenta con un conjunto de carro de rodadura con canaleta, con accionamiento propio, bidireccional, fabricado con acero ASTM A36, revestidos con un material resistente a la abrasión (Ni-hard) y placa de acero AR" (TECSUP, 2013, pág. 1).

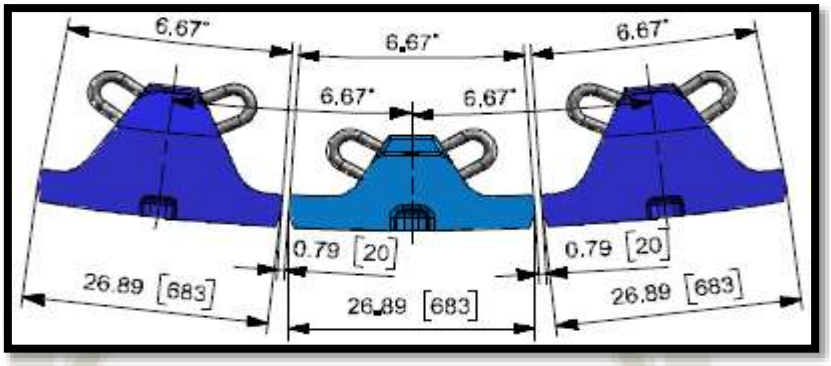
Figura N° 26 Chute de alimentación del molino SAG .

Fuente: Elaboración Propia.

Con el fin de evitar el desgaste de la carcasa del molino, debido al impacto de bolas y roca, se reviste el interior con un material resistente a desgaste, normalmente acero o goma o goma con insertos de acero. El grado del acero o goma se elige para ajustarse a las condiciones de rotura predominantes en el molino.

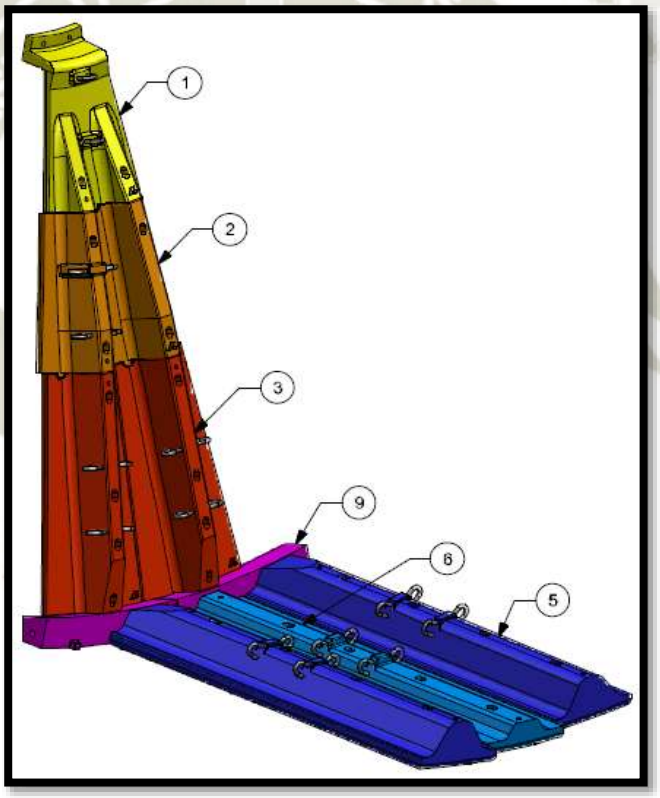
"En molinos autógenos, por ejemplo, si se utilizan revestimientos de acero se elegirá un grado duro para una buena resistencia al desgaste, pero con menos resistencia a la energía de alto impacto" (Mora, 2003).

Figura N° 27 Shell liners del molino SAG



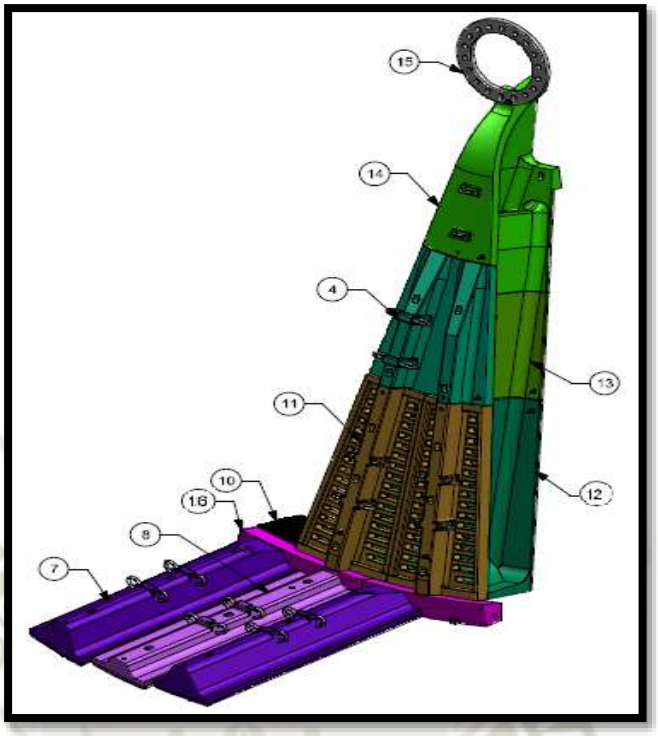
Fuente: Elaboración Propia.

Figura N° 28 Liners de alimentación del molino SAG .



Fuente: Elaboración Propia.

Figura N° 29 Liners de descarga del molino SAG



Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro N° 16 Tipos de liners del molino SAG

TIPOS DE LINERS DEL MOLINO SAG			
Ítem	**Descripción**	**Cantidad**	**Peso (kg)**
1	Feed Throat Liner	18	867
2	Feed Inner Liner	18	1948
3	Feed Outer Liner	36	1856
4	Discharge Middle Liner	18	1947
5	Feed Shell Liner - High	27	4194
6	Feed Shell Liner - Low	27	2761
7	Discharge Shell Liner - High	27	3454
8	Discharge Shell Liner - Low	27	2278
9	Filler Ring	54	404
10	Filler Block	36	110
11	Outer Grate	36	1873
12	Outer Pulp Lifter	36	2728
13	Middle Pulp Lifter	18	2362
14	Pulp Discharger	18	3103
15	Clamping Ring	1	139
16	Filler Strip	54	404

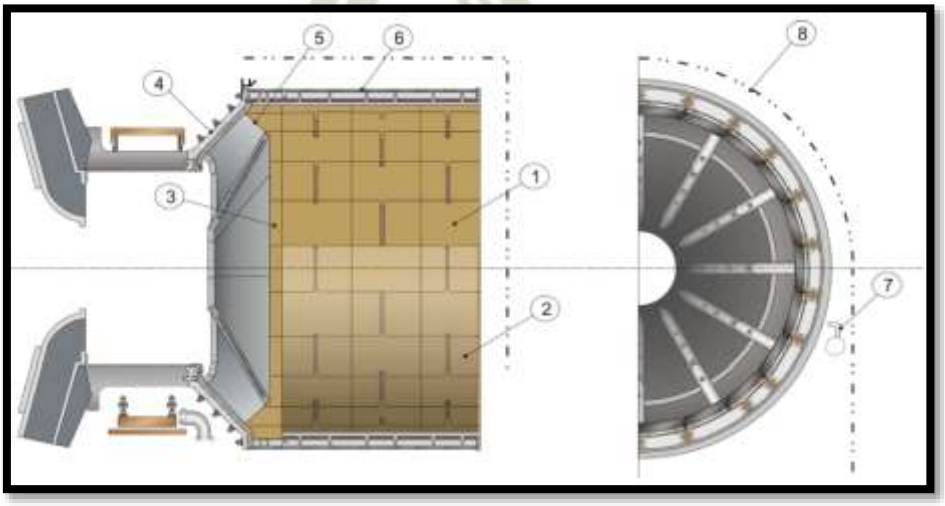
Fuente: Elaboración Propia.

"El trommel es un cilindro construido con una estructura de acero revestido con paneles de poliuretano, el cual se encuentra ranurado a través de todo el cuerpo. Estas ranuras tienen una abertura aproximada de 13 x 50 mm de dimensión, por estas aberturas pasa el material fino (undersize), el cual es descargado hacia el cajón distribuidor, mientras que el material grueso (oversize) que no pasa por las ranuras del trommel, es descargado sobre una zaranda vibratoria" (TECSUP, 2013, pág. 8).

Figura N° 30 Trommel del molino SAG .

Fuente: Elaboración Propia.

Figura N° 31 Partes del trommel del moligo SAG



Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro N° 17 Componentes de trommel del molino SAG

COMPOENENTES DEL TROMMEL	
ITEM	**COMPONENTES**
1	Panel de Poliuretano
2	Panel de Poliuretano (con dique)
3	Mallas de Poliuretano (de cierre)
4	Adaptador
5	Segmento deflector
6	Estructura de Tromel
7	Quenas de lavado
8	Cubierta de Tromel

Fuente: Elaboración Propia.

3.2.3.5.Sistema de Lubricación

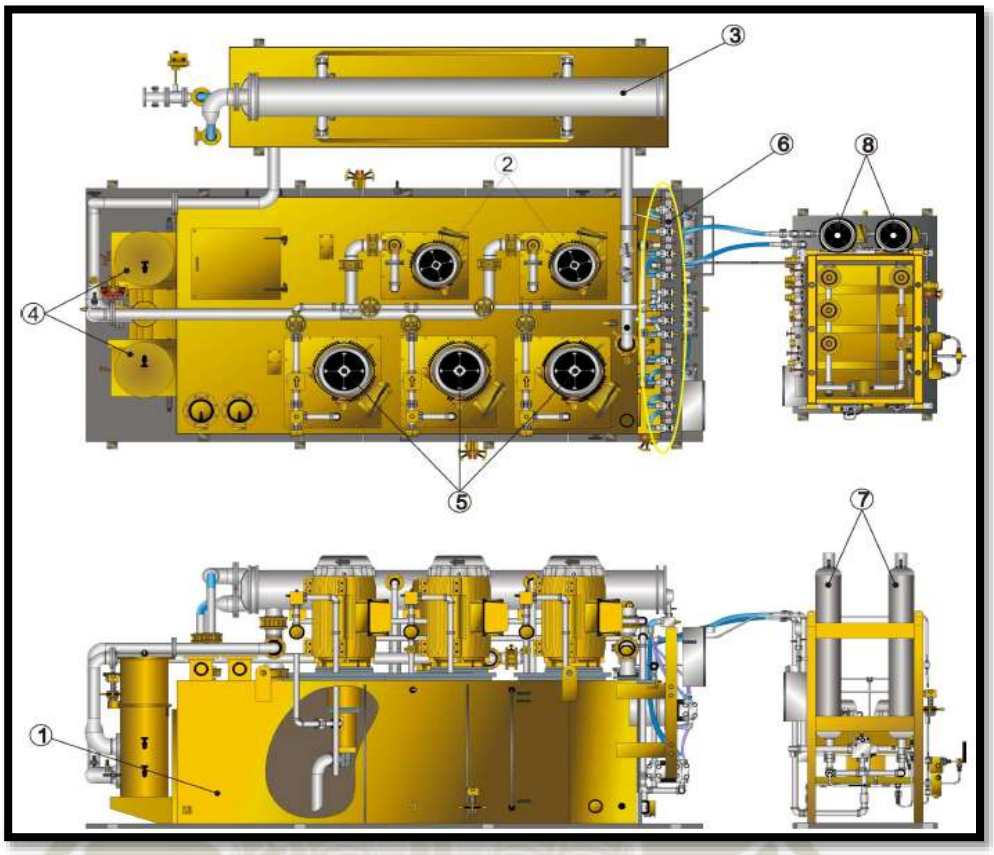
"Es el sistema encargado de lubricar y refrigerar las chumaceras del muñón del lado de alimentación y del lado de descarga (entrada y salida), además de suspender el molino y su contenido en una cama de aceite, alejándolo de las chumaceras del muñón" (Mobley, 1999).

Cuadro N° 18 Especificaciones técnicas del sistema de lubricación del molino SAG

ESPECIFICACIONES TECNICAS	
DATOS GENERALES	
Fabricante	Howard Marten Company Ltd.
Tipo de aceite	ISO 220 (240 cSt a 37°C)
DEPOSITO	
Capacidad	15,140 L (3 compartimientos)
BOMBAS DE BAJA PRESION	
Tipo	De tornillo
Capacidad/Potencia	1,059 LPM / 37 kW
BOMBAS DE ALTA PRESION	
Tipo	De tornillo
Capacidad/Potencia	409 LPM / 150 kW
ACUMULADORES	
Cantidad/Tamaño	4 acumuladores / 57 L cada uno
Volumen útil de aceite	228 L
Tiempo de carga	12 minutos
Flujo de aceite	145 LPM (para ocho pastillas)
Duración mínima	30 segundos

Fuente: Elaboración Propia.

Figura N° 32 Partes del sistema de lubricación de las chumaceras del molino SAG .



Fuente: (TECSUP, 2013, pág. 17)

Cuadro N° 19 Partes del sistema de lubricación del molino SAG.

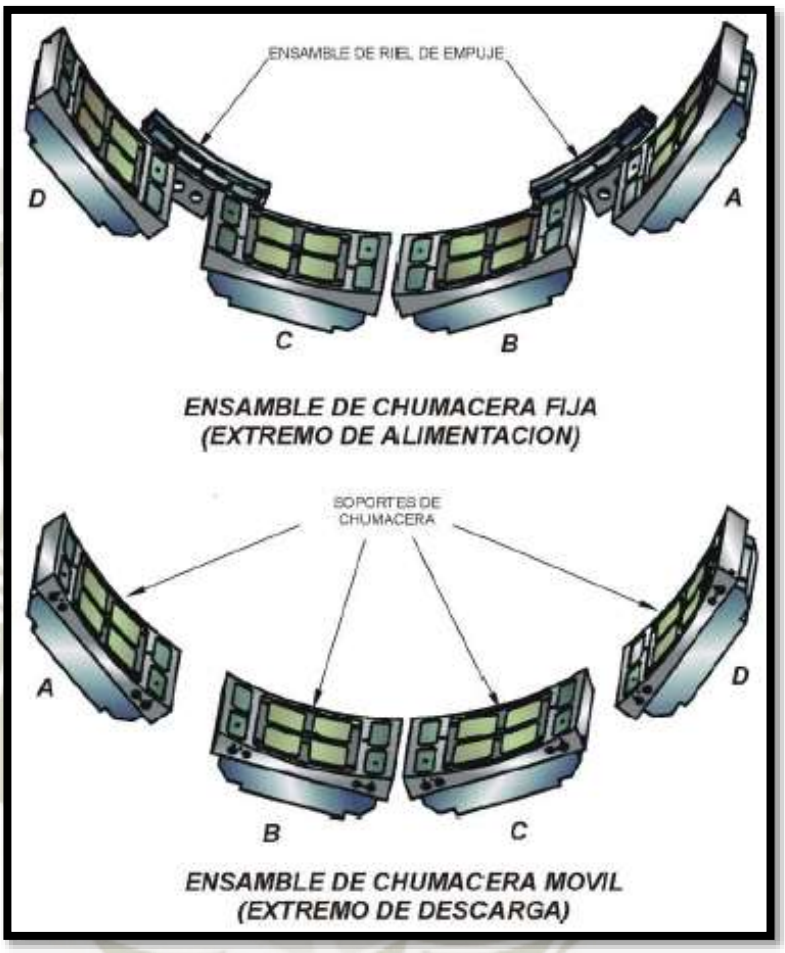
PARTES DEL SISTEMA DE LUBRICACION	
N°	**COMPONENTES**
1	Depósito de aceite
2	Bomba de baja presión (motor bomba)
3	Intercambiador de calor
4	Filtros de aceite
5	Bombas de alta presión (motor y bomba)
6	Divisores de flujo
7	Acumuladores (sistema de lubricación de emergencia)
8	Bomba de carga de los acumuladores

Fuente: Elaboración Propia.

"El sistema de lubricación de se encarga de recepcionar el aceite proveniente de las chumaceras, lo enfría en intercambiadores de calor, si fuera necesario y, lo filtra. Una

vez acondicionado, el aceite es bombeado y distribuido por divisores de flujo hacia los soportes de las chumaceras fija y móvil y a los rieles de empuje de la chumacera fija" (Jardine & Tsang, 2006).

Figura N° 33 Soportes de las chumaceras hidrostáticas del molino SAG.

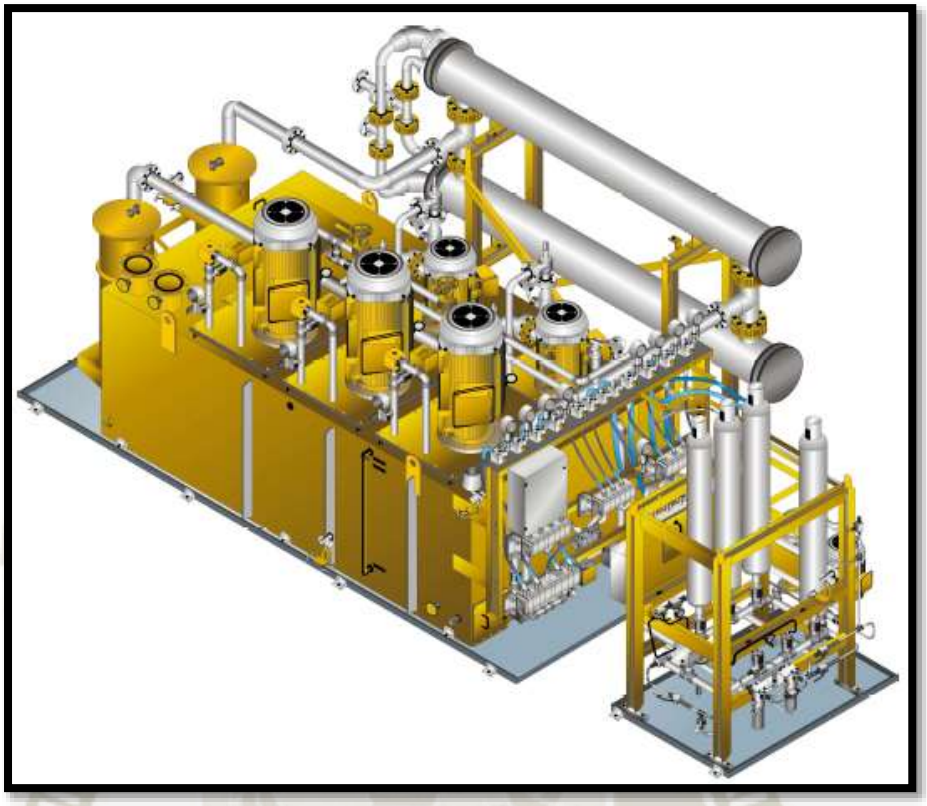


Fuente: Elaboración Propia.

"Durante el servicio no existe contacto metálico alguno entre las superficies de rodadura debido a que el aceite (entregado por las bombas de alta presión) tiene suficiente presión para levantar el molino alejando los muñones de las chumaceras. Cuando el molino está girando, éste va sobre esta película de aceite. El sistema de lubricación ha tiene una capacidad de almacenamiento total de 15,140 litros de aceite ISO 220 y su objetivo es entregar 90.8 LPM de aceite a 37 °C a cada soporte de las chumaceras fija y móvil y, 45.4 LPM a cada riel de empuje de la chumacera fija" (TECSUP, 2013, pág. 18).

"Cuenta con un tanque de aceite dividido en tres secciones mediante separadores (compartimentos de sedimentación, retorno, y acondicionamiento). Visores de vidrio de nivel en la parte exterior del tanque proporcionan una indicación visual del nivel de aceite dentro de cada compartimento del tanque" (TECSUP, 2013, pág. 18).

Figura N° 34 Sistema de lubricacion de las chumaceras del molino SAG.



Fuente: (TECSUP Manual de Operación - Molienda, 2013, p18).

"El aceite proveniente de las chumaceras drena hacia los sumideros de los muñones, y luego drena hacia el compartimento de sedimentación del tanque. Todo sólido grueso se asienta en el fondo de esta sección. El aceite pasa a través de una malla interna e ingresa al compartimento de retorno. "El compartimento de retorno contiene calentadores eléctricos para calentar el aceite. El aceite se saca del tanque de retorno mediante bombas de recirculación (bombas de tornillo) y es enviado al circuito de acondicionamiento. El circuito de acondicionamiento contiene dos filtros y dos intercambiadores de calor enfriados con agua para el acondicionamiento del aceite" (TECSUP, 2013, pág. 18).

"El aceite fluye a través del circuito acondicionador y hacia el compartimento de acondicionamiento. Esta sección del tanque contiene dos calentadores eléctricos termostáticamente controlados que aseguran que el aceite esté lo suficientemente tibio para arrancar el sistema luego de una parada. No obstante, el aceite que retorna del molino por lo general está lo suficientemente tibio como para que sea innecesario calentar durante la operación del molino" (TECSUP, 2013, pág. 18).

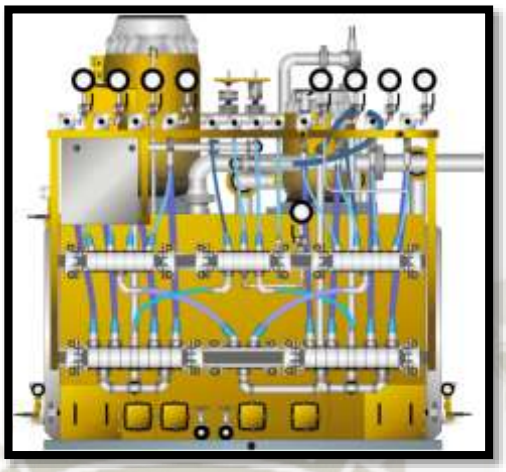
"Una de las dos bombas de recirculación (una en operación y la otra en standby) bombea el aceite a uno de los dos filtros (uno en operación y el otro en stand by). Un interruptor de presión diferencial en los filtros activa una alarma cuando el filtro se atora y requiere cambio.Después de filtrado el aceite, pasa a los intercambiadores de calor (una en operación y la otra en standby), para enfriar el aceite y mantenerlo a una temperatura promedio de 37 °C" (TECSUP, 2013, pág. 18).

"El flujo de agua de enfriamiento hacia los intercambiadores de calor se gradúa automáticamente mediante una válvula de control de temperatura en la línea de retorno de agua de enfriamiento. Mantener una temperatura constante de aceite resulta extremadamente importante. La viscosidad del aceite cambia significativamente a medida que cambia la temperatura. No sólo tiene que permanecer la viscosidad del aceite en el rango adecuado para la protección de las chumaceras, sino que los cambios en la viscosidad también afectan la contrapresión en las chumaceras. El operador depende de las mediciones de presión de la chumacera para controlar la carga del molino. El aceite acondicionado (filtrado y enfriado) luego pasa al lado acondicionado del tanque, y el exceso de aceite fluye sobre el separador hacia el compartimento de retorno" (TECSUP, 2013, pág. 18).

"A la salida del compartimiento de acondicionamiento, hay tres unidades de bomba de tornillo de alta presión, dos en línea y una en stand by, que entregan aceite a los divisores de flujo y estos distribuyen el flujo hacia los cuatro soportes de las chumaceras. Cada divisor de flujo está compuesto de cinco válvulas de control de flujo. Cuatro de éstas alimentan los cuatro soportes de las chumaceras tanto la fija como la móvil. La quinta válvula de flujo en cada divisor alimenta uno de los rieles de empuje de la chumacera fija. Este flujo de aceite y presión evitan que los lados de empuje de la chumacera hagan contacto, lo que podría provocar que la chumacera se caliente y desgaste. La chumacera de empuje evita que el molino se mueva en forma paralela a su eje" (TECSUP, 2013, pág. 18).

"Los divisores de flujo son en esencia una serie de bombas rotativas de engranaje, instalados en un eje motor común, accionado por la presión del aceite de entrada. Conectar las bombas mediante un eje asegura igual rotación de cada bomba rotativa de engranajes. A su vez, esto asegura que la misma cantidad de aceite llegue a cada una de las conexiones de aceite en las chumaceras. Sin los divisores de control de flujo, las diferencias en la presión en las conexiones darían como resultado que las conexiones de mayor presión estén sin aceite (Ver Figura N° 33)" (TECSUP, 2013, pág. 18).

Figura N° 35 Divisores de flujo del sistema de lubricación de las chumaceras.



Fuente: (TECSUP, 2013, pág. 18)

"En caso que haya una pérdida de flujo o presión en las chumaceras, el circuito de lubricación de emergencia suministra aceite a las chumaceras" (TECSUP, 2013, pág. 18).

"Este circuito suministra aceite presurizado hacia las chumaceras el tiempo suficiente para que los frenos hagan detener el molino. El circuito consta de cuatro acumuladores cargados de nitrógeno, una válvula de descarga, dos bombas de descarga/carga del acumulador (una en operación y la otra en stand by) y un ensamble divisor de flujo. El aceite proveniente del compartimento acondicionado del tanque se saca mediante la bomba de descarga/carga del acumulador y se carga en los acumuladores, los que también contienen suficiente nitrógeno para presurizar el aceite hasta que el molino se detenga. A pesar de que el flujo de aceite del sistema de descarga hacia las chumaceras es menor que el flujo normal de aceite cuando las bombas de lubricación están operando, el flujo de aceite de descarga y la presión son suficientes para proteger las chumaceras de los muñones durante la parada" (TECSUP, 2013, pág. 18).

"El sistema de lubricación está equipado con una serie de interruptores de flujo, presión y temperatura. Estos dispositivos sirven para advertir al operador sobre condiciones que pueden poner en peligro el equipo. En muchos casos, también paran el equipo y/o evitan que éste arranque" (TECSUP, 2013, pág. 18).

3.2.3.6.Sistema de Frenos

Es un sistema que emplea una unidad hidráulica y dos juegos de frenos caliper sujetos al bastidor en cada lado del molino, se usan para una parada rápida del molino y evitar que el molino se mueva mientras se realiza el mantenimiento o detenerlo en caso de una

emergencia. De tal manera que proporciona la presión hidráulica suficiente para superar la presión del resorte y así poder soltar los frenos; y de manera contraria, soltando la presión hidráulica, los frenos se enganchan deteniendo el molino" (TECSUP, 2013, pág. 23).

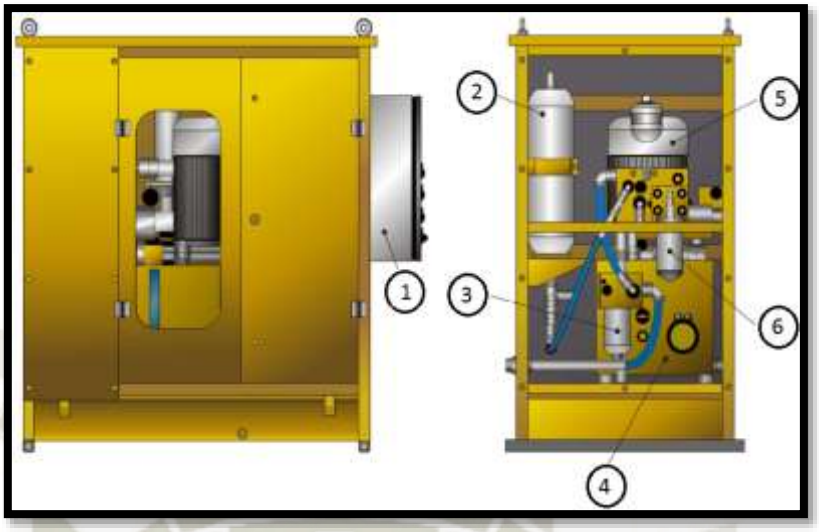
Los frenos son de la marca Svendborg y cada juego consta de tres caliper modelo FLSMB 1150 MS, de accionamiento por resortes y liberación hidráulica, que pueden ejercer un torque de frenado de 36,500 kN-m cuando el molino está girando a su velocidad nominal (9.04 RPM) y lo puede detener en 10 segundos como máximo. La presión nominal de liberación de los frenos es 13,500 kPa (1,96 psi) (TECSUP, 2013, pág. 23).

Cuadro N° 20 Especificaciones técnicas del sistema de frenos del molino SAG

ESPECIFICACIONES TECNICAS	
FRENOS CALIPER	
Tipo	Liberación Hidráulica
Modelo	FLSMB 1150 MS (2 conjuntos de 3 frenos)
Presión de liberación	13.5 Mpa
Torque de frenado	3500 KN-m
Tiempo de frenado	10 segundos
Velocidad de avance lento	1 RPM
Velocidad de arrastre	0.30 RPM
UNIDAD HIDRAULICA	
DEPOSITO	
Capacidad	130 L
BOMBAS	
Tipo	De pistones axiales
Potencia	11 Kw
ACUMULADORES	
Cantidad	03 acumuladores
Tamaño	10 L (17.5 Mpa)

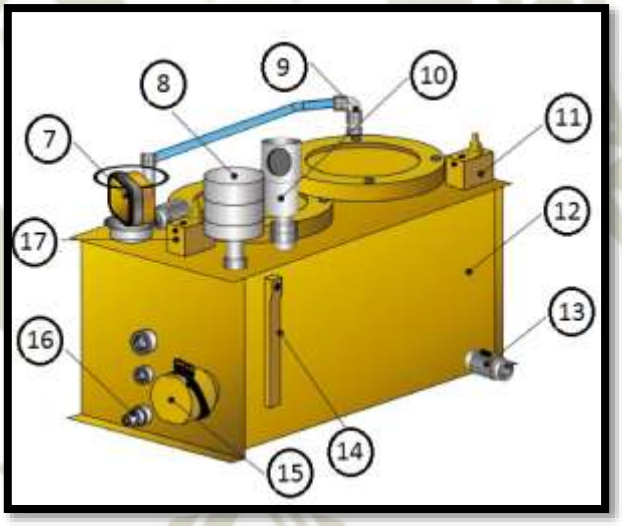
Fuente: Elaboración Propia.

Figura N° 36 Partes de la unidad hidraulica del del freno del molino SAG.



Fuente: (TECSUP, 2013, pág. 23)

Figura N° 37 Partes de la unidad hidraulica del del freno del molino SAG.



Fuente: (TECSUP, 2013, pág. 23)

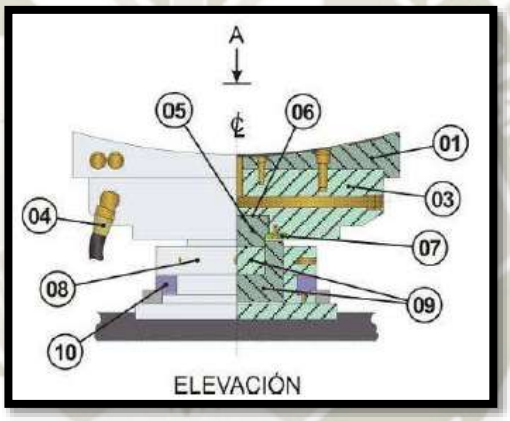
Cuadro N° 21 Partes de la Unidad Hidráulica de freno

PARTES DE LA UNIDAD HIDRAULICA DEL FRENO	
N°	**COMPONENTES**
1	Tablero de control
2	Acumuladores
3	Filtros de alta presión
4	Tanque de aceite
5	Bomba Hidráulica
6	Filtro de alta presión

PARTES DE LA UNIDAD HIDRAULICA DEL FRENO	
N°	COMPONENTES
7	Interruptor de nivel
8	Respirador de aire
9	Válvula check
10	Filtro de alta presión
11	Válvula de alivio
12	Tanque de aceite
13	Drenaje
14	Nivel de vidrio
15	Calefacción
16	Termómetro
17	Válvula de alivio

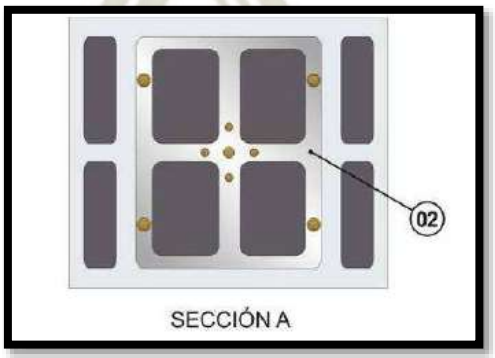
Fuente: Elaboración Propia.

Figura N° 38 Partes de la pastilla de freno



Fuente: Elaboración Propia.

Figura N° 39 Partes de la pastilla de freno.



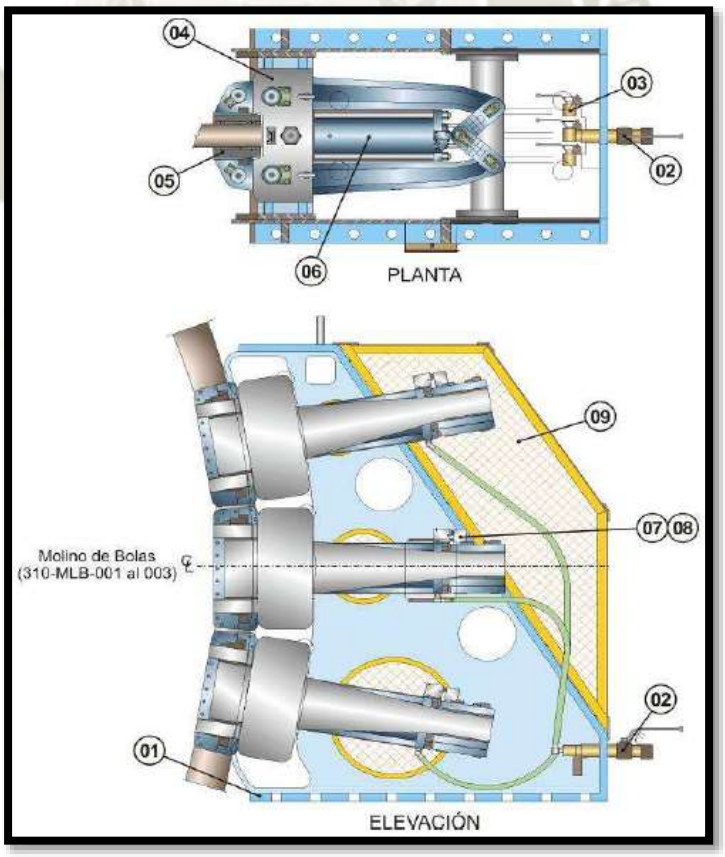
Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro N° 22 Partes de la pastilla freno

PARTES DE LA PASTILLA DE FRENO	
ITEM	**COMPONENTES**
1	Pastilla de bronce
2	Canales de lubricación
3	Bloque de soporte de pastillas
4	Ingreso de aceite
5	Bloque de aislamiento
6	Empaquetadura
7	Anillo de retención
8	Conjunto zapata d elevación
9	Arandela
10	Celda de carga

Fuente: Elaboración Propia.

Figura N° 40 Partes del freno del molino de bolas



Fuente: (TECSUP Manual de Operación - Molienda, 2013, p24).

Cuadro N° 23 Partes del freno del molino de bolas

PARTES DEL SISTEMA DE FRENO	
ITEM	**COMPONENTES**
1	Base de montaje
2	Válvula de cierre
3	Válvula de aislamiento
4	Freno de Caliper
5	Zapata de freno
6	Cilindro Hidráulico
7	Interruptor limitador de carrera
8	Interruptor de presión
9	Guarda de seguridad

Fuente: Elaboración Propia.

La unidad hidráulica consta de un depósito de aceite sellado y presurizado; dos bombas de pistones axiales, una en operación y la segunda en stand-by, filtros y un conjunto de 3 acumuladores de nitrógeno para proporcionar presión. "El depósito de aceite está conformado por un respiradero flexible, venteo, un calefactor de inmersión e interruptores de nivel bajo y temperatura alta. La bomba montada directamente en un motor eléctrico de jaula de ardilla, es la encargada de cargar los acumuladores, previo filtrado del aceite" (TECSUP, 2013, pág. 23).

"Los acumuladores almacenan aceite hidráulico a presión, y cuando se requiere liberar los frenos, las válvulas dirigen el aceite presurizado hacia los frenos, soltándolos. La presión del acumulador se mantiene mediante la bomba, la cual arranca y se detiene según se requiera" (TECSUP, 2013, pág. 23).

3.2.4. Zarandas vibratorias

Es un equipo electromecánico de clasificación, que separan la alimentación en dos flujos: gruesos (oversize) y finos (undersize), cada uno conteniendo partículas de un rango de tamaños diferentes. La separación ocurre al permitir que partículas finas pasen a través de los paneles de la zaranda.

"La zaranda se encarga de clasificar el mineral proveniente del trommel del molino SAG, usando dos niveles de superficie de zarandeo (primer y segundo piso "deck") para aceptar o rechazar partículas de mineral de acuerdo al tamaño, al tipo de mineral y a la disposición de las mallas en el segundo piso (deck). El producto grueso (mayor a 13

mm) es enviado al chute de descarga que conduce mediante fajas a la planta de chancado de pebbles (el cual no está incluido en este análisis), mientras que el producto fino (menor a 13 mm) se deposita en la canaleta de descarga (cajón SUL) para luego ser enviado al circuito de molienda secundaria" (TECSUP, 2013, pág. 1).

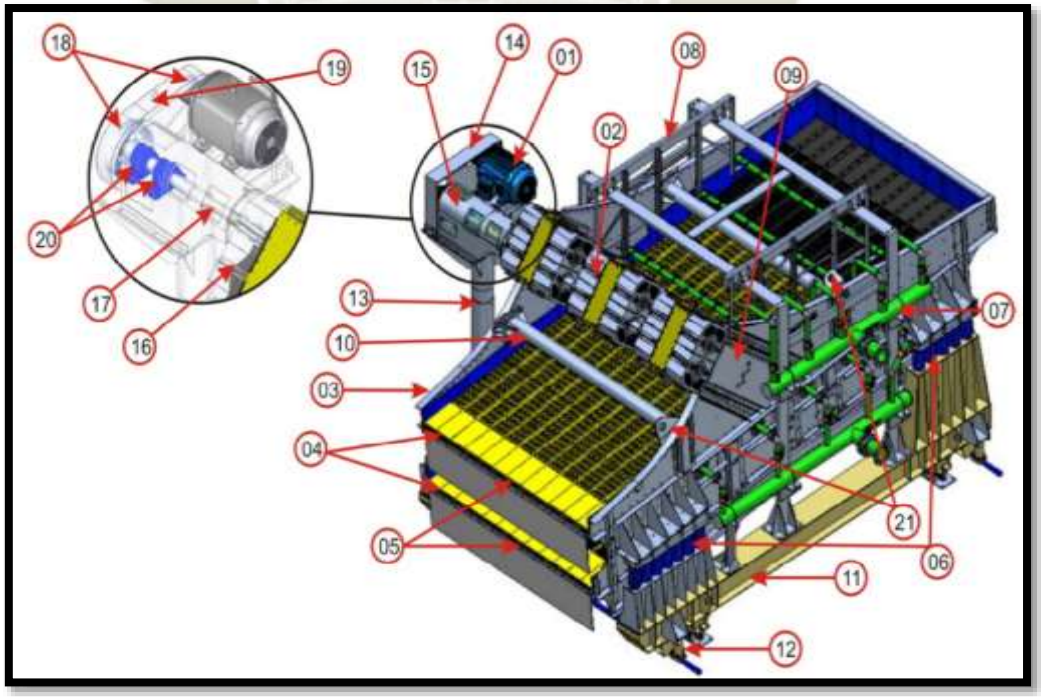
Cuadro N° 24 Especificaciones técnicas de la Zaranda Vibratoria

ESPECIFICACIONES TECNICAS	
Datos Generales	
Fabricante	Haver & Boecker
Modelo	R-MD
Tipo	Movimiento Lineal
Tamaño (ancho x largo)	12 pies x 24 pies
Capacidad (nominal)	4, 688 TPH
Nominal Strokes	
Aceleración	
Peso	

Fuente: Elaboración Propia.

3.2.4.1.Partes de la Zaranda Vibratoria

Figura N° 41 Componentes principales de la zaranza vibratoria



Fuente: (TECSUP, 2013, pág. 2).

Cuadro N° 25 Componentes de zaranda vibratoria

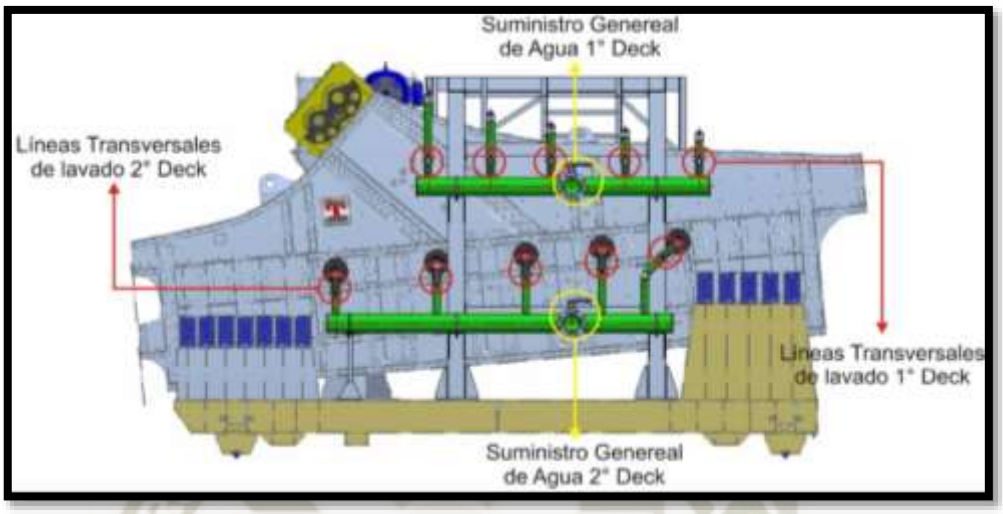
PARTES DE LA ZARANDA	
ITEM	**COMPONENTE**
1	Motor Eléctrico
2	Excitador (3 unidades)
3	Caja de Zaranda
4	Paneles de Poliuretano
5	Vigas o Rieles
6	Resortes
7	Sistema de Lavado
8	Soporte de sistema de lavado
9	Viga de soporte de excitadores
10	Soporte de placas laterales
11	Trolley
12	Cilindro Hidráulico (4 unidades)
13	Base de Motor Eléctrico
14	Protección de accionamiento
15	Protección de eje Cardan
16	Protección de excitador
17	Eje Cardan
18	Polea (2 unidades)
19	Correa
20	Chumaceras Horizontales
21	Orejas de izaje (4 unidades)

Fuente: Elaboración Propia.

El sistema de lavado consiste solamente de tuberías y conexiones controladas por válvulas de bola y válvulas de mariposa, y su función es lavar el material que se tamizará. Las válvulas de bola están distribuidas en todas las líneas transversales de lavado, lo que permite controlar la posición de lavado en cada deck. “En cuanto a las válvulas de mariposa, permiten abrir o cerrar el suministro general de agua para el primer segundo deck. Se debe verificar que el sistema de lavado este bien ajustado a la cantidad de material que está siendo tamizada. Si es necesario, ajustar el flujo de agua a través de las válvulas de bola de cada línea de pulverización. La zaranda vibratoria

consta de dos acelerómetros, instalados uno a cada lado de la caja de la zaranda, a fin de monitorear y documentar el estado dinámico en el que la maquina está funcionando" (TECSUP, 2013, pág. 3).

Figura N° 42 Sistema de lavado de la zaranza vibratoria



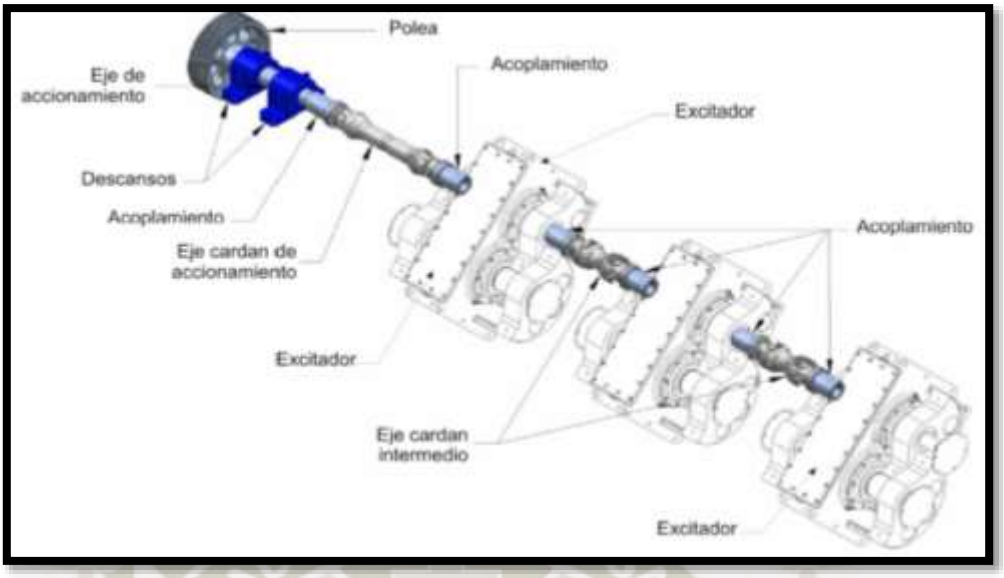
Fuente: (TECSUP, 2013, pág. 5)

3.2.4.2.Funcionamiento de la Zaranda Vibratoria

La zaranda vibratoria funciona accionada por un motor eléctrico de transmisión indirecta por poleas y correas de transmisión, que induce la vibración a través de un eje y tres excitadores. El peso muerto de la estructura y la fuerza centrífuga generada por el movimiento, es resistido por soportes exteriores o amortiguadores estacionarios adheridos a la estructura del soporte (resortes helicoidales de alta resistencia).

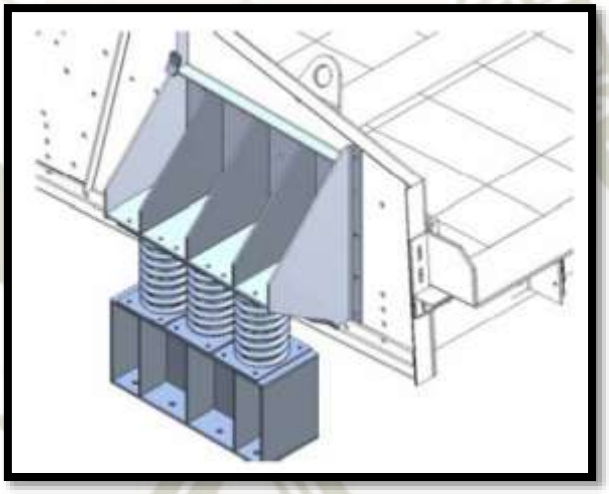
"El mineral proveniente del trommel del molino SAG, es separado en función de sus dimensiones. Las partículas finas pasan a través de las aberturas de los paneles de la zaranda, formando el flujo de undersize. Las partículas gruesas continúan sobre los paneles, formando el flujo de oversize. La Zaranda Vibratoria R-MD cuentan con dos decks (pisos) que permiten la clasificación del mineral en tres flujos: el oversize del 1° y 2° deck (piso) que es enviado al chute de descarga para ser conducido mediante correas a la planta de chancado de pebbles, mientras que el undersize del 2° piso (deck), se deposita en la canaleta de descarga (cajón SUL) para luego ser enviado al circuito de molienda secundaria" (TECSUP, 2013, pág. 3).

Figura N° 43 Transmisión del movimiento generado por el motor a los excitadores



Fuente: (TECSUP, 2013, pág. 3)

Figura N° 44 Amortiguadores estacionarios adheridos a la estructura de la zaranda



Fuente: (TECSUP Manual de Operación - Zaranda, 2013, p3).

"Para acelerar el proceso de separación, la zaranda vibra con pequeños movimientos circulares. Los movimientos vibratorios son alcanzados gracias a que las zarandas están equipadas con tres excitadores. Los excitadores, están compuestos básicamente de un eje largo apoyado sobre rodamientos de rodillos, sobre los cuales las masas excéntricas son montadas en los extremos" (TECSUP, 2013, pág. 1).

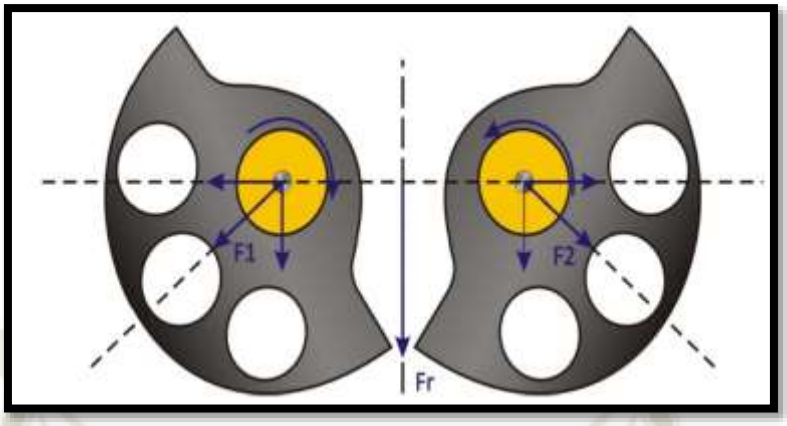
Figura N° 45 Vista del excitador de la Zaranda

Fuente: Elaboración Propia.

"Los ejes de cada mecanismo son accionados para rotar en sentidos opuestos, a la misma velocidad. De esta forma, los componentes de la fuerza centrífuga F1 y F2, generados por los contrapesos se suman para formar la fuerza de excitación del equipo a lo largo de la línea de acción (Fr) y los componentes que actúan perpendicularmente a ella se cancelan mutuamente" (TECSUP, 2013, pág. 1).

"La masa excéntrica es el resultado de la sumatoria de la masa de todos los contrapesos multiplicados por la distancia entre el centro de gravedad y el punto de giro (centro del eje). La masa excéntrica y, consecuentemente, la fuerza de excitación generada por el mecanismo vibratorio, pueden ser ajustadas gradualmente por el desfase angular entre el contrapeso fijo y el contrapeso móvil" (TECSUP, 2013, pág. 4).

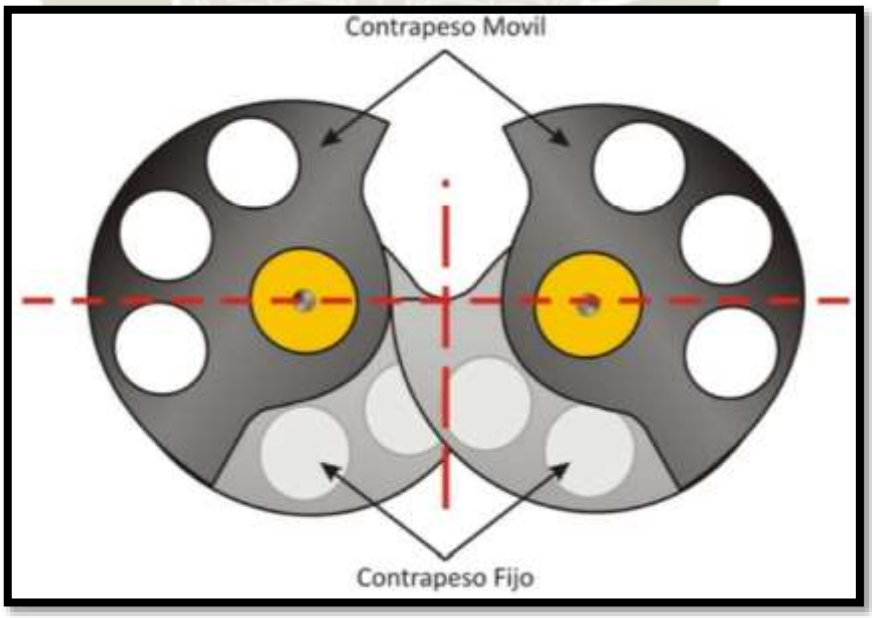
Figura N° 46 Movimiento de los contrapesos



Fuente: Elaboración Propia.

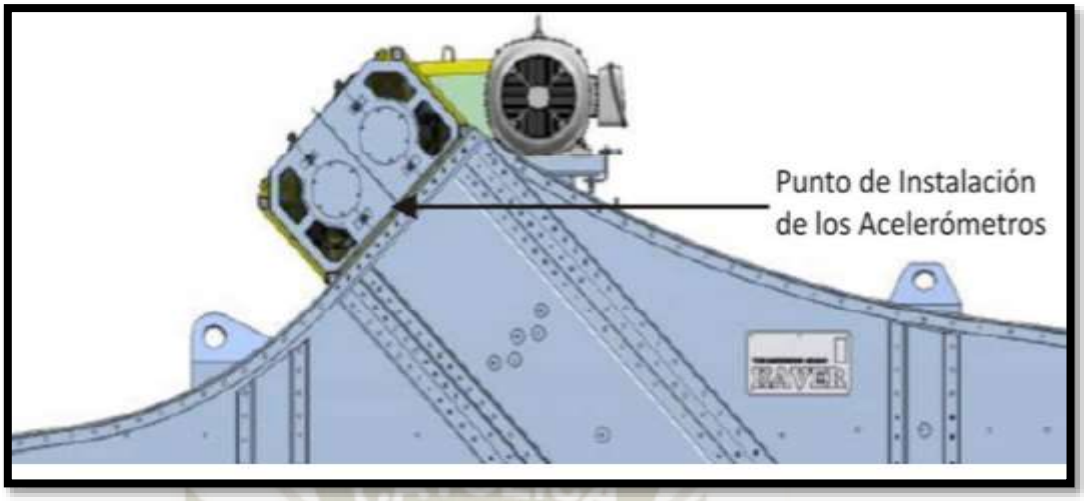
"Cuando mayor es el desfase angular, menor es el momento excéntrico, por lo tanto, menor es la amplitud. Una amplitud pequeña origina que las partículas se mantengan en las aberturas de las mallas. Una amplitud grande hará que las partículas salten mucho, generando una alta producción y evitando los riesgos de la obstrucción de los paneles. En general se usa una amplitud grande con partículas gruesas cuando la carga en los paneles es alta y una amplitud pequeña para el caso de material fino" (TECSUP, 2013).

Figura N° 47 Movimiento de los contrapesos



Fuente: Elaboración Propia.

Figura N° 48 Monitoreo y documentación de la aceleración



Fuente: Elaboración Propia.

Los acelerómetros monitorean los siguientes parámetros:

- Registrar los datos de aceleración de la zaranda.
- Vigilar la respuesta de aceleración.
- Alertar cuando se producen fallos en la zaranda.

"La aceleración máxima recomendada para la zaranda vibratoria es de 4,5 g. Como la rotación del equipo influye en los valores de la aceleración, es extremamente importante prestar atención para que la zaranda no trabaje por encima del límite máximo de aceleración especificado" (TECSUP, 2013, pág. 5).

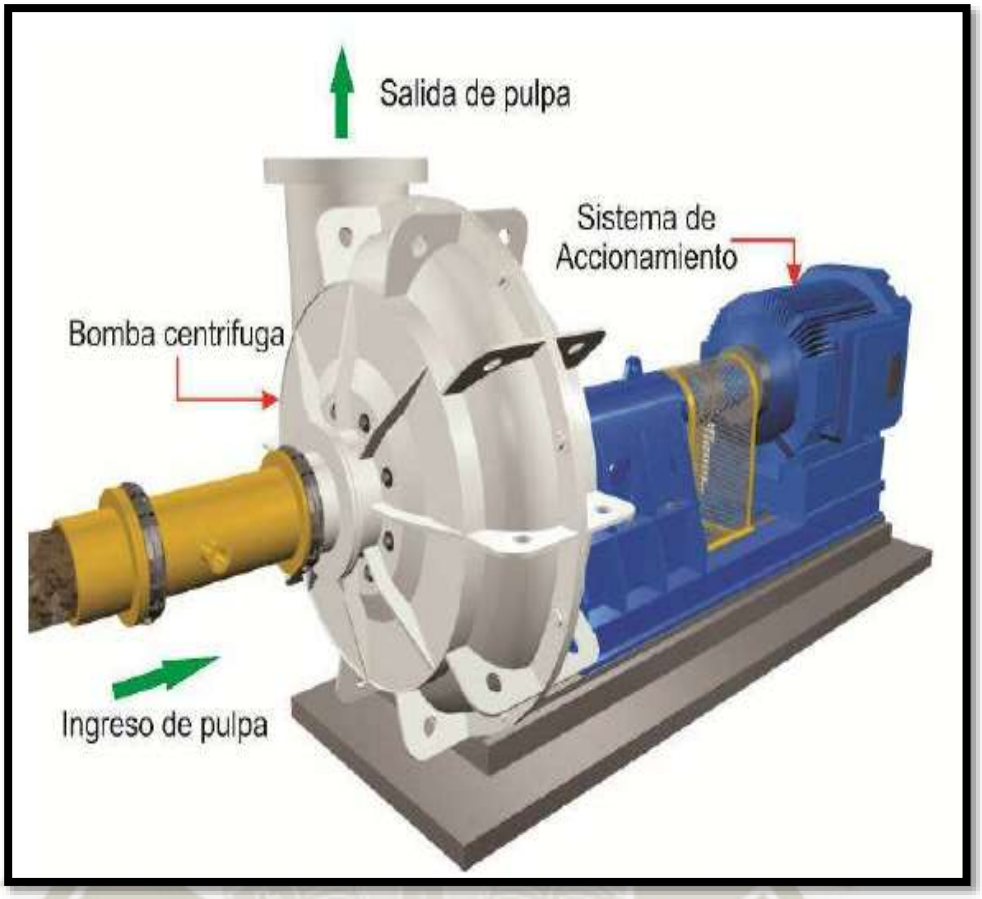
Como algunos datos operacionales se deben tener en cuenta Las zarandas R-MD no pueden operar si se presentan algunas de las siguientes situaciones:

- Holgura en los ejes cardanes.
- Quiebre del cardan intermedio.
- Desequilibrio de los contrapesos en los excitadores.

3.2.5. Bomba Centrífuga

"Las bombas centrifugas de alimentación de pulpa, a los nidos de ciclones, son equipos electromecánicos, que convierten la energía mecánica proporcionada por el sistema de accionamiento (motor-transmisión), en energía cinética, para posteriormente proporcionar presión y caudal constante al fluido bombeado (pulpa de mineral)" (TECSUP, 2013, pág. 5).

Figura N° 49 Bomba centrifura de pulpa.



Fuente: (TECSUP, 2013, pág. 5)

Cuadro N° 26 Especificaciones técnicas de la bomba centrífuga

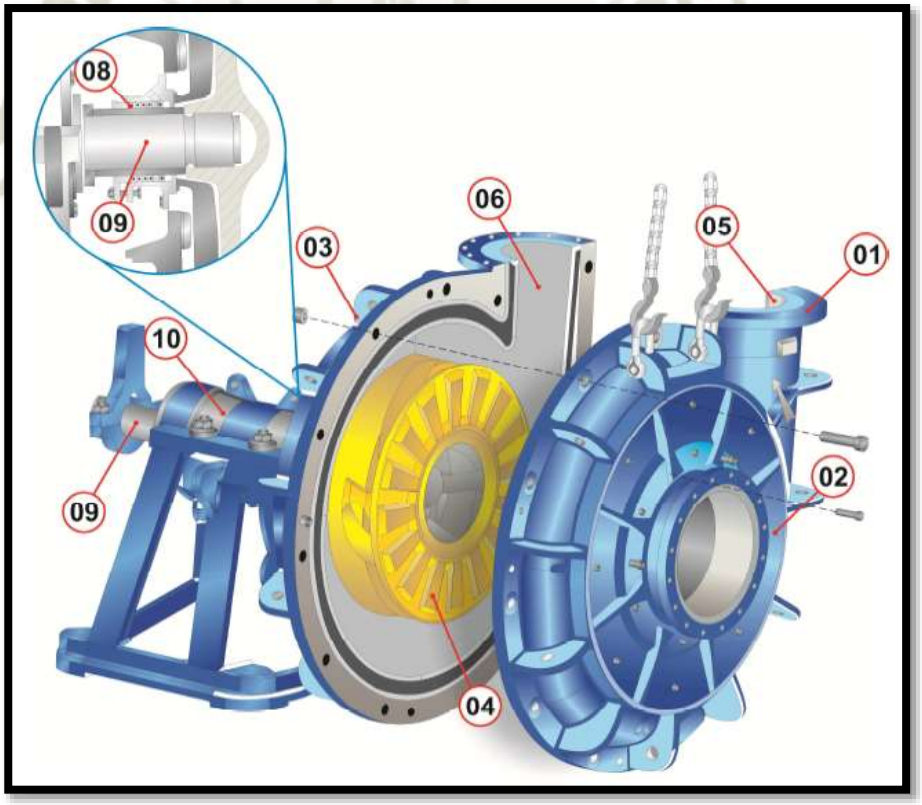
ESPECIFICACIONES TECNICAS	
Datos Generales	
Fabricante	WEIR
Modelo	Warman LSA 26 x 28-58
Tipo	Centrifugas Horizontales
Tamaño	26 x 28
Capacidad (diseño)	10 577 m3/hr
Velocidad de giro (diseño)	Velocidad ajustable
Datos específicos	
Motor	
Tipo/Posición de montaje	Eléctrico / En línea
Potencia	1500 kW
Velocidad de giro/Control	1,800 RPM / VDF

Carcasa	
Tipo/Material	Voluta/ Nodular
Revestimiento interior	Natural Rubber
Impulsor	
Tipo/Material	Cerrado/ Cromo A05
Revestimiento	NA
Diámetro (máximo)	1778 mm
Sello	
Tipo/Material	Prensa-estopa/Grafito
Flujo de agua de sello	20 – 32 GPM
Presión de agua de sello	660 KPa

Fuente: Elaboración Propia

3.2.5.1.Partes de la bomba centrífuga

Figura N° 50 Partes de la Bomba Centrígufa



Fuente: Elaboración Propia

Cuadro N° 27 Partes de la bomba centrífuga

ITEM	COMPONENTE
1	Carcasa
2	Plato de carcasa (lado de succión)
3	Plato de carcasa (lado del motor)
4	Impulsor
5	Revestimiento interior (lado de succión)
6	Revestimiento interior (lado del motor)
7	Tubería de ingreso de agua de sello
8	Prensaestopas
9	Eje
10	Caja de rodamiento

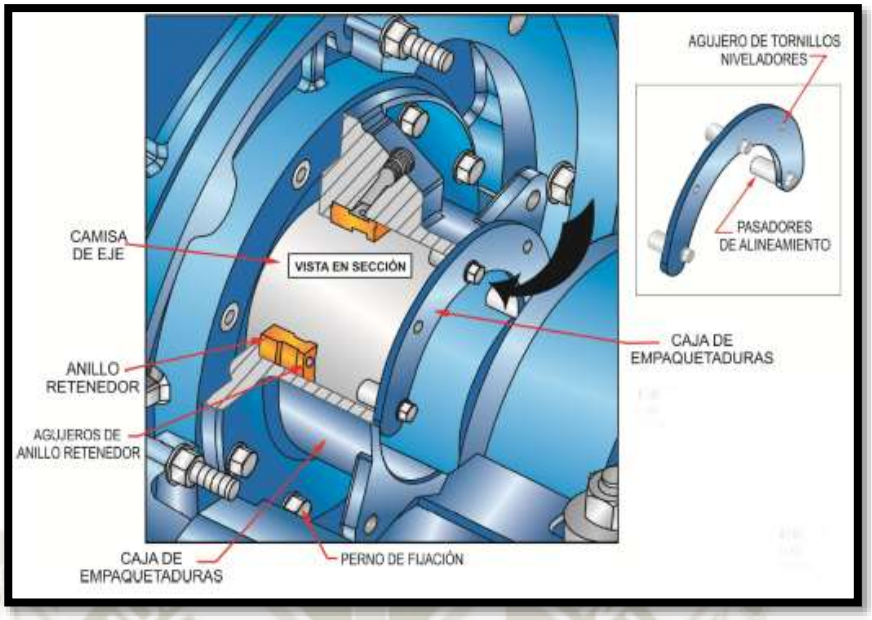
Fuente: Elaboración Propia

3.2.5.2.Funcionamiento de la Bomba Centrífuga

La pulpa contenida en el cajón de alimentación, sale desde el fondo de este, a través de las tuberías de succión y penetra axialmente hasta la entrada de la bomba centrifuga. "Al llegar la pulpa al impulsor, el flujo de pulpa experimenta un cambio de dirección un tanto brusco, es decir, pasa de un flujo lineal a un flujo radial; los alabes del impulsor, cambian la dirección del movimiento de la pulpa, sometiéndola a un movimiento de rotación muy rápido; de tal forma, que encamina la pulpa hacia la tubería de descarga de la bomba, por acción de la fuerza centrífuga" (TECSUP, 2013, pág. 4).

"Cada una de las bombas centrifuga, alimenta al nido o batería de ciclones, por medio de líneas independientes, para su posterior clasificación. La bomba centrifuga, cuenta con sello de prensa estopa, para evitar que la pulpa salga fuera de la carcasa. El sello se encuentra montado sobre el eje; este sello, consiste en anillos de material de empaquetadura, que se envuelven alrededor del eje, los cuales son comprimidos contra el eje y la caja de empaquetaduras mediante un collar que se desliza hacia el espacio que está detrás de éstas" (TECSUP, 2013, pág. 4).

Figura N° 51 Sello de prensa estopas



Fuente: Elaboración Propia

Cuadro N° 28 Tamaño de perno y torque requerido según tamaño de bomba

TAMAÑO DE BOMBA	TAMAÑO DE PERNO	TORQUE N-m / Lb-pie
250 – 300	M16	61-45
350 - 450	M20	118-87
550 - 650	M24	203-150

Fuente: Elaboración Propia

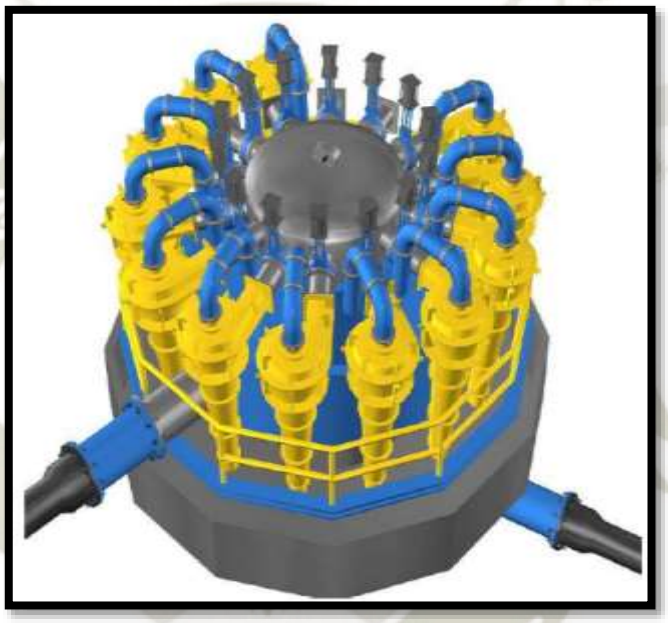
El agua de sello se inyecta a la caja de empaquetaduras, justo dentro de los anillos del empaque, este ingresa a una presión mayor que la presión de descarga de la bomba.

"El sello, se ajusta lo suficiente, como para que una pequeña cantidad de agua logre pasar a través de las estopas y pueda lubricarlo. Se debe de controlar el goteo del sello de agua y este debe oscilar entre 20 y 32 gotas por minuto. Cada bomba de alimentación al nido de ciclones, cuenta en la tubería de succión con una válvula neumática de compuerta de tipo cuchilla. Las válvulas de succión de la bomba, se usan para aislar la bomba mientras la planta funciona o mientras la bomba está fuera de funcionamiento.Las tuberías de descarga y succión de bombas también tienen tuberías de drenaje, que están equipadas con válvulas de compuerta tipo cuchilla, operadas neumáticamente" (TECSUP, 2013, pág. 4).

3.2.6. Nido o batería de Hidrociclones

La batería de hidrociclones (nido de ciclones), son un conjunto de 12 ciclones distribuidos en 14 posiciones, de los cuales 10 ciclones se encuentran en operación, 2 en standby y 2 se encuentran en blanco, para actividades de mantenimiento. Los hidrociclones, son equipos empleados para la clasificación de pulpa, destinados a separar las partículas finas (overflow) de las partículas gruesas (underflow) (TECSUP, 2013, pág. 1).

Figura N° 52 Nido o batería de ciclones



Fuente: (TECSUP, 2013, pág. 4).

Cuadro N° 29 Especificaciones técnicas del nido de ciclones

ESPECIFICACIONES TECNICAS	
Datos Generales	
Fabricante	FL KREBS
Modelo	Batería de 12 ciclones
Servicio	Clasificación de pre-molienda
Cantidad de hidrociclones por batería	12
Flujo de alimentación (nominal)	10 577 m3/h
Flujo de overflow (nominal)	4548 m3/h (35% de sólidos)
Flujo de underflow (nominal)	7133 m3/h (68% de sólidos)
Datos específicos	

Hidrociclón	
Tamaño (diámetro)	838 mm (33”)
Material	Acero al carbón
Revestimiento	Caucho Adhesivo
Dureza	45 Shore A ± 5
Espesor	25 mm
Dimensiones del cilindro	838 X 673
Dimensiones del cono	20 ° x 2389 mm
Alimentación	
Conexión de alimentación	1829 mm
Salida de Overflow	
Conexión de o’flow	1000 mm
Diámetro del vortex	Ø 5000 mm
Material del vortex	Carburo de Silico
Salida del Underflow	
Conexión del unflow	Ø 6900 mm
Diámetro del Apex	1050 mm
Material del Apex	Carburo de Silicio

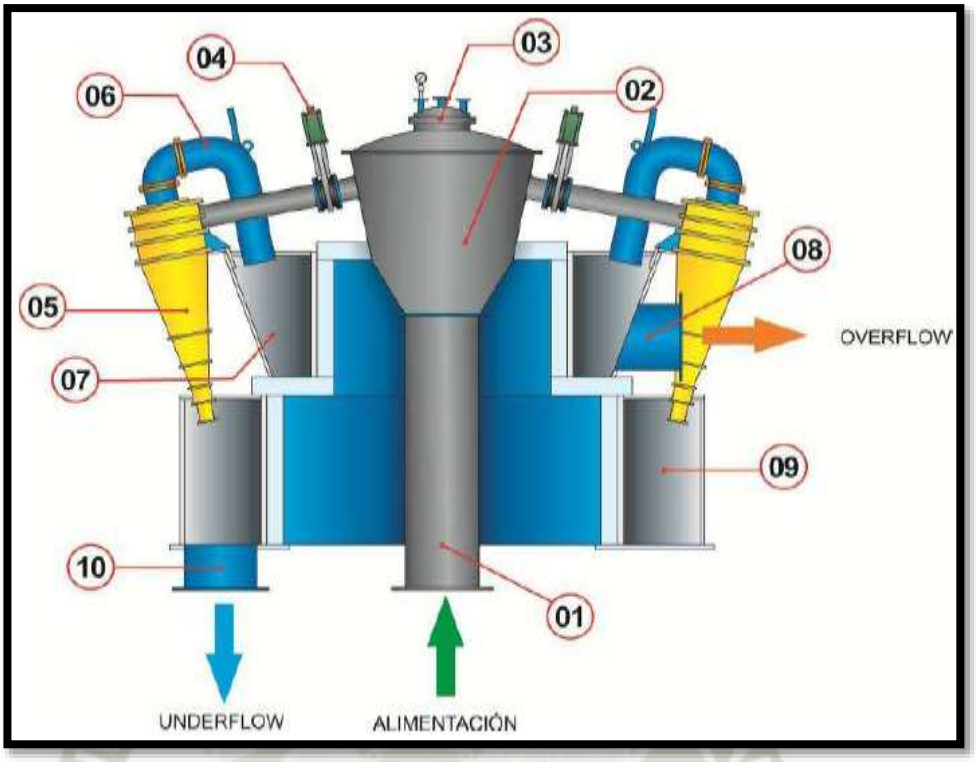
Fuente: Elaboración propia

3.2.6.1.Partes del Nido de Hidrociclones

La batería o nido de hidrociclones, es la encargada de realizar la clasificación de las partículas gruesas de las finas, del flujo de alimentación entregado por las bombas de tal modo, que los hidrociclones entregan dos flujos separados:

- Un primer flujo: llamado overflow, conformado por las partículas finas, de bajo peso y de un tamaño menor. Este flujo sale por la parte superior del hidrociclon hacia el siguiente proceso de flotación.
- Segundo Flujo: llamado underflow, conformado por las partículas gruesas, de gran peso y de un tamaño mayor que el anterior. Este flujo sale por la parte inferior del hidrociclon hacia el cajón de alimentación de del molino de bolas, para seguir con el proceso.

Figura N° 53 Partes principales del Nido de Hidrociclones



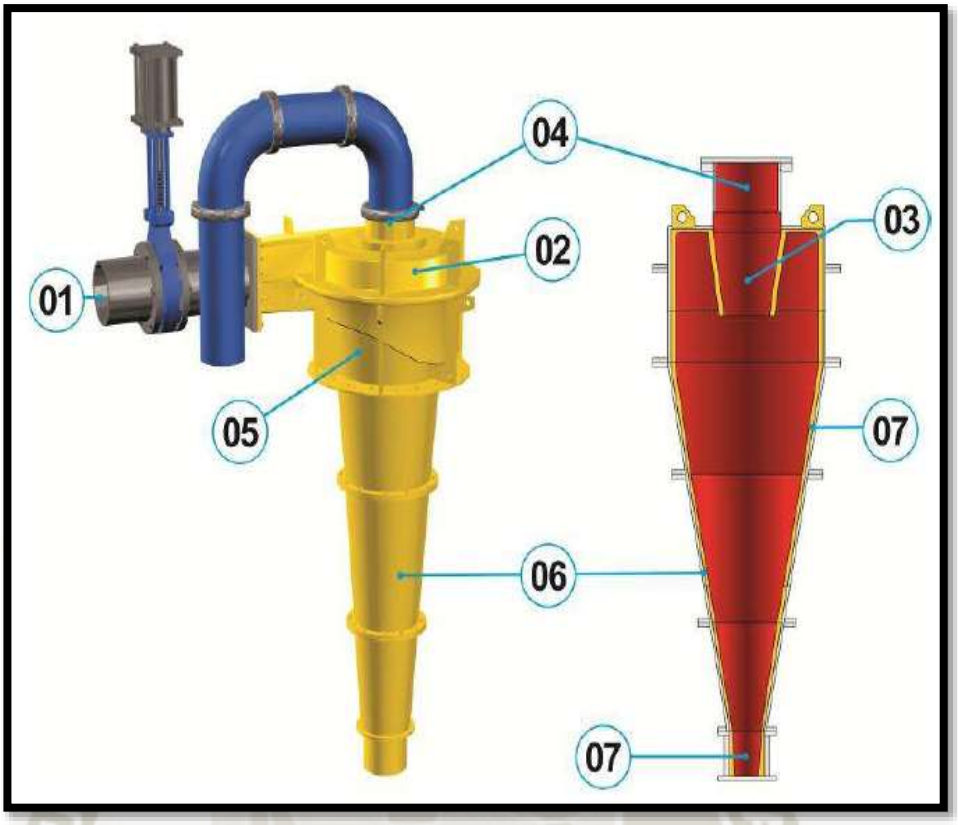
Fuente: (TECSUP, 2003, pág. 4).

Cuadro N° 30 Especificaciones técnicas del nido de ciclones

ITEM	COMPONENTE
1	Tubería de alimentación
2	Distribuidor
3	Compuerta de inspección
4	Válvula cuchilla neumática
5	Hidrociclón
6	Tubería de rebalse del Ciclón
7	Canaleta de Rebalse (overflow)
8	Tubería de Salida del Rebalse (overflow)
9	Canaleta de la Descarga (underflow)
10	Tubería de Salida de la Descarga (underflow)

Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 54 Componentes externos del Nido de Hidrociclones



Fuente: (TECSUP, 2003, pág. 4).

Cuadro N° 31 Componentes externos del Nido de Hidrociclones

ITEM	COMPONENTES
1	Adaptador de alimentación
2	Cabezal
3	Vórtex Finder
4	Adaptador de rebalse
5	Sección cilíndrica
6	Sección cónica
7	Ápex
8	Revestimiento Interior

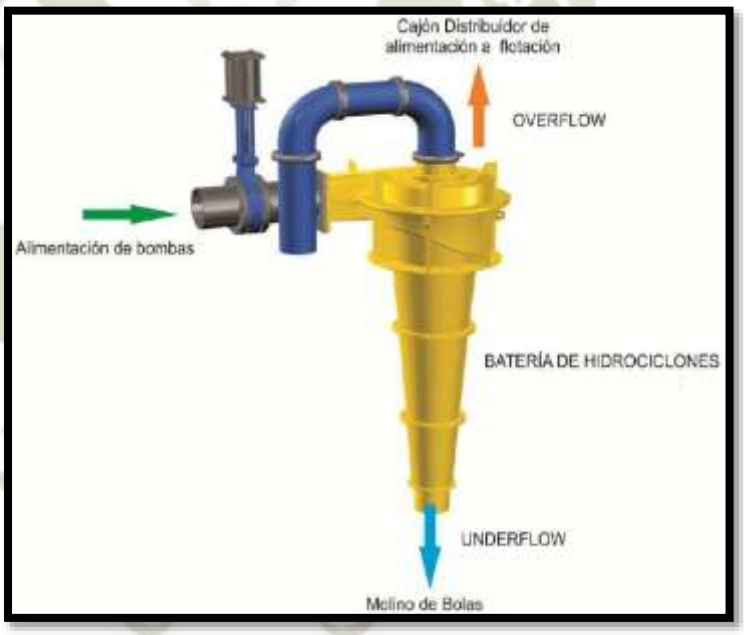
Fuente: Elaboración Propia

3.2.6.2.Funcionamiento del Nido o Batería de Hidrociclones

La pulpa proveniente de las bombas de alimentación de los ciclones, ingresa por la parte inferior del distribuidor de alimentación cilíndrico. En la zona baja se encuentran distribuidas de forma simétrica las tuberías de alimentación a los ciclones.

"En cada línea de alimentación a los ciclones, se encuentran montadas válvulas neumáticas tipo cuchilla, que son las encargadas de dar paso a la pulpa de alimentación a cada ciclón. Estas válvulas pueden operarse en forma independiente y de manera remota, desde el cuarto de control Al ingresar la pulpa a través de la tubería de alimentación en la sección cilíndrica del hidrociclon, esta se desplaza en forma descendiente en un espiral, forzado por la nueva alimentación que ingresa detrás. La fuerza centrífuga creada por el movimiento circular dentro del hidrociclón, separa las partículas finas de las partículas gruesas en dos flujo" (TECSUP, 2003, pág. 4).

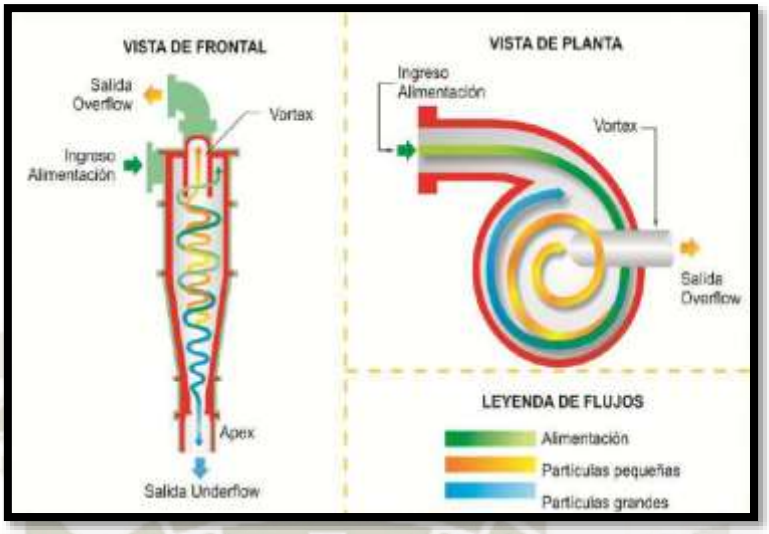
Cuadro N° 32 Distribución de los flujos del Hidrociclón



Fuente: Elaboración Propia.

"Las partículas más grandes y pesadas son expulsadas hacia las paredes del ciclón, desde donde escurren hacia el ápex del ciclón. A todo este conjunto de partículas pesadas se denomina oveflow. Las partículas más livianas y finas son arrastradas con la mayor parte del agua hacia el vórtex del ciclón. A todo este conjunto de partículas se denomina underflow. El balance entre la fuerza centrífuga y la fuerza de arrastre determina el lugar de salida de las partículas" (TECSUP, 2003, pág. 4).

Figura N° 55 Funcionamiento del nido de hidrociclones



Fuente: Elaboración Propia

"La descarga (Underflow) del hidrociclón, fluye por gravedad al cajón de alimentación al molino de bolas, a través de una canaleta. El rebalse (overflow) del hidrociclón, es recolectado en una canaleta diferente a la anterior, que descarga por gravedad en el muestreador primario de finos de los ciclones y luego en el cajón de distribución, para ir posteriormente a la flotación rougher" (TECSUP, 2003, pág. 2).

3.2.7. Molino de Bolas

"Es un equipo de rotación, que se utilizan para reducir el tamaño de las partículas de mineral; utilizando una combinación de impacto y abrasión, para conseguir un tamaño de partícula requerido, para su posterior recuperación en el proceso de concentración por flotación. El molino de bolas, reduce de tamaño las partículas de mineral El tamaño de ingreso del mineral es de 2000 micrones y el mineral molido de salida oscila entre los 125 y los 220 micrones" (TECSUP, 2003, pág. 1).

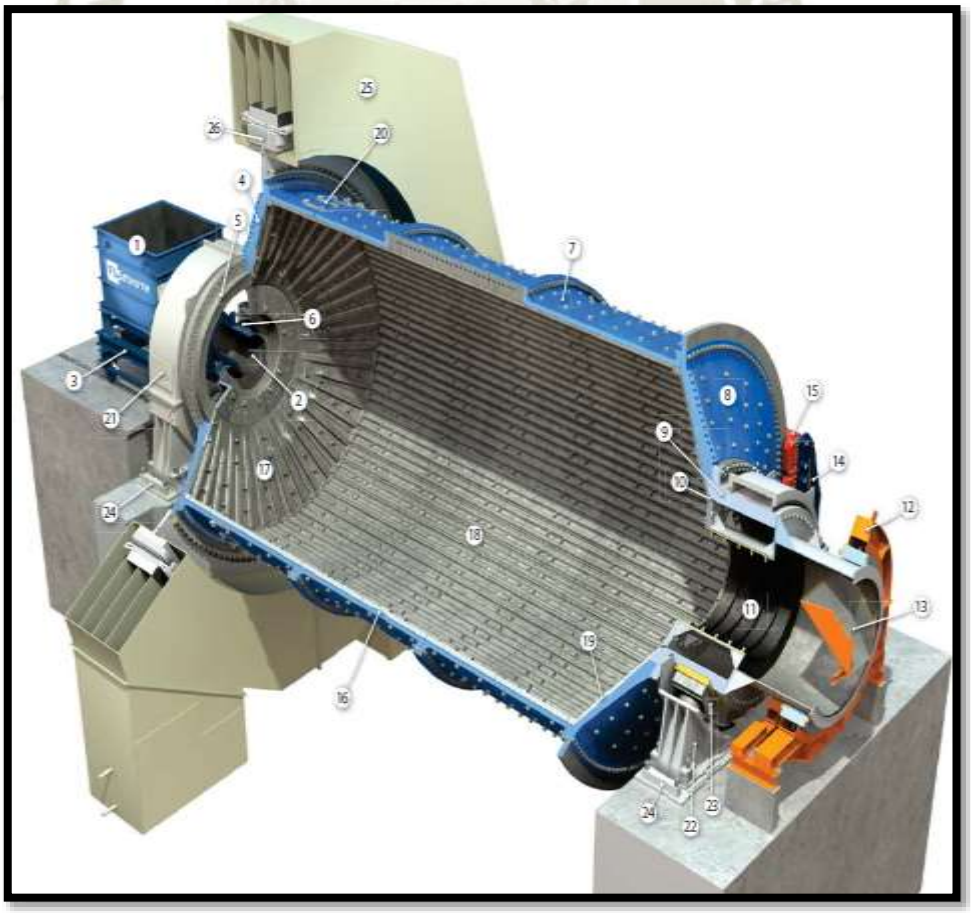
Cuadro N° 33 Componentes externos del Nido de Hidrociclones

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Datos Generales	
Fabricante	FLSmidth
Tipo	Molienda húmeda, descarga por rebose
Tamaño	26 pies D x 40 pies L
Capacidad (diseño)	20382 TPH
Carga de Bolas	35% del volumen (máx.)
Carga de Mineral	30% - 45% del volumen (máx.)
Velocidad de Giro	11.37 RPM variable (75% veloc. Critica)
Pulpa de Alimentación	80% pasante 2000 micrones
Pulpa de Descarga	80% pasante 125 / 220 micrones

Fuente: Elaboración Propia

3.2.7.1.Partes del molino de bolas

Figura N° 56 Partes de molino de bolas



Fuente: (FLSMIDTH , 2013, pág. 3)**.**

Cuadro N° 34 Partes principlaes del molino de bolas

ITEM	COMPONENTES
1	Chute de alimentación
2	Revestimiento del chute de alimentación
3	Base del chute de alimentación
4	Tapa del lado de alimentación
5	Trunnion del lado de alimentación
6	Anillo de levante o sello
7	Coraza
8	Tapa del lado de descarga
9	Trunnion del lado de descarga
10	Sello de los revestimientos del trunnion
11	Revestimiento del trunnion del lado de descarga
12	Imán del trunnion
13	Chute de descarga
14	Base de los frenos
15	Zapatas del freno del molino
16	Revestimiento de hule
17	Revestimiento del cabezal de alimentación
18	Revestimiento de la coraza
19	Revestimiento del cabezal de descarga
20	Pernos de fijación
21	Cojinete del lado de alimentación
22	Cojinete del lado de descarga
23	Cojinete tipo pad
24	Base de cojinete
25	Estator
26	Polos deslizantes

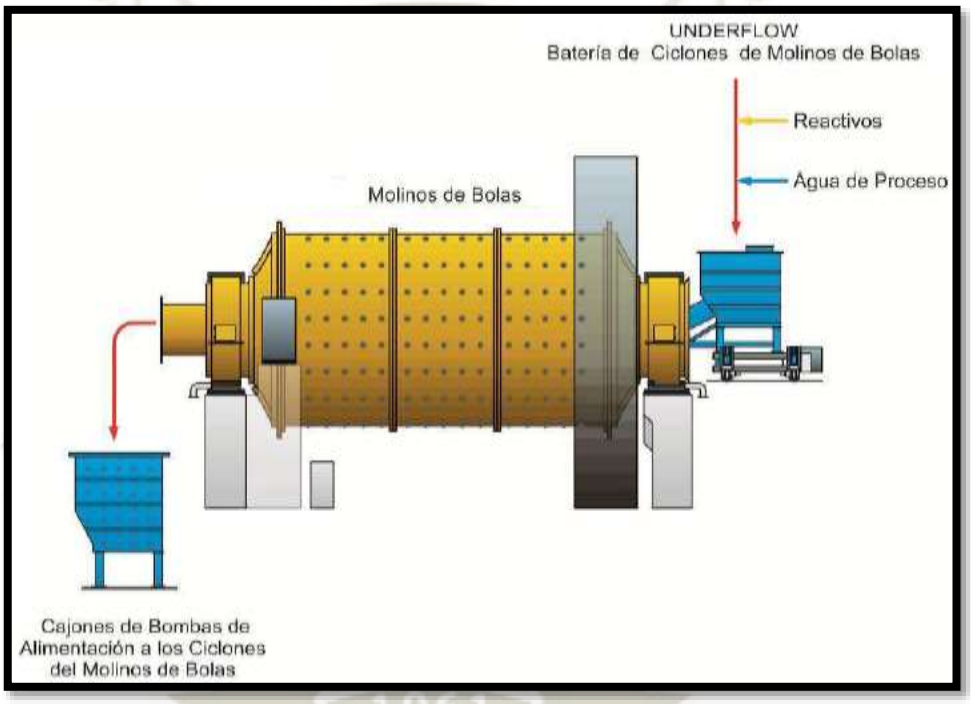
Fuente: Elaboración Propia

3.2.7.2.Funcionamiento del molino de bolas

"El molino trabaja bajo un sistema cerrado, en dicho sistema el molino es alimentado por el cajón (cajón SUL), proveniente del overflow de la batería de ciclones, agua de proceso, reactivos y bolas de molienda. Las bolas de acero de 3 pulgadas, llenan el

molino, hasta un promedio de 35% del cuerpo y la pulpa llena el vacío entre las bolas, cubriendo un 35% a 45 % del cuerpo. Cuando el molino gira sobre sus chumaceras (apoyos), por acción del motor, las bolas junto con el mineral son elevados por acción de rotación y por la forma ondula de las chaquetas (revestimientos interiores). El mineral junto con las bolas de acero, sube hasta una altura determinada, de donde posteriormente caen, girando y/o golpeándose entre sí y contra las chaquetas. El ciclo se repite, cuando vuelven a subir y bajar, el mineral junto con las bolas, dando como resultado el proceso de molienda" (TECSUP, 2013, pág. 4).

Figura N° 57 Flujo de funcionamiento del molino de bolas



Fuente: Elaboración Propia

Hay que tener presente, que en un molino con una velocidad de giro demasiada lenta (movimiento de cascada) ocasionaría que el proceso de molienda se realice por fricción y/o cizallamiento y con una baja eficiencia.

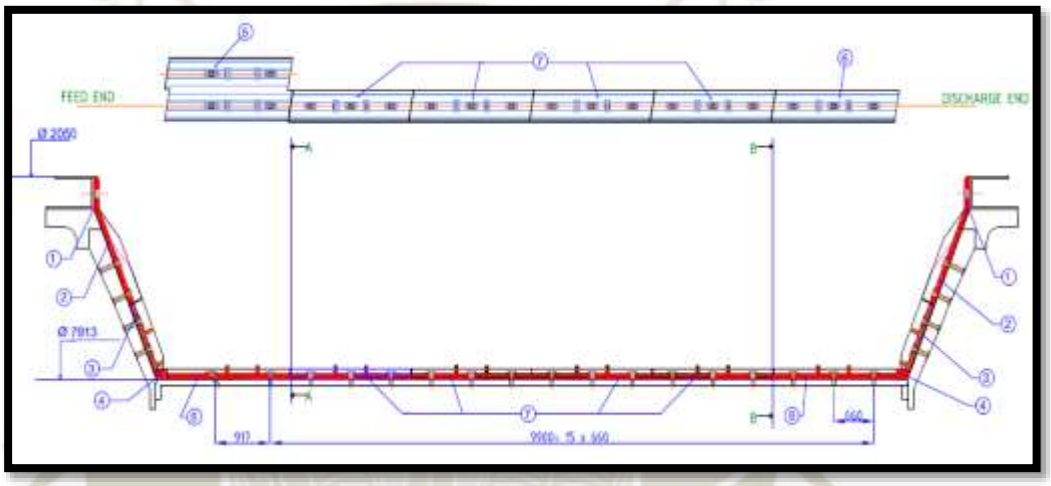
"Mientras que una velocidad de giro demasiada rápida (movimiento de catarata), realiza un proceso de molienda por impacto, de baja eficiencia y dando origen a un producto más grueso. Lo ideal, para un giro de un molino con estas características, es de 11.37 RPM (75% velocidad Critica). El agua y el mineral en forma de pulpa, rebalsan el muñón de descarga del molino y fluye hacia los cajones de las bombas de alimentación a los ciclones donde se encuentra con la corriente de pulpa del cajón distribuidor de la descarga del molino SAG. Aquí se agrega agua a esta pulpa para ajustar su densidad

antes de que sea bombeada al sistema de clasificación en ciclones" (TECSUP, 2013, pág. 4).

3.2.7.3.Sistema Estructural

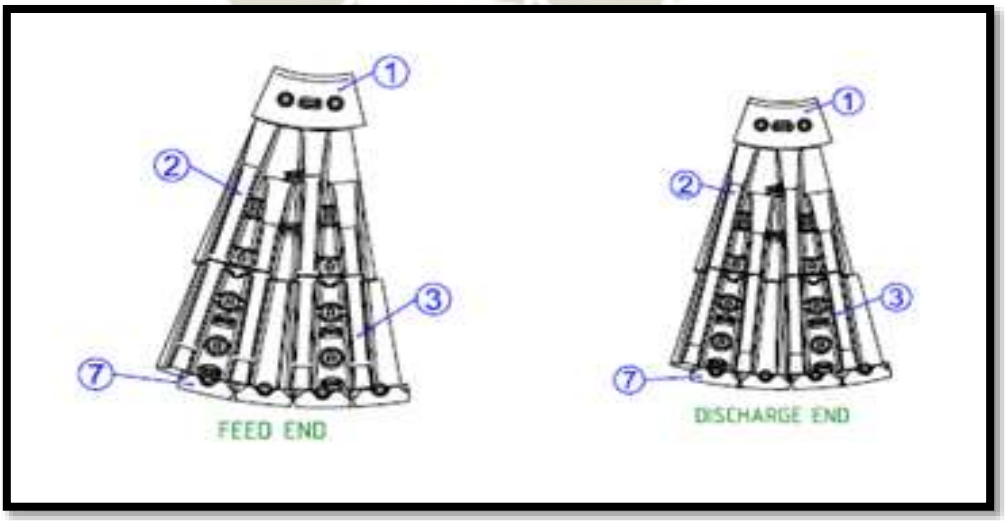
"El sistema estructural es el encargado de proteger al molino el cual consta del cuerpo (Shell), los cabezales de desgaste, los trunnion, cojinetes, chutes de alimentación y de descarga" (TECSUP, 2013, pág. 3).

Figura N° 58 Vista Transversal de la ubicación de los revestimientos del molino de bolas



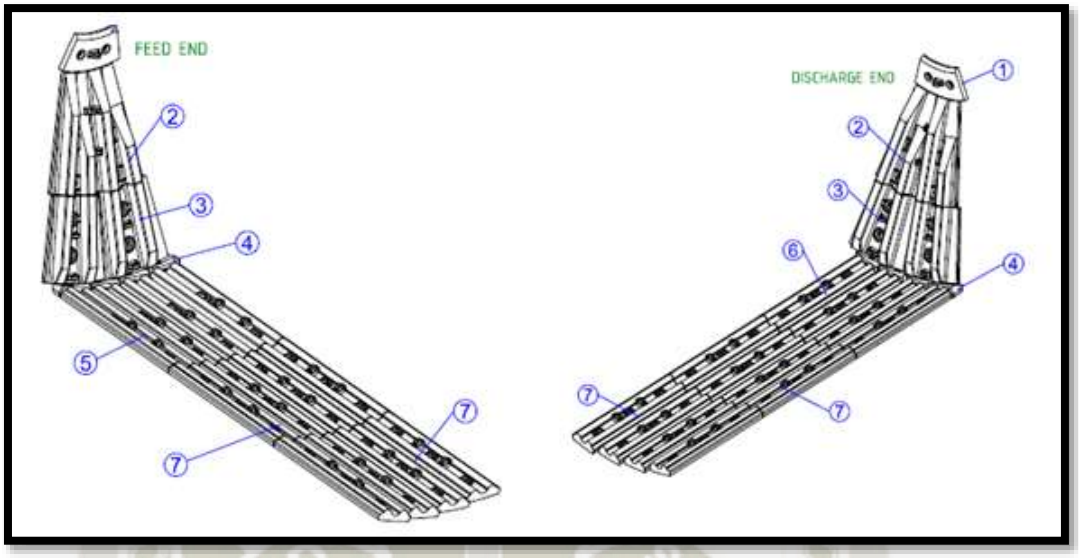
Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 59 Componentes de desgaste (linners) tanto del lado de alimentación como el de descarga



Fuente: Elaboración Propia.

Figura N° 60 Liners del lado de alimentación y de descarga



Fuente: Elaboración Propia

Cuadro N° 35 Componentes de desgaste del molino de bolas

COMPONENTES DE DESGASTE O LINNER DEL MOLINO DE BOLAS			
ITEM	**DESCRIPCIÓN**	**PESO**	**CANTIDAD**
1	FE & DE Plate Trunnion Liner	206	20
2	FE & DE Inner Head Liner	1654	24
3	FE & DE Outer Head Liner	885	48
4	FE & DE Filler Ring	165	52
5	FE Shell Liner	1577	26
6	DE Shell Liner	778	52
7	Middle Shell Liner	759	208

Fuente: Elaboración Propia

CAPITULO IV

PROCESO DE IMPLEMENTACION DE RCM II

4.1. ETAPAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL RCM

Las etapas consideradas para la ejecución correcta del RCM II, serán las siguientes

Esquema N° 1 Diagrama de flujo de implementación del Mantenimiento Basado en Confiabilidad

Fuente: Elaboración Propia

4.1.1. Formación del equipo natural de trabajo

En esta etapa se formó el equipo natural de trabajo, el cual define y clasifica los objetivos, parámetros de aceptación con respecto a la criticidad de los activos físicos, teniendo en cuenta las políticas de seguridad de medio ambiente que rigen las leyes en minería el equipo natural de trabajo es multidisciplinario y altamente capacitado, se involucró personal de mantenimiento, operaciones y especialistas.

Cuadro N° 36 Equipo natural de trabajo

EQUIPO NATURAL DE TRABAJO			
N°	**APELLIDOS Y NOMBRES**	**FUNCION**	**PRINCIPAL RESPALDO**
1	ALEX BUHESO, PETER	Líder	Principal
2	PACHAS LOVON, VICTOR	Líder	Principal
3	JAVIER MENDOZA RIVERO	Mecánico	Principal
4	JORGE TAPIA ZEVALLOS	Electricista	Principal
5	AURELIO MAMANI SALAS	Operador	Principal

Fuente: Elaboración Propia

Una vez determinado el equipo natural de trabajo, se procedió con el desarrollo del plan de trabajo para el proceso de implementación del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM II).

Cuadro N° 37 Equipo natural de trabajo

PLANIFICACIÓN DE ACTIVIDADES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL RCM II				
N°	ACTIVIDAD	METODOLOGÍA	LUGAR Y HORA	RESPONSABLE
1	Definición de equipo de trabajo	FODA aplicada a los grupos de trabajo	Sala Cobre main office 3- 5 pm.	Gerencia operaciones y Mantenimiento
2	Selección del Sistema piloto. Plan de Trabajo	Evaluación de la criticidad en el Concepto de Riesgo Metodologia 5W-1H	Sala Molibdeno Main Office 6-8 pm.	Gerencia operaciones, mantenimiento
3	Definición del Contexto operacional del sistema piloto	Resumen Operativo. Propósito del sistema. Descripción de equipos. Descripción del proceso, dispositivos de	Sala Molibdeno Main Office 6-8 pm	Equipo natural de trabajo
		Análisis de Flow Sheet. Metas de seguridad, ambientales y operacionales	Sala Molibdeno Main Office 6-8 pm	Equipo natural de trabajo
		PERSONAL: Turnos rotativos, operacionales, KPI's.	Sala Molibdeno Main Office 6-8 pm	Equipo natural de trabajo
		DIVISIÓN DE PROCESOS: División de proceso en sistemas, definición de los limites de los sistemas, listado de componentes de cada sistema	Sala Molibdeno Main Office 6-8 pm	Equipo natural de trabajo
4	Definición de Funciones	AMEF: PARTE 1 Aplicado a los subsistemas	Sala Molibdeno Main Office 6-8 pm	Equipo natural de trabajo
		AMEF; PARTE 2 Aplicando a los subsistemas	Sala Molibdeno Main Office 6-8 pm	Equipo natural de trabajo
		AMEF; PARTE 3 Aplicando a los subsistemas	Sala Molibdeno Main Office 6-8 pm	Equipo natural de trabajo
5	Determinar los modos y consecuencias de las	AMEF; PARTE 4 Aplicando a los subsistemas	Sala Molibdeno Main Office 6-8 pm	Equipo natural de trabajo
6	Aplicación de la hoja de decisión para las actividades de mantenimiento	Árbol de decisiones del RCM	Sala Molibdeno Main Office 6-8 pm	Equipo natural de trabajo
7	Control de plan de implementación de	Comparación y evaluación de resultados	Sala Molibdeno Main Office 6-8 pm	Equipo natural de trabajo

Fuente: Elaboración Propia.

4.1.2. Determinación de los equipos críticos del área

Para la determinación de la criticidad se empleó el método de evaluación de la criticidad basada en el concepto de riesgo, la cual se muestra a continuación.

4.1.2.1. Determinación de criterios de evaluación de la criticidad.

Los criterios para determinar la criticidad están en función de la frecuencia y las consecuencias de falla de la misma, la fórmula utilizada para calcular la criticidad es la siguiente.

Criticidad = Frecuencia x Consecuencia

Criticidad = Frecuencia de falla* (Imp. Seguridad + Imp. Ambiente + (Niv. Prod.*TPPR * Imp. Prod.) + Imp. Mantenimiento)

En la siguiente tabla se muestra los criterios de evaluación y lo pesos que se han asignado a la frecuencia y consecuencias de falla de los equipos.

Cuadro N° 38 Criterio de evaluación

CRITERIOS DE EVALUACIÓN		
A. Conceptos o Criterios para la Frecuencia de falla		
N°	CRITERIO	PESO
1	Pésimo mayor 24 fallas/año	5
2	Promedio 18 - 24 fallas/año	3
3	Buena 6 - 18 fallas/año	2
4	Excelente menores 3 falla/año	1
B. Conceptos o Criterios para el Impacto en Seguridad		
N°	CRITERIO	PESO
1	Pérdidas de vidas humanas	5
2	Incapacidad permanentes del trabajador	4
3	Incapacidad temporal del trabajador	3
4	Daños menores al trabajador	2
5	No provoca ningún daño a las personas o instalaciones	1
C. Conceptos o Criterios para El Impacto en Medio Ambiente		
N°	CRITERIO	PESO
1	Afecta al medio ambiente - alto impacto - daños irreversibles	5
2	Afecta al medio ambiente produciendo daños reversibles	4
3	Provoca un impacto ambiental y viola normas ambientales	3
4	Provoca normas ambientales pero no viola las normas ambientales	2
5	No origina ningún defecto	1
D. Conceptos o Criterios para el impacto en la Producción		
Nº	CRITERIO	PESO
1	Parada inmediata de la planta	5
2	Parada inmediata de la línea de producción	3
3	Parada del sistema y tiene repercusión en otros sistemas	2
4	No afecta a la producción	1
E. Conceptos o Criterios para el Tiempo Promedio para Reparar		
Nº	CRITERIO	PESO
1	Mayor o igual a 12 horas	5
2	Mayor o igual a 10 horas	4
3	Mayor o igual a 6 horas	3
4	Mayor o igual a 4 horas	2
5	Menor a 2 horas	1
F. Conceptos o Criterios para el impacto en el nivel de Producción manejado		
Nº	CRITERIO	PESO
1	Reduce la producción de un 91% a un 100%	5
2	Reduce la producción de un 61% a un 90%	4
3	Reduce la producción de un 31% a un 60%	3
4	Reduce la producción de un 1% a un 30%	2
5	No afecta a la producción manejada	1

G. Conceptos o Criterios para el Impacto en el Mantenimiento		
Nº	CRITERIO	PESO
1	Mayor o igual a $ 150'000	5
2	Mayor o igual a $ 100'000	4
3	Mayor o igual a $ 50'000	3
4	Menor a $ 50'000	1

Luego se procedió a asignar a los equipos del área de molienda los respectivos pesos en función de su historial de fallas y términos operativos y de mantenimiento para finalmente calcular la criticidad.

Cuadro N° 39 Análisis de criticidad de Equipos de Molienda.

	EQUIPOS	A. Frecuencia	B. Imp. Seguridad.	C. Imp. Ambiente.	D. Nivel de Producción.	E. TPPR	F. Imp. Producción.	G. Imp. Mantenimiento.	CONSECUENCIA	CRITICIDAD	CRITICIDAD
1	Apron Feeder	1	3	4	1	1	1	3	11	11	N
2	Faja de Alimentación al molino SAG	5	4	3	4	2	3	3	34	170	S
3	Molino SAG	5	3	3	4	5	3	5	71	355	C
4	Zaranda Vibratoria	5	3	3	4	2	3	3	33	165	S
5	Bomba Centrifuga	2	2	2	3	1	2	3	13	26	N
6	Nido de Ciclones	1	3	2	1	1	1	3	9	9	N
7	Molino de Bolas	2	3	3	4	3	3	5	47	94	S

Fuente: Datos alcanzados en el estudio de criticidad.

La asignación de nivel de criticidad se dividió en tres segmentos Crítico, semicrítico y no crítico.

Cuadro N° 40 Ponderación de criticidad de Equipos de Molienda.

CRITICIDAD	CÓDIGO	RANGO
ALTA (CRITICO)	C	312 - 700
MEDIA (SEMICRITICO)	S	60 - 311
BAJA (NO CRITICO)	N	1-59

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro N° 41 Matriz de localización de criticidad de Equipos de Molienda.

FRECUENCIA	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
5				2;4				3					
4													
3													
2		5			7								
1	6	1											

CONSECUENCIA

Fuente: Datos alcanzados en el estudio de criticidad.

Se puede observar que el único equipo crítico se encuentra en la posición Nr3 y es el Molino SAG, el cual tiene una frecuencia de ocurrencia de fallas de 5 y un nivel de consecuencias de 71 puntos, los cual lo coloca en la zona crítica de color rojo, por lo que de ahora en adelante el Molino SAG será el objeto de estudio de RCM.

4.1.3. Contexto Operacional

Para poder realizar el plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad se tiene que describir primero las condiciones de operación del equipo analizar en este caso del Molino SAG.

4.1.3.1.Resumen operativo

El molino SAG materia de estudio tiene como función principal reducir el tamaño del mineral que viene del área de chancado con 250 mm. y enviarlo a las celdas de flotación con un tamaño de 0.15mm., este proceso de reducción se llama conminución. El molino SAG empleado para este proceso es de trituración húmeda y descarga por rejilla y ostenta una potencia de 24 000 KW con un motor de accionamiento periférico y es de un tamaño de 12.19 metros de diámetro por 7,62 metros de longitud.

El diseño de la planta de molienda estima un tratamiento promedio de 140 000 toneladas por día de mineral, con un esquema operacional de 365 días al año las 24 horas del día teniendo una utilización efectiva promedio del 92%.

Cuadro N° 42 Condiciones ambientales de operación del equipo.

Altitud	3698 m.s.n.m.
Temperatura Ambiente (min. y máx).	De -5°C a 23°C
Humedad	0.10%
Neblina	No
Lluvia	Si
Nieve	si

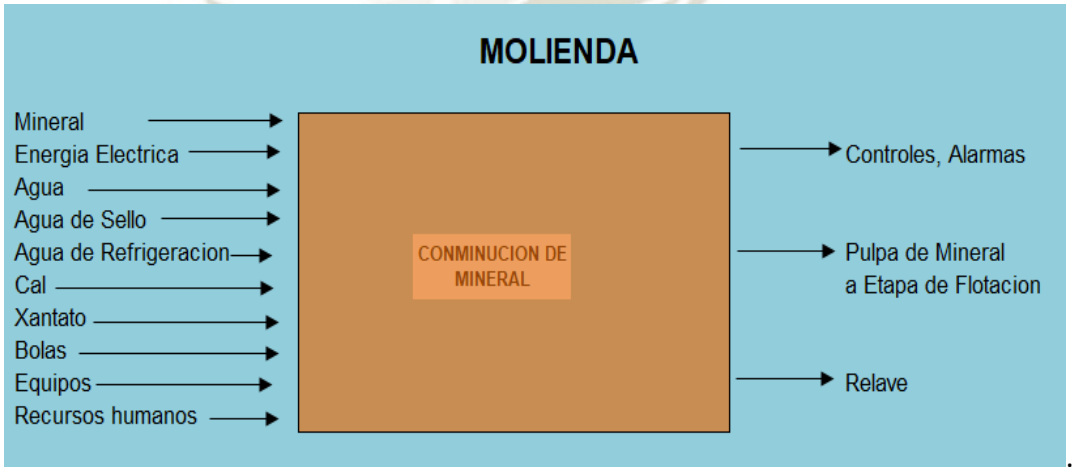
En cuanto al personal de operación se tiene dos líneas de producción en donde cada línea de producción cuenta con 01 operador de la misma empresa minera y 02 asistentes como personal de apoyo de una empresa contrista para atender toda el área de molienda en turnos de día y noche con un jornal de 12 horas por turno.

El área de mantenimiento que tiende el molino cuenta con 08 mecánicos de los cuales 02 son mecánicos-soldadores; 01 electricista y 01 instrumentista asignados a toda el área de molienda en turno día de manera exclusiva y para el turno noche se tiene asignado 06 mecánicos de los cuales 02 son mecánicos-soladores, 01 electricista y 01 instrumentista asignados para toda la planta, y atienden el área que tenga el trabajo más crítico o de emergencia. De manera diaria no hay personal de empresas contratistas asignadas a atender el molino SAG, ya que por cualquier eventualidad todo el personal asignado al área de molienda detiene sus otras labores en otros equipos y atienden al molino SAG, solo cuando hay paradas de planta si se asigna personal de empresa contratista al molino SAG (15 mecánicos, 02 electricistas , 02 instrumentistas,); pero de manera diaria si hay 02 mecánicos de empresas contratistas asignados a atender los ciclones que son equipos del área de molienda.

4.1.4. Diagrama Entrada, Proceso y salida

El proceso de molienda tiene este diagrama de bloque funcional el cual nos muestra todos los parámetros de ingreso y salida para poder estar seguros de no tener nada sin entender del proceso de molienda.

Figura N° 61 Entradas, proceso y salida del circuito de molienda

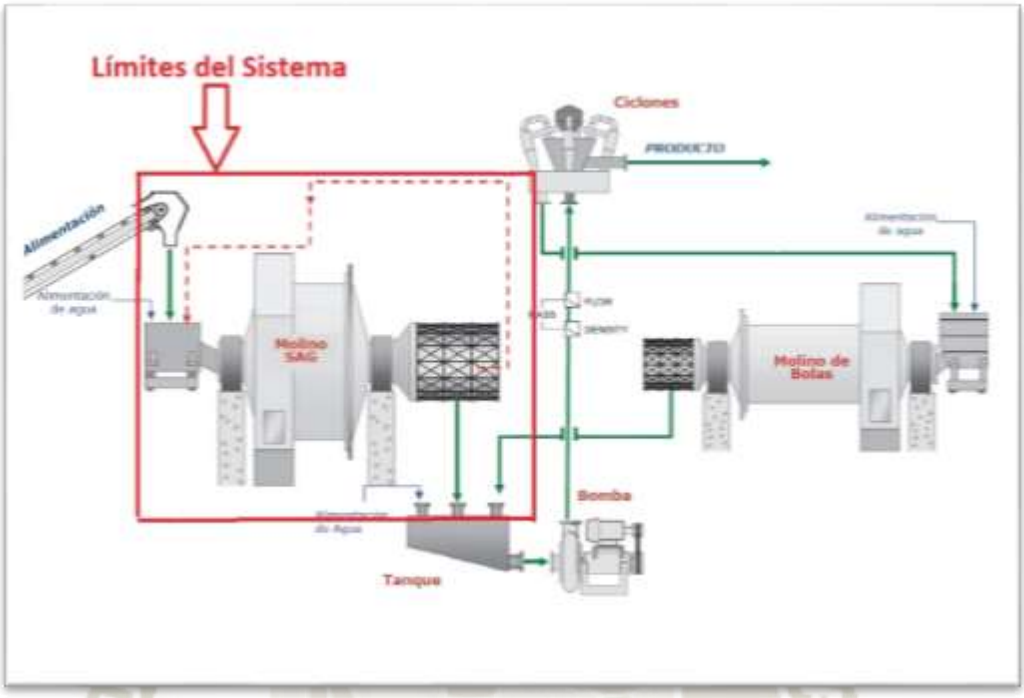


4.1.5. Límites del sistema a analizar

Una vez determinados los procesos de entrada, proceso y salida se determinan cual es el alcance del análisis del RCM mediante un gráfico de los límites de sistema, el

cual nos ayudara en no excedernos en la generación de funciones del sistema de molienda que estamos analizando.

Figura N° 62 Límites del sistema de molienda a analizar mediante el RCM.



4.1.6. Análisis de Modos y efectos de falla (AMEF)

La siguiente etapa de la metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad es la elaboración del AMEF, esta estará centrada específicamente en los componentes críticos del molino SAG, vale decir aquellos que presentan más fallas y tienen mayores consecuencias en el proceso productico de la planta.

Tabla N° 1 Análisis de modos y efectos de fallas de la estructura de protección, chute de alimentación, descarga de molino, sistemas de accionamiento y lubricación y frenos del molino SAG.

		Sistema:		Molino SAG	**Facilita**	Víctor Pachas Lovon.	
		Subsistema:		Estructura de Protección	**Auditor:**	Peter Alex Buheso	
	FUNCION		**FALLA FUNCIONAL**		**MODOS DE FALLA**	**EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA**	
1	Proteger la coraza.	**A**	Incapaz de proteger la coraza	**1**	Rotura de Shell Linner	**Evidente/No Evidente:** Evidente **Descripción del evento:** Los impactometros envían una señal de alerta a cuarto de control encontrando linner roto o caído pudiendo fracturar o romper otros linners del molino. En ese momento se para el molino **Tiempo de verificación:** 3 horas (bloqueo y verificación) **Reemplazo de componente:** Si se reemplaza linner. **Tiempo para volver a arrancar el equipo:** 45 minutos (desbloqueo del equipo) **¿Afecta a la seguridad y el medio ambiente?:** No **El impacto de la falla en el**	

		Sistema:		Molino SAG		**Facilita**	Víctor Pachas Lovon.
		Subsistema:		Estructura de Protección		**Auditor:**	Peter Alex Buheso
	FUNCION		**FALLA FUNCIONAL**		**MODOS DE FALLA**	**EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA**	
						mantenimiento: Impacta en un mantenimiento programado.	
1	Proteger la coraza.	**A**	Incapaz de proteger la coraza	**2**	Rotura de los pernos de sujeción del linner.	**Evidente/No Evidente:** Evidente **Descripción del evento:** Los impactometros envían una señal de alerta a cuarto de control encontrando linner caído por desajuste total de pernos que sujetan al linner, pudiendo fracturar o romper otros linners del molino. Tiempo de verificación: 1 hora y media (bloqueo y verificación) **Reemplazo de componente:** Ya ocurrida la falla, hay que verificar que no se haya caído el linner por mal ajuste de pernos, si en caso se haya caído el linner la parada duraría en total 6 horas, sino 3 horas con ajuste de pernos de linner **Tiempo para volver a arrancar el equipo:** 45 minutos (desbloqueo del equipo) **No afecta a la seguridad y el medio ambiente.** **Afecta a la producción. El impacto de la falla en el**	

		Sistema:		Molino SAG		**Facilita**	Víctor Pachas Lovon.
		Subsistema:		Estructura de Protección		**Auditor:**	Peter Alex Buheso
	FUNCION		**FALLA FUNCIONAL**		**MODOS DE FALLA**	**EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA**	
						mantenimiento: Impacta en un mantenimiento programado	
1	Proteger la coraza.	**A**	Incapaz de proteger la coraza	**3**	Pernos desajustados de linners	**Evidente/No Evidente:** No evidente **Descripción del evento:** Los pernos desajustados pueden causar la caída de linner produciendo producir fuga de mineral. **Tiempo de verificación:** 1 hora y media (bloqueo y verificación) **Reemplazo de componente:** Se reemplaza en el mantenimiento preventivo **Tiempo para volver a arrancar el equipo:** 45 minutos (desbloqueo del equipo) **No afecta a la seguridad y el medio ambiente** **Afecta a la producción** **El impacto de la falla en el mantenimiento: Impacta en un mantenimiento programado**	

		Sistema:		Molino SAG		**Facilita**	Víctor Pachas Lovon.
		Subsistema:		Estructura de Protección		**Auditor:**	Peter Alex Buheso
	FUNCION		**FALLA FUNCIONAL**		**MODOS DE FALLA**	**EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA**	
2	Levantar las bolas con mineral para la trituración óptima.	**B**	Incapaz de levantar las bolas con mineral para la trituración óptima.	**1**	Desgaste de shell linner (mayor al 50% de espesor)	**Evidente/No Evidente:** No evidente **Descripción del evento:** Los linner desgastados no cumplen su función de levantar el mineral con la bolas produciendo una mala molienda, dañando otros linner, dando más carga al molino pudiendo causar otras fallas en los demás sistemas. Se espera la próxima parada para realizar la inspección **Tiempo de verificación:** 2 hora (bloqueo y verificación) **Reemplazo de componente:** Al identificar los linners desgastados, se programa su cambio para el PM más próximo. **Tiempo para volver a arrancar el equipo:** 45 minutos (desbloqueo del equipo) **No afecta a la seguridad y el medio ambiente** **Afecta a la producción** **El impacto de la falla en el mantenimiento:** Impacta en un mantenimiento programado	

		Sistema:		Molino SAG		**Facilitador:**	Víctor Pachas Lovon.
		Subsistema:		Chute de Alimentación.		**Auditor:**	Peter Alex Buheso
	FUNCION		**FALLA FUNCIONAL**		**MODOS DE FALLA**	**EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA**	
3	Dosificar el ingreso de mineral a razón de 3170 tmh.	**A**	Incapaz de dosificar el ingreso de mineral a razón de 3170 tmh.	**1**	Linner de chute de alimentación desgastado	**Evidente/No Evidente:** No evidente **Descripción del evento:** Los linner desgastado en el chute de alimentación son identificados por alguna fuga o ruido en el chute, teniendo que cambiarse de manera correctiva. **Tiempo de verificación:** 2 horas (bloqueo y verificación) **Reemplazo de componente:** Cambio de linner de chute de alimentación en su PM más próximo. **Tiempo para volver a arrancar el equipo:** 45 minutos (desbloqueo del equipo) **No afecta a la seguridad y el medio ambiente:** No afecta el medio ambiente. **Afecta a la producción en:** No afecta **El impacto de la falla en el mantenimiento:** Impacta en un mantenimiento programado.	

		Sistema:		Molino SAG		**Facilitador:**	Víctor Pachas Lovon.
		Subsistema:		Chute de Alimentación.		**Auditor:**	Peter Alex Buheso
	FUNCION		**FALLA FUNCIONAL**		**MODOS DE FALLA**	**EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA**	
3	Dosificar el ingreso de mineral a razón de 3170 tmh.	**A**	Incapaz de dosificar el ingreso de mineral a razón de 3170 tmh.	**2**	Fuga por el sello del chute de alimentación	**Evidente/No Evidente:** Evidente **Descripción del evento:** El sello en el chute alimentación puede deteriorarse, teniendo que cambiarse de manera correctiva para evitar la fuga. **Tiempo de verificación:** 5 horas (bloqueo y verificación) **Reemplazo de componente:** Cambio de sello de chute de alimentación. **Tiempo para volver a arrancar el equipo:** 45 minutos (desbloqueo del equipo) **No afecta a la seguridad y el medio ambiente:** No afecta. **Afecta a la producción en:** Si afecta. **El impacto de la falla en el mantenimiento:** No impacta en un mantenimiento programado	

		Sistema:		Molino SAG.		**Facilitador:**	Víctor Pachas Lovon.
		Subsistema:		Descarga de Molino		**Auditor:**	Peter Alex Buheso.
	FUNCION		**FALLA FUNCIONAL**		**MODOS DE FALLA**	**EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA**	
4	Clasificar el mineral en la descarga a una granulometría de hasta 19 mm.	**A**	Incapaz de clasificar el mineral en la descarga a una granulometría de hasta 19 mm.	**1**	Parrillas de descarga rotas	**Evidente/No Evidente:** Evidente **Descripción del evento:** La parrilla se rompe y será evidente al operador por el filtrado de mineral grueso o bolas del molino, provocando un stock pile más grande en chancado de pebbles. **Tiempo de verificación:** 4 horas (bloqueo y verificación) **Reemplazo de componente:** Se realizara el cambio de componente en caso que sea critico **Tiempo para volver a arrancar el equipo:** 45 minutos (desbloqueo del equipo) **No afecta a la seguridad y el medio ambiente:** No afecta el medio ambiente. **Afecta a la producción en:** Si afecta. **El impacto de la falla en el mantenimiento:** Impacta en un mantenimiento programado	

		Sistema:		Molino SAG.		**Facilitador:**	Víctor Pachas Lovon.
		Subsistema:		Descarga de Molino		**Auditor:**	Peter Alex Buheso.
	FUNCION		**FALLA FUNCIONAL**		**MODOS DE FALLA**	**EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA**	
4	Clasificar el mineral en la descarga a una granulometría de hasta 19 mm.	**A**	Incapaz de clasificar el mineral en la descarga a una granulometría de hasta 19 mm.	**2**	Parrillas del trommel rotas	**Evidente/No Evidente:** Evidente **Descripción del evento:** La parrilla rota será evidente por el ruido y también por el filtrado de mineral grueso, provocando un stock pile más grande en chancado de pebbles. **Tiempo de verificación:** 3 horas (bloqueo y verificación) **Reemplazo de componente:** Se realizara el cambio de componente si es muy crítico de manera correctiva, sino se realizara en su PM más próximo. **Tiempo para volver a arrancar el equipo:** 45 minutos (desbloqueo del equipo) **No afecta a la seguridad y el medio ambiente:** No afecta el medio ambiente. **Afecta a la producción en:** Si afecta **El impacto de la falla en el mantenimiento:** Impacta en un mantenimiento programado	

		Sistema:		Molino SAG.		**Facilitador:**	Víctor Pachas Lovon.
		Subsistema:		Descarga de Molino		**Auditor:**	Peter Alex Buheso.
	FUNCION		**FALLA FUNCIONAL**		**MODOS DE FALLA**	**EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA**	
4	Clasificar el mineral en la descarga a una granulometría de hasta 19 mm.	**A**	Incapaz de clasificar el mineral en la descarga a una granulometría de hasta 19 mm.	**3**	Atascamiento de bolas en parrillas de descarga	**Evidente/No Evidente:** Evidente **Descripción del evento:** El atascamiento sera notable debido a que no habra filtrado de mineral en la descarga, provocando retencion de mineral. **Tiempo de verificación:** 4 hora (bloqueo y verificación) **Reemplazo de componente:** Se realizara el cambio de componente si es muy crítico de manera correctiva, sino se realizara en su PM más próximo. **Tiempo para volver a arrancar el equipo:** 45 minutos (desbloqueo del equipo) **No afecta a la seguridad y el medio ambiente:** No afecta el medio ambiente. **Afecta a la producción en:** Si afecta. **El impacto de la falla en el mantenimiento:** Impacta en un mantenimiento programado	

		Sistema:		Molino SAG.		**Facilitador:**	Víctor Pachas Lovon.
		Subsistema:		Descarga de Molino		**Auditor:**	Peter Alex Buheso.
	FUNCION		**FALLA FUNCIONAL**		**MODOS DE FALLA**	**EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA**	
4	Clasificar el mineral en la descarga a una granulometría de hasta 19 mm.	**A**	Incapaz de clasificar el mineral en la descarga a una granulometría de hasta 19 mm.	**4**	Atascamiento de bolas en parrillas de trommel	**Evidente/No Evidente:** Evidente **Descripción del evento:** El atascamiento será notable debido a que no habrá filtrado de mineral en la descarga, provocando retención de mineral. **Tiempo de verificación:** 1 hora y media (bloqueo y verificación) **Reemplazo de componente:** Se realizara el cambio de componente si es muy crítico de manera correctiva, sino se realizara en su PM más próximo. **Tiempo para volver a arrancar el equipo:** 45 minutos (desbloqueo del equipo) **Afecta a la seguridad y el medio ambiente:** No afecta el medio ambiente. **Afecta a la producción en:** Si afecta **El impacto de la falla en el mantenimiento:** Impacta en un mantenimiento programado	

		Sistema:		Molino SAG.		**Facilitador:**	Víctor Pachas Lovon.
		Subsistema:		Accionamiento.		**Auditor:**	Peter Alex Buheso.
	FUNCION		**FALLA FUNCIONAL**		**MODOS DE FALLA**	**EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA**	
5	Accionar el molino a una velocidad constante de 9 rpm (p=24 mw)	**A**	Incapaz de accionar el molino a una velocidad constante de 9 rpm (p=24 mw)	**1**	Contaminación en el interior del estator por desgaste de sello protector	**Evidente/No Evidente:** Evidente **Descripción del evento:** La contaminación dentro del sistema de accionamiento causa la parada del molino, debido al calentamiento del sistema. **Tiempo de verificación:** 1 horas (bloqueo y verificación) **Reemplazo de componente:** Se realiza cambio de sello (duración: 6h 15min) **Tiempo para volver a arrancar el equipo:** 45 minutos (desbloqueo del equipo) **¿Afecta a la seguridad y el medio ambiente?:** No afecta el medio ambiente. **Afecta a la producción en:** Afecta la producción. **El impacto de la falla en el mantenimiento:** Impacta en un mantenimiento programado.	

		Sistema:		Molino SAG.		**Facilitador:**	Víctor Pachas Lovon.
		Subsistema:		Accionamiento.		**Auditor:**	Peter Alex Buheso.
	FUNCION		**FALLA FUNCIONAL**		**MODOS DE FALLA**	**EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA**	
5	Accionar el molino a una velocidad constante de 9 rpm (p=24 mw)	**A**	Incapaz de accionar el molino a una velocidad constante de 9 rpm (p=24 mw)	**2**	Sobrecalentamiento de motor (exceso de carga)	**Evidente/No Evidente:** Evidente **Descripción del evento:** El sobrecalentamiento produce la parada del molino, en caso de excesiva carga se tendrá que retirar en forma manual el mineral. **Tiempo de verificación:** 5 min. **Medida correctiva:** Operador tiene que darle menos carga al molino y en caso haya un excesiva carga se tendrá que intervenir entre 5 a 6 horas. **Tiempo para volver a arrancar el equipo:** 45 minutos (desbloqueo del equipo) **No afecta a la seguridad y el medio ambiente**. **Afecta a la producción.**	

		Sistema:		Molino SAG.		**Facilitador:**	Víctor Pachas Lovon.
		Subsistema:		Accionamiento.		**Auditor:**	Peter Alex Buheso.
	FUNCION		**FALLA FUNCIONAL**		**MODOS DE FALLA**	**EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA**	
5	Accionar el molino a una velocidad constante de 9 rpm (p=24 mw)	**A**	Incapaz de accionar el molino a una velocidad constante de 9 rpm (p=24 mw)	**3**	Entrehierro fuera de su rango de 16mm	**Evidente/No Evidente:** Evidente **Descripción del evento:** El entrehierro tiene una tolerancia de 16mm para su óptimo. funcionamiento, cuando se encuentra fuera de rango, para el sistema de accionamiento. **Tiempo de verificación:** 5 min **Medida correctiva:** Colocar nuevamente al rango deseado (1hr) **Tiempo para volver a arrancar el equipo:** 45 minutos (desbloqueo del equipo) **No afecta a la seguridad y el medio ambiente. Afecta a la producción.**	

		Sistema:		Molino SAG.		**Facilitador:**	Víctor Pachas Lovon.
		Subsistema:		Accionamiento.		**Auditor:**	Peter Alex Buheso.
	FUNCION		**FALLA FUNCIONAL**		**MODOS DE FALLA**	**EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA**	
5	Accionar el molino a una velocidad constante de 9 rpm (p=24 mw)	**A**	Incapaz de accionar el molino a una velocidad constante de 9 rpm (p=24 mw)	**4**	Baja presión hidráulica de frenos	**Evidente/No Evidente:** No Evidente **Descripción del evento: El sistema de frenado es** incapaz de liberar frenos del molino **Tiempo de verificación:** 30 minutos (sin necesidad de parar el molino) **Medida correctiva:** Cambio de bomba o limpieza de mangueras y acoples. **Tiempo para volver a arrancar el equipo:** 45 minutos **No afecta a la seguridad y el medio ambiente:** No afecta el medio ambiente. **Afecta a la producción en:** 3 horas (Perdida a la producción de 125 mil dólares por hora) **El impacto de la falla en el mantenimiento:** No impacta en un mantenimiento programado	

		Sistema:		Molino SAG.		**Facilitador:**	Víctor Pachas Lovon.
		Subsistema:		Accionamiento.		**Auditor:**	Peter Alex Buheso.
	FUNCION		**FALLA FUNCIONAL**		**MODOS DE FALLA**	**EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA**	
5	Accionar el molino a una velocidad constante de 9 rpm (p=24 mw)	**A**	Incapaz de accionar el molino a una velocidad constante de 9 rpm (p=24 mw)	**5**	Falla en solenoides de válvulas de sistema hidráulico de frenos.	**Evidente/No Evidente:** No Evidente **Descripción del evento:** Válvula solenoide incapaz de cumplir función de control de cilindros de freno y acumuladores. **Tiempo de verificación:** 30 minutos (sin necesidad de parar el molino) **Medida correctiva:** Verificación de conexión de cables y reconectar. **Tiempo para volver a arrancar el equipo:** 45 minutos **No afecta a la seguridad y el medio ambiente:** No afecta el medio ambiente. **Afecta a la producción en:** (1 hora) Perdida a la producción de 125 mil dólares por hora **El impacto de la falla en el mantenimiento:** No impacta en un mantenimiento programado	

		Sistema:		Molino SAG.		**Facilitador:**	Víctor Pachas Lovon.
		Subsistema:		Lubricación.		**Auditor:**	Peter Alex Buheso.
	FUNCION		**FALLA FUNCIONAL**		**MODOS DE FALLA**	**EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA**	
6	Mantener una película de aceite en las chumaceras a una presión mínima 7200 kpa.	**A**	Incapaz de mantener una película de aceite a una presión mínima 7200 kpa.	**1**	Alta presión en el sistema hidráulico por sobrecarga en el molino.	**Evidente/No Evidente:** Evidente **Descripción del evento:** Al haber la sobre carga del molino, afecta al sistema hidráulico, produciendo alta presión en el sistema, provocando la parada del molino. **Tiempo de verificación:** 5 min. **Medida correctiva:** Dejar de alimentar molino y echar agua, arrancando nuevamente (1h). **Tiempo para volver a arrancar el equipo:** 45 minutos (desbloqueo del equipo) **No afecta a la seguridad y el medio ambiente.** **¿Afecta a la producción?:** Si	

		Sistema:		Molino SAG.		**Facilitador:**	Víctor Pachas Lovon.
		Subsistema:		Lubricación.		**Auditor:**	Peter Alex Buheso.
	FUNCION		**FALLA FUNCIONAL**		**MODOS DE FALLA**	**EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA**	
6	Mantener una película de aceite en las chumaceras a una presión mínima 7200 kpa.	**A**	Incapaz de mantener una película de aceite a una presión mínima 7200 kpa.	**2**	Baja presión en el sistema hidráulico por falla de bombas de alta	**Evidente/No Evidente:** Evidente **Descripción del evento:** Al haber baja presión en el sistema, no habría la lubricación desgastando las pastillas, esto puede ser debido a la falla de las bombas de alta. **Tiempo de verificación:** 5 min. **Medida correctiva:** Arrancar la bomba de Alta que está en stand-by para la operatividad de la bomba de stand-by. **Tiempo para volver a arrancar el equipo:** 5 minutos (desbloqueo del equipo) **No afecta a la seguridad y el medio ambiente.** **No afecta a la producción.**	

		Sistema:		Molino SAG.		**Facilitador:**	Víctor Pachas Lovon.
		Subsistema:		Lubricación.		**Auditor:**	Peter Alex Buheso.
	FUNCION		**FALLA FUNCIONAL**		**MODOS DE FALLA**	**EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA**	
7	Engrasar el sello de las chumaceras (alimentación y descarga)	**B**	Incapaz de engrasar el sello de las chumaceras (alimentación y descarga)	**1**	Rotura de sello triple en los pad.	**Evidente/No Evidente:** No evidente **Descripción del evento:** Fuga de aceite hidráulico por rotura de los sellos, dañando los sellos **Tiempo de verificación:** 1 hora y media (bloqueo y verificación). **Medida correctiva:** Verificación y cambio de sello triple **Tiempo para volver a arrancar el equipo:** 45 minutos (desbloqueo del equipo) **No afecta a la seguridad y el medio ambiente:** No afecta el medio ambiente. **Afecta a la producción en:** 3 horas de parada. (Perdida a la producción de 125 mil dólares por hora) **El impacto de la falla en el mantenimiento:** No impacta en un mantenimiento programado.	

		Sistema:		Molino SAG.		**Facilitador:**	Víctor Pachas Lovon.
		Subsistema:		Lubricación.		**Auditor:**	Peter Alex Buheso.
	FUNCION		**FALLA FUNCIONAL**		**MODOS DE FALLA**	**EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA**	
7	Engrasar el sello de las chumaceras (alimentación y descarga)	**B**	Incapaz de engrasar el sello de las chumaceras (alimentación y descarga)	**2**	Fuga en el distribuidor	**Evidente/No Evidente:** Evidente **Descripción del evento:** Fuga de grasa por mangueras y acoples del distribuidor. **Tiempo de verificación**: 20 minutos Medida correctiva: Reconexión de mangueras y acoples **Tiempo para volver a arrancar el equipo**: 30 minutos en cambiar mangueras o acoples. **No afecta a la seguridad y el medio ambiente**: No afecta el medio ambiente. **Afecta a la producción e**n: No. **El impacto de la falla en el mantenimiento**: No impacta en un mantenimiento programado	

		Sistema:		Molino SAG.		**Facilitador:**	Víctor Pachas Lovon.
		Subsistema:		Lubricación.		**Auditor:**	Peter Alex Buheso.
	FUNCION		**FALLA FUNCIONAL**		**MODOS DE FALLA**	**EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA**	
7	Engrasar el sello de las chumaceras (alimentación y descarga)	**B**	Incapaz de engrasar el sello de las chumaceras (alimentación y descarga)	**3**	Falla de la bomba de inyección de grasa.	**Evidente/No Evidente**: No Evidente **Descripción del evento**: Bomba incapaz de hacer llegar grasa hacia el sello triple de los pads. **Tiempo de verificación**: 20 minutos **Medida correctiva**: Cambio de bomba o limpieza de mangueras y acoples **Tiempo para volver a arrancar el equipo**: 1 hora para cambiar la bomba de inyección de grasa. **¿Afecta a la seguridad y el medio ambiente?**: No afecta el medio ambiente. **Afecta a la producción en**: No. **El impacto de la falla en el mantenimiento**: No impacta en un mantenimiento programado	

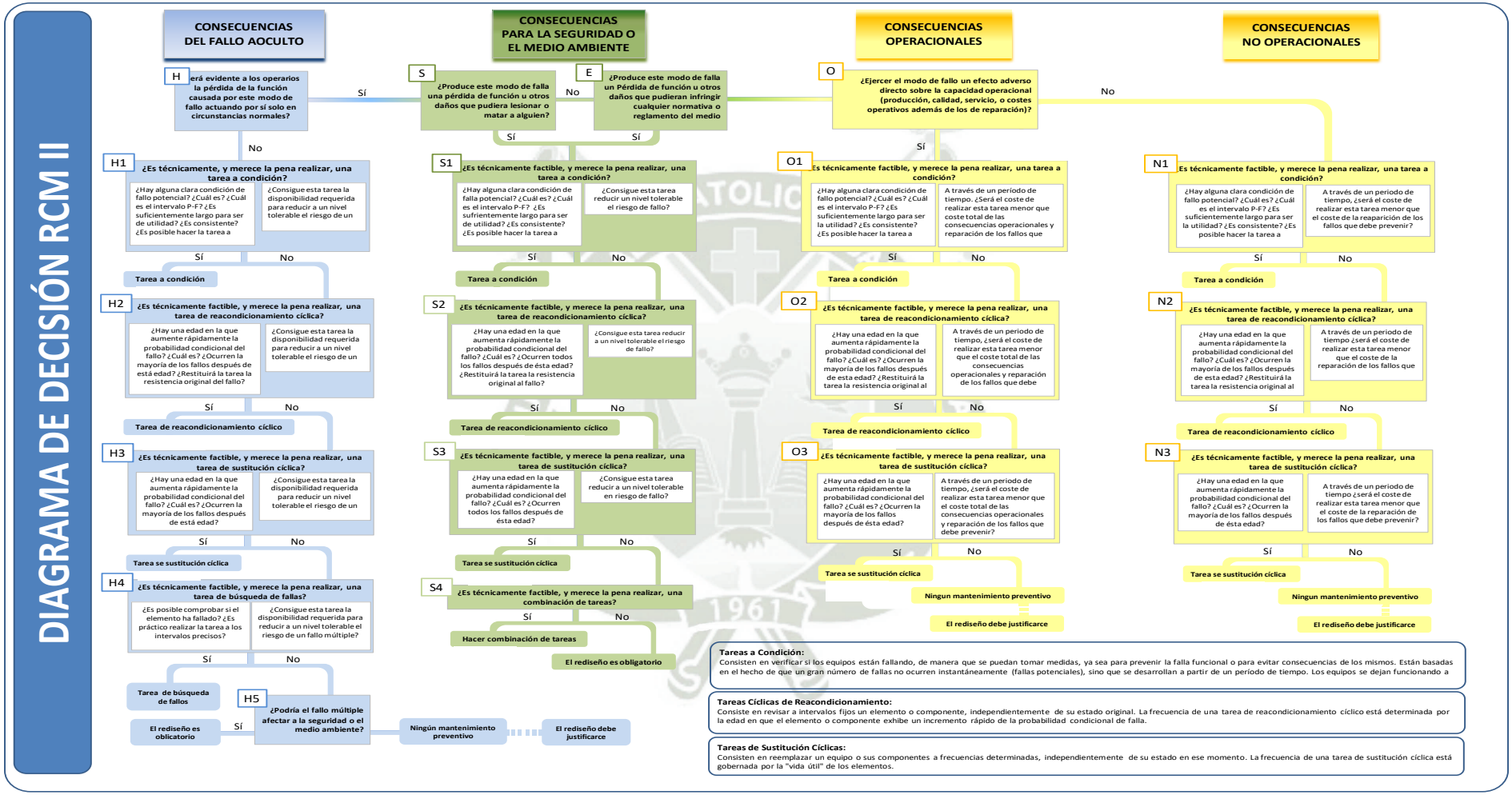
		Sistema:		Molino SAG.		**Facilitador:**	Víctor Pachas Lovon.
		Subsistema:		Frenos.		**Auditor:**	Peter Alex Buheso.
	FUNCION		**FALLA FUNCIONAL**		**MODOS DE FALLA**	**EFECTOS Y CONSECUNECIAS DE LOS MODOS DE FALLA**	
8	Frenar el molino en caso de emergencia o para mantenimiento preventivo programado en al menos 30 segundos	**A**	Frenar el molino en caso de emergencia o para mantenimiento en más de 30 segundos	**1**	Falla de resortes de freno	**Evidente/No Evidente:** No Evidente **Descripción del evento:** Resorte de Freno agarrotado no vuelve a su longitud original entonces el molino no se detiene en menos de 30 segundos. **Tiempo de verificación:** 1 hora y 45 minutos (sin necesidad de parar el molino) **Medida correctiva:** Cambio de resorte **Tiempo para volver a arrancar el equipo:** 45 minutos **No afecta a la seguridad y el medio ambiente:** No afecta el medio ambiente. **Afecta a la producción en: 4 horas (**Perdida a la producción de 125 mil dolares por hora) **El impacto de la falla en el mantenimiento:** No impacta en un mantenimiento programado	

		Sistema:		Molino SAG.		**Facilitador:**	Víctor Pachas Lovon.
		Subsistema:		Frenos.		**Auditor:**	Peter Alex Buheso.
	FUNCION		**FALLA FUNCIONAL**		**MODOS DE FALLA**	**EFECTOS Y CONSECUNECIAS DE LOS MODOS DE FALLA**	
8	Frenar el molino en caso de emergencia o para mantenimiento preventivo programado en al menos 30 segundos	**A**	Frenar el molino en caso de emergencia o para mantenimiento en más de 30 segundos	2	Pastillas de frenos desgastadas	**Evidente/No Evidente:** No Evidente **Descripción del evento: El molino demora en detenerse.** **Tiempo de verificación:** 1 hora y 15 minutos **Medida correctiva:** Cambio de pastillas **Tiempo para volver a arrancar el equipo:** 45 minutos **No afecta a la seguridad y el medio ambiente:** No afecta el medio ambiente. **Afecta a la producción en:** 2 horas **Impacto de la falla en el mantenimiento:** No impacta en un mantenimiento programado	

4.1.7. Árbol lógico de decisión de tareas de mantenimiento

En este punto analizaremos las 8 funciones y los 22 modos de falla anteriormente encontrados para el Molino SAG, para poder determinar las estrategias de mantenimiento a realizar utilizando como herramienta el Árbol Lógico de Decisión mostrado en el grafico siguiente. Cabe mencionar que cada uno de los modos de falla estarán sustentados técnica y económicamente en donde aplique y se mostrarán en las páginas siguientes.

Figura N° 63 Árbol Lógico de decisión RCM II de John Moubray.



Nota: Adaptado de la empresa Aladon LTD. Provider de RCM II.

Tabla N° 2 Hoja resumida de decisiones de tareas de mantenimiento para la estructura de protección, chute de alimentación, descarga de molino, sistema de accionamiento y sistema de lubricación y frenos del Molino SAG.

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Tareas "a falta de"			Tareas propuestas	Frecuencia	A realizar por
							S1	S2	S3						
							O1	O2	O3						
F	FF	MF	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4			
1	A	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Inspección de linners (Faro laser + visual)	mensual	mecánico
		2	S	N	N	S	N	N	S	-	-	-	Cambio de pernos de linner	6 meses	mecánico
		3	S	N	N	N	N	N	N	-	-	-	Ningún mantenimiento programado		
2	B	1	S	N	N	N	S	-	-	-	-	-	Inspección de desgaste de linner (Faro laser)	mensual	mecánico
3	A	1	S	N	N	N	N	N	S	-	-	-	Cambio de linner de chute de alimentación en PM	6 meses	mecánico
		2	S	N	N	S	S						Inspección de sello de chute de alimentación	mensual	mecánico
4	A	1	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Inspección de parrillas de descarga (Faro laser + visual)	mensual	mecánico
		2	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Inspección de parrillas de trommel (Visual)	1.5 meses	mecánico
		3	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Inspección de parrillas de descarga y bolas (visual)	mensual	mecánico
		4	S	N	N	S	S	-	-	-	-	-	Inspección de parrillas de trommel y bolas (visual)	mensual	mecánico

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Tareas "a falta de"			Tareas propuestas	Frecuencia	A realizar por
							S1	S2	S3						
							O1	O2	O3						
F	**FF**	**MF**	**H**	**S**	**E**	**O**	**N1**	**N2**	**N3**	**H4**	**H5**	**S4**			
5	A	1	S	N	N	S	N	N	S	-	-	-	Cambio de filtros de aire del estator del molino.	2 meses	mecánico
		2	S	N	N	S	N	N	N				Ningún mantenimiento programado (Entrenamiento al operador)		
		3	S	N	N	S	S		-	-	-	-	Monitorear la distancia del entrehierro	6 meses	operador
		4	N				N	N	N	S		-	Arranque de bomba hidráulica frenos en stand by.	semanal	operador
		5	S	N	N	S	N	S	-	-	-	-	Limpieza de solenoide de sistema hidráulico de freno	1.5 meses	eléctrico
6	A	1	S	N	N	S	N	N	N				Ningún mantenimiento programado (Entrenamiento al operador)		
		2	N				N	N	N	S	-	-	Arranque de bombas de alta en stand by	semanal	operador
7	A	1	S	N	N	S	N	S					Cambio de repuesto de sello triple	6 meses	mecánico
		2	S	N	N	S	N	N	S				Ningún mantenimiento programado.	Inspección diaria operador	Operador

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Tareas "a falta de"			Tareas propuestas	Frecuencia	A realizar por
							S1	S2	S3						
							O1	O2	O3						
F	**FF**	**MF**	**H**	**S**	**E**	**O**	**N1**	**N2**	**N3**	**H4**	**H5**	**S4**			
		3	S	N	N	S	N	N	S				Ningún mantenimiento programado.	Inspección diaria operador	Operador
8	A	1	N				N	S	-	-	-	-	Cambio de resorte de freno	6 meses	mecánico
		2	N				N	S	-	-	-	-	Cambio de pastilla desgastada	6 meses	mecánico

4.1.8. Análisis técnico y económico de las tareas de mantenimiento propuestas

"A continuación, se muestran en orden de los modos de falla (1 A 1 Hasta 8 A 2) la justificación técnica de las tareas de mantenimiento utilizando la metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad RCM" (SAE JA1011, 1990).

Tabla N° 3 Justificación técnica para el Modo de falla 1 A 1.

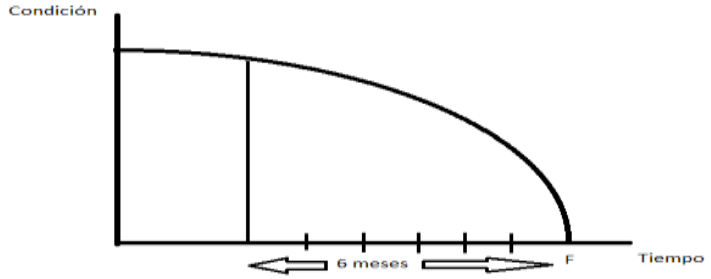
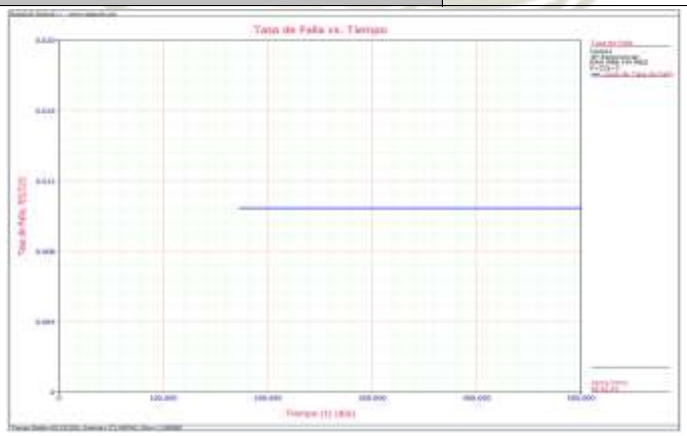
Modo de Falla 1.A.1	Rotura de Shell liner		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de monitoreo de condición?	**Si**	**No**	
	x		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Reacondicionamiento cíclico?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Sustitución cíclica?	**Si**	**No**	
Descripción de la tarea propuesta (monitoreo de condición)	Inspeccion de linners (Faro laser + visual)		
Técnica de Monitoreo	Inspección por scaner laser e inspección visual		
¿Cómo esta acción evitara, eliminara o minimizara las consecuencias de la falla?	Evitará la perdida de producción, debido a la parada inesperada del molino SAG. Debido a la rotura de shell liner		
Falla Potencial	Disminución de espesor o inicio de rotura de linners		
Intervalo P-F	**Intervalo propuesto para realizarla tarea propuesta**		
6 meses	1 mes		
			
Es posible realizar la tarea predictiva con personal	**Propio**	**Terceros**	
	X		
Tiempo medio entre fallas	268 días/falla		
Frecuencia de Reemplazo de componente	6 meses		
Tasa de fallas:	Constante, lo que indica Mantenimiento predictivo.		
			

Tabla N° 4 Justificación económica del modo de falla 1 A 1.

1	**MODO DE FALLA:**	1A1 Rotura de Shell liner				
2	**ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO:**	Monitoreo de Condición				
	Tarea de mantenimiento:	Inspección de linners (Faro laser + visual)				
	Frecuencia:	Mensual				
		Cálculo	**Cantidad**	**Unidad**	**Cost/unid**	**COSTO**
	COSTO p. PREDECIR					**USD**
3	Mano de Obra	hs.H/	9.00	hs.H	60.0	540.0
4	Equipo para hacer la predicción		2	horas	22	33.0
5	Tiempo de máquina parada		1.50	horas	0	-
6	Tiempo de proceso interrumpido		0	horas		
7	Costo del tiempo de proceso perdido	tiempo x$/unid.	125000	u$d/h		-
8	Otros costos de la predicción			$		-
9	Costo TOTAL de cada predicción	SUMA [3] a [8]		$		573.0
10	Frecuencia de la inspección de predicción		12	por año		
11	Costo TOTAL anual de cada predicción	[9] x [10]		por año		**6;876.0**
	COSTO DE LA REPARACIÓN ANTICIPADA					
12	Repuestos		2	shell liner	8;000	16;000.0
13	Mano de Obra directa	hs.H	16.00	hs	60.0	960.0
14	Otros costos directos de Mantenimiento					-
15	Tiempo de parada del equipo para el mant.		2.50	horas	0	-
16	Tiempo de proceso detenido		2.50	horas	0	-
17	Utilidades perdidas por proceso detenido	hours x $/h			125000	312;500.0
18	Costo de M.deO. de producción ocioso		5.00	hs.Homb	60	300.0
19	Costo adicional (horas extra, etc.)	hs extra, etc.	0.00		5.5	-
20	Materiales perdidos o deteriorados por MF				0	-
21	Otros costos de Mantenim. ocasionados					-
22	COSTO TOTAL cada vez que se hace	SUMA de anter.				329;760.0
23	Frecuencia de ocurrencia anual	MTBF	0.73	veces/años		
24	COSTO ANUAL de realizar la reparación	[22] x [23]				242;125.2
				unidades	1	242;125.2
25	**COSTO TOTAL PARA INSPECC.+REPAR.**	**[11] + [24]**				249;001.2
	COSTO DE REPARACIÓN (NO ANTICIP.)					
	MODO DE FALLA					
26	Repuestos		2	Liners	8;000	16;000.0
27	Mano de Obra directa de Mantenimiento	mec-elec	24	hs.H x $	60.0	1;440.0
28	Otros Costos directos de Mantenimiento		0		5	-
29	SUB-TOTAL por MF	SUMA de ant.		$		17;440.0
	DAÑOS SECUNDARIOS (si los hay)					
30	Repuestos		0	repuestos	35;000	-
31	Mano de Obra directa de Mantenimiento	hs,H x $/h	0		100.0	-
32	Otros costos directos de Mantenimiento			Gruero		-
33	Sub-total para el daño secundario	SUMAde ant.				-
34	% Daño secundario/MF		10%			
35	SUB-TOTAL.Daño secund. x % ocurrencia	[33] x [34]				-
	COSTO DE LAS CONSEC. OPERAC.					
36	Tiempo de equipo detenido		3.50	horas		
37	Tiempo de proceso detenido		3.50	horas		
38	Utilidades perd. por interrup. de proceso	hs paradax$/h			125000	437;500.0
39	Costo de M.deO. de prod.ociosa por el MF	hs.H x $/h	7.0		60.0	420.0
40	Costo adicional para recup.(hs extra, etc.)					
41	Cost de pérdidas de CALIDAD					-
42	Costo de pérdidas de SERVICIO					-
43	Materiales perdidos por el MF					-
44	Otros costos originados por el MF	extra montacarga y cambiador de		150	4	525.0
45	Costo Oper.Total (sum. al costo de repar.)	SUMA de anter.		$/ocurr.		438;445.0
46	COSTO TOTAL SI "NO ANTICIPADO"	[29]+[35]+[45]		$/ocurr.		455;885.0
	Frecuencia de ocurrencia de la falla	cada 1.28 años	0.78	veces/año		
47	**COSTO TOTAL SI NO ANTICIPADO**	[46]xfrec/año		$/año		357;214.0
	COMPARE línea [25] con línea [47}					
	La diferencia es el beneficio adicional	**$/año**	**-108;213**	**a favor de**		**PREDICTIVO**

Tabla N° 5 Justificación técnica del modo de falla 1 A 2.

Modo de Falla 1.A.2	Rotura de los pernos de sujecion del linner		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de monitoreo de condición?	**Si**	**No**	La tasa de fallas es aleatoria pero es imposible monitorear el desgaste de los pernos ya que estan dentro del molino.
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Reacondicionamiento cíclico?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Sustitución cíclica?	**Si**	**No**	
	x		
Descripción de la tarea de mantenimiento propuesta	Cambio de pernos de linner		
¿Cómo esta acción evitara, eliminara o minimizara las consecuencias de la falla?	Evitará la perdida de producción, debido a la parada inesperada del molino SAG. Debido a la rotura de pernos shell liner		
Es posible realizar la tarea preventiva con personal	**Propio**	**Terceros**	
	X		
Tiempo medio entre fallas	103 dias/falla		
Frecuencia de Reemplazo de componente	4 meses		
Tasa de fallas:	Constante.		

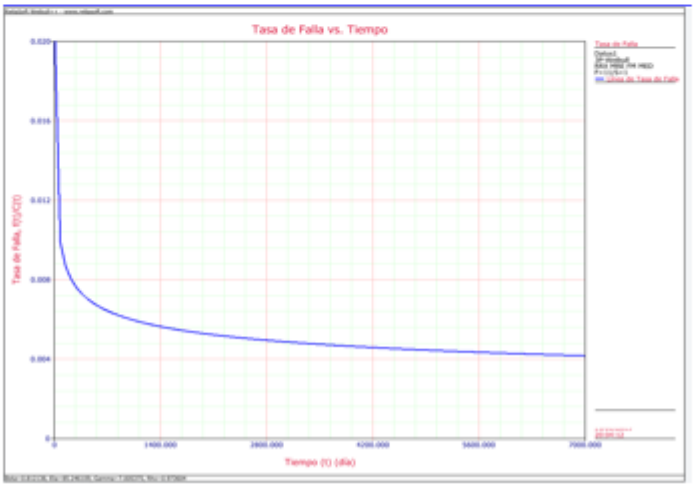


Tabla N° 6 Justificación económica del modo de falla 1 A 2.

1	**MODO DE FALLA:**	1A2 Rotura de los pernos de sujecion del linner				
2	**ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO:**	Sustitución Cíclica				
	Tarea de mantenimiento:	Cambio de pernos de linner				
	Frecuencia:	2 meses				
		Cálculo	**Cantidad**	**Unidad**	**Cost/unid**	**COSTO**
	COSTO p. PREVENIR					**USD**
3	Repuestos(pernos)		378	unidades	200	75600
4	Mano de Obra directa	hs.H	864	hs	60	51840
5	Otros costos directos de Mantenimiento					
6	Tiempo de parada del equipo para el mant.		72	horas	0	0
7	Tiempo de proceso detenido		0	horas	0	0
8	Utilidades perdidas por proceso detenido	hours x $/h			125000	0
9	Costo de M.deO. de producción ocioso		144	hs.Homb	60	8640
10	Costo adicional (horas extra, etc.)	hs extra, etc.			0	0
11	Materiales perdidos o deteriorados por MF				0	0
12	Otros costos de Mantenim. ocasionados					
13	**COSTO TOTAL cada vez que se hace**	**SUMA de anter.**				**136080**
14	Frecuencia de ocurrencia anual	Vida útil	**3.0**	veces/año		
15	**COSTO TOTAL PARA REPARACIÓN ANTICIPADA**					408,240.0
		Cálculo	**Cantidad**	**Unidad**	**Cost/unid**	**COSTO**
	COSTO DE REPARACIÓN (NO ANTICIP.)					
	MODO DE FALLA					
17	Repuestos (pernos de liners)		2	unids.	200	400
18	Mano de Obra directa de Mantenimiento		10	hs.H x $	59	590
20	**SUB-TOTAL por MF**	**SUMA de ant.**		**$**		**990**
	COSTO DE LAS CONSEC. OPERAC.					
27	Tiempo de equipo detenido		2	horas		
28	Tiempo de proceso detenido		2	horas		
29	Utilidades perd. por interrup. de proceso	hs paradax$/h			125000	250000
30	Costo de M.deO. de prod.ociosa por el MF	hs.H x $/h	4		60	240
37	**Costo Oper.Total (sum. al costo de repar.)**	**SUMA de anter.**		**$/ocurr.**		**250240**
38	COSTO TOTAL SI "NO ANTICIPADO"	[20]+[26]+[37]		$/ocurr.		**251230**
	Frecuencia de ocurrencia de la falla	1/ [MTBF]	**3.54**	veces/año		
39	**COSTO TOTAL SI NO ANTICIPADO**			$/año		890,281.1
	COMPARE línea [15] con línea [39]					
	La diferencia es el beneficio adicional	**$/año**	**-482,041**	**a favor de**		**PREVENTIVO**

Tabla N° 7 Justificación técnica del modo de falla 1 A 3.

Modo de Falla 1.A.3	Pernos desajustados de linners		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de monitoreo de condición?	**Si**	**No**	La tasa de fallas es aleatoria pero es imposible monitorear el desajuste de los pernos ya que estan dentro del molino.
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Reacondicionamiento cíclico?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Sustitución cíclica?	**Si**	**No**	
		X	
Descripción de la tarea de mantenimiento propuesta	Ningún mantenimiento programado		
¿Cómo esta acción evitara, eliminara o minimizara las consecuencias de la falla?	Evitará la perdida de producción, debido a la parada inesperada del molino SAG. Debido al desajuste de pernos shell liner		
Es posible realizar la tarea preventiva con personal	**Propio**	**Terceros**	
	X		
Tiempo medio entre fallas	45 dias/falla		
Frecuencia de Reemplazo de componente	Ningún mantenimiento programado		
Tasa de fallas:	Aleatoria en fase inicial		

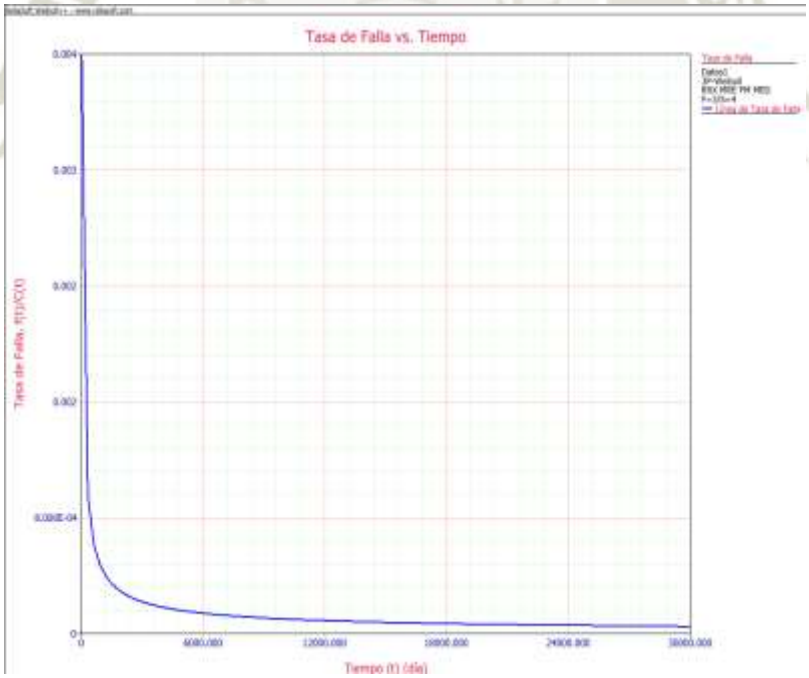


Tabla N° 8 Justificación técnica del modo de falla 2 B 1.

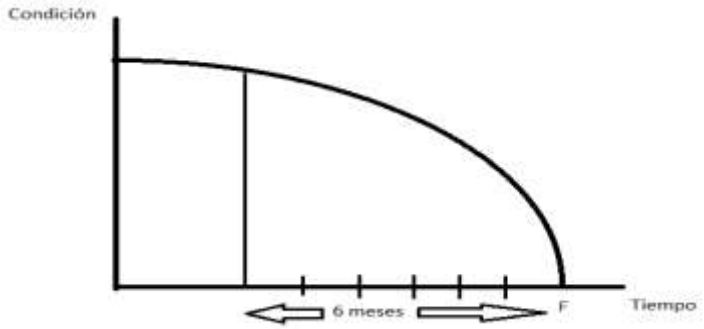
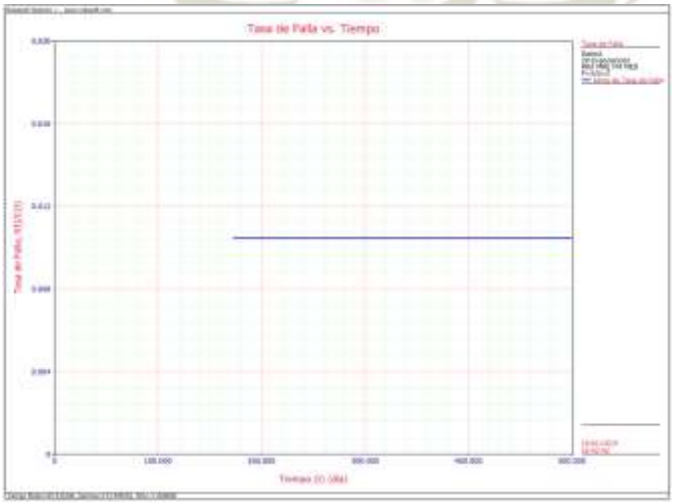
Modo de Falla 2.B.1	Desgaste de shell linner (mayor al 50% de espesor)		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de monitoreo de condición?	**Si**	**No**	
	x		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Reacondicionamiento cíclico?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Sustitución cíclica?	**Si**	**No**	
Descripción de la tarea propuesta (monitoreo de condición)	Inspeccion de espesor de linners (Faro laser + visual)		
Técnica de Monitoreo	Inspección visual o por espesores mediante Faro laser		
¿Cómo esta acción evitara, eliminara o minimizara las consecuencias de la falla?	Los linner desgastados no cumplen su funcion de levantar el mineral con la bolas produciendo una mala molienda, dañando otros linner, dando mas carga al molino pudiendo causar otras fallas en los demas sistemas. Se espera la proxima parada para realizar la inspeccion		
Falla Potencial	Disminución de espesor de linners		
Intervalo P-F	**Intervalo propuesto para realizarla tarea propuesta**		
6 meses	1 mes		
			
Es posible realizar la tarea predictiva con personal	**Propio**	**Terceros**	
	X		
Tiempo medio entre fallas	268 días/falla		
Frecuencia de Reemplazo de componente	6 meses		
Tasa de fallas:	Constante, lo que indica Mantenimiento predictivo.(Según condición)		
			

Tabla N° 9 Justificación económica de modo de falla 2 B1.

1	**MODO DE FALLA:**	2B1 Desgaste del shell linner(mayor al 50% del espesor)				
2	**ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO**	Monitoreo de condición				
	Tarea de mantenimiento:	Inspeccion de desgaste de linner (Faro laser)				
	Frecuencia:	Mensual				
		Cálculo	**Cantidad**	**Unidad**	**Cost/unid**	**COSTO**
	COSTO p. PREDECIR					**USD**
3	Mano de Obra	hs.H/	7.50	hs.H	60.0	450.0
4	Equipo para hacer la predicción		2	horas	22	33.0
5	Tiempo de máquina parada		1.50	horas	0	-
6	Tiempo de proceso interrumpido		0	horas		
7	Costo del tiempo de proceso perdido	tiempo x$/unid.	125000	u$d/h		-
8	Otros costos de la predicción			$		-
9	Costo TOTAL de cada predicción	SUMA [3] a [8]		$		483.0
10	Frecuencia de la inspección de predicción		12	por año		
11	Costo TOTAL anual de cada predicción	[9] x [10]		por año		**5;796.0**
	COSTO DE LA REPARACIÓN ANTICIPADA					
12	Repuestos		2	shell liner	8;000	16;000.0
13	Mano de Obra directa	hs.H	16.00	hs	60.0	960.0
14	Otros costos directos de Mantenimiento					-
15	Tiempo de parada del equipo para el mant.		2.50	horas	0	-
16	Tiempo de proceso detenido		0.50	horas	0	-
17	Utilidades perdidas por proceso detenido	hours x $/h			125000	62;500.0
18	Costo de M.deO. de producción ocioso		5.00	hs.Homb	60	300.0
19	Costo adicional (horas extra, etc.)	hs extra, etc.	0.00		5.5	-
20	Materiales perdidos o deteriorados por MF				0	-
21	Otros costos de Mantenim. ocasionados					-
22	COSTO TOTAL cada vez que se hace	SUMA de anter.				79;760.0
23	Frecuencia de ocurrencia anual	MTBF	1.36	veces/años		
24	COSTO ANUAL de realizar la reparación	[22] x [23]				108;628.4
				unidades	1	108;628.4
25	**COSTO TOTAL PARA INSPECC.+REPAR.**	**[11] + [24]**				114;424.4
	COSTO DE REPARACIÓN (NO ANTICIP.)					
	MODO DE FALLA					
26	Repuestos		2	Liners	8;000	16;000.0
27	Mano de Obra directa de Mantenimiento	mec-elec	24	hs.H x $	60.0	1;440.0
28	Otros Costos directos de Mantenimiento		0		5	-
29	SUB-TOTAL por MF	SUMA de ant.		$		17;440.0
	DAÑOS SECUNDARIOS (si los hay)					
30	Repuestos		0	repuestos	-	-
31	Mano de Obra directa de Mantenimiento	hs,H x $/h	0		-	-
32	Otros costos directos de Mantenimiento			Gruero		-
33	Sub-total para el daño secundario	SUMAde ant.				-
34	% Daño secundario/MF		10%			
35	SUB-TOTAL.Daño secund. x % ocurrencia	[33] x [34]				-
	COSTO DE LAS CONSEC. OPERAC.					
36	Tiempo de equipo detenido		2.50	horas		
37	Tiempo de proceso detenido		1.25	horas		
38	Utilidades perd. por interrup. de proceso	hs paradax$/h			125000	156;250.0
39	Costo de M.deO. de prod.ociosa por el MF	hs.H x $/h	7.0		60.0	420.0
40	Costo adicional para recup.(hs extra, etc.)					
41	Cost de pérdidas de CALIDAD					-
42	Costo de pérdidas de SERVICIO					-
43	Materiales perdidos por el MF					-
44	Otros costos originados por el MF	extra montacarga y cambiador de		150	4	525.0
45	Costo Oper.Total (sum. al costo de repar.)	SUMA de anter.		$/ocurr.		157;195.0
46	COSTO TOTAL SI "NO ANTICIPADO"	[29]+[35]+[45]		$/ocurr.		174;635.0
	Frecuencia de ocurrencia de la falla	cada 25 años	1.36	veces/año		
47	**COSTO TOTAL SI NO ANTICIPADO**	[46]xfrec/año		$/año		237;842.4
	COMPARE línea [25] con línea [47]					
	La diferencia es el beneficio adicional	**$/año**	**-123;418**	**a favor de**		**PREDICTIVO**

Tabla N° 10 Justificación técnica del modo de falla 3 A 1.

Modo de Falla 3.A.1	Linner de chute de alimentacion desgastado		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de monitoreo de condición?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Reacondicionamiento cíclico?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Sustitución cíclica?	**Si**	**No**	
	X		
Descripción de la tarea de mantenimiento propuesta	Cambio de linner de chute de alimentacion en PM		
¿Cómo esta acción evitara, eliminara o minimizara las consecuencias de la falla?	Se evitara una parada correctiva para cambiar el liner.		
Es posible realizar la tarea preventiva con personal	**Propio**	**Terceros**	
	X		
Tiempo medio entre fallas	10 años/falla		
Frecuencia de Reemplazo de componente	6 meses		
Tasa de fallas:	Creciente		

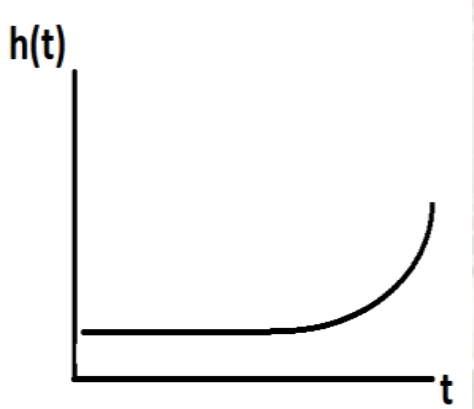


Tabla N° 11 Justificación Económica del modo de falla 3 A 1

1	**MODO DE FALLA:**	3A1 Linner de tolva de alimentacion desgastado				
2	**ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO**	Sustitución Cíclica.				
	Tarea de mantenimiento:	Cambio de linner de chute de alimentacion.				
	Frecuencia:	6 meses				
		Cálculo	**Cantidad**	**Unidad**	**Cost/unid**	**COSTO**
	COSTO p. PREVENIR					**USD**
3	Repuestos (linner de tolva de alimentación)		30	unidades	500	15;000.0
4	Mano de Obra directa	hs.H	7.50	hs	60	450.0
5	Otros costos directos de Mantenimiento					
6	Tiempo de parada del equipo para el mant.		2.5	horas	-	-
7	Tiempo de proceso detenido		0	horas	-	-
8	Utilidades perdidas por proceso detenido	hours x $/h			125;000	-
9	Costo de M.deO. de producción ocioso		5	hs.Homb	60	300.0
10	Costo adicional (horas extra, etc.)	hs extra, etc.			-	-
11	Materiales perdidos o deteriorados por MF				-	-
12	Otros costos de Mantenim. ocasionados					
13	COSTO TOTAL cada vez que se hace	SUMA de anter.				15;750.0
14	Frecuencia de ocurrencia anual	Vida útil	2.0	veces/años		
15	**COSTO TOTAL PARA REPARACIÓN ANTICIPADA**					31;500.0
	COSTO DE REPARACIÓN (NO ANTICIP.)					
	MODO DE FALLA					
17	Repuestos		3	unids.	500	1;500.0
18	Mano de Obra directa de Mantenimiento	mec-elec	10	hs.H x $	60	600.0
19	Otros Costos directos de Mantenimiento					1.0
20	SUB-TOTAL por MF	SUMA de ant.		$		2;101.0
	DAÑOS SECUNDARIOS (si los hay)					
21	Repuestos		0		-	-
22	Mano de Obra directa de Mantenimiento	hs,H x $/h	0		-	-
23	Otros costos directos de Mantenimiento					
24	Sub-total para el daño secundario	SUMAde ant.				-
25	% Daño secundario/MF		100%			
26	SUB-TOTAL.Daño secund. x % ocurrencia	[24] x [25]				-
	COSTO DE LAS CONSEC. OPERAC.					
27	Tiempo de equipo detenido		3.0	horas		
28	Tiempo de proceso detenido		3.0	horas		
29	Utilidades perd. por interrup. de proceso	hs paradax$/h			125;000	375;000.0
30	Costo de M.deO. de prod.ociosa por el MF	hs.H x $/h	4.00		60	240.0
31	Costo adicional para recup.(hs extra, etc.)					
32	Cost de pérdidas de CALIDAD					
33	Costo de pérdidas de SERVICIO					-
34	Materiales perdidos por el MF					-
35	Costos de Energía Eléctrica Adicionales					
36	Otros costos originados por el MF					-
37	Costo Oper.Total (sum. al costo de repar.)	SUMA de anter.		$/ocurr.		375;240.0
38	COSTO TOTAL SI "NO ANTICIPADO"	[20]+[26]+[37]		$/ocurr.		377;341.0
	Frecuencia de ocurrencia de la falla	TMEF	0.10	veces/año		
39	**COSTO TOTAL SI NO ANTICIPADO**			$/año		37;734.1
	COMPARE línea [15] con línea [39]					
	La diferencia es el beneficio adicional	**$/año**	**-6;234**	**a favor de**		**PREVENTIVO**

Tabla N° 12 Justificación técnica del modo de falla 3 A 2.

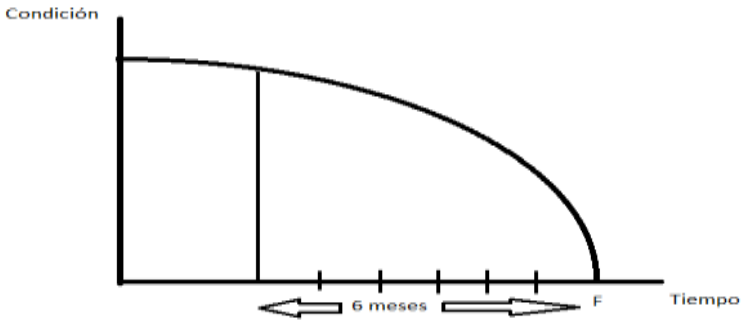
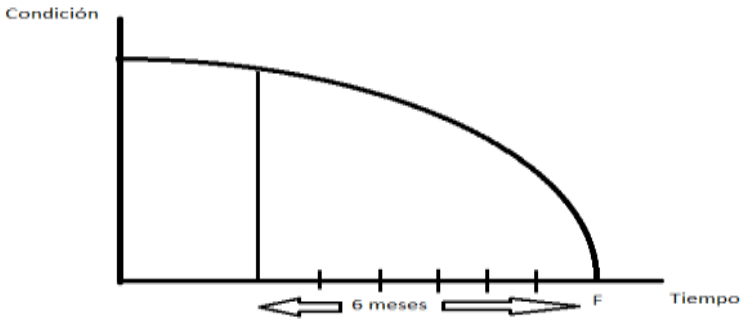
Modo de Falla 3.A.2	Fuga por el sello del chute de alimentacion		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de monitoreo de condición?	**Si**	**No**	
	X		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Reacondicionamiento cíclico?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Sustitución cíclica?	**Si**	**No**	
Descripción de la tarea propuesta (monitoreo de condición)	Inspeccion de sello de chute de alimentacion		
Técnica de Monitoreo	**Inspección Visual**		
¿Cómo esta acción evitara, eliminara o minimizara las consecuencias de la falla?	El sello en el chute alimentacion puede detiorarse, teniendo que cambiarse de manera correctiva para evitar la fuga.		
Falla Potencial	El sello en el chute de alimentación podría romperse.		
Intervalo P-F	**Intervalo propuesto para realizarla tarea propuesta**		
6 meses	1 mes		
			
Es posible realizar la tarea predictiva con personal	**Propio**	**Terceros**	
	X		
Tiempo medio entre fallas	2 años/falla		
Frecuencia de Reemplazo de componente	1.5 años		
Tasa de fallas:	Constante, lo que indica Mantenimiento predictivo.		
			

Tabla N° 13 Justificación económica del modo de falla 3 A 2.

1	**MODO DE FALLA:**	3A2 Fuga por el sello del chute de alimentacion				
2	**ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO**	**Monitoreo de Condición.**				
	Tarea de mantenimiento:	Inspeccion de sello de chute de alimentacion				
	Frecuencia:	Mensual				
		Cálculo	**Cantidad**	**Unidad**	**Cost/unid**	**COSTO**
	COSTO p. PREDECIR					**USD**
3	Mano de Obra	hs.H/	0.25	hs.H	60.0	15.0
4	Equipo para hacer la predicción		0	horas	22	-
5	Tiempo de máquina parada		1.50	horas	0	-
6	Tiempo de proceso interrumpido		0	horas		
7	Costo del tiempo de proceso perdido	tiempo x$/unid.	125000	u$d/h		-
8	Otros costos de la predicción			$		-
9	Costo TOTAL de cada predicción	SUMA [3] a [8]		$		15.0
10	Frecuencia de la inspección de predicción		12	por año		
11	Costo TOTAL anual de cada predicción	[9] x [10]		por año		**180.0**
	COSTO DE LA REPARACIÓN ANTICIPADA					
12	Repuestos		1	Sello de chute	1;000	1;000.0
13	Mano de Obra directa	hs.H	1.00	hs	60.0	60.0
14	Otros costos directos de Mantenimiento					-
15	Tiempo de parada del equipo para el mant.		1.50	horas	0	-
16	Tiempo de proceso detenido		0.00	horas	0	-
17	Utilidades perdidas por proceso detenido	hours x $/h			125000	-
18	Costo de M.deO. de producción ocioso		3.00	hs.Homb	60	180.0
19	Costo adicional (horas extra, etc.)	hs extra, etc.	0.00		5.5	-
20	Materiales perdidos o deteriorados por MF				0	-
21	Otros costos de Mantenim. ocasionados					-
22	COSTO TOTAL cada vez que se hace	SUMA de anter.				1;240.0
23	Frecuencia de ocurrencia anual	MTBF-1	0.50	veces/años		
24	COSTO ANUAL de realizar la reparación	[22] x [23]				620.0
				unidades	1	620.0
25	**COSTO TOTAL PARA INSPECC.+REPAR.**	**[11] + [24]**				800.0
	COSTO DE REPARACIÓN (NO ANTICIP.)					
	MODO DE FALLA					
26	Repuestos		1	sello de chute	1;000	1;000.0
27	Mano de Obra directa de Mantenimiento	mec-elec	1.5	hs.H x $	60.0	90.0
28	Otros Costos directos de Mantenimiento		0		5	-
29	SUB-TOTAL por MF	SUMA de ant.		$		1;090.0
	DAÑOS SECUNDARIOS (si los hay)					
30	Repuestos		0	repuestos	35;000	-
31	Mano de Obra directa de Mantenimiento	hs,H x $/h	0		100.0	-
32	Otros costos directos de Mantenimiento			Gruero		-
33	Sub-total para el daño secundario	SUMAde ant.				-
34	% Daño secundario/MF		10%			
35	SUB-TOTAL.Daño secund. x % ocurrencia	[33] x [34]				-
	COSTO DE LAS CONSEC. OPERAC.					
36	Tiempo de equipo detenido		3.50	horas		
37	Tiempo de proceso detenido		0.00	horas		
38	Utilidades perd. por interrup. de proceso	hs paradax$/h			125000	-
39	Costo de M.deO. de prod.ociosa por el MF	hs.H x $/h	7.0		60.0	420.0
40	Costo adicional para recup.(hs extra, etc.)					
41	Cost de pérdidas de CALIDAD					-
42	Costo de pérdidas de SERVICIO					-
43	Materiales perdidos por el MF					-
44	Otros costos originados por el MF	extra montacarga y cambiador de		150	1	150.0
45	Costo Oper.Total (sum. al costo de repar.)	SUMA de anter.		$/ocurr.		570.0
46	COSTO TOTAL SI "NO ANTICIPADO"	[29]+[35]+[45]		$/ocurr.		1;660.0
	Frecuencia de ocurrencia de la falla	cada 2 años	0.50	veces/año		
47	**COSTO TOTAL SI NO ANTICIPADO**	[46]xfrec/año		$/año		830.0
	COMPARE línea [25] con línea [47}					
	La diferencia es el beneficio adicional	**$/año**	**-30**	**a favor de**		**PREDICTIVO**

Tabla N° 14 Justificación técnica del modo de falla 4 A 1.

Modo de Falla 4.A.1	Parrillas de descarga rotas		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de monitoreo de condición?	**Si**	**No**	
	X		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Reacondicionamiento cíclico?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Sustitución cíclica?	**Si**	**No**	
Descripción de la tarea propuesta (monitoreo de condición)	Inspeccion de parrillas de descarga (Faro laser + visual)		
Técnica de Monitoreo	Inspección por scaner laser e inspección visual		
¿Cómo esta acción evitara, eliminara o minimizara las consecuencias de la falla?	De ser crítico se deteine el proceso y se cambian las parrillas.		
Falla Potencial			
Intervalo P-F	**Intervalo propuesto para realizarla tarea propuesta**		
6 meses	1 mes		



Es posible realizar la tarea predictiva con personal	**Propio**	**Terceros**	
	X		
Tiempo medio entre fallas	263 días/falla		
Frecuencia de Reemplazo de componente	6 a 8 meses		
Tasa de fallas:	Constante, lo que indica Mantenimiento predictivo.		

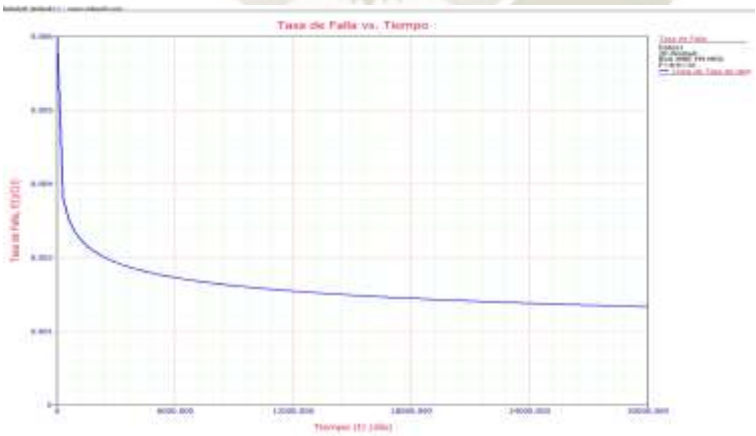
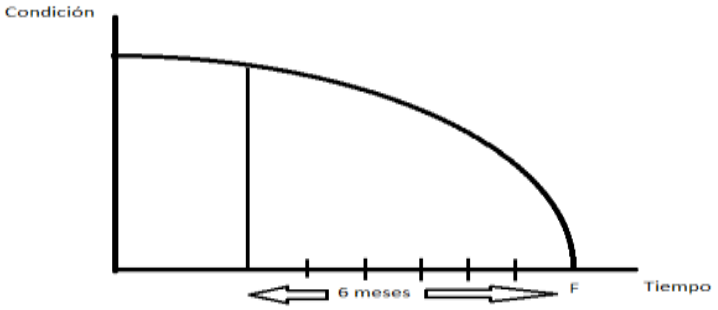


Tabla N° 15 Justificación económica del modo de falla 4 A 1.

1	**MODO DE FALLA:**	4A1 Parrillas de descarga rotas					
2	**ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO**	Monitorear la condición					
	Tarea de mantenimiento:	Inspección de parrillas de descarga (Faro laser + visual)					
	Frecuencia:	Mensual					
		Cálculo	**Cantidad**	**Unidad**	**Cost/unid**	**COSTO**	
	COSTO p. PREDECIR					**USD**	
3	Mano de Obra	hs.H/	9.00	hs.H	60.0	540.0	
4	Equipo para hacer la predicción		2	horas	22	33.0	
5	Tiempo de máquina parada		1.50	horas	0	-	
6	Tiempo de proceso interrumpido		0	horas			
7	Costo del tiempo de proceso perdido	tiempo x$/unid.	125000	u$d/h		-	
8	Otros costos de la predicción			$		-	
9	Costo TOTAL de cada predicción	SUMA [3] a [8]		$		573.0	
10	Frecuencia de la inspección de predicción		12	por año			
11	Costo TOTAL anual de cada predicción	[9] x [10]		por año		**6;876.0**	
	COSTO DE LA REPARACIÓN ANTICIPADA						
12	Repuestos		4	parrillas	7;000	28;000.0	
13	Mano de Obra directa	hs.H	15.00	hs	60.0	900.0	
14	Otros costos directos de Mantenimiento					-	
15	Tiempo de parada del equipo para el mant.		2.50	horas	0	-	
16	Tiempo de proceso detenido		0.00	horas	0	-	
17	Utilidades perdidas por proceso detenido	hours x $/h			125000	-	
18	Costo de M.deO. de producción ocioso		5.00	hs.Homb	60	300.0	
19	Costo adicional (horas extra, etc.)	hs extra, etc.	0.00		5.5	-	
20	Materiales perdidos o deteriorados por MF				0	-	
21	Otros costos de Mantenim. ocasionados					-	
22	COSTO TOTAL cada vez que se hace	SUMA de anter.				29;200.0	
23	Frecuencia de ocurrencia anual	MTBF-1	1.40	veces/años			
24	COSTO ANUAL de realizar la reparación	[22] x [23]				40;880.0	
				unidades	1	40;880.0	
25	**COSTO TOTAL PARA INSPECC.+REPAR.**	**[11] + [24]**				47;756.0	
	COSTO DE REPARACIÓN (NO ANTICIP.)						
	MODO DE FALLA						
26	Repuestos		4	parrillas	7;000	28;000.0	
27	Mano de Obra directa de Mantenimiento	mec-elec	18	hs.H x $	60.0	1;080.0	
28	Otros Costos directos de Mantenimiento		0		5	-	
29	SUB-TOTAL por MF	SUMA de ant.		$		29;080.0	
	DAÑOS SECUNDARIOS (si los hay)						
30	Repuestos		1	repuestos	35;000	35;000.0	
31	Mano de Obra directa de Mantenimiento	hs,H x $/h	0		100.0	-	
32	Otros costos directos de Mantenimiento			Gruero		-	
33	Sub-total para el daño secundario	SUMAde ant.				35;000.0	
34	% Daño secundario/MF		10%				
35	SUB-TOTAL.Daño secund. x % ocurrencia	[33] x [34]				3;500.0	
	COSTO DE LAS CONSEC. OPERAC.						
36	Tiempo de equipo detenido		3.00	horas			
37	Tiempo de proceso detenido		3.00	horas			
38	Utilidades perd. por interrup. de proceso	hs paradax$/h			125000	375;000.0	
39	Costo de M.deO. de prod.ociosa por el MF	hs.H x $/h	6.0		60.0	360.0	
40	Costo adicional para recup.(hs extra, etc.)						
41	Cost de pérdidas de CALIDAD					-	
42	Costo de pérdidas de SERVICIO					-	
43	Materiales perdidos por el MF					-	
44	Otros costos originados por el MF	extra montacarga y cambiador de		150	4	525.0	
45	Costo Oper.Total (sum. al costo de repar.)	SUMA de anter.		$/ocurr.		375;885.0	
46	COSTO TOTAL SI "NO ANTICIPADO"	[29]+[35]+[45]		$/ocurr.		408;465.0	
	Frecuencia de ocurrencia de la falla	cada 1.28 años	1.40	veces/año			
47	**COSTO TOTAL SI NO ANTICIPADO**	[46]xfrec/año		$/año		571;851.0	
	COMPARE línea [25] con línea [47]						
	La diferencia es el beneficio adicional	**$/año**	**-524;095**	**a favor de**		**PREDICTIVO**	

Tabla N° 16 Justificación técnica del modo de falla 4 A 2.

Modo de Falla 4.A.2	Parrillas del trommel rotas		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de monitoreo de condición?	**Si**	**No**	
	X		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Reacondicionamiento cíclico?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Sustitución cíclica?	**Si**	**No**	
Descripción de la tarea propuesta (monitoreo de condición)	Inspeccion de parrillas de trommel		
Técnica de Monitoreo	Inspección visual		
¿Cómo esta acción evitara, eliminara o minimizara las consecuencias de la falla?	Si fuese critico se para la producción en caso contrario se realiza el cambio en el Mantenimiento preventivo más próximo.		
Falla Potencial			
Intervalo P-F	**Intervalo propuesto para realizarla tarea propuesta**		
6 meses	1,5 meses		



Es posible realizar la tarea predictiva con personal	**Propio**	**Terceros**	
	X		
Tiempo medio entre fallas	1.5 meses/falla		
Frecuencia de Reemplazo de componente	1.5 meses.		

Tasa de fallas:	Constante, lo que indica Mantenimiento predictivo.

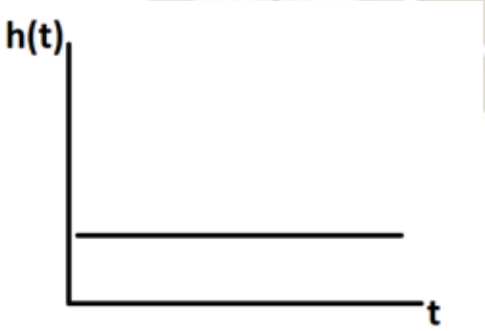


Tabla N° 17 Justificación económica del modo de fall 4 A 2.

1	**MODO DE FALLA:**	4A2 Parrillas de tromel rotas				
2	**ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO**	Monitoreo de Condición				
	Tarea de mantenimiento:	Inspeccion de parrillas de trommel (Visual)				
	Frecuencia:	1,5 meses (45 días)				
		Cálculo	**Cantidad**	**Unidad**	**Cost/unid**	**COSTO**
	COSTO p. PREDECIR					**USD**
3	Mano de Obra	hs.H/	2.00	hs.H	60.0	120.0
4	Equipo para hacer la predicción		0	horas	0	-
5	Tiempo de máquina parada		72.00	horas	0	-
6	Tiempo de proceso interrumpido		0	horas		
7	Costo del tiempo de proceso perdido	tiempo x$/unid.	125000	u$d/h		-
8	Otros costos de la predicción			$		-
9	Costo TOTAL de cada predicción	SUMA [3] a [8]		$		120.0
10	Frecuencia de la inspección de predicción		8	por año		
11	Costo TOTAL anual de cada predicción	[9] x [10]		por año		**960.0**
	COSTO DE LA REPARACIÓN ANTICIPADA					
12	Repuestos		20	parrillas tromel	400	8;000.0
13	Mano de Obra directa	hs.H	2.00	hs	60.0	120.0
14	Otros costos directos de Mantenimiento					-
15	Tiempo de parada del equipo para el mant.		1.50	horas	0	-
16	Tiempo de proceso detenido		0.00	horas	0	-
17	Utilidades perdidas por proceso detenido	hours x $/h			125000	-
18	Costo de M.deO. de producción ocioso		5.00	hs.Homb	60	300.0
19	Costo adicional (horas extra, etc.)	hs extra, etc.	0.00		5.5	-
20	Materiales perdidos o deteriorados por MF				0	-
21	Otros costos de Mantenim. ocasionados					-
22	COSTO TOTAL cada vez que se hace	SUMA de anter.				8;420.0
23	Frecuencia de ocurrencia anual	MTBF	8.00	veces/años		
24	COSTO ANUAL de realizar la reparación	[22] x [23]				67;360.0
				unidades	1	67;360.0
25	**COSTO TOTAL PARA INSPECC.+REPAR.**	**[11] + [24]**				68;320.0
	COSTO DE REPARACIÓN (NO ANTICIP.)					
	MODO DE FALLA					
26	Repuestos		10	parrillas	400	4;000.0
27	Mano de Obra directa de Mantenimiento	mec-elec	4	hs.H x $	60.0	240.0
28	Otros Costos directos de Mantenimiento		0		5	-
29	SUB-TOTAL por MF	SUMA de ant.		$		4;240.0
	DAÑOS SECUNDARIOS (si los hay)					
30	Repuestos		0	repuestos	35;000	-
31	Mano de Obra directa de Mantenimiento	hs,H x $/h	0		100.0	-
32	Otros costos directos de Mantenimiento			Gruero		-
33	Sub-total para el daño secundario	SUMAde ant.				-
34	% Daño secundario/MF		10%			
35	SUB-TOTAL.Daño secund. x % ocurrencia	[33] x [34]				-
	COSTO DE LAS CONSEC. OPERAC.					
36	Tiempo de equipo detenido		1.50	horas		
37	Tiempo de proceso detenido		1.50	horas		
38	Utilidades perd. por interrup. de proceso	hs paradax$/h			125000	187;500.0
39	Costo de M.deO. de prod.ociosa por el MF	hs.H x $/h	7.0		60.0	420.0
40	Costo adicional para recup.(hs extra, etc.)					
41	Cost de pérdidas de CALIDAD					-
42	Costo de pérdidas de SERVICIO					-
43	Materiales perdidos por el MF					-
44	Otros costos originados por el MF	extra montacarga y cambiador de		150	4	525.0
45	Costo Oper.Total (sum. al costo de repar.)	SUMA de anter.		$/ocurr.		188;445.0
46	COSTO TOTAL SI "NO ANTICIPADO"	[29]+[35]+[45]		$/ocurr.		192;685.0
	Frecuencia de ocurrencia de la falla	cada 1.28 años	8.00	veces/año		
47	**COSTO TOTAL SI NO ANTICIPADO**	[46]xfrec/año		$/año		1;541;480.0
	COMPARE línea [25] con línea [47}					
	La diferencia es el beneficio adicional	**$/año**	**-1;473;160**	**a favor de**		**PREDICTIVO**

Tabla N° 18 Justificación económica del modo de falla 4 A 3.

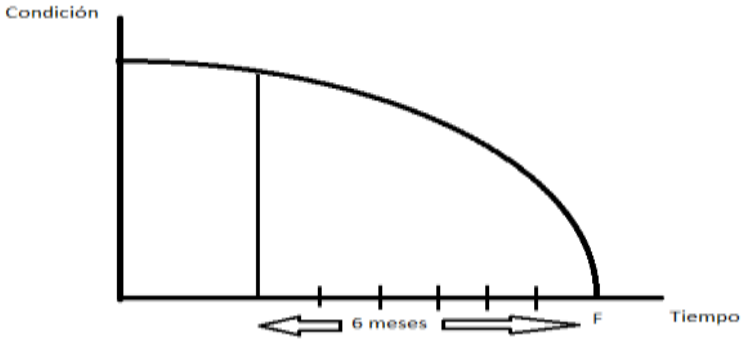
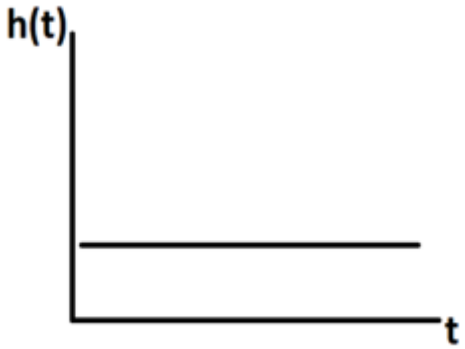
Modo de Falla 4.A.3	Atascamiento de bolas en parrillas de descarga		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de monitoreo de condición?	**Si**	**No**	
	X		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Reacondicionamiento cíclico?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Sustitución cíclica?	**Si**	**No**	
Descripción de la tarea propuesta (monitoreo de condición)	Inspeccion de parrillas de descarga y bolas		
Técnica de Monitoreo	Inspección visual		
¿Cómo esta acción evitara, eliminara o minimizara las consecuencias de la falla?	Si fuese critico se para la producción en caso contrario se realiza el cambio en el Mantenimiento preventivo más próximo.		
Falla Potencial			
Intervalo P-F	**Intervalo propuesto para realizarla tarea propuesta**		
6 meses	1 mes		
			
Es posible realizar la tarea predictiva con personal	**Propio**	**Terceros**	
	X		
Tiempo medio entre fallas	3 meses/falla		
Frecuencia de Reemplazo de componente	45 dias		
Tasa de fallas:	Constante, lo que indica Mantenimiento predictivo.		
			

Tabla N° 19 Justificación económica del modo de falla 4 A 3.

1	**MODO DE FALLA:**	4A3 Atascamiento de bolas en parrillas de descarga				
2	**ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO**	Monitoreo de Condición				
	Tarea de mantenimiento:	Inspeccion de parrillas de descarga y bolas (visual)				
	Frecuencia:	mensual				
		Cálculo	**Cantidad**	**Unidad**	**Cost/unid**	**COSTO**
	COSTO p. PREDECIR					**USD**
3	Mano de Obra	hs.H/	4.00	hs.H	60.0	240.0
4	Equipo para hacer la predicción		0	horas	0	-
5	Tiempo de máquina parada		1.50	horas	0	-
6	Tiempo de proceso interrumpido		0	horas		
7	Costo del tiempo de proceso perdido	tiempo x$/unid.	125000	u$d/h		-
8	Otros costos de la predicción			$		-
9	Costo TOTAL de cada predicción	SUMA [3] a [8]		$		240.0
10	Frecuencia de la inspección de predicción		12	por año		
11	Costo TOTAL anual de cada predicción	[9] x [10]		por año		**2;880.0**
	COSTO DE LA REPARACIÓN ANTICIPADA					
12	Repuestos		0		8;000	-
13	Mano de Obra directa	hs.H	4.50	hs	60.0	270.0
14	Otros costos directos de Mantenimiento		40	kgs	25	1;000.0
15	Tiempo de parada del equipo para el mant.		1.50	horas	0	-
16	Tiempo de proceso detenido		0.00	horas	0	-
17	Utilidades perdidas por proceso detenido	hours x $/h			125000	-
18	Costo de M.deO. de producción ocioso		5.00	hs.Homb	60	300.0
19	Costo adicional (horas extra, etc.)	hs extra, etc.	0.00		5.5	-
20	Materiales perdidos o deteriorados por MF				0	-
21	Otros costos de Mantenim. ocasionados					-
22	COSTO TOTAL cada vez que se hace	SUMA de anter.				1;570.0
23	Frecuencia de ocurrencia anual	MTBF	4.00	veces/años		
24	COSTO ANUAL de realizar la reparación	[22] x [23]				6;280.0
				unidades	1	6;280.0
25	**COSTO TOTAL PARA INSPECC.+REPAR.**	**[11] + [24]**				9;160.0
	COSTO DE REPARACIÓN (NO ANTICIP.)					
	MODO DE FALLA					
26	Repuestos		0		8;000	-
27	Mano de Obra directa de Mantenimiento	mec-elec	4.5	hs.H x $	60.0	270.0
28	Otros Costos directos de Mantenimiento		40	kgs	25	1;000.0
29	SUB-TOTAL por MF	SUMA de ant.		$		1;270.0
	DAÑOS SECUNDARIOS (si los hay)					
30	Repuestos		0	repuestos	35;000	-
31	Mano de Obra directa de Mantenimiento	hs,H x $/h	0		100.0	-
32	Otros costos directos de Mantenimiento			Gruero		-
33	Sub-total para el daño secundario	SUMAde ant.				-
34	% Daño secundario/MF		10%			
35	SUB-TOTAL.Daño secund. x % ocurrencia	[33] x [34]				-
	COSTO DE LAS CONSEC. OPERAC.					
36	Tiempo de equipo detenido		2.00	horas		
37	Tiempo de proceso detenido		2.00	horas		
38	Utilidades perd. por interrup. de proceso	hs paradax$/h			125000	250;000.0
39	Costo de M.deO. de prod.ociosa por el MF	hs.H x $/h	7.0		60.0	420.0
40	Costo adicional para recup.(hs extra, etc.)					
41	Cost de pérdidas de CALIDAD					-
42	Costo de pérdidas de SERVICIO					-
43	Materiales perdidos por el MF					-
44	Otros costos originados por el MF	extra montacarga y cambiador de		0	4	-
45	Costo Oper.Total (sum. al costo de repar.)	SUMA de anter.		$/ocurr.		250;420.0
46	COSTO TOTAL SI "NO ANTICIPADO"	[29]+[35]+[45]		$/ocurr.		251;690.0
	Frecuencia de ocurrencia de la falla	cada 1.28 años	4.00	veces/año		
47	**COSTO TOTAL SI NO ANTICIPADO**	[46]xfrec/año		$/año		1;006;760.0
	COMPARE línea [25] con línea [47}					
	La diferencia es el beneficio adicional	**$/año**	**-997;600**	**a favor de**		**PREDICTIVO**

Tabla N° 20 Justificación técnica del modo de falla 4 A 4.

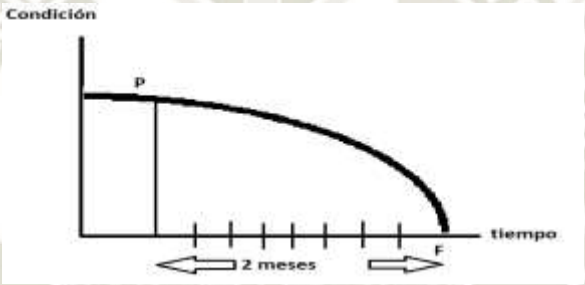
Modo de Falla 4.A.4	Atascamiento de bolas en parrillas de trommel		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de monitoreo de condición?	**Si**	**No**	
	X		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Reacondicionamiento cíclico?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Sustitución cíclica?	**Si**	**No**	
Descripción de la tarea propuesta (monitoreo de condición)	Inspeccion de parrillas de trommel y bolas		
Técnica de Monitoreo	Inspección visual		
¿Cómo esta acción evitara, eliminara o minimizara las consecuencias de la falla?	Si fuese critico se para la producción en caso contrario se realiza el cambio en el Mantenimiento preventivo más próximo.		
Falla Potencial			
Intervalo P-F	**Intervalo propuesto para realizarla tarea propuesta**		
2 meses	1 mes		
			
Es posible realizar la tarea predictiva con personal	**Propio**	**Terceros**	
	X		
Tiempo medio entre fallas	6 meses/falla		
Frecuencia de Reemplazo de componente	45 dias.		
Tasa de fallas:	Constante, lo que indica Mantenimiento predictivo.		
			

Tabla N° 21 Justificación económica del modo de falla 4 A 4

1	**MODO DE FALLA:**	4A4 Atascamiento de bolas en parrillas de trommel				
2	**ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO**	Monitoreo de condición				
	Tarea de mantenimiento:	Inspeccion de parrillas de trommel y bolas (visual)				
	Frecuencia:	Mensual				
		Cálculo	**Cantidad**	**Unidad**	**Cost/unid**	**COSTO**
	COSTO p. PREDECIR					**USD**
3	Mano de Obra	hs.H/	4.00	hs.H	60.0	240.0
4	Equipo para hacer la predicción		0	horas	22	-
5	Tiempo de máquina parada		1.50	horas	0	-
6	Tiempo de proceso interrumpido		0	horas		
7	Costo del tiempo de proceso perdido	tiempo x$/unid.	125000	u$d/h		-
8	Otros costos de la predicción			$		-
9	Costo TOTAL de cada predicción	SUMA [3] a [8]		$		240.0
10	Frecuencia de la inspección de predicción		12	por año		
11	Costo TOTAL anual de cada predicción	[9] x [10]		por año		**2;880.0**
	COSTO DE LA REPARACIÓN ANTICIPADA					
12	Repuestos		9	mallas	400	3;600.0
13	Mano de Obra directa	hs.H	1.50	hs	60.0	90.0
14	Otros costos directos de Mantenimiento					-
15	Tiempo de parada del equipo para el mant.		0.75	horas	0	-
16	Tiempo de proceso detenido		0.00	horas	0	-
17	Utilidades perdidas por proceso detenido	hours x $/h			125000	-
18	Costo de M.deO. de producción ocioso		5.00	hs.Homb	60	300.0
19	Costo adicional (horas extra, etc.)	hs extra, etc.	0.00		5.5	-
20	Materiales perdidos o deteriorados por MF				0	-
21	Otros costos de Mantenim. ocasionados					-
22	COSTO TOTAL cada vez que se hace	SUMA de anter.				3;990.0
23	Frecuencia de ocurrencia anual	MTBF	2.00	veces/años		
24	COSTO ANUAL de realizar la reparación	[22] x [23]				7;980.0
				unidades	1	7;980.0
25	**COSTO TOTAL PARA INSPECC.+REPAR.**	**[11] + [24]**				10;860.0
	COSTO DE REPARACIÓN (NO ANTICIP.)					
	MODO DE FALLA					
26	Repuestos		9	mallas	400	3;600.0
27	Mano de Obra directa de Mantenimiento	mec-elec	2	hs.H x $	60.0	120.0
28	Otros Costos directos de Mantenimiento		0		5	-
29	SUB-TOTAL por MF	SUMA de ant.		$		3;720.0
	DAÑOS SECUNDARIOS (si los hay)					
30	Repuestos		0	repuestos	35;000	-
31	Mano de Obra directa de Mantenimiento	hs,H x $/h	0		100.0	-
32	Otros costos directos de Mantenimiento			Gruero		-
33	Sub-total para el daño secundario	SUMAde ant.				-
34	% Daño secundario/MF		10%			
35	SUB-TOTAL.Daño secund. x % ocurrencia	[33] x [34]				-
	COSTO DE LAS CONSEC. OPERAC.					
36	Tiempo de equipo detenido		1.00	horas		
37	Tiempo de proceso detenido		1.00	horas		
38	Utilidades perd. por interrup. de proceso	hs paradax$/h			125000	125;000.0
39	Costo de M.deO. de prod.ociosa por el MF	hs.H x $/h	7.0		60.0	420.0
40	Costo adicional para recup.(hs extra, etc.)					
41	Cost de pérdidas de CALIDAD					-
42	Costo de pérdidas de SERVICIO					-
43	Materiales perdidos por el MF					-
44	Otros costos originados por el MF	extra montacarga y cambiador de		0	-	-
45	Costo Oper.Total (sum. al costo de repar.)	SUMA de anter.		$/ocurr.		125;420.0
46	COSTO TOTAL SI "NO ANTICIPADO"	[29]+[35]+[45]		$/ocurr.		129;140.0
	Frecuencia de ocurrencia de la falla	cada 6 meses	2.00	veces/año		
47	**COSTO TOTAL SI NO ANTICIPADO**	[46]xfrec/año		$/año		258;280.0
	COMPARE línea [25] con línea [47}					
	La diferencia es el beneficio adicional	**$/año**	**-247;420**	**a favor de**		**PREDICTIVO**

Tabla N° 22 Justificación técnica del modo de falla 5 A 1.

Modo de Falla 5.A.1	Contaminacion en el interior del estator por desgaste de sello		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de monitoreo de condición?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Reacondicionamiento cíclico?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Sustitución cíclica?	**Si**	**No**	
	X		
Descripción de la tarea de mantenimiento propuesta	Cambio de filtros de aire del estator del molino.		
¿Cómo esta acción evitara, eliminara o minimizara las consecuencias de la falla?			
Es posible realizar la tarea preventiva con personal	**Propio**	**Terceros**	
	X		
Tiempo medio entre fallas	5 años/falla		
Frecuencia de Reemplazo de componente	2 meses		
Tasa de fallas:	Creciente		

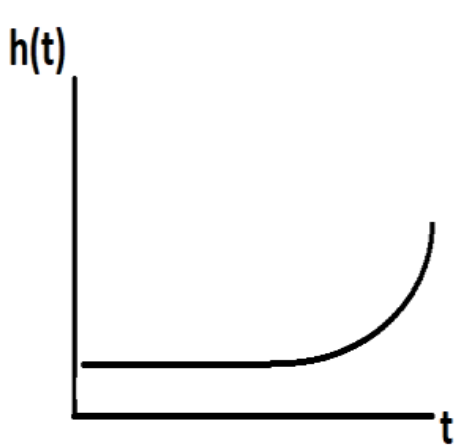


Tabla N° 23 Justificación económica del modo de falla 5 A 1.

1	**MODO DE FALLA:**	5A1 Contaminacion en el interior del estator por desgaste de sello protector				
2	**ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO**	Susitución Cíclica				
	Tarea de mantenimiento:	Cambio de filtros de aire del estator del molino.				
	Frecuencia:	2 meses				
		Cálculo	**Cantidad**	**Unidad**	**Cost/unid**	**COSTO**
	COSTO p. PREVENIR					**USD**
3	Repuestos (filtros)		8	unidades	250	2;000.0
4	Mano de Obra directa	hs.H	2.00	hs	60	120.0
5	Otros costos directos de Mantenimiento					
6	Tiempo de parada del equipo para el mant.		1	horas	-	-
7	Tiempo de proceso detenido		0	horas	-	-
8	Utilidades perdidas por proceso detenido	hours x $/h			125;000	-
9	Costo de M.deO. de producción ocioso		5	hs.Homb	60	300.0
10	Costo adicional (horas extra, etc.)	hs extra, etc.			-	-
11	Materiales perdidos o deteriorados por MF				-	-
12	Otros costos de Mantenim. ocasionados					
13	COSTO TOTAL cada vez que se hace	SUMA de anter.				2;420.0
14	Frecuencia de ocurrencia anual	Vida útil	6.0	veces/años		
15	**COSTO TOTAL PARA REPARACIÓN ANTICIPADA**					14;520.0
	COSTO DE REPARACIÓN (NO ANTICIP.)					
	MODO DE FALLA					
17	Repuestos (filtros)		8	unids.	200	1;600.0
18	Mano de Obra directa de Mantenimiento	mec-elec	3	hs.H x $	60	180.0
19	Otros Costos directos de Mantenimiento					1.0
20	SUB-TOTAL por MF	SUMA de ant.		$		1;781.0
	DAÑOS SECUNDARIOS (si los hay)					
21	Repuestos		0		-	-
22	Mano de Obra directa de Mantenimiento	hs,H x $/h	0		-	-
23	Otros costos directos de Mantenimiento					
24	Sub-total para el daño secundario	SUMAde ant.				-
25	% Daño secundario/MF		100%			
26	SUB-TOTAL.Daño secund. x % ocurrencia	[24] x [25]				-
	COSTO DE LAS CONSEC. OPERAC.					
27	Tiempo de equipo detenido		1.5	horas		
28	Tiempo de proceso detenido		1.5	horas		
29	Utilidades perd. por interrup. de proceso	hs paradax$/h			125;000	187;500.0
30	Costo de M.deO. de prod.ociosa por el MF	hs.H x $/h	4.00		60	240.0
31	Costo adicional para recup.(hs extra, etc.)					
32	Cost de pérdidas de CALIDAD					
33	Costo de pérdidas de SERVICIO					-
34	Materiales perdidos por el MF					-
35	Costos de Energía Eléctrica Adicionales					
36	Otros costos originados por el MF					-
37	Costo Oper.Total (sum. al costo de repar.)	SUMA de anter.		$/ocurr.		187;740.0
38	COSTO TOTAL SI "NO ANTICIPADO"	[20]+[26]+[37]		$/ocurr.		189;521.0
	Frecuencia de ocurrencia de la falla	TMEF	0.20	veces/año		
39	**COSTO TOTAL SI NO ANTICIPADO**			$/año		37;904.2
	COMPARE línea [15] con línea [39]					
	La diferencia es el beneficio adicional	**$/año**	**-23;384**	**a favor de**		**PREVENTIVO**

Tabla N° 24 Justificación técnica del modo de falla 5 A 2.

Modo de Falla 5.A.2	Sobrecalentamiento de motor (exceso de carga)		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de monitoreo de condición?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Reacondicionamiento cíclico?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Sustitución cíclica?	**Si**	**No**	
		X	La carga varia seguna la densidad es aleatorio
Descripción de la tarea de mantenimiento propuesta	Ningún mantenimiento programado.		
¿Cómo esta acción evitara, eliminara o minimizara las consecuencias de la falla?	Se sugiere entrenar al operador para que pueda detectar a tiempo la variación de densidad del mineral y evitar sibrecargas.		
Es posible realizar la tarea preventiva con personal	**Propio**	**Terceros**	
	X		
Tiempo medio entre fallas	100.38 días/falla		
Frecuencia de Reemplazo de componente	Ningún mantenimiento programado		
Tasa de fallas:	Aleatoria constante.		

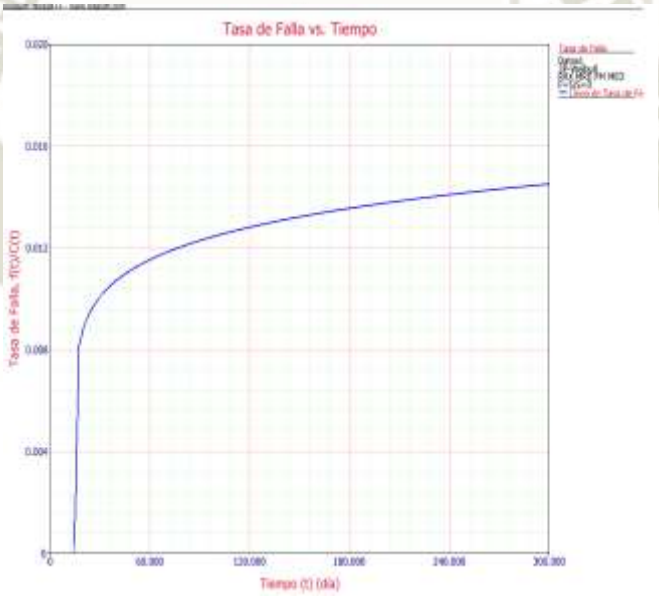


Tabla N° 25 Justificación técnica del modo de falla 5 A 3.

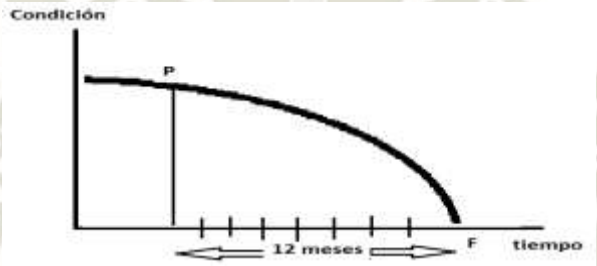
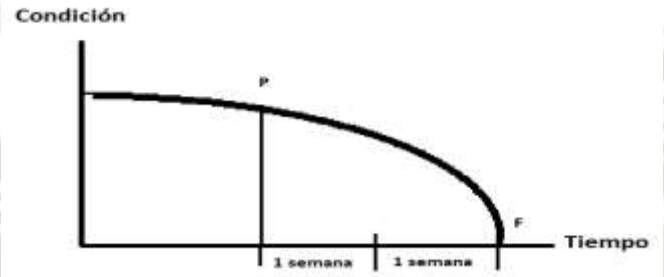
Modo de Falla 5.A.3	Entrehierro fuera de su rango de 16mm		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de monitoreo de condición?	**Si**	**No**	
	X		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Reacondicionamiento cíclico?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Sustitución cíclica?	**Si**	**No**	
Descripción de la tarea propuesta (monitoreo de condición)	Monitorear la distancia del entrehierro		
Técnica de Monitoreo	Inspección con equipos.		
¿Cómo esta acción evitara, eliminara o minimizara las consecuencias de la falla?	Se detiene solamente en caso critico que se reduzca la distancia del entrehierro a menos de 14mm.		
Falla Potencial			
Intervalo P-F	**Intervalo propuesto para realizarla tarea propuesta**		
1 año	6 meses		
			
Es posible realizar la tarea predictiva con personal	**Propio**	**Terceros**	
	X		
Tiempo medio entre fallas	5 años/falla.		
Frecuencia de medición de distancia del entrehierro	6 meses.		
Tasa de fallas:	Constante, lo que indica Mantenimiento predictivo.		
			

Tabla N° 26 Justificación económica del modo de falla 5 A 3.

1	**MODO DE FALLA:**	5A3 Entrehierro fuera de su rango de 16mm				
2	**ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO**	Monitoreo de condición.				
	Tarea de mantenimiento:	Monitorear la distancia del entrehierro (empresa externa Siemens)				
	Frecuencia:	6 meses				
		Cálculo	**Cantidad**	**Unidad**	**Cost/unid**	**COSTO**
	COSTO p. PREDECIR					**USD**
3	Mano de Obra	hs.H/	144.00	hs.H	60.0	8;640.0
4	Equipo para hacer la predicción		48	horas	22	1;056.0
5	Tiempo de máquina parada		72.00	horas	0	-
6	Tiempo de proceso interrumpido		0	horas		
7	Costo del tiempo de proceso perdido	tiempo x$/unid.	125000	u$d/h		-
8	Otros costos de la predicción			$		-
9	Costo TOTAL de cada predicción	SUMA [3] a [8]		$		9;696.0
10	Frecuencia de la inspección de predicción		2	por año		
11	Costo TOTAL anual de cada predicción	[9] x [10]		por año		**19;392.0**
	COSTO DE LA REPARACIÓN ANTICIPADA					
12	Repuestos		0	unidades	1;000	-
13	Mano de Obra directa	hs.H	288.00	hs	60.0	17;280.0
14	Otros costos directos de Mantenimiento					-
15	Tiempo de parada del equipo para el mant.		1.50	horas	0	-
16	Tiempo de proceso detenido		0.00	horas	0	-
17	Utilidades perdidas por proceso detenido	hours x $/h			125000	-
18	Costo de M.deO. de producción ocioso		3.00	hs.Homb	60	180.0
19	Costo adicional (horas extra, etc.)	hs extra, etc.	0.00		5.5	-
20	Materiales perdidos o deteriorados por MF				0	-
21	Otros costos de Mantenim. ocasionados					-
22	COSTO TOTAL cada vez que se hace	SUMA de anter.				17;460.0
23	Frecuencia de ocurrencia anual	MTBF-1	0.20	veces/años		
24	COSTO ANUAL de realizar la reparación	[22] x [23]				3;492.0
				unidades	1	3;492.0
25	**COSTO TOTAL PARA INSPECC.+REPAR.**	**[11] + [24]**				22;884.0
	COSTO DE REPARACIÓN (NO ANTICIP.)					
	MODO DE FALLA					
26	Repuestos		4	cojinetes	200;000	800;000.0
27	Mano de Obra directa de Mantenimiento	mec-elec	288	hs.H x $	60.0	17;280.0
28	Otros Costos directos de Mantenimiento		1		15;000	15;000.0
29	SUB-TOTAL por MF	SUMA de ant.		$		832;280.0
	DAÑOS SECUNDARIOS (si los hay)					
30	Repuestos		0	repuestos	35;000	-
31	Mano de Obra directa de Mantenimiento	hs,H x $/h	0		100.0	-
32	Otros costos directos de Mantenimiento			Gruero		-
33	Sub-total para el daño secundario	SUMAde ant.				-
34	% Daño secundario/MF		10%			
35	SUB-TOTAL.Daño secund. x % ocurrencia	[33] x [34]				-
	COSTO DE LAS CONSEC. OPERAC.					
36	Tiempo de equipo detenido		48.00	horas		
37	Tiempo de proceso detenido		48.00	horas		
38	Utilidades perd. por interrup. de proceso	hs paradax$/h			125000	6;000;000.0
39	Costo de M.deO. de prod.ociosa por el MF	hs.H x $/h	7.0		60.0	420.0
40	Costo adicional para recup.(hs extra, etc.)					
41	Cost de pérdidas de CALIDAD					-
42	Costo de pérdidas de SERVICIO					-
43	Materiales perdidos por el MF					-
44	Otros costos originados por el MF	extra montacarga y cambiador de		150	1	150.0
45	Costo Oper.Total (sum. al costo de repar.)	SUMA de anter.		$/ocurr.		6;000;570.0
46	COSTO TOTAL SI "NO ANTICIPADO"	[29]+[35]+[45]		$/ocurr.		6;832;850.0
	Frecuencia de ocurrencia de la falla	cada 2 años	0.20	veces/año		
47	**COSTO TOTAL SI NO ANTICIPADO**	[46]xfrec/año		$/año		1;366;570.0
	COMPARE línea [25] con línea [47}					
	La diferencia es el beneficio adicional	**$/año**	**-1;343;686**	**a favor de**		**PREDICTIVO**

Tabla N° 27 Justificación técnica del modo de falla 5 A 4.

Modo de Falla 5.A.4	Baja presion hidraulica de frenos		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de monitoreo de condición?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Reacondicionamiento cíclico?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Sustitución cíclica?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de busqueda de fallas?	**Si**	**No**	
	X		
Descripción de la tarea propuesta (Busqueda de fallas)	Arranque de bomba en stand by		
Técnica de mantenimiento	Busqueda de fallas		
¿Cómo esta acción evitara, eliminara o minimizara las consecuencias de la falla?	Verificara que la bomba en stand by se encuentra operativa		
Falla Potencial			
Intervalo P-F	**Intervalo propuesto para realizarla tarea propuesta**		
2 semanas	1 semana		



Es posible realizar la tarea predictiva con personal	**Propio**	**Terceros**	
	X		
Tiempo medio entre fallas	191.9 días/falla		
Arranque de bomba en stand by	Semanal		
Tasa de fallas:	Creciente con el tiempo		

Tabla N° 28 Justificación económica del modo de falla 5 A 4.

1	**MODO DE FALLA:**	5A4 Baja presion hidraulica de frenos					
2	**ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO:**	DETECTIVO					
	Tarea de mantenimiento:	Arranque de bomba en stand by					
	Frecuencia:	semanal					
		Cálculo	**Cantidad**	**Unidad**	**Cost/unid**	**COSTO**	
	COSTO p. DETECTAR					**USD**	
3	Mano de Obra	hs.H/	0.50	hs.H	60.0	30.0	
4	Equipo para hacer la detección		0	horas	-	0.0	
5	Tiempo de máquina parada		0.50	horas	-	0.0	
6	Tiempo de proceso interrumpido		0	horas			
7	Costo del tiempo de proceso perdido	tiempo x$/unid.	1250000	$/h		0.0	
8	Otros costos de la detección		1	$	100	30.0	
9	Costo TOTAL de cada detección	SUMA [3] a [8]		$		60.0	
10	Frecuencia de la inspección detectiva		52	por año			
11	Costo TOTAL anual de cada detección	[9] x [10]		por año		**3;120.0**	
	COSTO DE LA REPARACIÓN ANTICIPADA						
12	Repuestos		1	bomba	35;000	35;000.0	
13	Mano de Obra directa	hs.H	12	hs	60.0	720.0	
14	Otros costos directos de Mantenimiento						
15	Tiempo de parada del equipo para el mant.		3.00	horas	-	0.0	
16	Tiempo de proceso detenido		0	horas	-	0.0	
17	Utilidades perdidas por proceso detenido	hours x $/h			125000	0.0	
18	Costo de M.deO. de producción ocioso		0	hs.Homb	60.0	0.0	
19	Costo adicional (horas extra, etc.)	hs extra, etc.			-	0.0	
20	Materiales perdidos o deteriorados por MF				-	0.0	
21	Otros costos de Mantenim. ocasionados						
22	COSTO TOTAL cada vez que se hace	SUMA de anter.				35;720.0	
23	Frecuencia de ocurrencia anual	1/Mtor	**0.33**	veces/años			
24	COSTO ANUAL de realizar la reparación	[22] x [23]				11;906.7	
				unidades	1	11;906.7	
25	**COSTO TOTAL PARA INSPECC.+REPAR.**	**[11] + [24]**				15;026.7	
	COSTO DE REPARACIÓN (NO ANTICIP.)						
	MODO DE FALLA						
26	Repuestos		1	bomba	35;000	35;000.0	Cambio de Bomba
27	Mano de Obra directa de Mantenimiento	mec-elec	13	hs.H x $	10	130.0	
28	Otros Costos directos de Mantenimiento	Limpieza	1		100	100.0	
29	SUB-TOTAL por MF	SUMA de ant.		$		35;230.0	
	DAÑOS SECUNDARIOS (si los hay)						
30	Repuestos		0	set	-	0.0	
31	Mano de Obra directa de Mantenimiento	hs,H x $/h	72		-	0.0	
32	Otros costos directos de Mantenimiento					0.0	
33	Sub-total para el daño secundario	SUMAde ant.				0.0	
34	% Daño secundario/MF		10%				
35	SUB-TOTAL.Daño secund. x % ocurrencia	[33] x [34]				0.0	
	COSTO DE LAS CONSEC. OPERAC.						
36	Tiempo de equipo detenido		3	horas			
37	Tiempo de proceso detenido		3	horas			
38	Utilidades perd. por interrup. de proceso	hs paradax$/h			125;000	375;000.0	
39	Costo de M.deO. de prod.ociosa por el MF	hs.H x $/h	0		-	0.0	
40	Costo adicional para recup.(hs extra, etc.)						
41	Cost de pérdidas de CALIDAD						
42	Costo de pérdidas de SERVICIO						
43	Materiales perdidos por el MF					0.0	
44	Otros costos originados por el MF			20	4	80.0	
45	Costo Oper.Total (sum. al costo de repar.)	SUMA de anter.		$/ocurr.		375;080.0	
46	COSTO TOTAL SI "NO ANTICIPADO"	[29]+[35]+[45]		$/ocurr.		410;310.0	
	Frecuencia de ocurrencia de la falla	TMEF	**0.33**	veces/año			
47	**COSTO TOTAL SI NO ANTICIPADO**	[46]xfrec/año		$/año		1;230;930.0	
	COMPARE línea [25] con línea [47}						
	La diferencia es el beneficio adicional	**$/año**	**-1;215;903**	**a favor de**		**DETECTIVO**	

Tabla N° 29 Justificación técnica del modo de falla 5 A 5.

Modo de Falla 5.A.5	Falla en solenoides de valvulas de sistema hidráulico de frenos		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de monitoreo de condición?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Reacondicionamiento cíclico?	**Si**	**No**	
	X		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Sustitución cíclica?	**Si**	**No**	
Descripción de la tarea de mantenimiento propuesta	Limpieza de solenoide de sistema hidráulico de freno		
¿Cómo esta acción evitara, eliminara o minimizara las consecuencias de la falla?	Se evitara una parada correctiva.		
Es posible realizar la tarea preventiva con personal	**Propio**	**Terceros**	
	X		
Tiempo medio entre fallas	1 año/falla		
Frecuencia de reacondicionamiento de componente.	45 dias		
Tasa de fallas:	Creciente		

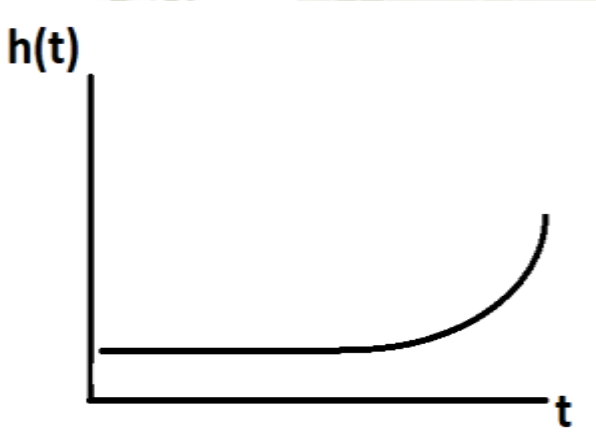


Tabla N° 30 Justificación económica del modo de falla 5 A 5.

1	**MODO DE FALLA:**	5A5 Falla en solenoides de valvulas				
2	**ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO**	Reacondicionamiento Cíclico				
	Tarea de mantenimiento:	Limpieza de solenoide de sistema hidráulico de freno				
	Frecuencia:	cada 1.5 meses				
		Cálculo	**Cantidad**	**Unidad**	**Cost/unid**	**COSTO**
	COSTO p. PREVENIR					**USD**
3	Repuestos		0	unidades	-	-
4	Mano de Obra directa	hs.H	0.50	hs	60	30.0
5	Otros costos directos de Mantenimiento		1		40	40.0
6	Tiempo de parada del equipo para el mant.		0.5	horas	-	-
7	Tiempo de proceso detenido		0	horas	-	-
8	Utilidades perdidas por proceso detenido	hours x $/h			125;000	-
9	Costo de M.deO. de producción ocioso			hs.Homb	-	-
10	Costo adicional (horas extra, etc.)	hs extra, etc.			-	-
11	Materiales perdidos o deteriorados por MF				-	-
12	Otros costos de Mantenim. ocasionados					
13	COSTO TOTAL cada vez que se hace	SUMA de anter.				70.0
14	Frecuencia de ocurrencia anual	Vida útil	8.0	veces/años		
15	**COSTO TOTAL PARA REPARACIÓN ANTICIPADA**					560.0
	COSTO DE REPARACIÓN (NO ANTICIP.)					
	MODO DE FALLA					
17	Repuestos		0	unids.	-	-
18	Mano de Obra directa de Mantenimiento	mec-elec	1	hs.H x $	60	60.0
19	Otros Costos directos de Mantenimiento		1		50	50.0
20	SUB-TOTAL por MF	SUMA de ant.		$		110.0
	DAÑOS SECUNDARIOS (si los hay)					
21	Repuestos		0		-	-
22	Mano de Obra directa de Mantenimiento	hs,H x $/h	0		-	-
23	Otros costos directos de Mantenimiento					
24	Sub-total para el daño secundario	SUMAde ant.				-
25	% Daño secundario/MF		100%			
26	SUB-TOTAL.Daño secund. x % ocurrencia	[24] x [25]				-
	COSTO DE LAS CONSEC. OPERAC.					
27	Tiempo de equipo detenido		1	horas		
28	Tiempo de proceso detenido		1	horas		
29	Utilidades perd. por interrup. de proceso	hs paradax$/h			125;000	125;000.0
30	Costo de M.deO. de prod.ociosa por el MF	hs.H x $/h	1.00		60	60.0
31	Costo adicional para recup.(hs extra, etc.)					
32	Cost de pérdidas de CALIDAD					
33	Costo de pérdidas de SERVICIO					-
34	Materiales perdidos por el MF					-
35	Costos de Energía Eléctrica Adicionales					
36	Otros costos originados por el MF					-
37	Costo Oper.Total (sum. al costo de repar.)	SUMA de anter.		$/ocurr.		125;060.0
38	COSTO TOTAL SI "NO ANTICIPADO"	[20]+[26]+[37]		$/ocurr.		125;170.0
	Frecuencia de ocurrencia de la falla	TMEF	0.50	veces/año		
39	**COSTO TOTAL SI NO ANTICIPADO**			$/año		62;585.0
	COMPARE línea [15] con línea [39]					
	La diferencia es el beneficio adicional	**$/año**	**-62;025**	**a favor de**		**PREVENTIVO**

Tabla N° 31 Justificación técnica del modo de falla 6 A 1.

Modo de Falla 6.A.1	Alta presion en el sistema hidráulico por sobrecarga en el molino		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de monitoreo de condición?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Reacondicionamiento cíclico?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Sustitución cíclica?	**Si**	**No**	La tasa de fallas es aleatoria pero es más por falla de descuido del operador que del equipo en sí.
		X	
Descripción de la tarea de mantenimiento propuesta	Ningún mantenimiento programado		
¿Cómo esta acción evitara, eliminara o minimizara las consecuencias de la falla?	Se sugiere entrenar al operador para eliminar este tipo de falla ya que es más descuido o falta de conocimieto que del equipo.		
Es posible realizar la tarea preventiva con personal	**Propio**	**Terceros**	
	X		
Tiempo medio entre fallas	80.95 días/falla		
Frecuencia de tarea.	Ningún mantenimiento programado		
Tasa de fallas:	Aleatoria en fase inicial		

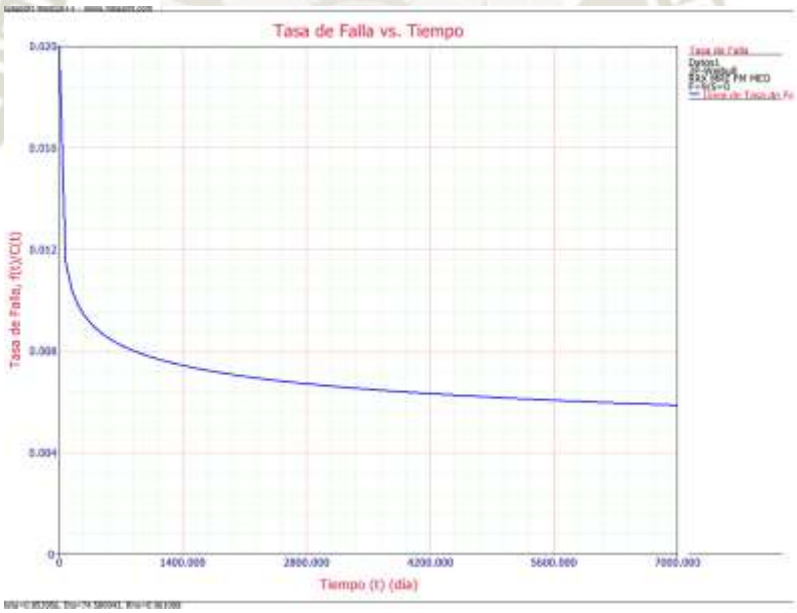


Tabla N° 32 Justificación técnica del modo de falla 6 A 2.

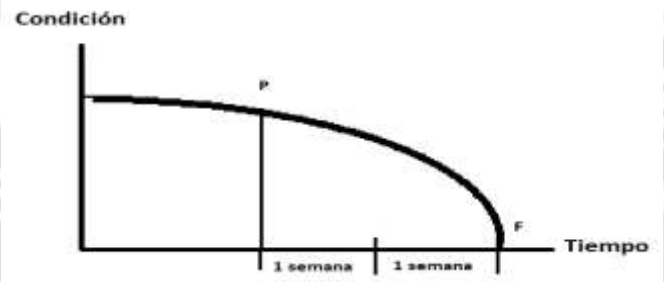
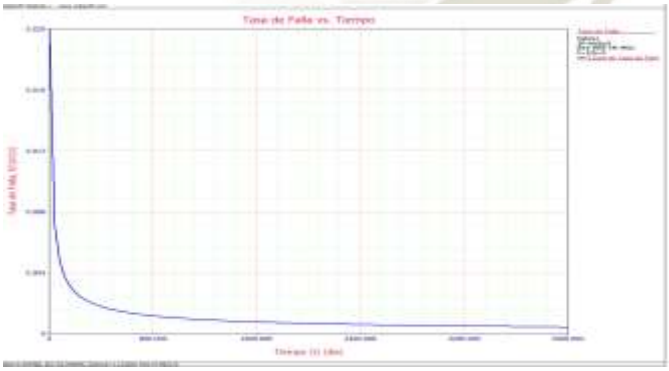
Modo de Falla 6.A.2	Baja presion en el sistema por falla sistema de bombas de alta		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de monitoreo de condición?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Reacondicionamiento cíclico?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Sustitución cíclica?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de busqueda de fallas?	**Si**	**No**	
	X		
Descripción de la tarea propuesta (Busqueda de fallas)	Arranque de bombas de alta en stand by		
Técnica de mantenimiento	Busqueda de fallas		
¿Cómo esta acción evitara, eliminara o minimizara las consecuencias de la falla?	Verificara que la bomba de alta en stand by se encuentra operativa		
Falla Potencial			
Intervalo P-F	**Intervalo propuesto para realizarla tarea propuesta**		
2 semanas	1 semana		
			
Es posible realizar la tarea predictiva con personal	**Propio**	**Terceros**	
	X		
Tiempo medio entre fallas	311,5 días/falla		
Arranque de bomba en stand by	Semanal		
Tasa de fallas:	Decreciente con el tiempo		
			

Tabla N° 33 Justificación económica del modo de falla 6 A 2.

1	**MODO DE FALLA:**	6A2 Baja presion en el sistema por falla sistema de bombas de alta					
2	**ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO**	DETECTIVO					
	Tarea de mantenimiento:	Arranque de bombas de alta en stand by					
	Frecuencia:	semanal (realizado por operaciones)					
		Cálculo	**Cantidad**	**Unidad**	**Cost/unid**	**COSTO**	
	COSTO p. DETECTAR					**USD**	
3	Mano de Obra	hs.H/	0.50	hs.H	60.0	30.0	
4	Equipo para hacer la detección		0	horas	-	0.0	
5	Tiempo de máquina parada		0.00	horas	-	0.0	
6	Tiempo de proceso interrumpido		0	horas			
7	Costo del tiempo de proceso perdido	tiempo x$/unid.	1250000	$/h		0.0	
8	Otros costos de la detección		1	$	100	30.0	
9	Costo TOTAL de cada detección	SUMA [3] a [8]		$		60.0	
10	Frecuencia de la inspección detectiva		52	por año			
11	Costo TOTAL anual de cada detección	[9] x [10]		por año		**3;120.0**	
	COSTO DE LA REPARACIÓN ANTICIPADA						
12	Repuestos		1	bomba	70;000	70;000.0	
13	Mano de Obra directa	hs.H	16	hs	60.0	960.0	
14	Otros costos directos de Mantenimiento						
15	Tiempo de parada del equipo para el mant.		4.00	horas	-	0.0	
16	Tiempo de proceso detenido		0	horas	-	0.0	
17	Utilidades perdidas por proceso detenido	hours x $/h			125000	0.0	
18	Costo de M.deO. de producción ocioso		0	hs.Homb	60.0	0.0	
19	Costo adicional (horas extra, etc.)	hs extra, etc.			-	0.0	
20	Materiales perdidos o deteriorados por MF				-	0.0	
21	Otros costos de Mantenim. ocasionados						
22	COSTO TOTAL cada vez que se hace	SUMA de anter.				70;960.0	
23	Frecuencia de ocurrencia anual	1/Mtor	0.25	veces/años			
24	COSTO ANUAL de realizar la reparación	[22] x [23]				17;740.0	
				unidades	1	17;740.0	
25	**COSTO TOTAL PARA INSPECC.+REPAR.**	**[11] + [24]**				20;860.0	
	COSTO DE REPARACIÓN (NO ANTICIP.)						
	MODO DE FALLA						
26	Repuestos		1	bomba	70;000	70;000.0	Cambio de Bomba
27	Mano de Obra directa de Mantenimiento	mec-elec	16	hs.H x $	10	160.0	
28	Otros Costos directos de Mantenimiento	Limpieza	1		100	100.0	
29	SUB-TOTAL por MF	SUMA de ant.		$		70;260.0	
	DAÑOS SECUNDARIOS (si los hay)						
30	Repuestos		0	set	-	0.0	
31	Mano de Obra directa de Mantenimiento	hs,H x $/h	72		-	0.0	
32	Otros costos directos de Mantenimiento					0.0	
33	Sub-total para el daño secundario	SUMAde ant.				0.0	
34	% Daño secundario/MF		10%				
35	SUB-TOTAL.Daño secund. x % ocurrencia	[33] x [34]				0.0	
	COSTO DE LAS CONSEC. OPERAC.						
36	Tiempo de equipo detenido		4	horas			
37	Tiempo de proceso detenido		4	horas			
38	Utilidades perd. por interrup. de proceso	hs paradax$/h			125;000	500;000.0	
39	Costo de M.deO. de prod.ociosa por el MF	hs.H x $/h	0		-	0.0	
40	Costo adicional para recup.(hs extra, etc.)						
41	Cost de pérdidas de CALIDAD						
42	Costo de pérdidas de SERVICIO						
43	Materiales perdidos por el MF					0.0	
44	Otros costos originados por el MF			20	4	80.0	
45	Costo Oper.Total (sum. al costo de repar.)	SUMA de anter.		$/ocurr.		500;080.0	
46	COSTO TOTAL SI "NO ANTICIPADO"	[29]+[35]+[45]		$/ocurr.		570;340.0	
	Frecuencia de ocurrencia de la falla	TMEF	**0.25**	veces/año			
47	**COSTO TOTAL SI NO ANTICIPADO**	[46]xfrec/año		$/año		2;281;360.0	
	COMPARE línea [25] con línea [47]						
	La diferencia es el beneficio adicional	**$/año**	**-2;260;500**	**a favor de**		**DETECTIVO**	

Tabla N° 34 Justificación técnica del modo de falla 7 A 1.

Modo de Falla 7.A.1	Rotura de sello triple en los pad		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de monitoreo de condición?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Reacondicionamiento cíclico?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Sustitución cíclica?	**Si**	**No**	
	X		
Descripción de la tarea de mantenimiento propuesta	Cambio de repuesto de sello triple		
¿Cómo esta acción evitara, eliminara o minimizara las consecuencias de la falla?	Evitara la fuga de aceite hidráulico por los sellos y evitara la parada del equipo.		
Es posible realizar la tarea preventiva con personal	**Propio**	**Terceros**	
	X		
Tiempo medio entre fallas (TMEF)	2,5 años/falla		
Frecuencia de Reemplazo de componente	6 meses		
Tasa de fallas:	Creciente		

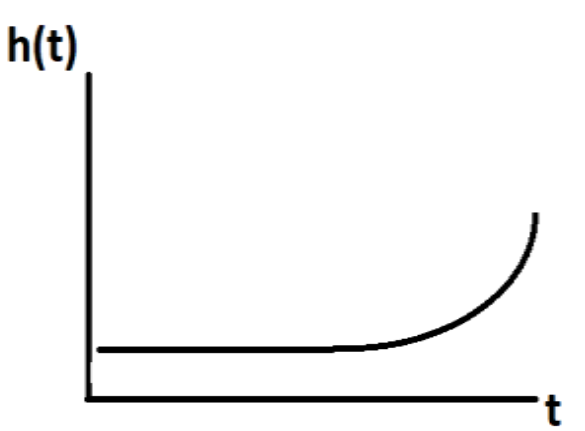


Tabla N° 35 Justificación económica del modo de falla 7 A 1.

1	**MODO DE FALLA:**	7A1 Rotura de sello triple en los pad					
2	**ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO:**	Sustitución Cíclica					
	Tarea de mantenimiento:	Cambio de repuesto de sello triple en PM					
	Frecuencia:	6 meses					
		Cálculo	**Cantidad**	**Unidad**	**Cost/unid**	**COSTO**	
	COSTO p. PREVENIR					**USD**	
3	Repuestos (sello triple)		4	unidades	5;000	20;000.0	
4	Mano de Obra directa	hs.H	24.00	hs	60	1;440.0	
5	Otros costos directos de Mantenimiento						
6	Tiempo de parada del equipo para el mant.		8	horas	-	-	
7	Tiempo de proceso detenido		0	horas	-	-	
8	Utilidades perdidas por proceso detenido	hours x $/h			125;000	-	
9	Costo de M.deO. de producción ocioso		16	hs.Homb	60	960.0	
10	Costo adicional (horas extra, etc.)	hs extra, etc.			-	-	
11	Materiales perdidos o deteriorados por MF				-	-	
12	Otros costos de Mantenim. ocasionados						
13	COSTO TOTAL cada vez que se hace	SUMA de anter.				22;400.0	
14	Frecuencia de ocurrencia anual	Vida útil	2.0	veces/años			
15	**COSTO TOTAL PARA REPARACIÓN ANTICIPADA**					44;800.0	
	COSTO DE REPARACIÓN (NO ANTICIP.)						
	MODO DE FALLA						
17	Repuestos (sellos triple)		4	unids.	5;000	20;000.0	Cambio de sellos
18	Mano de Obra directa de Mantenimiento	mec-elec	24	hs.H x $	60	1;440.0	
19	Otros Costos directos de Mantenimiento					100.0	
20	SUB-TOTAL por MF	SUMA de ant.		$		21;540.0	
	DAÑOS SECUNDARIOS (si los hay)						
21	Repuestos		0		-	-	
22	Mano de Obra directa de Mantenimiento	hs,H x $/h	0		-	-	
23	Otros costos directos de Mantenimiento						
24	Sub-total para el daño secundario	SUMAde ant.				-	
25	% Daño secundario/MF		100%				
26	SUB-TOTAL.Daño secund. x % ocurrencia	[24] x [25]				-	
	COSTO DE LAS CONSEC. OPERAC.						
27	Tiempo de equipo detenido		8.0	horas			
28	Tiempo de proceso detenido		8.0	horas			
29	Utilidades perd. por interrup. de proceso	hs paradax$/h			125;000	1;000;000.0	
30	Costo de M.deO. de prod.ociosa por el MF	hs.H x $/h	16.00		60	960.0	
31	Costo adicional para recup.(hs extra, etc.)						
32	Cost de pérdidas de CALIDAD						
33	Costo de pérdidas de SERVICIO					-	
34	Materiales perdidos por el MF					-	
35	Costos de Energía Eléctrica Adicionales						
36	Otros costos originados por el MF					-	
37	Costo Oper.Total (sum. al costo de repar.)	SUMA de anter.		$/ocurr.		1;000;960.0	
38	COSTO TOTAL SI "NO ANTICIPADO"	[20]+[26]+[37]		$/ocurr.		1;022;500.0	
	Frecuencia de ocurrencia de la falla	TMEF	0.50	veces/año			
39	**COSTO TOTAL SI NO ANTICIPADO**			$/año		511;250.0	
	COMPARE línea [15] con línea [39]						
	La diferencia es el beneficio adicional	**$/año**	**-466;450**	**a favor de**		**PREVENTIVO**	

Tabla N° 36 Justificación técnica del modo de falla 7 A 2.

Modo de Falla 7.A.2	Fuga en el distribuidor de grasa		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de monitoreo de condición?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Reacondicionamiento cíclico?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Sustitución cíclica?	**Si**	**No**	
		X	
Descripción de la tarea de mantenimiento propuesta	Ningún mantenimiento programado		
¿Cómo esta acción evitara, eliminara o minimizara las consecuencias de la falla?	Al no haber perdida de producción y no haber daños colaterales de componentes o equipos se deja que falle y luego se cambia o repara.		
Es posible realizar la tarea preventiva con personal	**Propio**	**Terceros**	
	X		
Tiempo medio entre fallas	6 meses/falla		
Frecuencia de Reemplazo de componente	Ningún mantenimiento programado (Inspección diaria del operador)		
Tasa de fallas:	Aleatoria		

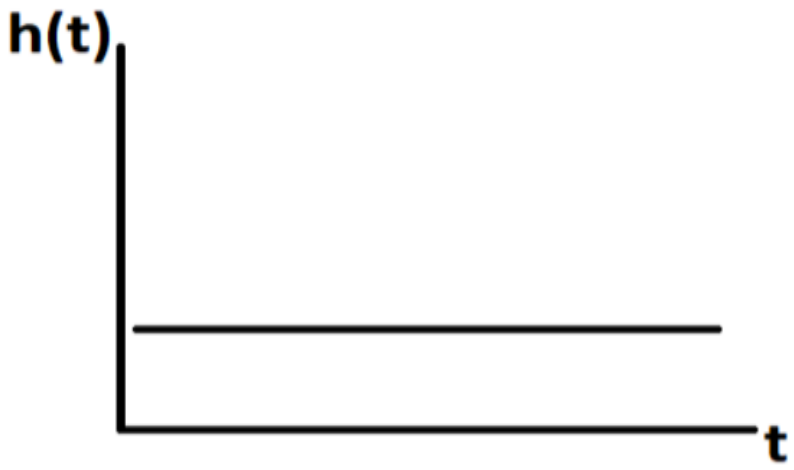


Tabla N° 37 Justificación técnica del modo de falla 7 A 3.

Modo de Falla 7.A.3	Falla de la bomba de inyeccion de grasa		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de monitoreo de condición?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Reacondicionamiento cíclico?	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Sustitución cíclica?	**Si**	**No**	
		X	
Descripción de la tarea de mantenimiento propuesta	Ningún mantenimiento programado		
¿Cómo esta acción evitara, eliminara o minimizara las consecuencias de la falla?	Al no haber perdida de producción y no haber daños colaterales de componentes o equipos se deja que falle y luego se cambia o repara.		
Es posible realizar la tarea preventiva con personal	**Propio**	**Terceros**	
	X		
Tiempo medio entre fallas	9 meses/falla		
Frecuencia de Reemplazo de componente	Ningún mantenimiento programado (Inspección diaria del operador)		

Tasa de fallas:	Aleatoria

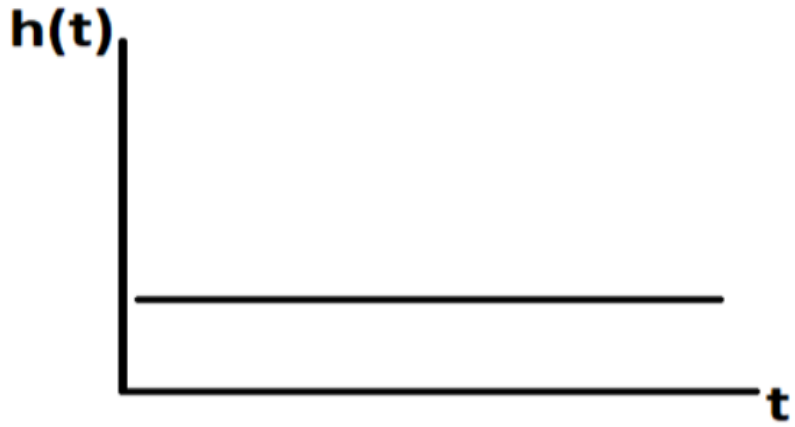


Tabla N° 38 Justificación técnica del modo de falla 8 A 1.

Modo de Falla 8.A.1	Falla de resorte de freno		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de monitoreo de condición? (H1)	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Reacondicionamiento cíclico? (H2)	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Sustitución cíclica? (H3)	**Si**	**No**	
	X		
Descripción de la tarea de mantenimiento propuesta	Cambio de resorte		
¿Cómo esta acción evitara, eliminara o minimizara las consecuencias de la falla?	Evitará la perdida de producción.		
Es posible realizar la tarea preventiva con personal	**Propio**	**Terceros**	
	X		
Tiempo medio entre fallas (TMEF)	5 meses/falla		
Frecuencia de Reemplazo de componente	6 meses		
Tasa de fallas:	Creciente		

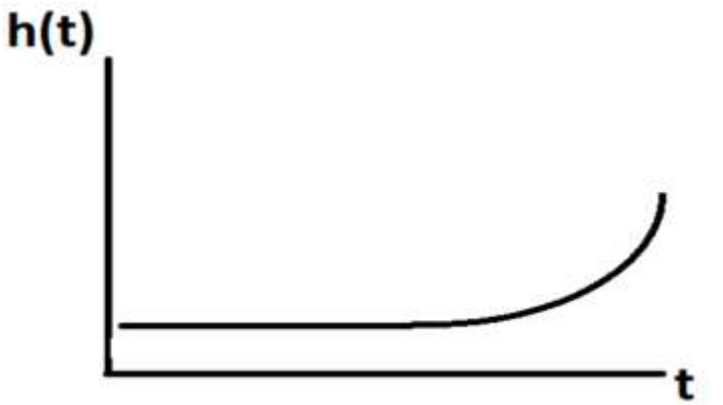


Tabla N° 39 Justificación económica del modo de falla 8 A 1.

1	**MODO DE FALLA:**	8A1 Falla de resorte de freno					
2	**ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO**	Sustitución Cíclica					
	Tarea de mantenimiento:	Cambio de resorte de freno					
	Frecuencia:	6 meses					
		Cálculo	**Cantidad**	**Unidad**	**Cost/unid**	**COSTO**	
	COSTO p. PREVENIR					**USD**	
3	Repuestos (resorte)		12	unidades	900	10;800.0	
4	Mano de Obra directa	hs.H	36.00	hs	60	2;160.0	
5	Otros costos directos de Mantenimiento						
6	Tiempo de parada del equipo para el mant.		12	horas	-	-	
7	Tiempo de proceso detenido		0	horas	-	-	
8	Utilidades perdidas por proceso detenido	hours x $/h			125;000	-	
9	Costo de M.deO. de producción ocioso		12	hs.Homb	60	720.0	
10	Costo adicional (horas extra, etc.)	hs extra, etc.			-	-	
11	Materiales perdidos o deteriorados por MF				-	-	
12	Otros costos de Mantenim. ocasionados						
13	COSTO TOTAL cada vez que se hace	SUMA de anter.				13;680.0	
14	Frecuencia de ocurrencia anual	Vida útil	2.0	veces/años			
15	**COSTO TOTAL PARA REPARACIÓN ANTICIPADA**					27;360.0	
	COSTO DE REPARACIÓN (NO ANTICIP.)						
	MODO DE FALLA						
17	Repuestos (sellos triple)		12	unids.	1;000	12;000.0	Cambio de resortes
18	Mano de Obra directa de Mantenimiento	mec-elec	36	hs.H x $	60	2;160.0	
19	Otros Costos directos de Mantenimiento					100.0	
20	SUB-TOTAL por MF	SUMA de ant.		$		14;260.0	
	DAÑOS SECUNDARIOS (si los hay)						
21	Repuestos		0		-	-	
22	Mano de Obra directa de Mantenimiento	hs,H x $/h	0		-	-	
23	Otros costos directos de Mantenimiento						
24	Sub-total para el daño secundario	SUMAde ant.				-	
25	% Daño secundario/MF		100%				
26	SUB-TOTAL.Daño secund. x % ocurrencia	[24] x [25]				-	
	COSTO DE LAS CONSEC. OPERAC.						
27	Tiempo de equipo detenido		12.0	horas			
28	Tiempo de proceso detenido		12.0	horas			
29	Utilidades perd. por interrup. de proceso	hs paradax$/h			125;000	1;500;000.0	
30	Costo de M.deO. de prod.ociosa por el MF	hs.H x $/h	16.00		60	960.0	
31	Costo adicional para recup.(hs extra, etc.)						
32	Cost de pérdidas de CALIDAD						
33	Costo de pérdidas de SERVICIO					-	
34	Materiales perdidos por el MF					-	
35	Costos de Energía Eléctrica Adicionales						
36	Otros costos originados por el MF					-	
37	Costo Oper.Total (sum. al costo de repar.)	SUMA de anter.		$/ocurr.		1;500;960.0	
38	COSTO TOTAL SI "NO ANTICIPADO"	[20]+[26]+[37]		$/ocurr.		1;515;220.0	
	Frecuencia de ocurrencia de la falla	TMEF	0.50	veces/año			
39	**COSTO TOTAL SI NO ANTICIPADO**			$/año		757;610.0	
	COMPARE línea [15] con línea [39]						
	La diferencia es el beneficio adicional	**$/año**	**-730;250**	**a favor de**		**PREVENTIVO**	

Tabla N° 40 Justificación económica del modo de falla 8 A 2.

Modo de Falla 8.A.2	Pastillas de frenos desgastadas		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de monitoreo de condición? (H1)	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Reacondicionamiento cíclico? (H2)	**Si**	**No**	
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de Sustitución cíclica? (H3)	**Si**	**No**	
	X		
Descripción de la tarea de mantenimiento propuesta	Cambio de pastilla desgastada.		
¿Cómo esta acción evitara, eliminara o minimizara las consecuencias de la falla?	Evitará la perdida de producción.		
Es posible realizar la tarea preventiva con personal	**Propio**	**Terceros**	
	X		
Tiempo medio entre fallas (TMEF)	192.21 días/falla		
Frecuencia de Reemplazo de componente	6 meses		
Tasa de fallas:	Creciente		

Tabla N° 41 Justificación económica del modo de falla 8 A 2.

1	**MODO DE FALLA:**	8A2 Pastillas de frenos desgastadas					
2	**ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO**	Sustitución Cíclica					
	Tarea de mantenimiento:	Cambio de pastilla desgastada en el PM					
	Frecuencia:	6 meses					
		Cálculo	**Cantidad**	**Unidad**	**Cost/unid**	**COSTO**	
	COSTO p. PREVENIR					**USD**	
3	Repuestos (pastillas de freno)		6	unidades	1;750	10;500.0	
4	Mano de Obra directa	hs.H	36.00	hs	60	2;160.0	
5	Otros costos directos de Mantenimiento						
6	Tiempo de parada del equipo para el mant.		12	horas	-	-	
7	Tiempo de proceso detenido		0	horas	-	-	
8	Utilidades perdidas por proceso detenido	hours x $/h			125;000	-	
9	Costo de M.deO. de producción ocioso		16	hs.Homb	60	960.0	
10	Costo adicional (horas extra, etc.)	hs extra, etc.			-	-	
11	Materiales perdidos o deteriorados por MF				-	-	
12	Otros costos de Mantenim. ocasionados						
13	COSTO TOTAL cada vez que se hace	SUMA de anter.				13;620.0	
14	Frecuencia de ocurrencia anual	Vida útil	2.0	veces/años			
15	**COSTO TOTAL PARA REPARACIÓN ANTICIPADA**					27;240.0	
	COSTO DE REPARACIÓN (NO ANTICIP.)						
	MODO DE FALLA						
17	Repuestos (pastillas de freno)		6	unids.	1;750	10;500.0	Cambio de pastillas de
18	Mano de Obra directa de Mantenimiento	mec-elec	36	hs.H x $	60	2;160.0	freno
19	Otros Costos directos de Mantenimiento					100.0	
20	SUB-TOTAL por MF	SUMA de ant.		$		12;760.0	
	DAÑOS SECUNDARIOS (si los hay)						
21	Repuestos		0		-	-	
22	Mano de Obra directa de Mantenimiento	hs,H x $/h	0		-	-	
23	Otros costos directos de Mantenimiento						
24	Sub-total para el daño secundario	SUMAde ant.				-	
25	% Daño secundario/MF		100%				
26	SUB-TOTAL.Daño secund. x % ocurrencia	[24] x [25]				-	
	COSTO DE LAS CONSEC. OPERAC.						
27	Tiempo de equipo detenido		12.0	horas			
28	Tiempo de proceso detenido		12.0	horas			
29	Utilidades perd. por interrup. de proceso	hs paradax$/h			125;000	1;500;000.0	
30	Costo de M.deO. de prod.ociosa por el MF	hs.H x $/h	16.00		60	960.0	
31	Costo adicional para recup.(hs extra, etc.)						
32	Cost de pérdidas de CALIDAD						
33	Costo de pérdidas de SERVICIO					-	
34	Materiales perdidos por el MF					-	
35	Costos de Energía Eléctrica Adicionales						
36	Otros costos originados por el MF					-	
37	Costo Oper.Total (sum. al costo de repar.)	SUMA de anter.		$/ocurr.		1;500;960.0	
38	COSTO TOTAL SI "NO ANTICIPADO"	[20]+[26]+[37]		$/ocurr.		1;513;720.0	
	Frecuencia de ocurrencia de la falla	TMEF	0.50	veces/año			
39	**COSTO TOTAL SI NO ANTICIPADO**			$/año		756;860.0	
	COMPARE línea [15] con línea [39]						
	La diferencia es el beneficio adicional	**$/año**	**-729;620**	**a favor de**		**PREVENTIVO**	

4.1.9. Programación del mantenimiento

Una vez finalizado la justificación de las tareas de mantenimiento desde el punto de vista económico y técnico se procede a enlistar las tareas de realizar por el personal correspondiente.

Tabla 42: Tareas de mantenimiento generadas por la metodología RCM y que se deben de realizar al molino SAG

Tarea Nr	Descripción de la tarea	Duración (hrs)	A realizarse por	Frecuencia
MS-01	Inspección de linners (Faro laser + visual)	1.5	mecánico	mensual
MS-02	Cambio y retorqueo de pernos de de shell linner.	72	mecánico	Bimensual
MS-03	Ningún mantenimiento programado			
MS-04	Inspección de desgaste de linner (Faro laser)	1.5	mecánico	mensual
MS-05	Cambio de linner de chute de alimentación en PM	2.5	mecánico	6 meses
MS-06	Inspección de sello de chute de alimentación	0.25	mecánico	mensual
MS-07	Inspección de parrillas de descarga (Faro laser + visual)	1.5	mecánico	mensual
MS-08	Inspección de parrillas de trommel (Visual)	1.0	mecánico	1,5 meses
MS-09	Inspección de parrillas de descarga y bolas (visual)	0.667	mecánico	mensual
MS-10	Inspección de parrillas de trommel y bolas (visual)	0.667	mecánico	mensual
MS-11	Cambio de filtros de aire del estator del molino.	1.0	mecánico	2 meses
MS-12	Ningún mantenimiento programado (Entrenamiento al operador)			

MS-13	Monitorear la distancia del entrehierro (empresa externa Siemens)	48	operador	6 meses
MS-14	Arranque de bomba en stand by	0.5	operador	semanal
MS-15	Limpieza de solenoide de sistema hidráulico de freno	0.5	eléctrico	1,5 meses
MS-16	Ningún mantenimiento programado (Entrenamiento al operador)			
MS-17	Arranque de bombas de alta en stand by	0.5	operador	semanal
MS-18	Cambio de repuesto de sello triple en PM	8.0	mecánico	6 meses
MS-19	Ningún mantenimiento programado		operador	diaria
MS-20	Ningún mantenimiento programado		operador	diaria
MS-21	Cambio de resorte	12	mecánico	6 meses
MS-22	Cambio de pastilla desgastada	12	mecánico	6 meses

Para poder saber cuál es la carga de trabajo se tiene en el área de manera mensual y anual se desarrolló el plan de mantenimiento anual, el cual se muestra a continuación en la tabla 43, cabe resaltar que todas estas tareas están justificadas técnica y económicamente.

Se puede apreciar también en la tabla 43 que el promedio mensual de horas hombre necesarias es 514, lo cual en promedio nos indica que deberíamos de tener 3 personas para realizar las tareas de mantenimiento preventivo, pero esto no indica que esta sea el personal a tener al mes solamente nos indica la cantidad promedio y nos sirve para calcular los costos de mano de obra de mantenimiento, ya que la cantidad de horas-hombre anuales es 6166 a 60 USD la hora-hombre nos da un costo de mano de obra de 369984 USD para atender el mantenimiento preventivo del molino SAG.

Tabla N° 42 Programa de mantenimiento anual del Molino SAG.

	Programa de Mantenimiento Preventivo Anual																		
	Sistema:		Molienda																
	Equipo:		Estrutura de protección de Molino, chutes de alimentación, descarga de molino, sistema de accionamiento, sistema de lubricación y frenos del Molino SAG																
	Año	**2019**																	
		Frecuencia		**Responsable**	**Duración**														
	Tarea		**dias**	**Área**	**Hombre**	**Horas**	**TIPO de tarea**	**ENE**	**FEB**	**MAR**	**ABR**	**MAY**	**JUN**	**JUL**	**AGO**	**SEP**	**OCT**	**NOV**	**DIC**
1	MS-001	MENSUAL	30	mecánico	6	1.5	Inspección	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
2	MS-002	BIMENSUAL	60	mecánico	12	72	Cambio		864		864		864		864		864		864
3	MS-003						Ningún Mto												
4	MS-004	MENSUAL	30	mecánico	5	1.5	Inspección	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
5	MS-005	SEMESTRAL	180	mecánico	3	2.5	Cambio						7.5						7.5
6	MS-006	MENSUAL	30	mecánico	1	0.25	Inspección	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
7	MS-007	MENSUAL	30	mecánico	6	1.5	Inspección	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
8	MS-008	1.5 MENSUAL	45	mecánico	2	1	Inspección		2	2		2	2		2	2		2	2
9	MS-009	MENSUAL	30	mecánico	6	0.67	Inspección	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
10	MS-010	MENSUAL	30	mecánico	6	0.67	Inspección	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
11	MS-011	BIMENSUAL	60	mecánico	2	1.0	Cambio		2		2		2		2		2		2
12	MS-012						Ningún Mto												
13	MS-013	SEMESTRAL	180	operador	3	48	Inspección						144						144
14	MS-014	SEMANAL	7	operador	1	0.5	Detectivo	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
15	MS-015	1,5 MENSUAL	45	eléctrico	1	0.5	Limpieza		0.5	0.5		0.5	0.5		0.5	0.5		0.5	0.5
16	MS-016						Ningún Mto												
17	MS-017	SEMANAL	7	operaciones	1	0.5	Detectivo	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
18	MS-018	SEMESTRAL	180	mecánico	3	8	Cambio						24						24
19	MS-019	DIARIA	1	operador			Ningún Mto												
20	MS-020	DIARIA	1	operador			Ningún Mto												
21	MS-021	SEMESTRAL	180	mecánico	3	12	Cambio						36						36
22	MS-022	SEMESTRAL	180	mecánico	3	12	Cambio						36						36
		DURACION MENSUAL:						38	906	40	904	40	1154	38	906	40	904	40	1154
		PROMEDIO MENSUAL				:		**514**	**Horas-Hombre**										

4.2. COSTOS EVITADOS AL UTILIZAR LA METODOLOGÍA RCM.

Para poder dimensionar la efectividad que podría tener el plan de mantenimiento basado en la confiabilidad RCM se ha listado en la tabla 44 los 22 modos de falla más críticos que tiene el molino SAG en sus componentes críticos (Estructura de protección, chute de alimentación, descarga de molino, sistema de accionamiento, sistemas de lubricación y frenos), logrando tener un potencial de ahorro de alrededor de 10 millones de dólares en el lapso de 1 año, esto claro esta si se cumplen todos estos modos de falla en 1año; este análisis escapa a la presente tesis ya que se tendría que tener por lo menos unos 20 datos de falla por cada modo de falla para poder calcular con precisión la probabilidad de ocurrencia de los modos de falla.

Tabla N° 43 Principales costos evitados en el plan de mantenimiento del Molino SAG

Ítem	Modo de falla	Detalle	Frecuencia	Costos Evitados /año
			(veces/año)	(USD)
1	1A1	Rotura de Shell Linner	0.73	$108,213
2	1A2	Rotura de los pernos de sujecion del linner	3.5	$482,041
3	1A3	Pernos desajustados de linners	8	$0
4	2B1	Desgaste de shell linner	1.36	$123,418
5	3A1	Linner de tolva de alimentacion desgastado	0.1	$6,234
6	3A2	Fuga por el sello del chute de alimentacion	0.5	$30
7	4A1	Parrillas de descarga rotas	1.4	$524,095
8	4A2	Parrillas del trommel rotas	8	$1,473,160
9	4A3	Atascamiento de bolas en parrillas de descarga	4	$997,600
10	4A4	Atascamiento de bolas en parrillas de trommel	2	$247,420
11	5A1	Contaminacion en el interior del estator por desgaste de sello protector	0.2	$23,384
12	5A2	Sobrecalentamiento de motor (exceso de carga)	0.3	$0
13	5A3	Entrehierro fuera de su rango de 16mm	0.2	$1,343,686
14	5A4	Baja presion hidraulica de frenos	0.33	$1,215,903
15	5A5	Falla en solenoides de valvulas	0.5	$62,025
16	6A1	Alta presion en el sistema hidráulico por sobrecarga en el molino	0.3	$0
17	6A2	Baja presión en el sistema por falla sistema de bombas de alta	0.25	$2,260,500
18	7A1	Rotura de sello triple en los pad	0.5	$466,450
19	7A2	Fuga en el distribuidor de grasa	2	$0
20	7A3	Falla de la bomba de inyeccion de grasa	0.75	$0
21	8A1	Falla de resorte de freno	0.5	$730,250
22	8A2	Pastillas de frenos desgastadas	0.5	$729,620
			Gran Total	$10,794,029

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Se pudo determinar 17 tareas de mantenimiento a través de la metodología RCM II de 22 modos de falla encontrados en el molino SAG. Tabla N°42
- Se determinó, al molino SAG como equipo más crítico del área de Molienda. Según Tabla N° 39.
- Se determinó que se podrían reducir 10.8 millones de dólares americanos en costos de mantenimiento anual, al utilizar la metodología RCM II.
- Se optimizo la planta por la implementación de la metodología de RCM II aumentando la disponibilidad del área de molienda de 92.3% a 93 %.
- Todas las tareas de mantenimiento preventivo se acondicionaron a las fechas de realización de mantenimiento preventivos programados en el área de molienda para no generar mantenimientos de oportunidad.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se sugiere implementar un registro de seguimiento de componentes más detallado ya que el existente no brinda la cantidad de datos de falla necesaria ni filtrada para poder determinar con una precisión de 95% el tiempo medio entre fallas.
- Se sugiere extrapolar la implementación de la metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad a otras áreas críticas de la empresa ya se podría ahorrar una cantidad considerable de dinero.
- Se sugiere revisar los costos evitados en repuestos de mantenimiento ya que al haber menos tareas de mantenimiento correctivo se podría ahorrar en costos de almacenaje y compras imprevistas de repuestos del Molino SAG.

BIBLIOGRAFÍA

Bechtel Chile LTDA. (2012). *Filosofía de operación concentrador Colectivo.*

FLSMIDTH . (2013). *Manual de molino fuller-traylor Manual de instalación, operación y mantenimiento.*

Jardine, A., & Tsang, A. (2006). *Maintenance, Replacement, and Reliability : Theory and applications. USA. Taylor & Francis group.*

Mobley, R. K. (1999). *Root cause Failure Analysis. USA. Plant Engineering.*

Mora, G. A. (2003). *Mantenimiento, Planeación, Ejecución y Control. México: Editorial Alfa omega.*

Moubray, J. (2004). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad-RCMII. USA. Aladon Ltd.* .

Nowlan, S., & Heap, H. (1978). *Realiability Centered Maintenance. USA. Dolby Acces press.*

Parra, C. A., Márquez, A., & Crespo, A. (2012). *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos. Argentina: Editorial INGEMAN Primera Edición.* .

Society of Automotive Engineers JA1011. (1990). *Norma para vehículos aeroespaciales y de superficie.*

Society of Automotive Engineers JA1012, S. (2002). *Norma para vehículos aeroespaciales y de superficie.*

TECSUP . (2013). *Manual de Operación de Planta concentradora.*

TECSUP. (2003). *Manual de Operación – Hidrociclones.*

TECSUP. (2013). *Manual de Operación – Bomba Centrifuga.*

TECSUP. (2013). *Manual de Operación – Molino Bolas.*

TECSUP. (2013). *Manual de Operación - Zaranda.*

ANEXOS

ANEXO 1: NORMA SAE JA1012

SAE The Engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space
INTERNATIONAL
400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA 15096-0001

PRÁCTICAS RECOMENDADAS PARA VEHICULOS AEROESPACIALES Y DE SUPERFICIE

SAE JA1012 | EMITIDA ENE2002

Emitida 2002-01

Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)

Prólogo— El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC) fue documentado por primera vez en un reporte escrito por F.S. Nowlan y H.F. Heap y publicado por el Departamento de Defensa de U.S. en 1978. El mismo describió los procesos innovadores y actuales, para ese entonces, usados para desarrollar programas de mantenimiento para aviones comerciales. Desde entonces, el proceso MCC ha sido ampliamente utilizado por otras industrias, y desarrollado y mejorado ampliamente. Estas mejoras se han incorporado en numerosos documentos de aplicación, publicados por una variedad de organizaciones alrededor del mundo. Muchos de estos documentos permanecen fieles a los principios básicos del MCC expuestos por Nowlan y Heap.

Sin embargo, en el desarrollo de algunos de estos documentos, se han omitido o malinterpretado elementos claves del proceso MCC. Debido a la creciente popularidad de MCC, han surgido otros procesos a los cuales sus defensores les han dado el nombre de "MCC", pero que no están basados en absoluto en Nowlan y Heap. Mientras que la mayoría de estos procesos pueden alcanzar algunas de las metas de MCC, otros pocos son activamente contraproducentes, y algunos son, incluso, dañinos.

Como resultado, a habido un crecimiento de la demanda internacional por una norma que imponga los criterios que cualquier proceso deba cumplir para ser llamado "MCC". SAE JA1011 contempla esa necesidad. Sin embargo, SAE JA1011 presupone un alto grado de familiaridad con los conceptos y la terminología de MCC. Esta guía amplifica, y donde es necesario clarifica, estos conceptos claves y términos, especialmente aquellos que son únicos para MCC.

Nótese que esta guía no esta concebida para ser un manual o una guía de procedimiento para desarrollar MCC. Es para aquellos quienes deseen aplicar MCC, que estén sumamente animados a estudiar el asunto en gran detalle, y a desarrollar sus competencias bajo la guía de practicantes MCC experimentados.

Traducción al español de la norma SAE JA1012 "A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard" emitida en Enero de 2.002.

TABLA DE CONTENIDO

SAE JA1012 Issued JAN2002 (Traducción)

1. ***Alcance—*** SAE JA1012 ("A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard") amplifica y aclara cada uno de los criterios claves listados en SAE JA1011 ("Evaluation Criteria for RCM Processes"), y resume problemas adicionales que deben ser tomados en cuenta para aplicar MCC exitosamente.

1.1 **Organización de la Guía—** Las Secciones de la 5 a la 14, 16 y 17 de esta guía reflejan las secciones de SAE JA1011 en la mayoría de su contenido. La Sección 15 explica más detalladamente como se pueden combinar los elementos claves del proceso MCC para seleccionar políticas apropiadas de manejo individual de modos de falla y sus consecuencias. La Sección 18 toma en cuenta la gerencia y los aspectos relacionados con recursos esenciales para el desarrollo exitoso de MCC.

2. ***Referencias***

2.1 **Publicaciones Aplicables—** Las siguientes publicaciones forman parte de este documento con una magnitud especificada en el mismo. A menos que sea indicado, aplicará la emisión más reciente de las publicaciones SAE. La emisión aplicable surtirá efecto a partir de la fecha de la orden de compra. En caso de existir algún conflicto entre el texto de este documento y las referencias citadas en el mismo, prevalece el texto de este documento. Nada en este documento; sin embargo, reemplaza leyes y regulaciones aplicables a menos que se haya obtenido una exención específica.

2.1.1 Publicaciones SAE— Disponible en SAE, 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA 15096-0001.

SAE JA1011—Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes

2.2 Publicaciones Relacionadas

2.2.1 PUBLICACIONES DEL DEPARTAMENTO DE COMERCIO DE U.S.— Disponible en NTIS, Port Royal Road, Springfield, VA 22161

Nowlan, F. Stanley, and Howard F. Heap, "Reliability-Centered Maintenance," Departamento de Defensa, Washington, D.C. 1978. Número de Reporte AD-A066579.

2.2.2 PUBLICACIONES DEL DEPARTAMENTO DE DEFENSA DE U.S.— Disponible en DODSSP, Subscription Services Desk, Building 4/Section D, 700 Robbins Avenue, Philadelphia, PA 19111-5098

MIL-STD 2173(AS)— "Reliability-Centered Maintenance Requirements for Naval Aircraft, Weapons Systems and Support Equipment" (U.S. Naval Air Systems Command)
NAVAIR 00-25-403— "Guidelines for the Naval Aviation Reliability Centered Maintenance Process" (U.S. Naval Air System Command)
MIL-P-24534— "Planned Maintenance System: Development of Maintenance Requirement Cards, Maintenance Index Pages, and Associated Documentation" (U.S. Naval Sea Systems Command)
S9081-AB-GIB-010/MAINT— "Reliability-Centered Maintenance Handbook" (U.S. Naval Sea Systems Command)

2.2.3 PUBLICACIONES DE LA PRENSA INDUSTRIAL— Disponible en Industrial Press, Inc., 200 Madison Avenue, New York City, New York, 10016 (también disponible en Butterworth-Heinemann, Linacre House, Jordan Hill, Oxford, Great Britain OX2 8DP).

Moubray, John, "Reliability-Centered Maintenance," 1997

2.2.4 PUBLICACIÓN DEL MINISTERIO DE DEFENSA DE U.K.— Disponible en Reliability-centred Maintenance Implementation Team, Ships Support Agency, Ministry of Defence (Navy), Room 22, Block K, Foxhill, Bath, BA1 5AB United Kingdom.

NES 45— Naval Engineering Standard 45, "Requirements for the Application of Reliability-Centred Maintenance Techniques to HM Ships, Royal Fleet Auxiliaries and other Naval Auxiliary Vessels"(Restricted-Commercial)

2.3 **Otras Publicaciones—** Las siguientes publicaciones fueron consultadas durante el desarrollo de esta SAE y no son una parte requerida de este documento.

Anderson, Ronald T. and Neri, Lewis, "Reliability-Centered Maintenance: Management and Engineering Methods," Elsevier Applied Science, London and New York, 1990
Blanchard, B.S., Verma, D., and Peterson, E.L., "Maintainability: A Key to Effective Serviceability and Maintenance Management," John Wiley and Sons, New York, 1995
Cox, S.J. and Tait, N.R.S., "Reliability, Safety and Risk Management," Butterworth Heinemann, Oxford, 1991
"Dependability Management— Part 3-11: Application Guide— Reliability Centred Maintenance," International Electrotechnical Commission, Geneva, Document No. 56/651/FDIS.
Jones, Richard B., "Risk-Based Management: A Reliability-Centered Approach," Gulf Publishing Company, Houston, TX, 1995
MSG-3, "Maintenance Program Development Document," Air transport Association, Washington DC, Revision 2 1993
"Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis," Department of Defense, Washington, DC, Military Standard MIL-DTD. 1629A, Notice 2, 1984
"Reliability Centered Maintenance for Aircraft, Engines, and Equipment," United States Air Force, MIL-STD-1843 (NOTA: Cancelado sin reemplazo en Agosto de 1995)
Smith, Anthony M., "Reliability Centered Maintenance," McGraw-Hill, New York, 1993
Zwingelstein, G., "Reliability Centered Maintenance, A Practical Guide for Implementation," Hermés, Paris, 1996

3. *Definiciones*

3.1 **Cambio de especificaciones—** Cualquier acción tomada para cambiar la configuración física de un activo o sistema (rediseño o modificación), cambiar el método utilizado por un operador o mantenedor para el desarrollo de una tarea específica, cambiar el contexto operacional del sistema, o cambiar la capacidad de un operador o mantenedor (entrenamiento).

3.2 **Capacidad Inicial—** El nivel de operación que el activo físico o sistema es capaz de lograr en el momento que entra en servicio.

3.3 **Consecuencias Ambientales—**Un modo de falla o falla múltiple tiene consecuencias ambientales si puede violar cualquier norma ambiental corporativa, municipal, regional, nacional o internacional, o la regulación que aplica para el activo físico o sistema en consideración.

3.4 **Consecuencias de Falla—** Los efectos que puede provocar un modo de falla o una falla múltiple (evidencia de falla, impacto en la seguridad, en el ambiente, en la capacidad operacional, en los costos de reparación directos o indirectos).

3.5 **Consecuencias en la Seguridad—** Un modo de falla o falla múltiple tiene consecuencias en la seguridad si puede dañar o matar a un ser humano.

3.6 **Consecuencias No Operacionales—** Una categoría de consecuencias de falla que no afecta adversamente la seguridad, el ambiente, o las operaciones, y que sólo requiere reparación o reemplazo de cualquier elemento (s) que podría ser afectado por la falla.

3.7 Consecuencias Operacionales— Una categoría de consecuencias de falla que afecta adversamente la capacidad operacional de un activo físico o sistema (producción, calidad del producto, servicio al consumidor, capacidad militar, o costos operacionales en adición al costo de reparación).

3.8 Contexto Operacional— Las circunstancias bajo las cuales se espera que opere el activo físico o sistema.

3.9 Desempeño deseado— El nivel de desempeño deseado por el dueño o usuario de un activo físico o sistema.

3.10 Desincorporación Programada— Una tarea programada que trae consigo la desincorporación de un componente en o antes de un límite de longevidad específico sin tener en cuenta su condición en el momento.

3.11 Dispositivo Protector o Sistema Protector— Un dispositivo o sistema que pretende evitar, eliminar, o minimizar las consecuencias de falla de cualquier otro sistema.

3.12 Dueño— Una persona u organización que puede sufrir o acarrear la responsabilidad de las consecuencias de un modo de falla en virtud de la propiedad del activo o sistema.

3.13 Efecto de Falla— Lo que pasa cuando ocurre un modo de falla.

3.14 Falla Evidente— Un modo de falla cuyos efectos se tornan evidentes para el personal de operaciones bajo circunstancias normales, si el modo de falla ocurre aislado.

3.15 Falla Funcional— Un estado en el que un activo físico o sistema no se encuentra disponible para ejercer una función específica a un nivel de desempeño deseado.

3.16 Falla Múltiple— Un evento que ocurre si una función protegida falla mientras su dispositivo o sistema protector se encuentra en estado de falla.

3.17 Falla Oculta— Un modo de falla cuyo efecto no es evidente para el personal de operaciones bajo circunstancias normales, si el modo de falla ocurre aislado.

3.18 Falla Potencial— Una condición identificable que indica que una falla funcional está a punto de ocurrir o está en proceso de ocurrir.

3.19 Función— Lo que el dueño o usuario desea que realice un activo físico o sistema

3.20 Función Evidente— Una función cuya falla aislada se vuelve evidente al personal de operaciones bajo circunstancias normales.

3.21 Función Oculta— Una función cuya falla aislada no se vuelve evidente para el personal de operaciones bajo circunstancias normales.

3.22 Función(es) Primaria(s)— La(s) función(es) que constituyen la(s) razón(es) principal(es) por las que el activo físico o sistema es adquirido por su dueño o usuario.

3.23 Funciones Secundarias— Las funciones que un activo físico o sistema tiene que cumplir a parte de su(s) función(es) primaria(s), así como aquellas que necesitan cumplir con los requerimientos reguladores o a las cuales conciernen los problemas de protección, control, contención, confort, apariencia, eficiencia de energía e integridad estructural.

3.24 **Intervalo P-F—** El intervalo entre el punto en que una falla potencial se hace detectable y el punto en que esta se degrada hasta una falla funcional (también conocido como "período para el desarrollo de falla" o "tiempo esperado para la falla").

3.25 **Intervalo P-F Neto—** El intervalo mínimo probable que trascurre entre la detección de una falla potencial y la ocurrencia de una falla funcional.

3.26 **Longevidad—** Una medida de exposición al esfuerzo calculada desde el momento en el cual un elemento o componente entra en servicio cuando nuevo o vuelve a entrar en servicio después de una tarea designada para restaurar su capacidad inicial, y puede ser medida en términos de tiempo de calendario, tiempo de operación, distancia recorrida, ciclos de durabilidad o unidades de producción o de rendimiento.

3.27 **Mantenimiento Proactivo—** Mantenimiento emprendido antes de que ocurra una falla, para prevenir que cualquier elemento entre en estado de falla (restauración programada, desincorporación programada y mantenimiento basado en condición)

3.28 **Modo de Falla—** Un evento único, que causa una falla funcional.

3.29 **Operar hasta Fallar—** Una política de manejo de fallas que permite que un modo de falla específico ocurra sin ningún esfuerzo para anticiparla o prevenirla.

3.30 **Política de Manejo de Fallas—** Un término genérico que abarca tareas basadas en condición, restauración programada, desincorporación programada, detección de falla, operar hasta fallar y cambio de especificaciones.

3.31 **Probabilidad Condicional de Falla—** La probabilidad de que una falla ocurra en un período específico, dado que el elemento involucrado ha sobrevivido al comienzo de ese período.

3.32 **Programado—** Se establece como fijo, a intervalos predeterminados, incluye "monitoreo continuo" (donde el intervalo es efectivamente cero).

3.33 **Restauración Programada—** Una tarea programada que restaura la capacidad de un elemento en (o antes de) un intervalo especificado (límite de longevidad), sin tener en cuenta su condición en el momento, a un nivel que proporciona una probabilidad tolerable de supervivencia hasta el final de otro intervalo especificado.

3.34 **Tarea Apropiada—** Una tarea que es técnicamente factible y al mismo tiempo vale la pena realizar (aplicable y efectiva).

3.35 **Tarea Basada en Condición—** Una tarea programada usada para detectar una falla potencial.

3.36 **Tarea para Detectar Fallas—** Una tarea programada utilizada para determinar si ha ocurrido una falla oculta específica.

3.37 **Usuario—** Una persona u organización que opera un activo o sistema y podría sufrir o acarrear la responsabilidad por las consecuencias de un modo de falla de ese sistema.

4. Siglas

EPI	Equipo de Prueba Incorporado
IDF	Intervalo de (tarea) Detección de Falla
AMEF	Análisis de Modo y Efectos de Falla
mm	Milímetros
TPEFM	Tiempo Promedio entre Fallas Múltiples

TPEF	Tiempo Promedio entre Fallas
TPDA	TPEF de la Función Protegida
TPRA	TPEF de la Función Protectora
psi	Libras por pulgada cuadrada
MCC	Mantenimiento Centrado en Confiabilidad
RPM	Revoluciones por Minuto
I_{TORA}	La indisponibilidad permitida por la función protectora

5. ***Definición de Activo***— "MCC es un proceso específico utilizado para identificar las políticas que deben ser implementadas para el manejo de los modos de falla que pueden causar una falla funcional de cualquier activo físico en un contexto operacional dado" (SAE JA1011, sección 1.1).

Para identificar apropiadamente las políticas de manejo de fallas de un activo físico o sistema, se debe definir el activo o sistema. Esto incluye la selección del activo/sistema, la definición de sus límites, y la identificación del nivel de detalle más apropiado al cual se llevará a cabo el análisis.

SAE JA1011 se refiere al proceso utilizado para la selección adecuada de las políticas de manejo de fallas, bajo la suposición de que el activo/sistema involucrado ha sido ya seleccionado y definido. Esta no proporciona criterios de los procesos a ser utilizados en la selección y definición de activos o sistemas por si mismos, ya que tales procesos tienden a ser altamente dependientes del tipo de activo/sistema, para qué, y por quién están siendo (o son) usados. Sin embargo, en la sección 18 de esta guía se dan algunas orientaciones generales bajo esta óptica.

6. ***Funciones***— Un proceso MCC que es elaborado conforme a la SAE JA1011 comienza por preguntarse "¿Cuáles son las funciones deseadas y los estándares de desempeño asociados del activo en su contexto operacional presente (funciones)?". Esta sección discute los siguientes cuatro conceptos claves concernientes a las funciones que son listadas en la Sección 5.1 de la SAE JA1011:

a. Contexto Operacional
b. Funciones primarias y secundarias
c. Enunciado de una función
d. Estándares de desempeño

6.1 **Contexto Operacional**— "Se debe definir el contexto operacional del activo". (SAE JA1011, sección 5.5.1)

Las funciones, los modos de falla, las consecuencias de falla y las políticas de manejo de fallas que serán aplicadas a cualquier activo dependerán no sólo de cual es el activo, sino también de las circunstancias exactas bajo las cuales será utilizado. Como resultado, se necesitan definir claramente estas circunstancias antes de intentar responder la pregunta citada anteriormente.

La definición de un contexto operacional de un activo físico típicamente incluye una descripción global breve de cómo se utilizará este activo, donde se utilizará, y los aspectos que gobiernan los criterios de desempeño global tales como producción, rendimiento, seguridad, integridad ambiental, y así sucesivamente. Los aspectos específicos que se deben documentar en la definición del contexto operacional, incluyen:

a. Proceso fluido versus proceso por lotes: si el activo está operando en un proceso por lotes (o intermitente) o un proceso fluido (o continuo).
b. Estándares de calidad: la calidad global o las expectativas de servicio al consumidor, en términos de aspectos tales como la tasa global de desperdicio, mediciones de satisfacción al cliente (como expectativas de operación a tiempo en sistemas de transporte, o tasa de las demandas de garantía de los artículos manufacturados), o preparación militar.

c. Estándares ambientales: que estándares ambientales organizacionales, regionales, nacionales, e internacionales aplican para el activo (si hay alguno).

d. Estándares de seguridad: si cualquier expectativa de seguridad predeterminada aplica al activo (en términos de lesiones globales o tasa de fatalidad).
e. Lugar de operaciones: características de la localidad en la cual el equipo será operado (ártico versus tropical, desértico versus selvático, costa adentro versus costa afuera, proximidad de las fuentes de suministro de partes y/o labor, etc.).

f. Intensidad de operaciones: en el caso de manufactura y minería, si el proceso del cual forma parte el equipo opera 24 horas por día, siete días a la semana, o a una intensidad menor. En el caso de utilidades, si el equipo opera bajo picos de carga o condiciones de baja carga. En el caso de equipos militares, si las políticas de manejo de fallas están diseñadas para operaciones en tiempos de paz o en tiempos de guerra.
g. Redundancia: si existe alguna capacidad redundante o en stand by, y en ese caso que forma toma.
h. Trabajo-durante-operación: La magnitud a la cual las actividades trabajo-durante-operación (si hay alguna) permite parar el equipo sin afectar la producción o el rendimiento.

i. Repuestos: si se deben tomar algunas decisiones en cuanto al inventario de repuestos claves que puedan afectar la subsiguiente selección de las políticas de manejo de fallas.
j. Demanda del mercado/suministro de materia prima: si las fluctuaciones cíclicas en la demanda del mercado y/o en el suministro de materia prima puedan afectar la subsiguiente selección de las políticas de manejo de fallas. (Tales fluctuaciones pueden ocurrir en el transcurso de un día en el caso de un negocio de transporte urbano, o en el transcurso de los años en el caso de una estación generadora de energía, un parque de diversiones, o una industria de procesamiento de alimentos).

En el caso de sistemas muy grandes y muy complicados, sería sensato estructurar el contexto operacional de modo jerárquico, si es necesario comenzar con la definición de la misión de la organización entera que está usando el activo.

6.2 **Lista de Funciones—** "Se deben identificar todas las funciones del activo/sistema (todas las funciones primarias y secundarias, incluyendo las funciones de todos los dispositivos de protección)". (SAE JA1011, sección 5.1.2).

El objetivo del proceso MCC es desarrollar una serie de políticas que preserven las funciones del activo o sistema en consideración, a los estándares de desempeño que son aceptables para el dueño/usuario. Como resultado, el proceso MCC comienza por la definición de todas las funciones del activo en su contexto operacional.

Las funciones deben ser divididas en dos categorías: funciones primarias y secundarias.

6.2.1 FUNCIONES PRIMARIAS— La razón por la que cualquier organización adquiere algún activo o sistema es para cumplir con una función o funciones específicas. Estas se conocen como funciones primarias del activo. Por ejemplo, la razón principal por la que alguien adquiere un carro puede ser "transportar cinco personas a 90 Km una hora en un buen camino".

6.2.2 FUNCIONES SECUNDARIAS— Se espera que la mayoría de los activos desarrollen otras funciones, además de las funciones primarias. Estas son conocidas como funciones secundarias. Las funciones secundarias normalmente son menos obvias que las funciones primarias. Pero la pérdida de una función secundaria también puede tener serias consecuencias, en ocasiones más serias que la pérdida de la función primaria. Como resultado, las funciones secundarias necesitan a menudo tanta, sino más, atención que las funciones primarias, por lo tanto deben estar claramente identificadas.

Cuando se identifican las funciones secundarias, se debe velar de no descuidar lo siguiente:

a. Integridad ambiental
b. Integridad de seguridad/estructural

c. Control/contención/confort
d. Apariencia
e. Dispositivos y sistemas protectores
f. Economía/eficiencia
g. Superfluos

Estos aspectos son discutidos con más detalle como sigue.

6.2.2.1 *Integridad Ambiental*— Estas funciones definen la magnitud de cumplimiento del activo con las normas o regulaciones ambientales corporativas, municipales, regionales, nacionales e internacionales que aplican al activo. Estas normas rigen cosas tales como la descarga de materiales de desecho al ambiente, y el ruido.

6.2.2.2 *Seguridad*— Algunas veces se hace necesario escribir el enunciado de una función que trata con una amenaza específica a la seguridad, que es inherente al diseño o a la operación del proceso (como opuesto a las amenazas de seguridad que son resultado de una falla funcional). Por ejemplo, la función de un aislante eléctrico de un artefacto doméstico es "prevenir a los usuarios de tocar los componentes energizados".

6.2.2.3 *Integridad Estructural*— Muchos activos tienen una función secundaria para proveer soporte o una cierta seguridad a otro elemento. Por ejemplo, mientras la función primaria de una pared puede ser proteger a las personas y a los equipos del clima, se puede esperar también que soporte el techo, o el peso de estantes y pinturas.

6.2.2.4 *Control*— En muchos casos, los usuarios no sólo desean que el activo cumpla las funciones de una norma de desempeño dada, también desean regular su desempeño. Esta expectativa se resume en los enunciados de funciones separados. Por ejemplo, una función de un sistema de enfriamiento puede ser regular la temperatura entre unas temperaturas específicas. La indicación y la retroalimentación forman un subconjunto importante de las categorías de control de las funciones.

6.2.2.5 *Contención*— Los sistemas en los cuales la función primaria es almacenar materiales deben también contenerlos. Similarmente, los sistemas que transfieren materiales –especialmente fluidos- también tienen una función de contención. Estas funciones también se deben especificar.

6.2.2.6 *Confort*— Dueños y usuarios generalmente esperan que sus activos o sistemas no causen pena o ansiedad a los operadores o mantenedores. Estos problemas, por supuesto, se deben tratar en la fase de diseño. Sin embargo, el deterioro o las expectativas cambiantes pueden llevar a niveles inaceptables de pena o ansiedad. La mejor manera de cerciorarse de que esto no pase es asegurar que los enunciados de una función asociada estén descritos de manera precisa y que reflejen los estándares actuales.

6.2.2.7 *Apariencia*— La apariencia frecuentemente constituye una función secundaria importante. Por ejemplo, la razón primordial de pintar la mayoría de los equipos industriales es protegerlos de la corrosión. Sin embargo, se puede seleccionar un color brillante para realzar su visibilidad por cuestiones de seguridad, y esta función también se debe documentar.

6.2.2.8 *Protección*— Las funciones protectoras evitan, eliminan, o minimizan las consecuencias de la falla de alguna otra función. Estas funciones están asociadas con dispositivos o sistemas que:

a. Advierten a los operadores de condiciones anormales (luces de advertencia o alarmas).
b. Detienen el equipo en caso de una falla funcional (mecanismos de parada).
c. Eliminan o relevan las condiciones anormales causadas por una falla funcional (mecanismos de alivio, sistemas apaga fuegos, preservadores de vida).
d. Realizan una función que haya fallado (componentes estructurales redundantes, plantas de emergencia).

e. Impiden, en primer lugar, el surgimiento de situaciones peligrosas (señales de advertencia, cubiertas protectoras).

Una función protectora asegura que la falla de la función que está siendo protegida sea menos seria de lo que sería sin protección. Los dispositivos asociados son incorporados en el sistema para reducir el riesgo, de modo que sus funciones se deben documentar con un cuidado especial.

6.2.2.9 *Economía/eficiencia*— En la mayoría de las organizaciones, los costos globales esperados son expresados en la forma de presupuestos de gastos. Sin embargo, para activos específicos, los costos esperados pueden ser tomados en cuenta directamente por los enunciados de las funciones secundarias concernientes, cosas tales como tasas de consumo de energía y tasa de desgaste de materiales de proceso.

6.2.2.10 *Funciones Superfluas*— Algunos sistemas incorporan elementos o componentes que se establecen para ser completamente superfluos. Esto pasa usualmente cuando el equipo o la manera en la cual es utilizado se ha modificado con el tiempo, o cuando se ha sobre-especificado el nuevo equipo.

Aunque tales elementos no tienen una función positiva y frecuentemente es costoso desincorporarlos, ellos pueden de hecho fallar y reducir la confiabilidad global del sistema. Para evitar esto, algunos pueden requerir mantenimiento y por ende, el consumo de recursos.

Si son desincorporados, los modos de falla asociados y los costos también serán desincorporados. Sin embargo, antes de que se recomiende con confianza su desincorporación, sus funciones deben estar claramente identificadas y entendidas.

6.2.2.11 *Funciones "Confiables"* — Frecuentemente existe una tendencia a escribir los enunciados de una función "confiable" tal como "para operar 7 días a la semana, 24 horas por día". De hecho, la confiabilidad no es una función en si misma, es un desempeño esperado que comprende todas las otras funciones. Las metas de confiabilidad/disponibilidad globales deben ser documentadas en la definición del contexto. La confiabilidad de un activo específico es de hecho manejada por el trato adecuado de cada uno de los modos de falla que pueden causar cada pérdida de la función.

6.3 Describiendo las Funciones— "Todas los enunciados de una función deben contener un verbo, un objeto, y un estándar de desempeño (cuantificado en cada caso en que se pueda hacer)" (SAE JA1011, sección 5.1.3)

Por ejemplo, la Figura 1 muestra una bomba para bombear agua de un tanque a otro. La capacidad nominal de la bomba es de 1000 litros por minuto, y el agua es succionada del tanque a una velocidad máxima de 800 litros por minuto. La función primaria de esta bomba se debe describir así: "bombear agua del tanque X al tanque Y, a no menos de 800 litros por minuto". Aquí el verbo es "bombear", el objeto es "agua", y el estándar de desempeño es "del tanque X al tanque Y, a no menos de 800 litros por minuto".

Los enunciados de las funciones protectoras necesitan un manejo especial. Estas funciones actúan en excepciones –en otras palabras, cuando algo va mal- entonces el enunciado de la función debe reflejar este hecho. Normalmente esto se hace incorporando las palabras "si" o "en el caso de", seguidas por un breve resumen de las circunstancias o evento que activarían la protección. Por ejemplo, la función de una válvula de alivio de presión debe ser descrita como sigue: "Ser capaz de aliviar la presión en la caldera si excede de 250 psi".

FIGURA 1— FUNCIÓN DE UNA BOMBA

6.4 Estándares de Desempeño— "Los estándares de desempeño incorporados en los enunciados de una función deben tener el nivel de desempeño deseado por el dueño o usuario del activo/sistema en su contexto operacional." (SAE JA1011, sección 5.1.4)

Cualquier sistema organizado expuesto al mundo real se deteriorará –hacia una desorganización total (también conocida como "caos" o "entropía")- a menos que se tomen ciertos pasos para tratar con cualquier proceso que esté causando el deterioro del sistema.

Por ejemplo, las bombas centrifugas son objeto de desgaste del impulsor (impeller). Esto pasa si una bomba desplaza ácido o aceite lubricante, y si el impulsor es de titanio o de acero dúctil. La única pregunta es cuán rápido se deteriorará el impulsor hasta el punto en el cual no pueda bombear fluido al caudal de flujo mínimo requerido.

Una vez que el desempeño de un activo cae por debajo del valor mínimo aceptable para el usuario, el activo ha fallado. Recíprocamente, si el desempeño del activo se mantiene por encima de este valor mínimo, continúa funcionando a un nivel que es satisfactorio para el usuario. En esta guía, "usuarios" incluye dueños de los activos, los usuarios de los activos –comúnmente los operadores- y la sociedad como un todo. Los dueños están satisfechos si sus activos generan un retorno satisfactorio de la inversión realizada para adquirirlos (normalmente el retorno financiero para operaciones comerciales, u otras mediciones para operaciones no-comerciales). Los usuarios están satisfechos si cada activo continua haciendo aquello que ellos desean que haga a un estándar de desempeño que ellos –los usuarios- consideran satisfactorio. Finalmente, la sociedad como un todo está satisfecha si el activo no falla de modo que amenace la seguridad pública o el ambiente.

En esencia, esto significa que si nosotros estamos en la búsqueda de encausar un activo para que continúe funcionando a un nivel que sea satisfactorio para el usuario, entonces el objetivo del mantenimiento es asegurar que el activo continúe operando por encima del nivel mínimo que es aceptable para estos usuarios. Si fuese posible disponer de un activo de modo que pudiese entregar el desempeño mínimo sin ningún deterioro, entonces él mismo podría estar disponible para trabajar continuamente, sin necesidad de mantenimiento.

Sin embargo, el deterioro es inevitable, por lo tanto debe estar permitido. Esto significa que cuando algún activo entra en servicio, debe estar disponible para entregar el estándar de desempeño mínimo deseado por el usuario. Lo que el activo esta disponible a entregar en este punto se conoce como capacidad inicial. La Figura 2 muestra la relación correcta entre esta capacidad y el desempeño deseado.

Esto significa que el desempeño puede ser definido de dos maneras:

a. Desempeño deseado (que desea el usuario que haga el activo).
b. Capacidad inicial (que puede hacer).

FIGURA 2— PERMITIENDO EL DETERIORO

El margen de deterioro debe ser suficientemente extenso para permitir un tiempo de uso razonable antes de que los componentes se degraden hacia una falla funcional, pero no tan extenso para que el sistema esté sobre diseñado y sea también demasiado costoso. En la práctica, el margen es adecuado en el caso de la mayoría de los componentes, sin embargo, normalmente es posible desarrollar programas de mantenimiento acordes.

Sin embargo, si el desempeño deseado es más alto que la capacidad inicial, ninguna cantidad de mantenimiento podrá entregar el desempeño deseado, en ese caso el activo no es mantenible.

Esto implica que para saber si un activo debe ser mantenido, necesitamos saber ambos tipos de comportamientos: capacidad inicial del activo y el desempeño mínimo que el usuario está dispuesto a aceptar en el contexto en el cual el activo será utilizado. Este desempeño mínimo es el desempeño estándar que debe ser incorporado en los enunciados de la función.

Por ejemplo, la capacidad inicial de la bomba de la Figura 1 es de 1000 litros por minuto, y la tasa a la cual el agua está siendo succionada del tanque (fuera del tanque) es de 800 litros por minuto. En este contexto, la bomba está cumpliendo las expectativas de su usuario con tal que continúe bombeando agua en el tanque más rápido de lo que el agua está siendo succionada. Como resultado, la función primaria de la bomba fue descrita como "bombear agua del tanque X al tanque Y, a no menos de 800 litros por minuto", y no "bombear a 1000 litros por minuto".

Nótese que si la misma bomba estuviese siendo usada en una situación en la que la succión del tanque fuera (dijera) 900 litros por minuto, entonces la función primaria debería leerse "bombear agua del tanque X al tanque Y, a no menos de 900 litros por minuto", y el programa de mantenimiento debe ser cambiado para reflejar esta nueva expectativa operacional.

Nótese que los usuarios y mantenedores frecuentemente tienen puntos de vista significativamente diferentes acerca de lo que constituye un desempeño aceptable. Como resultado, para evitar malos entendidos en lo que constituye una "falla funcional", los estándares mínimos de desempeño aceptable deben estar claramente definidos y entendidos por los usuarios y los mantenedores del activo, junto con cualquier otra persona que tenga un interés legítimo en el comportamiento del activo.

Los estándares de desempeño se deben cuantificar en los casos en que sea posible, ya que los estándares cuantitativos son más claros y más precisos que los cualitativos. Ocasionalmente sólo se utilizan estándares cualitativos cuando se trata de funciones relativas a la apariencia. En esos casos,

se debe cuidar especialmente de que los estándares cualitativos sean entendidos y aceptados por los usuarios y mantenedores del activo.

7. ***Fallas Funcionales—*** Un proceso MCC que sea conforme a la norma SAE JA1011 responde la pregunta, "¿De qué maneras puede fallar al cumplir sus funciones (fallas funcionales)?". Para responder satisfactoriamente esta pregunta, SAE JA1011 en la sección 5.2 declara que "Se deben definir todos los estados de falla asociados con cada función".

La sección 6 explica que un activo falla si es incapaz de hacer lo que el usuario desea que haga. También explica que el activo debe estar definido como una función, y que cada activo tiene más de una (y frecuentemente varias) funciones diferentes. Como para cada una de estas funciones existe la posibilidad de fallar, cualquier activo puede sufrir una variedad de estados de falla.

Por ejemplo, la función primaria de la bomba en la Figura 1 era "bombear agua del tanque X al tanque Y, a no menos de 800 litros por minuto", mientras que una función secundaria podría ser "contener el agua en la bomba". Es posible que tal bomba sea capaz de bombear la cantidad requerida de agua (no falla en términos de su función primaria) mientras gotea continuamente (falla en términos de su función secundaria). Recíprocamente, es equivalentemente posible que la bomba se deteriore al punto en el cual no pueda bombear el caudal requerido (falla en términos de su función primaria) mientras contiene el líquido requerido (no falla en términos de su función secundaria).

Por esta razón, definir la falla en términos de la pérdida de las funciones específicas es más preciso que definir la falla de un activo como un todo. Los ejemplos anteriores también muestran porque el proceso MCC utiliza el término "falla funcional" para describir estados de falla, en lugar de simplemente "falla". (Nótese que MCC distingue entre una falla funcional o estado de falla, y un "modo de falla" el cual es un evento que causa un estado de falla).

Dos puntos adicionales que se deben considerar cuando se definen las fallas funcionales son: falla parcial y total, y los límites superiores e inferiores.

7.1 **Falla Total y Parcial—** Las fallas funcionales que representan la falla total de la función son relativamente fáciles de identificar. Por ejemplo, está claro que la bomba mencionada en la sección 6.3, sufrirá una falla funcional si no bombea ninguna cantidad de agua ("falla total"). Sin embargo; la bomba también sufrirá una falla funcional si puede bombear agua a una tasa menor de 800 litros por minuto.

El segundo estado de falla en este ejemplo se conoce como "falla parcial". Las fallas parciales necesitan identificarse separadamente porque ellas son causadas casi siempre por modos de falla diferentes de las fallas totales, y porque las consecuencias casi siempre son también diferentes.

Tenga presente que la falla parcial no es igual que el deterioro por debajo de la capacidad inicial. Todo se deteriora por debajo de la capacidad inicial después de algún tiempo de uso, y tal deterioro puede ser tolerado con tal que no alcance el punto inaceptable para el usuario del activo, como se muestra en la Figura 2. El deterioro sólo se convierte en una falla funcional (parcial o total) cuando el desempeño cae por debajo del nivel mínimo requerido por el usuario.

7.2 **Límites Superiores e Inferiores—** Los estándares de desempeño asociados con algunas funciones incorporan límites superiores e inferiores. Estos límites implican que el activo ha fallado si opera por encima del límite superior o por debajo del límite inferior. En estos casos, la demarcación del límite superior necesita ser documentada separadamente de la demarcación del límite inferior. Esto es porque los modos de falla y/o consecuencias asociadas cuando se excede el límite superior son generalmente diferentes que los asociados cuando se está por debajo del límite inferior.

Por ejemplo, la función primaria de una máquina pulidora se puede definir como "Pulir cojinetes en un ciclo de tiempo de 3.00 minutos, a un diámetro de 75 mm ± 0.1 mm, con una superficie final no mayor de 0.2 Ra". Esta máquina ha fallado si:

a. Si se detiene por completo.
b. Rectifica una pieza en un ciclo de tiempo mayor a 3.03 minutos.
c. Rectifica una pieza en un ciclo de tiempo menor a 2.97 minutos.
d. El diámetro excede 75.1 mm.
e. El diámetro es menor de 74.9 mm.
f. La superficie final es muy rugosa (excede 0.2 Ra)

8. ***Modos de falla***— Un proceso MCC que cumple con la norma SAE JA1011 responde la pregunta, "¿Qué causa cada falla funcional (modos de falla)?" Esta sección discute los cinco conceptos claves siguientes concernientes a los modos de falla que están listados en la Sección 5.3 de SAE JA1011:

a. Identificar los modos de falla.
b. Establecer que se entiende por "probable".
c. Niveles de causalidad.
d. Fuentes de información.
e. Tipos de modos de falla.

8.1 Identificando los Modos de Falla— "Se deben identificar los modos de falla probables que puedan causar cada falla funcional". (SAE JA1011, sección 5.3)

La Sección 7 de esta guía menciona que el MCC distingue entre el estado de falla del activo (falla funcional) y los eventos que causan los estados de falla (modos de falla). Debido a que es imposible definir las causas de una falla hasta que se haya establecido exactamente que se entiende por "falla", el proceso MCC identifica las fallas funcionales antes de definir los modos de falla. En la Figura 3 se muestra la manera usual de documentar esto para la función primaria de la bomba ilustrada en la Figura 1. La Figura 3 que lista las funciones de un activo, las fallas funcionales y los modos de falla, muestra casi todos los elementos de un Análisis de Modo y Efectos de Falla (AMEF). Los "efectos" de cada modo de falla son listados más adelante (ver la Sección 9 de esta guía).

La Figura 3 también muestra que la descripción de un modo de falla debe contener al menos un pronombre y un verbo. La descripción debe ser suficientemente detallada de modo que posibilite la selección de una política de manejo de fallas adecuada, pero no tan detallada que tome demasiado tiempo realizar el proceso de análisis.

En particular, los verbos utilizados para describir los modos de falla se deben seleccionar cuidadosamente, ya que tienen una gran influencia en el proceso de selección de las políticas de manejo de fallas. Por ejemplo, se debe usar muy poco verbos como "fallar" o "averiarse" o "malfuncionamiento", ya que dan poca o ninguna indicación de cual podría ser la manera apropiada de manejar el modo de falla. El uso de verbos más específicos hace posible seleccionar las opciones de manejo de fallas a partir de un rango completo.

Por ejemplo, en la Figura 3 el modo de falla 1A4 podría llamarse "fallas del acople". Sin embargo; tal frase no provee pistas de que podría hacerse para anticipar o prevenir el modo de falla. Si nosotros decimos "los pernos del acople están sueltos" o "el cubo del acople presenta cizallas debido a la fatiga", entonces se torna mucho más fácil identificar una tarea proactiva.

ACTIVO: Sistema de Bombeo

FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL (Pérdida de la Función)		Modo de Falla (Causa de la Falla)	
1	Transferir agua del tanque X al tanque Y, a no menos de 800 litros por minuto.	A	No disponible para transferir ninguna cantidad de agua	1	Cojinete atascado
				2	Motor quemado
				3	Impulsor suelto
				4	Cizallas en el cubo del acople debido a la fatiga
				5	Válvula de entrada atascada en posición cerrada
				6	Impulsor atascado por un objeto extraño…….etc.
		B	Transfiere menos de 800 litros por minuto	1	Impulsor desgastado
				2	Línea de succión parcialmente bloqueada….etc.

FIGURA 3— MODOS DE FALLA DE UNA BOMBA

Para válvulas, interruptores, y dispositivos similares, la descripción del modo de falla debe indicar si la pérdida de la función es causada en la posición abierta o cerrada del elemento que falla. "Atascamiento de la válvula en posición cerrada" dice más que "Atascamiento de la válvula". Además, el propósito de identificar los modos de falla es identificar la causa de la falla funcional de modo que se encuentre la manera de anticiparla o prevenirla. Como resultado, a veces puede ser necesario tomar además otro paso, como por ejemplo "Atascamiento de la válvula en posición cerrada debido al óxido en el paso del tornillo". En este contexto, el uso de la palabra "óxido" sugiere que sería apropiado enfocar los esfuerzos de manejo de fallas en detectar o controlar el óxido.

8.2 **Estableciendo Cuál es el Significado de "Probable"—** "El método utilizado para decidir que constituye un modo de falla "probable" debe ser aceptado por el dueño o usuario del activo". (SAE JA1011, sección 5.3.2).

La sección 8.1 menciona que se deben identificar todos los modos de falla probables que pueden causar cada falla funcional. "Probabilidad razonable" significa: una probabilidad que encuentra una prueba de racionalidad, cuando es aplicada por personal conocedor y entrenado. (Un término utilizado en lugar de "razonable" en este contexto es el término "creíble".) Si las personas entrenadas para utilizar MCC, y quienes conocen el activo en su contexto operacional, acuerdan que la probabilidad a la que un modo de falla específico puede ocurrir es suficientemente alta para que garantice un análisis extenso entonces, el modo de falla debe ser listado.

En la práctica, algunas veces es muy difícil decidir si un modo de falla debe o no ser listado. Este problema está relacionado al mismo tiempo a la probabilidad de ocurrencia y al nivel de detalle utilizado para describir los modos de falla. Muy pocos modos de falla, y/o poco detalle, conducen a un análisis superficial y algunas veces peligroso. Muchos modos de falla, y/o mucho detalle, causan que el proceso MCC completo tome mucho más tiempo del necesario. En casos extremos, esto puede causar que el proceso tome dos o incluso tres veces más del tiempo necesario (un fenómeno conocido como "parálisis del análisis"), y puede también conducir a programas de mantenimiento excesivamente difíciles.

En situaciones, donde puedan existir dudas o desacuerdos sobre lo que constituye el umbral de "racionalidad", la decisión final debe ser tomada por la organización que posee o usa el activo, ya que dicha organización tendrá la responsabilidad de las consecuencias si ocurre el modo de falla.

Nótese que la decisión de listar un modo de falla debe ser regulada considerando sus consecuencias. Si es probable que las consecuencias sean de hecho muy severas, posiblemente deben listarse los modos de falla y deben estar sujetos a un análisis más extenso.

Por ejemplo, si la bomba descrita en la Figura 3 fuese instalada en una fábrica de alimentos o en una planta ensambladora de vehículos, el modo de falla "carcaza rota por un objeto que cayó del cielo" debe ser omitida inmediatamente por ser ridículamente improbable. Sin embargo; si la misma bomba fuese una bomba de enfriamiento primaria de un reactor nuclear en una planta de energía comercial, este modo de falla se debe tomar más en serio –incluso si pensamos que todavía es altamente improbable. (Las políticas de manejo de fallas apropiadas podrían prohibir que un avión vuele encima de la facilidad, o diseñar un techo que pueda resistir el choque de un avión. Esto por supuesto no es una simple especulación –ambas políticas son consideradas rutinariamente en estaciones de energía nuclear).

8.3 **Niveles de Causalidad—** "Se deben identificar los modos de falla en un nivel de causalidad que haga posible identificar una política de manejo de fallas apropiada." (SAE JA 1011, sección 5.3.3)

Las secciones previas de esta guía declaran que los modos de falla deben ser descritos con suficiente detalle para hacer posible la selección de una política de manejo de fallas apropiada, pero no en tanto detalle que se invierta demasiado tiempo en el proceso de análisis.

La magnitud a la cual los modos de falla se deben describir en diferentes niveles de detalle se ilustra en la Figura 4, basada en la bomba cuyas funciones y fallas funcionales fueron descritas en la Figura 3. La Figura 4 lista algunos de los modos de falla que podrían causar la falla funcional "no disponible para transferir ninguna cantidad de agua". En este ejemplo, estos modos de falla se consideran en siete niveles de detalle, comenzando con la falla de la bomba dispuesta como un conjunto.

El primer punto que surge de este ejemplo es la conexión entre el nivel de detalle y el número de modos de falla listados. El ejemplo muestra que mientras más profundo sea el Análisis de Modo y Efectos de Falla (AMEF), más grande será el número de modos de falla que pueden ser listados. Por ejemplo, hay tres modos de falla listados para la bomba al nivel 3 en la Figura 4, pero 20 al nivel 6.

Otro punto que surge de la Figura 4 es "causas raíz". Este se discutirá a continuación.

8.3.1 CAUSAS RAÍZ— El término "causa raíz" se utiliza frecuentemente en conexión con el análisis de fallas. Implica que es posible llegar al final y a un nivel de causalidad absoluto, si se profundiza lo suficiente. De hecho, esto no es sólo muy difícil de hacer, sino que también es comúnmente innecesario.

Por ejemplo, en la Figura 4 el modo de falla "tuerca del impulsor suelta" está listado en el nivel 4, que a su vez es causado por "tuerca del impulsor fracturada" en el nivel 5. Si nosotros fuésemos a un nivel más profundo, esto podría haber ocurrido por "apriete excesivo de la tuerca del impulsor" (nivel 6), lo que a su vez puede haber ocurrido por "error de ensamblaje" (nivel 7). El error de ensamblaje puede haber ocurrido porque el "técnico estaba distraído" (nivel 8). El pudo haber estado distraído porque su "niño estaba enfermo" (nivel 9). Este modo de falla puede haber ocurrido porque el "niño comió comida dañada en un restaurante" (nivel 10).

SAE JA1012 Issued JAN2002 (Traducción)

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Nivel 7
Fallar el conjunto de la bomba	Falla de la bomba	Falla del impulsor	Tuerca del impulsor suelta	Montaje de la tuerca desierto	Tuerca ajustada incorrectamente	Error de ensamblaje
				Montaje de la tuerca desgastado	Tuerca ensamblada suelta	
					Tuerca fabricada con un material erróneo	Especificación errónea del material
						Suministro erróneo del material
				Tuerca del impulsor fracturada	Ajuste excesivo de la tuerca del impulsor	Error de ensamblaje
					Tuerca fabricada con un material erróneo	Especificación errónea del material
						Suministro erróneo del material
				Cuñas en la chavera del impulsor	Especificación errónea del acero de la chavera	Error de diseño
					Suministro erróneo del acero de la chavera	Error de procura
						Error de almacenamiento de la bomba
						Error de requisición
			Objeto atrapa el impulsor	Parte en el sistema después del mantenimiento	Error de ensamblaje	Ver (error humano)
				Objeto extraño entra al sistema	Filtro de succión no instalado	Error de ensamblaje
					Filtro equivocado por la corrosión	
		Rupture de la carcasa	Pernos de la carcasa sueltos	Poco apriete de los pernos de la carcasa	Error de ensamblaje	Ver (error humano)
				Pernos sueltos por la vibración		
				Pernos de la carcasa corroídos		
				Falla de los pernos debido a la fatiga		
			Falla de la junta de la carcasa	Juntas ajustadas incorrectamente	Error de ensamblaje	Ver (error humano)
				Falla de las juntas debido al roce		
			Rotura de la carcasa	Carcasa rota por vehículo	Error de operación	Ver (error humano)
				Rotura por objeto desde el caso	Carcasa golpeada por un material	
					Carcasa golpeada por otra parte de carga	
		Falla del sello de la bomba	Respuesta a desgaste normal	Desgaste del sello		
			Bomba trabaja en seco	Ver "fallas del suministro de agua" debajo		
			Sello desalineado	Error de ensamblaje	Ver (error humano)	
			Carga del sello sesgo	Error de ensamblaje	Ver (error humano)	
			Sello mal ajustado	Tornillos erróneos del sello	Error de procura	Ver (error humano)
					Error de almacenamiento de la bomba	Ver (error humano)
				Especificación errónea del sello	Error de diseño	Ver (error humano)
			Sello instalado dañado	Sello de la bomba se cayó de la bomba	Error de almacenamiento de la bomba	Ver (error humano)
				Sello de la bomba dañado durante el transporte	Error de procura	Ver (error humano)
	Falla del motor	Etc.				
	Falla de la línea de succión	Etc.				
	Válvula cerrada	Etc.				
	Falla de energía	Etc.				

FIGURA 4— MODOS DE FALLA EN DIFERENTES NIVELES DE DETALLE

Claramente, este proceso de profundizar podría seguir casi para siempre –la vía más allá del punto al cual la organización responsable de la operación y el mantenimiento del activo, tiene algún control sobre los modos de falla. Esta es la razón por la que SAE JA1011 requiere de un proceso MCC para identificar los modos de falla a un nivel de causalidad que haga posible identificar una política de manejo de fallas apropiada. Este nivel variará para los diferentes modos de falla. Algunos modos de falla se deben identificar hasta un nivel 3, otros hasta un nivel 5, y el resto a otros niveles.

Nótese que algunos de los modos de falla mostrados en la Figura 4 podrían considerarse no probables en un contexto diferente al utilizado para desarrollar la Figura 4. En este caso, no habría ninguna razón para listarlos en absoluto. Recíprocamente, otros modos de falla que no son mostrados en la Figura 4 pero que se consideren probables en ese otro contexto deben ser agregados a la lista. Nótese también que los modos de falla listados en la Figura 4 sólo aplican a la falla funcional, "no disponible para transferir ninguna cantidad de agua". La Figura 4 no muestra los modos de falla que podrían causar otras fallas funcionales, tales como pérdida de contención o pérdida de protección.

8.4 **Fuentes de Información de los Modos de Falla—** "Las listas de los modos de falla deben incluir los modos de falla que han ocurrido antes, los modos de falla que están siendo prevenidos actualmente debido a la existencia de programas de mantenimiento, y los modos de falla que no han ocurrido aún pero que se piensan probables (creíbles) en el contexto operacional." (SAE JA1011, 5.3.4).

Los modos de falla que han ocurrido antes en los mismos activos o en activos similares, son los candidatos más obvios para ser incluidos en la lista de los modos de falla, a menos que se haya cambiado algo para que ese modo de falla no ocurra de nuevo. Las fuentes de información de estos modos de falla incluyen personas que conocen bien el activo (operadores, mantenedores, vendedores de equipos, u otros usuarios del mismo equipo), registros de historia técnica (memoria técnica) y bancos de datos.

Los modos de falla para los cuales existen rutinas de mantenimiento proactivas también se deben incorporar en la lista de modos de falla. Una manera de asegurar que ninguno de estos modos de falla haya sido descuidado, es estudiar la existencia del mantenimiento programado para activos idénticos o muy similares y preguntarse, "¿qué podría ocurrir si no se realizara esta tarea?". Sin embargo, la existencia de programaciones no debe ser sólo analizada como una revisión final después que se halla completado el resto del análisis MCC, de modo que se reduzca la posibilidad de perpetuar el status quo.

Finalmente, la lista de modos de falla debe incluir los modos de falla que no hayan ocurrido aún pero que se consideren como posibilidades reales en el contexto en consideración. Una característica esencial del mantenimiento proactivo y de la gerencia del riesgo en particular, es identificar y decidir como tratar con los modos de fallas que aún no han ocurrido. Este es también uno de los aspectos más desafiantes del proceso MCC, porque requiere un alto grado de juicio aplicado por personas experimentadas y conocedoras.

8.5 **Tipos de Modos de Falla—** "Las listas de los modos de falla deben incluir cualquier evento o proceso que probablemente pueda causar una falla funcional, incluyendo deterioro, defectos de diseño, y errores humanos que pueden ser causados por operadores o mantenedores (a menos que el error humano esté siendo activamente dirigido por un proceso analítico aparte del MCC)." (SAE JA1011, 5.3.5)

El deterioro ocurre cuando la capacidad de un activo está por encima del desempeño deseado para comenzar a operar, pero entonces cae por debajo del desempeño deseado después que el activo entra en servicio. Esto cubre todas las formas de "desgaste o rotura". Tales como fatiga, corrosión, abrasión, erosión, evaporación, degradación (especialmente de aislantes, lubricantes, etc.) y así

sucesivamente. Estos modos de falla deben, por supuesto, ser incluidos en una lista de modos de falla en la que se piensen sean probables, y al nivel de detalle más apropiado como se discutió en 8.3.

En algunos casos, el diseño de un activo o la configuración de un sistema pueden proporcionarlo de modo que sea incapaz de cumplir el rango completo de los requerimientos funcionales en el contexto en el cual se espera que opere. Si tales deficiencias se piensan que afecten el equipo existente, o si en el caso de un equipo nuevo, se piensa que el diseño existente y los procesos de manejo de construcción son improbables para descubrir y rectificar tales deficiencias, deben listarse estos modos de falla para que puedan identificarse las políticas de manejo de fallas apropiadas más adelante en el análisis.

Muchas fallas funcionales son causadas cuando el esfuerzo aplicado a un activo se incrementa por encima de su habilidad para resistir el esfuerzo. En la práctica estos incrementos del esfuerzo son aplicados frecuentemente por seres humanos. La literatura en esta materia clasifica tales errores humanos en una amplia variedad de maneras. Sin embargo; en el mundo de los activos físicos estos errores usualmente entran en las siguientes categorías:

a. Operación incorrecta. Esto usualmente toma dos formas. La primera es sobrecarga sostenida, frecuentemente deliberada (por ejemplo, si una máquina es operada a niveles de desempeño que alcancen o excedan su capacidad inicial, tal como un motor de automóvil que es operado persistentemente a unas RPM excesivas, causando su falla prematura). La segunda es sobrecarga repentina, usualmente no intencional, (por ejemplo, si un activo es simplemente operado incorrectamente, tal como un vehículo que es puesto en retroceso mientras se está moviendo hacia delante, dañando la caja).
b. Ensamblaje incorrecto (por ejemplo, si un mecánico deja una herramienta en una caja de engranajes o un electricista cablea un interruptor incorrectamente).
c. Daño externo (por ejemplo, si la carcaza de una bomba es golpeada por un camión montacargas)

Si tales incrementos en el esfuerzo aplicado se piensan probables en el contexto en consideración (y si ellos no se han tratado por un proceso analítico separado), también se deben incorporar en la lista de los modos de falla, de modo que se puedan identificar las políticas de manejo de fallas adecuadas.

9. ***Efectos de Falla—*** Un proceso MCC que esté conforme a la norma SAE JA1011 debe preguntarse "¿Qué pasa cuando ocurre cada falla funcional (efectos de falla)?" Esta sección discute los dos conceptos claves siguientes concernientes a los efectos de falla que son listados en la sección 5.4 de SAE JA1011:

a. Suposiciones básicas.
b. Información necesaria.

9.1 Suposiciones Básicas— "Los efectos de falla deben describir lo que puede pasar si no se realiza ninguna tarea especifica para anticipar, prevenir o detectar la falla." (SAE JA1011, sección 5.4.1)

Una definición de efecto de falla describe lo que puede pasar si ocurre el modo de falla. Nótese que el MCC hace una distinción clara entre un efecto de falla (que pasa) y una consecuencia de falla (como, y cuanto, afecta el modo de falla).

Como se explica en la Sección 10 de esta Guía, las definiciones de los efectos de falla son utilizadas para evaluar las consecuencias de cada modo de falla. Estas también proveen la información básica necesaria para decidir que políticas de manejo de fallas se deben implementar para evitar, eliminar o minimizar estas consecuencias para la satisfacción de los dueños/usuarios del activo.

Las principales opciones de las políticas de manejo de fallas incluyen tareas de mantenimiento proactivas (de monitoreo de condición, programadas, restauración, y desincorporación programada), junto con las frecuencias respectivas. Si nosotros deseamos identificar estas tareas correctamente, es esencial asumir que no se está llevando a cabo ningún mantenimiento proactivo cuando se están identificando los modos de falla y los efectos asociados. En otras palabras, para comenzar desde una verdadera base cero, es esencial asumir que el modo de falla causa de hecho, la falla funcional asociada. Se necesitan describir los modos de falla, y escribir las definiciones de los efectos de fallas, respectivamente.

9.2 **Información Necesaria—** "Los efectos de falla deben incluir toda la información necesaria para sustentar la evaluación de las consecuencias de la falla, tales como:

a. ¿Qué evidencia (si existe alguna) que la falla ha ocurrido (en el caso de funciones ocultas, que podría pasar si ocurre una falla múltiple)?
b. ¿Qué hace (si ocurre algo) para matar o dañar a alguien, o para tener efectos adversos en el ambiente?
c. ¿Qué hace (si ocurre algo) para tener un efecto adverso en la producción o en las operaciones?
d. ¿Qué daño físico (si existe alguno) causa la falla?
e. ¿Qué (si existe algo) se debe hacer para restaurar la función del sistema después de la falla?" (SAE JA1011, sección 5.4.2)

9.2.1 EVIDENCIA DE QUE HA OCURRIDO LA FALLA— Una definición de efecto de falla debe describir si hay alguna evidencia de que el modo de falla en consideración ha ocurrido. Si es así, la misma debe describir que forma toma esta evidencia. Por ejemplo, debe mencionar si el comportamiento del equipo cambia notablemente como resultado del modo de falla (luces de alarma, cambio en los niveles de ruido y velocidad, etc.). También debe describir si el modo de falla está acompañado (o precedido) por efectos físicos obvios, tales como, ruidos altos, fuego, humo, escapes de vapor, olores inusuales, o charcos de líquido en el piso.

Cuando se trata de protección, las descripciones de los efectos de falla deben definir brevemente lo que puede pasar si la función protectora falla mientras la protección está en estado de falla.

9.2.2 AMENAZAS A LA SEGURIDAD Y AL AMBIENTE— Si hay una posibilidad que alguien pueda ser herido o muerto como resultado directo del modo de falla, o se viola una norma o regulación ambiental, el efecto de falla debe describir como podría pasar esto. Una lista seleccionada de ejemplos incluye:

a. Incremento del riesgo de fuego o explosión.
b. El escape de químicos peligrosos.
c. Electrocución.
d. Accidentes vehiculares, descarrilamientos.
e. Ingreso de suciedad en productos alimenticios o farmacéuticos.
f. Exposición a bordes afilados o maquinaria en movimiento.

Cuando se listan estos efectos, se debe tener cuidado de no decir que el modo de falla "tiene consecuencias de seguridad" o "afecta el ambiente". Simplemente define que pasa, y deja la evaluación de las consecuencias para el próximo paso del proceso MCC.

9.2.3 EFECTO EN LA PRODUCCIÓN O EN LAS OPERACIONES — Las descripciones de los efectos de falla deberían indicar como se afecta la producción o las operaciones (si son afectadas), y por cuanto tiempo. Se deben considerar los siguientes puntos:

a. Tiempo fuera de servicio: cuanto tiempo el activo podría estar fuera de servicio debido a ese modo de falla, desde el momento que falla hasta el momento que entra de nuevo

completamente en operación. Para asegurar que el programa de manejo de fallas es razonablemente conservador (pero no demasiado conservador), se debe asumir que el modo de falla ocurre en una situación del "peor caso típico", por ejemplo, tarde en la noche en una fábrica, o si un equipo móvil está en una localidad más remota de lo usual.

b. Velocidad de operación: Si el equipo ha bajado su velocidad como resultado del modo de falla, y si es así, que tanto la ha bajado.

c. Calidad: Si el modo de falla afecta la calidad para la cual está configurada la función, tales como la guía de precisión o los sistemas de control, los parámetros de calidad del producto, e inclusive los asuntos de servicio al consumidor (operación a tiempo, etc.). La definición del efecto de falla debe indicar también si el modo de falla incrementa los desechos o los trozos de desperdicios, causa un aborto de la misión, o incurre en penalidades financieras contractuales significativas.

d. Otros sistemas: Si otro equipo o proceso se ha detenido, bajado su velocidad, o está afectado de cualquier otra manera por el modo de falla.

e. Costos de operación globales: Si el modo de falla causa cualquier otro incremento en los costos operacionales, tales como incremento del consumo de energía o desgaste excesivo de los materiales del proceso.

9.2.4 DAÑO SECUNDARIO— Si el modo de falla en consideración causa daños significativos a otros componentes o sistemas, los efectos de este daño secundario también se deben registrar.

9.2.5 ACCIÓN CORRECTIVA REQUERIDA— La descripción de los efectos de falla debe incluir una breve descripción de la acción que se requiere para corregir el modo de falla después que este ha ocurrido.

10. *Categorías de Consecuencia de Fallas*

10.1 Categorías de Consecuencias— "Las consecuencias de cada modo de falla deben ser formalmente categorizadas…." (SAE JA1011, sección 5.5.1)

Después que se ha identificado cada modo de falla y sus efectos a un nivel de detalle apropiado, el siguiente paso en el proceso MCC es evaluar las consecuencias de cada modo de falla. La fuente primordial de información utilizada para evaluar las consecuencias de falla es la descripción de los efectos de falla.

Algunos modos de falla afectan el rendimiento, la calidad del producto o el servicio al consumidor. Otros amenazan la seguridad o el ambiente. Algunos incrementan los costos operacionales, por ejemplo, el incremento del consumo de energía, mientras otros pocos impactan hasta cuatro, cinco o incluso todas estas seis áreas. Aún así, otros pueden aparecer y no tener efecto alguno si ocurren aislados, pero pueden exponer a la organización al riesgo de modos de falla mucho más serios.

Si cualquiera de estos modos de falla no se previenen o se anticipan, el tiempo y esfuerzo que se necesitará invertir para corregirlos también afecta la organización, ya que su reparación consume recursos que sería mejor utilizados en otra parte.

La naturaleza y la severidad de estos efectos rigen la manera como cada modo de falla es visto por la organización. El impacto preciso en cada caso –en otras palabras, la magnitud en que cada modo de falla afecta- depende del contexto operacional del activo, los estándares de desempeño que aplican a cada función, y los efectos físicos de cada modo de falla.

Esta combinación de contexto, estándares y efectos implica que todo modo de falla tiene un conjunto específico de consecuencias asociadas a él. Si las consecuencias son muy serias, entonces se deberán hacer esfuerzos considerables para prevenir el modo de falla, o al menos para anticiparlo en el tiempo con la finalidad de reducir o eliminar las consecuencias. Por otro lado, si el modo de falla

sólo tiene consecuencias menores, es posible que no se tome ninguna acción proactiva y el modo de falla simplemente se corregirá cada vez que ocurra.

Esto implica que las consecuencias de los modos de falla son más importantes que sus características técnicas. Esto también sugiere que la idea entera de manejo de falla no está muy cercana de anticipar o prevenir los modos de falla per se, más bien es cercana a evitar y reducir sus consecuencias.

El resto de esta sección considera el criterio utilizado para evaluar las consecuencias de los modos de falla, y el criterio para decidir si cualquier forma de manejo de falla vale la pena. Estas consecuencias están divididas en cuatro categorías en dos fases. La primera fase separa fallas ocultas de fallas evidentes.

10.1.1 FALLAS EVIDENTES Y OCULTAS— "El proceso de categorización de consecuencias debe separar los modos de falla ocultos de los modos de falla evidentes." (SAE JA1011, sección 5.5.1.1)

Algunos modos de falla ocurren de tal modo que nadie esta al tanto que el elemento se encuentra en estado de falla a menos, o hasta que ocurra también alguna otra falla (o evento anormal). Una falla oculta es un modo de falla cuyos efectos no son apreciables para el equipo de operadores en circunstancias normales si el modo de falla ocurre aislado. Recíprocamente, una falla evidente es un modo de falla cuyos efectos son apreciables para el equipo de operadores en circunstancias normales si el modo de falla ocurre aislado.

El MCC se aproxima a la evaluación de las consecuencias de fallas comenzando por la separación de las fallas ocultas de las fallas evidentes. Las fallas ocultas se pueden considerar para la mitad de los modos de falla que pueden afectar equipos modernos, los equipos complejos necesitan ser manejados con un cuidado especial. Los párrafos siguientes explican la relación entre fallas ocultas y protección e introducen el concepto de "falla múltiple".

Fallas Ocultas y Protección: la sección 6.2.2.8 de esta guía menciona que la función de cualquier protección es asegurar que las consecuencias de la falla de la función protegida sean mucho menos serias de lo que hubiesen sido si no tuviese protección. Así, cualquier función protectora es, de hecho parte de un sistema con al menos dos componentes:

a. La función protectora.
b. La función protegida.

La existencia de tales sistemas crea dos conjuntos de posibilidades de falla, dependiendo si la falla de la protección es evidente o no. Las implicaciones de cada conjunto son consideradas en los párrafos siguientes, empezando con dispositivos cuya falla es evidente.

10.1.1.1 Fallas evidentes de las Funciones Protectoras— En este contexto, una falla "evidente" de una función protectora es aquella mediante la cual los efectos del modo de falla aislado se vuelve apreciable para el equipo de operadores en circunstancias normales. La existencia de tales modos de falla crea tres escenarios posibles en cualquier período, como sigue.

La primera posibilidad es que ni la función protectora ni la función protegida fallen. En ese caso todo procede normalmente.

La segunda posibilidad es que la función protegida falle antes de la protección. Es ese caso la protección llevará a cabo su función, y dependiendo de la naturaleza de la protección, las consecuencias de falla de la función protegida son reducidas o eliminadas.

La tercera posibilidad es que la función protectora falle antes de la función protegida. Debido a que esta falla es "evidente", la pérdida de la protección se debe convertir en aparente. En esta

situación, la posibilidad de que la función protegida falle mientras la función protectora está en estado de falla, debe ser casi eliminada, bien sea por el paro de la función protegida o por proveer una protección alternativa hasta que se restaure la función protectora que falló, como se ilustra en la Figura 5. Esto implica a su vez, que las consecuencias de una falla evidente de una función protectora normalmente entra en las categorías "operacional" o "no operacional", como se discutirá en la sección 10.1.2

FIGURA 5— FALLA EVIDENTE DE UNA FUNCIÓN PROTECTORA

10.1.1.2 *Funciones Protectoras cuya Falla no es Evidente*— Las fallas ocultas se pueden identificar al hacerse la siguiente pregunta:

¿Algunos de los efectos de este modo se falla se harán evidentes para el equipo de operadores en circunstancias normales si el modo de falla ocurre aislado?

Si la respuesta a esta pregunta es no, el modo de falla es oculto. Si la respuesta es si, es evidente. Nótese que en este contexto, "aislado" significa que nada más ha fallado. Nótese también que en este punto del análisis se asume que no se está haciendo ningún esfuerzo para revisar si la función asociada está trabajando todavía. Esto es porque tales revisiones son una manera de mantenimiento programado, y el propósito total del análisis es hallar si tal mantenimiento es necesario.

Si ocurre tal modo de falla, el hecho de que la protección no esté disponible para cumplir su función, no se hace aparente en circunstancias normales. La existencia de tales modos de falla crea cuatro escenarios posibles en cualquier período, dos de los cuales también se aplican a las fallas evidentes de las funciones protectoras. El primero es en el que ninguna función falla, en cuyo caso todo procede normalmente como antes.

La segunda posibilidad es que la función protegida falla cuando la protección está funcionando. En este caso la protección también lleva a cabo la función premeditada, entonces las consecuencias de las fallas de la función protegida son de nuevo reducidas o eliminadas del todo.

La tercera posibilidad es que falle la protección mientras la función protegida está operando. En este caso, la pérdida de la protección no tiene consecuencias directas. De hecho, nadie sabe que la protección está en estado de falla.

La cuarta posibilidad durante cualquier ciclo es que falle la protección, entonces la función protegida falla mientras la protección está en estado de falla. Está situación se conoce como falla múltiple. (Esta es una posibilidad real simplemente porque la falla de la protección no es evidente, entonces

nadie podría estar consciente de la necesidad de tomar una acción correctiva –o alternativa- para evitar la falla múltiple.)

La secuencia de eventos que predomina en una falla múltiple se resume en la Figura 6.

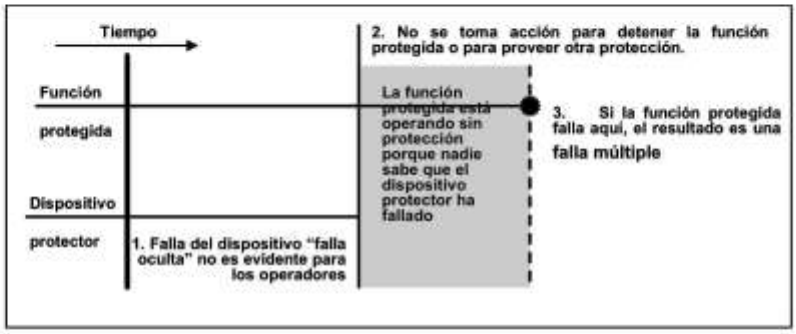


FIGURA 6— FALLA OCULTA DE UNA FUNCIÓN PROTECTORA

10.1.2 CONSECUENCIAS EN LA SEGURIDAD, EL AMBIENTE, OPERACIONALES Y NO OPERACIONALES— "El proceso de categorización de consecuencias debe distinguir claramente los eventos (modos de falla y fallas múltiples) que tengan consecuencias en la seguridad y/o en el ambiente de los que sólo tengan consecuencias económicas (consecuencias operacionales y no operacionales)." (SAE JA1011, sección 5.5.1.2)

Nota— A lo largo de esta sección, "falla" se refiere a un modo de falla o a una falla múltiple.

10.1.2.1 Consecuencias en la Seguridad— Una falla tiene consecuencias en la seguridad si existe una probabilidad intolerable de que pueda matar o dañar a un ser humano. La distinción entre una probabilidad "tolerable" e "intolerable" se discute con más detalle en la sección 12.1.3 de esta Guía.

10.1.2.2 Consecuencias Ambientales— A otro nivel, "seguridad" se refiere a la seguridad o el bienestar de la sociedad en general. Tales fallas tienden a ser clasificadas como aspectos "ambientales". Las expectativas de la sociedad adquieren la forma de normas ambientales municipales, regionales y nacionales. Algunas organizaciones también tienen sus propias normas corporativas, incluso más estrictas. Como resultado, una falla tiene consecuencias ambientales si existe una probabilidad intolerable de que puede violar cualquier norma o regulación ambiental conocida.

10.1.2.3 Consecuencias Operacionales— La función primaria de la mayoría de los equipos en el comercio y en la industria está usualmente conectada con la necesidad de obtener ingresos o para soportar actividades de ganancia de réditos. Las fallas que afectan las funciones primarias de estos activos afectan la capacidad de ingreso de réditos de la organización. La magnitud de estos efectos depende de que tanto se utilice el equipo y de la disponibilidad de las alternativas. Sin embargo; en casi todos los casos, los costos de estos efectos son mayores –frecuentemente mucho mayores- que el costo de reparar las fallas, y estos costos necesitan ser tomados en cuenta cuando se evalúa la relación costo-efectividad de cualquier política de manejo de fallas. En general, las fallas afectan las operaciones de cuatro maneras:

a. Afectan el rendimiento o la producción total.
b. Afectan la calidad del producto.

c. Afectan el servicio al consumidor (y pueden incurrir en penalidades financieras).
d. Incrementan los costos operacionales en adición a los costos directos de reparación.

En empresas sin fines de lucro como compañías militares, muchas fallas también afectan la disponibilidad de la organización para cumplir su función primaria, algunas veces con resultados devastadores. Mientras se hace difícil costear los resultados de la pérdida de una batalla o incluso una guerra, las fallas que pueden afectar la capacidad operacional aún tienen implicaciones económicas. Si esto ocurre muy frecuentemente, podría ser necesario desplegar (decir) 60 tanques de batalla en lugar de 50, o seis portaviones en lugar de cinco. La redundancia a esta escala podría ser muy costosa.

Por esta razón, si una falla evidente no constituye una amenaza a la seguridad o al ambiente, el proceso MCC se enfoca luego en las consecuencias operacionales de la falla.

Debido a que estas consecuencias tienden a ser económicas por naturaleza, comúnmente son evaluadas en términos económicos. Sin embargo; en casos más extremos (como la pérdida de una guerra), el "costo" puede haber sido evaluado sobre una base cualitativa. En la práctica, el efecto económico global de cualquier falla tiene consecuencias operacionales dependiendo de dos factores:

a. Cuanto cuesta la falla cada vez que ocurre, en términos de su efecto en la capacidad operacional más los costos de reparación de la falla (si hay algún daño secundario).
b. Qué tan frecuentemente ocurre esto.

10.1.2.4 Consecuencias No Operacionales— Las consecuencias de una falla evidente que no tienen efectos adversos directos en la seguridad, el ambiente o la capacidad operacional, son clasificadas como no operacionales. Las únicas consecuencias asociadas con estas fallas son los costos directos de reparación de las mismas y de cualquier daño secundario, entonces estas consecuencias son también económicas.

10.1.3 MCC Y LAS REGULACIONES/LEGISLACIONES DE SEGURIDAD— Una pregunta que surge frecuentemente concierne a la relación entre MCC y las tareas especificadas por las autoridades reguladoras (la legislación ambiental trata con ellas directamente).

La mayoría de las regulaciones que rigen la seguridad demandan simplemente que los usuarios sean capaces de demostrar que están haciendo cualquier cosa prudente para cerciorarse que sus activos sean seguros. Esto ha llevado rápidamente a un énfasis creciente del concepto de auditoría, la cual requiere básicamente que los usuarios de los activos tengan la capacidad de producir evidencia documental de que existe una base defendible, racional para sus programas de mantenimiento. En la vasta mayoría de los casos, MCC satisface totalmente este tipo de requerimiento.

Sin embargo; algunas regulaciones demandan que ciertas tareas específicas se deben hacer en ciertos tipos de equipos específicos a intervalos específicos. Muy a menudo el proceso MCC sugiere una tarea diferente y/o un intervalo diferente, y en la mayoría de los casos, la tarea derivada del MCC es una política de manejo de fallas superior. Sin embargo; en tales casos, es sabio continuar haciendo la tarea especificada por las regulaciones y discutir el cambio sugerido con las autoridades reguladoras correspondientes.

10.2 Evaluando las Consecuencias de Falla— "La valoración de las consecuencias de falla se debe realizar como si ninguna tarea específica se esté llevando a cabo actualmente para anticipar, prevenir o detectar la falla." (SAE JA1011, sección 5.5.2)

Por las razones explicadas en la sección 9.1 de esta guía, es esencial asumir que ningún mantenimiento proactivo se está llevando a cabo cuando se están identificando las consecuencias de falla.

11. *Selección de las Políticas de Manejo de Fallas*

11.1 La Relación entre Longevidad y Falla— "El proceso de selección de manejo de fallas debe tomar en cuenta el hecho de que la probabilidad condicional de algunos modos de falla se incrementará con el tiempo (o con la exposición al esfuerzo), que la probabilidad condicional de otros no cambiará con el tiempo y que la probabilidad condicional de otros tampoco decrecerá con el tiempo." (SAE JA1011,sección 5.6.1)

Uno de los factores más importantes que afecta la selección de cualquier política de manejo de fallas es la relación entre la longevidad (o exposición al esfuerzo) y la falla. Existen seis conjuntos de maneras en las cuales la probabilidad condicional de falla varía a medida que un elemento envejece, como se muestra en la Figura 7.

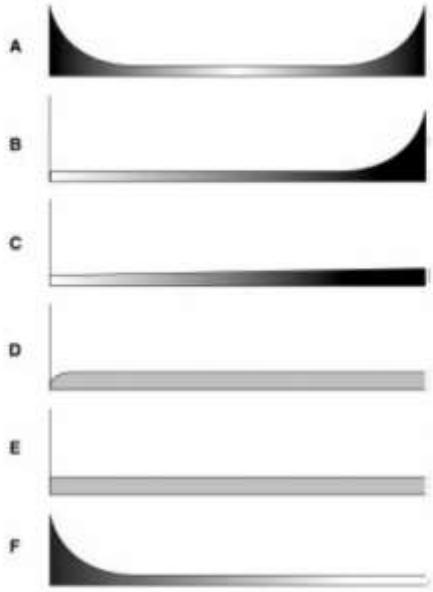


FIGURA 7— SEIS PATRONES DE FALLA

Los patrones A y B despliegan el punto al cual hay un incremento veloz de la probabilidad condicional de falla (a veces llamada "zona de desgaste"). El patrón C muestra un incremento sostenido en la probabilidad de falla, pero no distingue la zona de desgaste. El patrón D muestra una probabilidad condicional de falla baja cuando el elemento es nuevo o recién comprado, entonces ocurre un incremento rápido hacia un nivel que crece lento o constante, mientras que el patrón E muestra una probabilidad condicional de falla constante para toda la longevidad (falla aleatoria). El patrón F empieza con alta mortalidad infantil, cayendo a un decrecimiento constante o muy bajo de la probabilidad condicional de falla.

En general, los patrones de falla relacionados a la longevidad aplican a elementos que son muy simples, o elementos muy complejos que sufren un modo de falla dominante. En la práctica, están comúnmente asociados con el desgaste directo (más frecuente en donde los equipos entran en contacto directo con el producto), fatiga, corrosión, oxidación y evaporación.

11.2 Técnicamente Factible y Vale la Pena Hacerlo— "Todas las tareas programadas deben ser técnicamente factibles y deben valer la pena hacerlas (aplicables y efectivas)....." (JA1011, sección 5.6.2)

Cualquier tarea programada vale la pena hacerla sólo si reduce (evita, elimina o minimiza) las consecuencias del modo de falla a una magnitud que justifique los costos directos o indirectos de realizar la tarea. (Nótese que en este contexto los dispositivos de monitoreo incorporados constituyen una "tarea programada", ya que una se está ejecutando automáticamente -continuamente o a intervalos predeterminados- por el dispositivo de monitoreo. Por consiguiente están sujetas al mismo criterio de selección que cualquier otro tipo de tareas programadas. Note también que tales dispositivos por si mismos requieren diseño, instalación y mantenimiento, lo cual también se debe considerar cuando se evalúa su costo-efectividad).

Si no se puede hallar una tarea programada apropiada, y si las consecuencias del modo de falla no son aceptables por el dueño o usuario del activo, entonces se debe encontrar alguna otra manera de manejar las consecuencias de falla.

Por supuesto, esto también tiene que ser técnicamente posible para cualquier política de manejo de fallas que influencie las consecuencias de falla. El hecho de que tal política sea o no técnicamente factible (o aplicable) depende de las características técnicas de la política y del modo de falla en consideración. El criterio que rige la factibilidad técnica se discute más detalladamente en las Secciones de la 12 a la 14 de esta guía.

11.3 Efectividad de Costo— "Si dos o más políticas de manejo de fallas propuestas son técnicamente factibles y valen la pena hacerlas (aplicables y efectivas), se debe seleccionar la política que sea más costo-efectiva." (SAE JA1011, sección 5.6.3)

Dado el número de opciones de políticas de manejo de fallas (especialmente el mantenimiento predictivo o las técnicas de monitoreo de condición) que están disponibles actualmente, normalmente es tentador seleccionar una política basada solamente en la sofisticación técnica antes que en la base de costo-efectividad. Cuando más de una opción de política de manejo de fallas es apropiada técnicamente, para aplicar MCC correctamente, el trabajo siempre está en seleccionar la política que maneje satisfactoriamente las consecuencias del modo de falla en la forma más económica, antes que aquella que sea más sofisticada técnicamente.

11.4 Selección de las Políticas de Manejo de Fallas— "La selección de las políticas de manejo de fallas debe ser llevada a cabo como si ninguna tarea específica estuviese siendo realizada actualmente para anticipar, prevenir o detectar la falla." (SAE JA1011, sección 5.6.4)

De nuevo, por las razones explicadas en la sección 9.1 de esta guía, es esencial asumir que ningún mantenimiento proactivo se está llevando a cabo cuando se seleccionan las políticas de manejo de fallas.

12. *Manejo de las Consecuencias de Falla*

12.1 Modos de Falla Evidente con Consecuencias en el Ambiente o en la Seguridad— "En el caso de que un modo de falla evidente tenga consecuencias en la seguridad o en el ambiente, la tarea debe

reducir la probabilidad del modo de falla a un nivel que sea tolerable para el dueño o usuario del activo." (SAE JA1011, sección 5.7.1.1)

A la mayoría de las personas les gustaría vivir en un ambiente en el cual no exista ninguna probabilidad de muerte o daño físico, hay, de hecho, un elemento de riesgo en todas las cosas que hacemos. En otras palabras, el "cero" es inalcanzable. Entonces ¿qué es alcanzable?

Para responder a esta pregunta, la pregunta del riesgo debe ser considerada con más detalle.

La evaluación del riesgo consiste en tres elementos. La primera pregunta es que podría pasar si el evento en consideración ocurre. La segunda pregunta es que probabilidad existe de que el evento ocurra del todo. La combinación de estos dos elementos provee una medida del grado de riesgo. La tercera pregunta –y frecuentemente el elemento más contencioso- es si el riesgo es tolerable.

Por ejemplo, considere un modo de falla que pueda resultar en la muerte o el daño físico de 10 personas (¿qué puede pasar?). La probabilidad de que ocurra este modo de falla es de 1 en 1.000 en un año cualquiera (¿cuán probable es que ocurra?). Basados en estas cifras, el riesgo asociado con este modo de falla es:

10 x (1 en 1.000) = 1 accidente cada 100 años

Ahora considere un segundo modo de falla que puede causar 1.000 accidentes, pero la probabilidad de que ocurra este modo de falla es 1 en 100.000 en un año. El riesgo asociado con este modo de falla es:

1.000 x (1 en 100.000) = 1 accidente cada 100 años

En estos ejemplo, el riesgo es el mismo a pesar de que las cifras en las que se basan son muy diferentes. Nótese también que estos ejemplos no indican si el riesgo es tolerable –ellos sólo lo cuantifican. Si el riesgo es tolerable o no, es otra pregunta que se trata más adelante.

(Los términos "probabilidad" (1 en 10 oportunidades de un modo de falla en un año) y "tasa de falla" (una vez en 10 períodos en promedio, correspondiente a Tiempo Promedio Entre Fallas de 10 períodos) se utilizan frecuentemente si son intercambiables cuando aplican a fallas aleatorias. Estrictamente hablando, esto no es verdad. Sin embargo; si el TPEF es mayor de 4 períodos, la diferencia es tan pequeña que casi puede ignorarse).

Los párrafos siguientes consideran cada uno de estos tres elementos de riesgo en más detalle.

12.1.1 ¿QUÉ PUEDE PASAR SI OCURRE EL MODO DE FALLA?— Lo que suceda exactamente siempre y cuando ocurra cada modo de falla, se debe registrar como parte de la lista de los efectos de falla. En otras palabras, la definición del efecto de falla debe registrar si cualquier ocurrencia del modo de falla (se dice) tiene una de 10 posibilidades de matar a una persona o si es probable que mueran hasta 10 personas o si es posible que cause la pérdida de un miembro de un operador. Con la finalidad de ser razonablemente conservador, note que las definiciones del efecto de falla deben reflejar el "escenario del peor caso típico" (pero no el caso más extremo, ya que esto podría ser excesivamente conservador). Si surge la duda, las personas que desarrollan el análisis deben preguntarse, si ocurre el peor de los peores casos, que punto de vista probable finalmente será defendible ante cualquier autoridad y sus superiores responsables.

12.1.2 ¿CUÁL ES LA PROBABILIDAD DE QUE OCURRA EL MODO DE FALLA?— La Sección 8.1 de esta guía menciona que sólo los modos de falla que son probables de ocurrir en el contexto en cuestión deben ser registrados en el AMEF. Como resultado, si el AMEF se ha preparado sobre una base real, el mismo hecho de que un modo de falla haya sido listado sugiere que existe una probabilidad

finita de que ocurra. Idealmente esta probabilidad debe ser cuantificada como parte de la definición del efecto de falla o en una base de datos separada, de modo que el riesgo también pueda ser cuantificado. (Note que, en la práctica, los datos de falla histórica precisos no están disponibles en la mayoría de los casos, especialmente en los de equipos nuevos que incorporan cantidades sustanciales de nueva tecnología. En estos casos, la evaluación debe estar basada en estimaciones inteligentes por personas que entiendan claramente el equipo y el contexto en el cual están siendo utilizados).

12.1.3 ¿ES TOLERABLE EL RIESGO?— Como se mencionó anteriormente, el riesgo se mide por la probabilidad multiplicado por la severidad. Esto se expresa usualmente sobre una base anual (aunque puede ser expresado en términos de eventos por un número de ciclos u horas operacionales dadas o cualquier otro que tenga sentido en el contexto en cuestión). Decidir que es tolerable, es completamente otra materia.

Las creencias acerca del nivel tolerable de riesgo de matar o dañar físicamente varía ampliamente de individuo a individuo o de grupo a grupo. Muchos factores influencian estas creencias. Los dos factores más dominantes son el grado de control que cualquier individuo piensa tiene sobre la situación y el beneficio que las personas creen que los mismos derivaran al exponerse al riesgo. Esto a su vez influencia hasta que punto ellos podrían escoger exponerse al riesgo. Esta perspectiva tiene que ser llevada a un grado de riesgo que pueda ser tolerado por la población entera (todos los trabajadores en el sitio, todo los ciudadanos de un pueblo o incluso, la población entera de un país).

En otras palabras, si yo tolero una probabilidad de 1 en 100.000 (10^{-5}) de ser muerto en el trabajo en un año y tengo 1.000 compañeros de trabajo quienes comparten la misma perspectiva, entonces nosotros aceptaremos que un promedio de una persona en nuestro sitio morirá en el trabajo cada 100 años –y esa persona puedo ser yo, y puede pasar este año.

Tenga presente que cualquier cuantificación del riesgo de esta manera, puede ser solamente una aproximación brusca. En otras palabras, una probabilidad tolerable de 10^{-5} nunca es más que una aproximación. Con esto en mente, el próximo paso es llevar la probabilidad de que un individuo y sus compañeros de trabajo estén preparados para tolerar que uno de ellos pueda ser muerto por algún evento en el trabajo, a una probabilidad tolerable para cada evento simple (modo de falla o falla múltiple) que pueda matar a alguien.

Por ejemplo, continuando con la lógica del ejemplo previo, la probabilidad de que cualquiera de mis 1.000 compañeros de trabajo sean muertos en un año es de 1 en 100 (asumiendo que cualquiera en el sitio está expuesto a las mismas amenazas). Si las actividades llevadas a cabo en el sitio incluyen (se dice) 10.000 eventos que pueden matar a alguien, entonces la probabilidad promedio de que cada evento pueda matar a una persona debe ser reducida a 10_{-6} en un año. Esto significa que la probabilidad de un evento que es probable mate a 10 personas se debe reducir a 10_{-7}, mientras que la probabilidad de un evento que tiene una oportunidad de 1 en 100 de matar a una persona se debe reducir a 10 . (Las técnicas utilizadas para subir o bajar la jerarquía de la probabilidad de esta manera se conoce como evaluaciones del riesgo cuantitativo o probabilístico).

Aunque los puntos discutidos anteriormente dominan las decisiones acerca de la tolerancia del riesgo, no son los únicos puntos. Los factores adicionales que ayudan a decidir que es tolerable incluyen valores individuales, valores industriales, que tanto se conocen los efectos reales y las consecuencias de cada modo de falla, el valor colocado para la vida humana por los diferentes grupos culturales, valores religiosos, la edad y el estado civil del individuo.

12.1.4 ¿QUIÉNES DEBEN EVALUAR EL RIESGO?— La diversidad de factores discutidos previamente indican que en este punto, es comúnmente imposible para alguna persona –o incluso una organización- decidir que es "tolerable" en nombre de todas las personas expuestas a un riesgo en particular. Además, en el presente pocas organizaciones utilizan una metodología formal para

determinar que constituye un riesgo tolerable. En ausencia de tal metodología, lo que es tolerable puede ser determinado por un grupo representativo:

a. Personas que probablemente tienen un entendimiento claro del mecanismo de falla, los efectos de falla (especialmente la naturaleza de algunas amenazas), la probabilidad de que ocurra el modo de falla y las probables medidas que se puedan tomar para anticiparlo o prevenirlo.
b. Personas quienes tienen una visión genuina de la tolerabilidad u otra parte de los riesgos. Esto debe incluir representaciones de:

1. Las probables victimas (operadores o mantenedores en el caso de amenazas directas a la seguridad, y la comunidad en general en el caso de amenazas al ambiente)
2. Quienes tienen que acarrear con las consecuencias si alguien es lastimado o muerto o si se viola una norma ambiental (como la gerencia).

Sin embargo; si una organización ha establecido niveles de riesgo que se consideren tolerables por todas las partes involucradas, entonces estos niveles pueden ser utilizados cuando se evalúa si alguna política de manejo de fallas vale la pena aplicarla a los modos de falla con consecuencias en el ambiente o en la seguridad.

12.1.5 MANEJO DE FALLAS Y SEGURIDAD— Si existe un riesgo intolerable de que un modo de falla pueda afectar la seguridad o el ambiente, el proceso MCC estipula que nosotros debemos tratar de reducir la probabilidad del modo de falla, o sus consecuencias, o ambos, de modo que la magnitud del riesgo total descienda a un nivel tolerable. Esto sugiere que, para los modos de falla que tienen consecuencias en la seguridad o en el ambiente, una política de manejo de fallas sólo vale la pena aplicarla si reduce el riesgo del modo de falla a un nivel bajo tolerable.

Nótese que cuando se trata con modos de falla evidentes que tienen consecuencias en la seguridad o en el ambiente, MCC no considera el costo del modo de falla. Si el riesgo es intolerable entonces se debe reducir a un nivel tolerable, bien sea por la introducción de una tarea proactiva adecuada (o tareas), o por el cambio del diseño o de la operación del activo de tal modo que el riesgo se reduzca a un nivel tolerable.

12.2 Modos de Falla Oculta con Consecuencias en la Seguridad y en el Ambiente— "En el caso de un modo de falla oculta en el que la falla múltiple asociada tenga consecuencias en la seguridad o en el ambiente, la tarea debe reducir la probabilidad del modo de falla oculta a una magnitud que disminuya la probabilidad de la falla múltiple asociada a un nivel tolerable para el dueño o usuario del activo." (SAE JA1011, Sección 5.7.1.2)

Como se explicó anteriormente, una falla múltiple sólo ocurre si la función protegida falla mientras la protección está en estado de falla. Esto significa que la probabilidad de una falla múltiple en cualquier período es dada por la probabilidad de que la función protegida fallará mientras que la protección está en estado de falla durante el mismo período. Esto se puede calcular como se muestra en la Ecuación 1:

Probabilidad de una falla múltiple	=	Probabilidad de falla de la función protegida	x	Promedio de indisponibilidad de la protección	(Ec. 1)

Para fallas múltiples que tengan consecuencias en la seguridad y en el ambiente, se debe determinar la probabilidad tolerable como se describe en las secciones 12.1.3 y 12.1.4. La probabilidad de falla (o tasa de falla) de la función protegida normalmente es dada. Entonces, si esas dos variables son conocidas, la indisponibilidad permitida de la función protectora puede expresarse como se muestra en la Ecuación 2:

$$\text{Indisponibilidad permitida de la protección} = \frac{\text{Probabilidad tolerable de una falla múltiple}}{\text{Probabilidad de falla de la función protegida}} \qquad \text{(Ec. 2)}$$

Así un elemento crucial del desempeño requerido de cualquier protección que pueda sufrir un modo de falla oculta es la máxima indisponibilidad que se puede permitir si la probabilidad de la falla múltiple asociada no excede el nivel tolerable. Esta indisponibilidad se determina en las siguientes tres fases:

a. Si no se ha determinado como se describe en 12.1.3. y 12.1.4, establezca cual es la probabilidad que la organización está dispuesta a tolerar para la falla múltiple.
b. Entonces, determine la probabilidad de que la función protegida falle en el período en consideración (esto también se conoce como "tasa de demanda").

c. Finalmente, determine la indisponibilidad (también conocida como "tiempo muerto parcial") de la protección que resulta en la probabilidad tolerable de la falla múltiple.

Nótese también que comúnmente es posible variar tanto la probabilidad de una falla no anticipada de la función protegida, como (especialmente) la indisponibilidad de la función protectora por adopción de políticas de manejo de fallas convenientes. Como resultado, también es posible reducir la probabilidad de una falla múltiple a casi cualquier nivel deseado en razón de adoptar tales políticas. (cero es, por supuesto, un ideal inalcanzable).

12.3 Modos de Falla Evidente con Consecuencias Económicas— "En el caso de un modo de falla evidente que no tenga consecuencias en la seguridad o el ambiente, los costos directos o indirectos de la tarea deben ser menores que los costos directos o indirectos del modo de falla cuando se calculan en períodos de tiempo comparables." (SAE JA1011, Sección 5.7.1.3)

Las secciones 10.1.2.3 y 10.1.2.4 describen los elementos claves de las consecuencias económicas de un modo de falla. Estas secciones también muestran que las consecuencias económicas comprenden consecuencias operacionales y no operacionales, y que ellas son evaluadas bajo la suposición de que no se está desarrollando ninguna tarea programada.

Si las consecuencias de falla son económicas, el costo total de la organización en un período de tiempo no sólo es afectado por la magnitud de las consecuencias que podrían ocurrir, sino también por cuan frecuente las consecuencias tienen probabilidad de ocurrencia. Similarmente, el costo total de la organización de realizar cualquier tarea programada es afectado también por el costo total de hacer la tarea y por cuan frecuente es realizada. En este contexto, el costo total de realizar la tarea debe tomar en cuenta el costo de hacer la tarea por si misma, más el hecho de que en ocasiones puede ser necesario un trabajo adicional al levantar la tarea. Por ejemplo, puede ser necesario revisar un cojinete por ruido una vez a la semana y reemplazar un cojinete ruidoso una vez cada cuatro o cinco años en promedio.

Consecuentemente, para evaluar la viabilidad económica de cualquier tarea, es necesario comparar el costo total del modo de falla en un período dado con el costo total de la política de manejo de falla en el mismo período. (En la mayoría de los casos, estos costos son comparados por la reducción de los mismos sobre una base anualizada).

Si el costo de realizar la tarea en ese período es menor que el costo total del modo de falla, entonces vale la pena hacerla. De lo contrario, la tarea no es apropiada y se debe considerar alguna otra política de manejo de falla.

Nótese que si existe un grado razonable de certeza de que la probabilidad condicional del modo de falla se incrementará con el tiempo, entonces el período utilizado para la comparación debe ser suficientemente largo para abarcar tanto la vida temprana como el período de incremento de la probabilidad de falla cuando se evalúa si vale la pena hacer la tarea programada.

Nótese también que si el resto de la vida útil del activo es significativamente más corta que el tiempo promedio entre las ocurrencias del modo de falla (especialmente en el caso de fallas relacionadas con la longevidad), entonces sería apropiado tomar esto en cuenta cuando se evalúa la viabilidad económica de la tarea programada.

12.4 Modos de Falla Oculta con Consecuencias Económicas— "En el caso de un modo de falla oculta en el que la falla múltiple asociada no tenga consecuencias en la seguridad o en el ambiente, los costos directos o indirectos de la tarea deben ser menores que los costos directos o indirectos de una falla múltiple más el costo de reparación del modo de falla oculta cuando se calculen en períodos de tiempo comparables." (SAE JA1011, Sección 5.7.1.4.)

Las fallas múltiples que sólo tienen consecuencias económicas (operacionales o no operacionales) cuestan dinero. El manejo de fallas también cuesta dinero. Como resultado, normalmente es posible identificar una política de manejo de fallas que reduzca el costo total de manejar la falla oculta a un valor mínimo. En tales casos, el primer paso es determinar que política de manejo de fallas conduce al costo mínimo total sobre una base anualizada, entonces determine si este riesgo financiero (aunque minimizado) es tolerable para los dueños/usuarios del activo.

13. ***Políticas de Manejo de Fallas—Tareas Programadas***

13.1 Tareas Basadas en Condición— "Cualquier tarea basada en condición que se seleccione (o predictiva, o basada en condición, o tarea de monitoreo de condición) debe satisfacer los siguientes criterios adicionales:

a. Debe existir una falla potencial claramente definida.
b. Debe existir un intervalo P-F identificable (o período para el desarrollo de falla).
c. El intervalo de la tarea debe ser menor que el intervalo P-F probable más corto.
d. Debe ser físicamente posible realizar la tarea en intervalos menores que el intervalo P-F.
e. El tiempo más corto entre la detección de una falla potencial y la ocurrencia de una falla funcional (el intervalo P-F menos el intervalo de la tarea) debe ser suficientemente largo para predeterminar la acción a ser tomada a fin de evitar, eliminar o minimizar las consecuencias del modo de falla." (SAE JA1011, Sección 5.7.2)

13.1.1 FALLAS POTENCIALES Y LA CURVA P-F— La mayoría de los modos de falla no ocurren instantáneamente del todo. En tales casos, es muy posible detectar que los elementos concernientes se encuentran en etapas finales de deterioro antes de alcanzar su estado de falla. Esta evidencia de falla inminente se conoce como "falla potencial", la cual se define como "una condición identificable que indica que una falla funcional está a punto de ocurrir o está en un proceso de ocurrencia". Si esta condición puede ser detectada, podría ser posible tomar acción para prevenir que el elemento falle completamente y/o evitar las consecuencias del modo de falla.

La Figura 8 ilustra lo que ocurre en las fases finales del proceso de falla. Esta se llama curva P-F, porque muestra como comienza una falla, deteriora hasta el punto en el cual puede ser detectada ("P") y entonces, si no es detectada y corregida, continúa deteriorándose –usualmente a una velocidad acelerada- hasta que alcanza el punto de falla funcional ("F").

Si se detecta una falla funcional entre el punto P y el punto F de la Figura 8, este es el punto al cual podría ser posible tomar acción para prevenir la falla funcional y/o evitar sus consecuencias. (si es posible o no tomar una acción significante dependerá de cuán rápido ocurre la falla funcional, como se discutirá más adelante). Las tareas diseñadas para detectar las fallas potenciales se conocen como tareas basadas en condición.

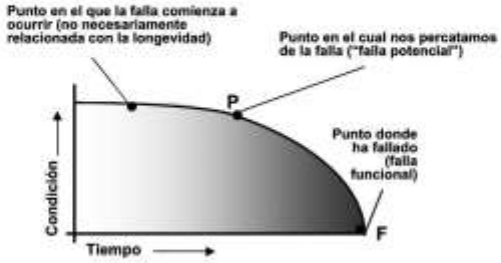


FIGURA 8— LA CURVA P-F

Las tareas basadas en condición se llaman así porque los elementos se inspeccionan y se dejan en servicio bajo la condición de que continúen obteniéndose los estándares de operación especificados –en otras palabras, bajo la condición que el modo de falla en consideración improbablemente ocurra antes de la próxima revisión. Esto también se conoce como mantenimiento predictivo (porque nosotros estamos tratando de predecir si –y posiblemente cuando- el elemento va a fallar en base a su comportamiento actual) o mantenimiento basado en condición (porque la necesidad de una acción correctiva o para evitar consecuencias está basada en una evaluación de la condición del elemento).

13.1.2 EL INTERVALO P-F— En adición a la falla potencial, también es necesario considerar la cantidad de tiempo (o el número de ciclos de esfuerzo) que transcurre entre el punto en el cual ocurre la falla potencial –en otras palabras, el punto en el cual se hace identificable- y el punto en el que se deteriora hacia una falla funcional. Como se muestra en la Figura 9, este intervalo se conoce como el intervalo P-F.

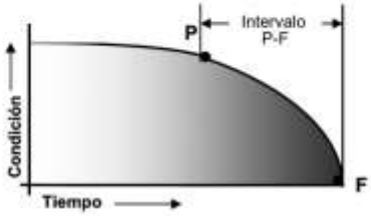


FIGURA 9— EL INTERVALO P-F

El intervalo P-F determina que tan frecuente se deben hacer las tareas basadas en condición. Para detectar la falla potencial antes que se convierta en una falla funcional, el intervalo entre revisiones debe ser menor que el intervalo P-F. También es esencial que la condición de la falla potencial sea lo suficientemente clara para tener la certeza de que la persona que está entrenada para realizar la revisión, detectará la falla potencial siempre y cuando ocurra (o al menos, que la probabilidad de que la falla potencial no sea detectada sea suficientemente baja para reducir la probabilidad de un modo de falla no anticipado a un nivel que sea tolerable para el dueño o usuario del activo).

El intervalo P-F también se conoce como período de advertencia, el tiempo que conduce hacia una falla funcional o el período de desarrollo de la falla. Este se puede medir en cualesquiera unidades que provean una indicación de la exposición al esfuerzo (tiempo de operación, unidades de

producción, ciclos parada-arranque, etc.). Para diferentes modos de falla, estos varían de fracciones de segundo a varias décadas.

Nótese que si se realiza una tarea basada en condición a intervalos que son más largos que el intervalo P-F, existe una posibilidad de que la falla potencial sea abandonada del todo. Por otro lado, si se realiza la tarea a fracciones muy pequeñas del intervalo P-F, los recursos serán gastados en el proceso de revisión.

En la práctica los intervalos de las tareas siempre se deben seleccionar para ser más cortos que el más corto intervalo P-F probable. En la mayoría de los casos, es suficiente seleccionar un intervalo de tarea igual a la mitad del intervalo P-F. Sin embargo, algunas veces es apropiado seleccionar intervalos de tarea que sean alguna otra fracción del intervalo P-F. Esto se puede regir por el intervalo P-F neto requerido (como se discute más adelante), o puede ser porque el usuario del activo tiene datos históricos relevantes que dictaminan que una fracción diferente es apropiada.

13.1.3 EL INTERVALO NETO P-F— El intervalo neto P-F es el intervalo mínimo probable que transcurre entre la detección de una falla potencial y la ocurrencia de la falla funcional. Esto se ilustra en la Figura 10, la cual muestra un proceso de falla con un intervalo P-F de nueve meses. La figura muestra que si el elemento es revisado mensualmente, el intervalo neto P-F es de 8 meses. Por otro lado, si es revisado semestralmente, el intervalo neto P-F debería ser de tres meses. Entonces, en el primer caso el tiempo mínimo disponible para realizar cualquier cosa con respecto a la falla potencial es cinco meses mayor que en el segundo, pero la tarea basada en condición tiene que ser realizada con una frecuencia seis veces mayor.

FIGURA 10— INTERVALO NETO P-F

El intervalo P-F rige la duración del período disponible para tomar cualquier acción necesaria con la finalidad de reducir o eliminar las consecuencias del modo de falla. Para que una tarea basada en condición sea técnicamente factible, el intervalo neto P-F debe ser mayor que el período requerido para evitar o reducir las consecuencias del modo de falla. Si el intervalo neto P-F es demasiado corto para tomar una acción sensata, entonces la tarea basada en condición no es técnicamente factible. En la práctica, el período requerido varía ampliamente. En algunos casos, puede ser una cuestión de horas (decir hasta el final de un ciclo de operación o el fin de un cambio) o incluso minutos (parar una máquina o para evacuar un edificio). En otros casos, pueden ser semanas o incluso meses (decir hasta un mantenimiento mayor). En general, se desean intervalos P-F mayores por dos razones:

a. Es posible hacer cualquier cosa necesaria para evitar las consecuencias del modo de falla (incluyendo la planeación de la acción correctiva) de una manera más considerada y por demás controlada.

b. Se requieren menos inspecciones basadas en condición.

Por esta razón se invierte mucha energía para encontrar las condiciones de la falla potencial y las técnicas basadas en condición que suministran posibles intervalos P-F mayores. Sin embargo; en algunos casos, es posible utilizar intervalos P-F muy cortos.

13.1.4 LA RELACIÓN ENTRE EL INTERVALO P-F Y LA LONGEVIDAD

13.1.4.1 Intervalos P-F y Fallas Aleatorias— Cuando se aplican estos principios por primera vez, las personas frecuentemente tienen la dificultad de distinguir entre la "vida" de un componente y el intervalo P-F. Esto los lleva a basar las frecuencias de las tareas basadas en condición en la "vida" real o imaginaria del elemento. Si el esto existe, esta vida normalmente es mucho mayor que el intervalo P-F, de modo que la tarea logra poco o nada. En la realidad, nosotros medimos la vida de un componente hacia delante desde el momento en que entra en servicio. El intervalo P-F se mide hacia atrás desde la falla funcional, así los dos conceptos comúnmente no están relacionados. La distinción es importante ya que los modos de falla que no están relacionados con la longevidad (en otras palabras, fallas aleatorias) tienen la misma probabilidad de ser advertidos como de no serios.

Por ejemplo, la Figura 11 muestra un componente que conforma el patrón de una falla aleatoria (patrón E). Uno de los componentes falla después de los cinco años, el segundo falla después de seis meses y un tercero después de dos años. En cada caso, la falla funcional estuvo precedida por una falla potencial con un intervalo P-F de cuatro meses.

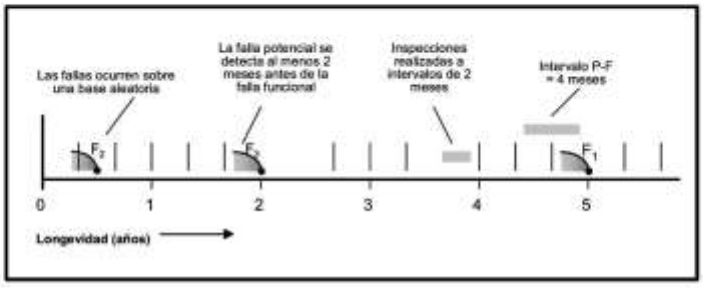


FIGURA 11— FALLAS ALEATORIAS Y EL INTERVALO P-F

La Figura 11 muestra que con el fin de detectar la falla potencial, necesitamos realizar una tarea de inspección cada 2 meses. Debido a que los modos de falla ocurren sobre una base aleatoria, no sabemos cuando ocurrirá el próximo, así el ciclo de inspecciones debe comenzar tan pronto como el elemento entra en servicio. En otras palabras, la medida del tiempo de las inspecciones no tiene nada que ver con la longevidad o vida del componente.

Sin embargo; esto no significa que las tareas basadas en condición aplican sólo a elementos que fallan sobre una base aleatoria. Estas también se deben aplicar a elementos que sufren modos de falla relacionados con la longevidad, como se discutió anteriormente.

13.1.4.2 Intervalos P-F y Modos de Falla Relacionados con la Longevidad— Si un elemento se deteriora de una manera más o menos lineal a lo largo de su vida, está supuesto razonar que las fases finales

de deterioro serán también más o menos lineales. Esto es probable que sea verdadero para modos de falla relacionados con la longevidad.

Por ejemplo, considere el uso de un neumático. Es probable que la superficie de un neumático se desgaste de una manera más o menos lineal hasta que la profundidad de la banda de rodamiento alcance el mínimo aceptable. Si este mínimo es (se dice) 2 mm, es posible especificar una profundidad de rodamiento mayor a 2 mm que provea una advertencia adecuada para la ocurrencia inminente de la falla funcional. Este es, por supuesto, el nivel de la falla potencial.

Si la falla potencial es fijada en (se dice) 3 mm, entonces el Intervalo P-F es la distancia que el neumático podría viajar hasta que su profundidad de rodamiento se desgaste de 3 mm a 2 mm, como se ilustra en la Figura 12.

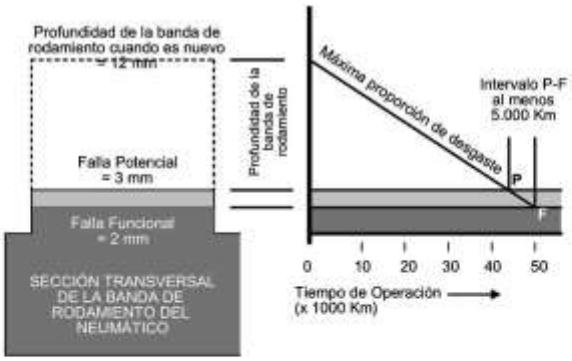


FIGURA 12— UNA CURVA P-F LINEAL

La Figura 12 también sugiere que si el neumático entra en servicio con una profundidad de banda de rodamiento de (se dice) 12 mm, podría ser posible predecir el intervalo P-F basándose en la distancia total cubierta comúnmente antes de que el neumático tenga que ser reencauchado . Por ejemplo, si los neumáticos duran al menos 50.000 Km antes de que sean reencauchados, es razonable concluir que la banda de rodamiento se desgasta a una proporción máxima de 1 mm por cada 5.000 Km de recorrido. Estas cantidades a un intervalo P–F de 5.000 Km. La tarea basada en condición asociada podría ser llamada por el conductor: "Revisar la profundidad de la banda de rodamiento cada 2.500 Km y reportar los neumáticos cuya profundidad de banda de rodamiento sea menor de 3 mm".

Esta tarea no sólo asegurará que se detecte el desgaste antes de exceder el límite legal, sino que también permite el tiempo suficiente -2.500 km en este caso- para que los operadores del vehículo planeen retirar el neumático antes de alcanzar el límite.

En general, el deterioro lineal entre "P" y "F" probablemente sólo se encuentra en los casos en los cuales los mecanismos de falla estén intrínsecamente relacionados con la longevidad.

13.1.5 CONSISTENCIA DEL INTERVALO P-F— Las curvas P-F ilustradas hasta ahora en esta sección de la guía indican que el intervalo P-F es constante para cualquier modo de falla dado. De hecho, este no es el caso –algunos realmente varían en un amplio rango de valores, como se muestra en la Figura 13. En esos casos se debe seleccionar un intervalo de tarea que sea menor que los

intervalos probables P-F más cortos. Esto asegura un grado razonable de certeza al detectar la falla potencial antes que se convierta en una falla funcional. Si el intervalo neto P-F asociado con este intervalo mínimo es lo suficientemente grande para tomar una acción que maneje las consecuencias del modo de falla, la tarea basada en condición es técnicamente factible.

Por otro lado, si el intervalo P-F es muy inconsistente, no es posible establecer un intervalo de tarea significativo, y se debe abandonar la tarea a favor de alguna otra manera de manejar el modo de falla.

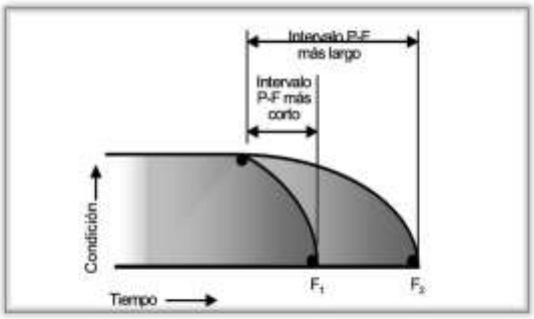


FIGURA 13— INTERVALOS P-F INCONSISTENTES

13.1.6 CATEGORÍAS DE TÉCNICAS BASADAS EN CONDICIÓN— Las cuatro categorías mayores de técnicas basadas en condición son las siguientes:

a. Las técnicas basadas en las variaciones de la calidad del producto. En muchos casos, la emergencia de un defecto en un artículo producido por una máquina está directamente relacionada a un modo de falla de la misma. Muchos otros defectos surgen gradualmente, y así proveen evidencia oportuna de fallas potenciales.

b. Técnicas de monitoreo de efectos primarios. Los efectos primarios (velocidad, caudal de flujo, presión, temperatura, potencia, corriente, etc.) son otras fuentes de información acerca de las condiciones del equipo. Los efectos pueden ser monitoreados por una persona a través de la lectura de un indicador, por un computador como parte de un sistema de control de procesos, o por un registrador de mapas.

c. Técnicas basadas en los sentidos humanos (observar, escuchar, sentir, y oler).

d. Técnicas de monitoreo de condición. Estas son técnicas para detectar fallas potenciales que involucran el uso de equipo especializado (el cual algunas veces, se incorpora al equipo que se está monitoreando). Estas técnicas son conocidas como monitoreo de condición para distinguirlas de otros tipos de mantenimiento basados en condición.

Muchos modos de falla son precedidos por más de una –frecuentemente varias- fallas potenciales diferentes, así podría ser apropiada más de una categoría de tareas basadas en condición. Cada una de ellas tendrá un intervalo P-F diferente, y cada una requerirá diferentes tipos y niveles de habilidades. Esto significa que ninguna categoría de tareas por sí sola será siempre la más costo-efectiva. Entonces, para evitar inclinaciones innecesarias en la selección de la tarea, es esencial:

a. Considerar todos los fenómenos detectables que probablemente precedan cada modo de falla, junto al rango total de tareas basadas en condición que puedan utilizarse para detectar esas advertencias.

b. Aplicar el criterio de selección de tareas del MCC rigurosamente para determinar cuales tareas (si existen) probablemente sean la manera más costo-efectiva de anticipar el modo de falla en consideración.

Nótese que cualquier dispositivo incorporado para determinar si un modo de falla está en proceso de ocurrir, debe satisfacer el mismo criterio para la factibilidad técnica y vale la pena hacerlo de cualquier mantenimiento basado en condición, con modos de falla adicionales, y se deben analizar conforme a ello.

13.2 Tareas de Restauración Programada y de Desincorporación Programada— "Cualquier tarea de desincorporación programada seleccionada debe satisfacer los siguientes criterios adicionales:

a. Debe estar claramente definida (preferiblemente demostrable) la longevidad en la cual hay un incremento en la probabilidad condicional del modo de falla en consideración.
b. Debe existir una proporción suficientemente grande de las ocurrencias de este modo de falla después de esta longevidad para reducir la probabilidad de una falla prematura a un nivel que sea tolerable para el dueño o usuario del activo." (SAE JA1011, Sección 5.7.3)

"Cualquier tarea de restauración programada seleccionada debe satisfacer los siguientes criterios adicionales:

a. Debe estar claramente definida (preferiblemente demostrable) la longevidad a la cual hay un incremento en la probabilidad condicional del modo de falla en consideración.
b. Debe existir una proporción suficientemente grande de las ocurrencias de este modo de falla después de esta longevidad para reducir la probabilidad de una falla prematura a un nivel que sea tolerable para el dueño o usuario del activo.
c. La tarea debe restaurar la resistencia a fallar (condición) del componente a un nivel que sea tolerable para el dueño o usuario del activo." (SAE JA1011, Sección 5.7.4)

Las tareas de restauración programada y de desincorporación programada tienen un número de características en común, así esta parte de la guía considera primero sus características comunes, luego revisa las diferencias.

La restauración programada vincula la toma de acciones periódicas para restaurar la capacidad de un elemento a (o antes de) un intervalo especificado (límite de longevidad), indiferentemente de su condición en el momento, a un nivel que provea una probabilidad tolerable de supervivencia hasta el final o hasta otro intervalo especificado (el cual no tiene que ser necesariamente igual al intervalo inicial). Esta acción usualmente trae consigo tanto la refabricación de un sólo componente como la verificación del ensamblaje completo.

La desincorporación programada significa desincorporar un elemento o componente a (o antes de) un límite de longevidad especificado, indiferentemente de su condición en el momento. Esto se hace en el supuesto de que al reemplazar un viejo componente con uno nuevo se restaurará la resistencia original a fallar.

Si el modo de falla en consideración es conforme a los Patrones A y B, es posible identificar la longevidad a la que comienza el deterioro. La tarea de restauración programada o de desincorporación programada se debe hacer en intervalos menores a esta longevidad. En otras palabras, la frecuencia de la tarea de restauración programada o de desincorporación programada es determinada por la longevidad a la cual el elemento o componente muestra un incremento rápido en la probabilidad condicional de falla.

En el caso del Patrón C, se requieren técnicas analíticas más complejas. Estas técnicas están más allá del alcance de esta guía. Nótese que dos tipos de límites de vida aplican a las tareas de

restauración programada y de desincorporación programada. Estos son límites de vida-segura y de vida-económica.

13.2.1 LÍMITES DE VIDA-SEGURA— Los límites de vida-segura sólo aplican a modos de falla que tienen consecuencias en la seguridad o en el ambiente, así las tareas asociadas deben reducir a un nivel tolerable la probabilidad de que ocurra un modo de falla antes del límite de vida. (Un método de decisión que fuese tolerable se discutió en la sección 12.1.3 de esta guía. En la práctica, las probabilidades tan bajas como 10_{-6} y algunas veces, incluso 10_{-9} se utilizan frecuentemente en este contexto.) Este requerimiento implica que estos límites de vida-segura no se pueden aplicar a cualquier modo de falla que tenga una probabilidad significativa de ocurrencia cuando el elemento entra en servicio.

Idealmente, los límites de vida-segura se deben determinar antes de que un elemento nuevo entre en servicio. Se deben establecer probando estadísticamente una muestra adecuada de elementos en un ambiente de operación simulado para determinar que vida realmente se logra. Algunas industrias aplican una fracción conservadora de esta vida (típicamente un tercio o un cuarto) como límite de vida-segura, como se ilustra en la Figura 14.

FIGURA 14— LÍMITES DE VIDA-SEGURA

13.2.2 LÍMITES DE VIDA-ECONÓMICA— La experiencia en operaciones algunas veces sugiere que la restauración programada o la desincorporación programada es deseable en términos económicos. Esto se conoce como un límite de vida-económica. Está basado en la relación longevidad-confiabilidad actual del elemento, en lugar de una fracción de la longevidad a la cual existe un incremento en la probabilidad condicional de falla. Una cantidad suficientemente mayor de elementos deben sobrevivir al límite de vida-económica para que la tarea sea justificable en términos económicos.

13.3 Tareas de Detección de Fallas— "Cualquier tarea de detección de fallas seleccionada debe satisfacer los siguientes criterios adicionales (detección de fallas no aplica para modos de falla evidentes):

a. La base sobre la cual se selecciona el intervalo de tarea debe tomar en cuenta la necesidad de reducir la probabilidad de una falla múltiple del sistema protector asociado a un nivel que sea tolerable para el dueño o usuario del activo.
b. La tarea debe confirmar que todos los componentes cubiertos por la descripción del modo de falla sean funcionales.
c. La tarea de detección de falla y el proceso de selección del intervalo asociado deben tomar en cuenta cualquier probabilidad de que la tarea por si misma pueda dejar la función oculta en un estado de falla.

d. Debe ser físicamente probable hacer la tarea en los intervalos especificados." (SAE JA1011, Sección 5.7.5)

13.3.1 FALLAS MÚLTIPLES Y DETECCIÓN DE FALLAS— Como se mencionó en la sección 10.1.1.2, una falla múltiple ocurre si una función protegida falla mientras la protección está en estado de falla. Este fenómeno fue ilustrado en la Figura 5. La Ecuación 1, repetida abajo como Ecuación 3, muestra como se puede calcular la probabilidad de una falla múltiple.

Probabilidad de una falla múltiple	=	Probabilidad de falla de la función protegida	x	Promedio de indisponibilidad de la protección	(Ec. 3)

Esto lleva a concluir que la probabilidad de una falla múltiple se puede reducir al disminuir la indisponibilidad de la protección –en otras palabras, por el incremento de su disponibilidad.

La mejor manera de hacer esto es prevenir que la función protectora entre en estado de falla aplicando algún tipo de mantenimiento proactivo. Sin embargo; pocas tareas proactivas satisfacen el criterio de factibilidad técnica cuando se aplican a fallas ocultas. No obstante, aunque el mantenimiento proactivo es frecuentemente impropio, todavía es esencial hacer algo para reducir la probabilidad de una falla múltiple a un nivel requerido. Esto se puede hacer revisando periódicamente si ha ocurrido la falla. Tales revisiones son conocidas como tareas de detección de fallas.

13.3.2 ASPECTOS TÉCNICOS DE LA DETECCIÓN DE FALLAS— El objetivo de la detección de fallas es determinar si un modo de falla oculta o la combinación de modos de falla oculta han proporcionado una función protectora incapaz de proveer la protección requerida si es llamada a hacerla. (Esta es la razón por la que las tareas de detección de fallas también se conocen como revisiones funcionales). Los párrafos siguientes consideran algunos de los puntos claves en esta área.

13.3.2.1 Revise la Función Protectora en su Totalidad— Una tarea de detección de fallas debe asegurar la detección de todos los modos de falla oculta a los cuales se dirige. Esto es verdad especialmente en dispositivos complejos, tales como los compuestos por sensores, circuitos eléctricos, y actuadores. Idealmente, esto se debe hacer simulando las condiciones que el sensor debe detectar, y revisar si el actuador proporciona la respuesta correcta. El intervalo de detección de fallas se debe establecer acorde a esto.

13.3.2.2 No Altere— Desarmar algo siempre crea la posibilidad de ensamblarlo incorrectamente. Si esto pasa a un dispositivo protector en el que ocurren fallas ocultas, el hecho de que los modos de falla sean ocultos implica que nadie sabrá si algo se ha dejado en estado de falla hasta la próxima revisión (o hasta que se necesite). Por esta razón, siempre busque la manera de revisar las funciones de los dispositivos protectores sin desconectarlos o cualquier otra manera de alterarlos.

Se ha dicho que algunos dispositivos simplemente tienden a ser desarmados o removidos del todo para revisar si están trabajando apropiadamente. En esos casos, se debe tener mucho cuidado de realizar la tarea de tal manera que los dispositivos todavía trabajarán cuando retornen al servicio.

13.3.2.3 Debe ser Físicamente Posible Realizar la Revisión de la Función— En un número muy pequeño pero aún significativo de casos, es imposible llevar a cabo una tarea detección de fallas de cualquier tipo. Estos son:

a. En el caso en el cual es imposible tener acceso al dispositivo protector para revisar su función (esto es casi siempre resultado de un diseño insensato), y
b. Cuando la función del dispositivo no puede ser revisada sin destruirlo (como en el caso de dispositivos fusibles y los discos de seguridad). En la mayoría de esos casos, están

disponibles otras tecnologías (tales como cortacircuitos en lugar de fusibles). Sin embargo; en uno o dos casos las únicas opciones son encontrar otra manera de manejar los riesgos asociados con protección no probada hasta que algo mejor pase a lo largo del proceso concerniente o al abandonarlo.

13.3.2.4 *Minimice el Riesgo Mientras se Realiza la Tarea*— Puede ser posible llevar a cabo una tarea de detección de fallas sin incrementar significativamente el riesgo de una falla múltiple. Si el dispositivo protector ha de estar desactivado para realizar la tarea de detección de fallas, o si tal dispositivo se revisa y se encuentra en estado de falla, entonces se debe proveer una protección alternativa o se debe detener la función protegida hasta que se restablezca la protección original.

13.3.2.5 *La Frecuencia debe ser Práctica*— Debe ser práctico realizar la tarea de detección de fallas a los intervalos requeridos. Esto se discutirá en la sección 13.3.3. Sin embargo; antes de poder decidir si un intervalo requerido es práctico, necesitamos determinar que intervalo es realmente "requerido".

13.3.3 INTERVALOS DE TAREAS DE DETECCIÓN DE FALLAS

13.3.3.1 *Intervalos de Detección de Fallas, Disponibilidad y Confiabilidad*— Nada más que dos variables –disponibilidad y confiabilidad- se utilizan para establecer los intervalos de detección de fallas. Se puede demostrar que existe una correlación lineal entre la indisponibilidad, el intervalo de detección de fallas y la confiabilidad de la función protectora dada por su TPEF, como sigue en la Ecuación 4:

$$\text{Indisponibilidad} = 0{,}5 \times \frac{\text{Intervalo de deteción de fallas}}{\text{TPEF de la función protectora}} \qquad \text{(Ec. 4)}$$

También se puede demostrar que esta relación lineal es válida para todas las indisponibilidades menores al 5%, con tal que la función protectora conforme una distribución de supervivencia exponencial.[1]

13.3.3.2 *Excluyendo el Tiempo de la Tarea y el Tiempo de la Reparación*— La "indisponibilidad" de la función protectora en la Ecuación 4 no incluye alguna indisponibilidad incurrida mientras se está realizando la tarea de detección de fallas, ni incluye cualquier indisponibilidad causada por la necesidad de restaurar la función si se encuentra en estado de falla. Esto es así por dos razones:

a. La indisponibilidad requerida para realizar la tarea de detección de fallas y para efectuar cualquier reparación es probable que sea relativamente pequeña con respecto a la indisponibilidad no revelada entre tareas, a una magnitud que normalmente será despreciable sólo en términos matemáticos.

b. Tanto la tarea de detección de fallas y cualquier reparación que podría ser necesaria se deben realizar bajo condiciones estrictamente controladas. Estas condiciones deben reducir enormemente –si no la elimina por completo- la posibilidad de una falla múltiple mientras la intervención está en marcha. Esto incluye tanto la parada del sistema protegido como el arranque de una función protectora hasta que se restaure por completo el sistema. Si esto se hace apropiadamente, la indisponibilidad resultante de la intervención (controlada) se puede ignorar en cualquier evaluación de la probabilidad de una falla múltiple.

En el proceso de decisión del MCC, el último punto es cubierto por el criterio para evaluar si una tarea de detección de fallas vale la pena hacerla. Si hay un incremento significativo de la probabilidad de una falla múltiple mientras la tarea está en marcha, la respuesta a la pregunta "¿La tarea reduce la probabilidad de una falla múltiple a un nivel tolerable?" Será "no".

[1] Vea Cox y Tait o Andrews y Moss

13.3.3.3 *Cálculo del IDF Utilizando sólo Disponibilidad y Confiabilidad*— Si utilizamos la abreviatura "IDF" para escribir el Intervalo de Detección de Fallas y "TPRA" para describir el TPEF de una función protectora, la Ecuación 4 puede ser reacomodada como se muestra en la Ecuación 5:

$$IDF = 2 \times \text{Indisponibilidad} \times TPRA \qquad \text{(Ec. 5)}$$

Esto significa que para determinar el intervalo de detección de fallas para una sola función protectora, es necesario encontrar su tiempo promedio entre fallas y la disponibilidad deseada de la función (de la cual es posible computar la indisponibilidad a ser utilizada en la fórmula). Para quienes se sienten incómodos con formulaciones matemáticas, se puede utilizar la Ecuación 5 para desarrollar una tabla simple, como se muestra en la Figura 15:

Disponibilidad que se requiere para la función protectora	99.99%	99.95%	99.9%	99.5%	99%	98%	95%
Intervalo de detección de fallas (como % del TPEF)	0.02%	0.1%	0.2%	1%	2%	4%	10%

FIGURA 15— INTERVALO DE DETECCIÓN DE FALLAS, DISPONIBILIDAD Y CONFIABILIDAD

13.3.3.4 *Métodos Rigurosos para el Cálculo del IDF*— Una fórmula sencilla para determinar los intervalos de detección de fallas que incorpora todas las variables consideradas hasta ahora se puede desarrollar por la combinación de las Ecuaciones 1 y 5, como se explica en los párrafos siguientes. Para hacer esto, se necesitan definir más términos como sigue:

a. Una probabilidad de una falla múltiple de 1 en 1.000.000 en un año implica un tiempo promedio entre fallas múltiples de 1.000.000 de años. Si esto se llama T_{FM}, la probabilidad de ocurrencia de una falla múltiple en cualquier año es $1/T_{FM}$.
b. Si la tasa de demanda de la función protegida es (se dice) una en 200 años, esto corresponde a la probabilidad de falla para la función protegida de 1 en 200 en cualquier año, o un tiempo promedio entre fallas de la función protegida de 200 años. Si esta es llamada T_{GIDA}, la probabilidad de falla de la función protegida en cualquier año será $1/T_{GIDA}$. Esto también se conoce como tasa de demanda.
c. T_{TORA} es el tiempo promedio entre fallas de la función protectora e IDF es el intervalo de la tarea de detección de fallas.
d. I_{TORA} es la indisponibilidad permitida de la función protectora.

Si se sustituyen las expresiones previas en la Ecuación 5, tenemos:

$$1/T_{FM} = (1/T_{GIDA}) \times I_{TORA} \qquad \text{(Ec. 6)}$$

Esto se puede reacomodar como sigue en la Ecuación 7:

$$I_{TORA} = \frac{T_{GIDA}}{T_{FM}} \qquad \text{(Ec. 7)}$$

Sustituyendo I_{TORA} de la Ecuación 7 en la Ecuación 5, obtenemos la Ecuación 8:

$$IDF = \frac{(2 \times T_{TORA} \times T_{GIDA})}{T_{FM}} \qquad \text{(Ec. 8)}$$

Esta fórmula permite determinar en un sólo paso el intervalo de detección de fallas, independientemente de la función protectora.

13.3.3.4.1 Modos de Falla Múltiple de una Sola Función Protectora— A lo largo de esta sección, todas las posibilidades de falla que podrían causar la falla de cualquier función protectora se han agrupado como un solo modo de falla ("falla de la bomba de respaldo"). La vasta mayoría de las funciones protectoras se pueden tratar de esta manera, debido a que todos los modos de falla que podrían causar la falla de una función protectora son revisados cuando se examina la función del dispositivo como un todo.

Sin embargo; algunas veces es apropiado realizar un AMEF detallado de la función protectora para identificar modos de falla individuales, cada uno de los cuales por si mismo podrían causar que el dispositivo o sistema protector no esté en disposición de proveer la protección requerida. Esto normalmente se hace bajo sólo dos conjuntos de circunstancias:

a. Cuando se conoce que algunos de los modos de falla son susceptibles al mantenimiento basado en condición o a las tareas de restauración programada o de desincorporación programada, pero otros no son predecibles ni prevenibles. En esos casos, la tarea apropiada de desincorporación/restauración programada o basada en condición, se debe aplicar a los modos de falla que califiquen, y aplicar la detección de fallas al resto de los modos de falla.
b. Cuando el dispositivo protector es nuevo y los únicos datos de falla que están disponibles (provenientes de bancos de datos, suplidores del componente o cualquier otra fuente) aplican a partes del dispositivo pero no al dispositivo como un todo.

En esas circunstancias, la Ecuación 8 se debe modificar para adecuar la combinación de modos de falla individuales que son objeto de la tarea de detección de fallas, a través de la determinación de un tiempo promedio entre fallas compuesto de la función protectora basado en los TPEF de cada modo de falla.

13.3.3.4.2 Métodos de Cálculo de los Intervalos de Detección de Fallas para Otros Tipos de Funciones Protectoras— Las técnicas para fijar los intervalos de detección de fallas descritas previamente son enfoques basados en riesgo para funciones protectoras solas. El manejo de funciones protectoras múltiples y el manejo de fallas múltiples que sólo tienen consecuencias económicas están fuera del alcance de esta guía.

13.3.3.5 La Viabilidad de los Intervalos de Tareas de Detección de Fallas— Los métodos descritos hasta ahora para el cálculo de los intervalos de detección de fallas algunas veces producen intervalos muy cortos o muy largos, con las siguientes implicaciones:

a. Un intervalo de detección de fallas muy corto tiene dos implicaciones principales:

1. Algunas veces el intervalo es simplemente demasiado corto para ser práctico. Un ejemplo podría ser una tarea de detección de fallas que emplaza a un elemento grande de una planta de proceso a que se pare cada pocos días.
2. La tarea puede causar acostumbramiento (lo cual puede pasar si una alarma contraincendio se prueba muy frecuentemente).

En estos casos, se debe rechazar la tarea propuesta y se debe encontrar alguna otra manera de reducir la probabilidad de una falla múltiple a un nivel tolerable.

b. Un intervalo de detección de fallas muy largo también tiene dos implicaciones principales:

1. Para intervalos que son sustancialmente mayores que el resto de la vida útil proyectada del activo: tales intervalos sugieren que no hay ninguna necesidad de realizar una tarea de detección de fallas programada en absoluto (aunque todavía es necesario determinar durante las participaciones que el dispositivo se ha instalado correctamente).

2. Para intervalos que son mayores que el horizonte máximo de planeación de los sistemas de planeación de mantenimiento existentes, pero son menores que el resto de la vida útil proyectada del activo: En estos casos, se debe tener cuidado de no reducir los intervalos asociados simplemente por ajuste de los límites de los sistemas de planeación existentes, si sólo porque las tareas de detección de fallas puedan algunas veces inducir los modos de falla los cuales están destinadas a detectar.

c. Nótese que el intervalo de las tareas de detección de fallas puede exceder el intervalo promedio entre fallas de la función protegida. Debido al incremento de la cantidad por la que el intervalo de detección de fallas excede al intervalo de falla, el valor de detección de fallas disminuye rápidamente, hasta el punto en el que hay poco o ningún efecto en la probabilidad de la falla múltiple. Si cualquiera de las fórmulas anteriores produce un intervalo en este punto o más allá de él, se debe encontrar alguna otra manera de reducir la probabilidad de la falla múltiple a un nivel tolerable.

13.4 Combinación de Tareas— Si un modo de falla o una falla múltiple puede afectar la seguridad o el ambiente y no se puede encontrar ninguna tarea programada que por si misma reduzca el riesgo de falla a un nivel bajo tolerable, a veces es posible que la combinación de tareas (normalmente desde dos categorías de tareas diferentes, tales como una tarea basada en condición y una tarea de desincorporación programada), pueda reducir el riesgo del modo de falla a un nivel tolerable.

Cuando se consideran tales combinaciones, se debe tener cuidado de asegurar que cada tarea por si misma satisfará el criterio de factibilidad técnica apropiado para cada tipo de tarea, y que cada tarea se realice a una frecuencia adecuada para esa tarea. También se debe cuidar de asegurar que las dos tareas combinadas reducirán de hecho, las consecuencias a un nivel tolerable. Sin embargo; debe enfatizarse que las situaciones en las que se necesite la combinación de tareas son muy raras, y se debe cuidar de no emplear tales combinaciones indiscriminadamente.

14. Políticas de Manejo de Fallas— Cambio de Especificaciones y Operar Hasta Fallar

14.1 Cambio de especificaciones— "El proceso MCC se esfuerza por obtener el desempeño deseado del sistema como está configurado y operado actualmente a través de la aplicación de tareas programadas apropiadas." (SAE JA1011, Sección 5.8.1.1)

"En los casos donde tales tareas no estén disponibles, pueden ser necesarios cambios de especificaciones del activo o sistema, sujetos a los siguientes criterios:

a. En los casos donde la falla es oculta, y la falla múltiple asociada tiene consecuencias en la seguridad y en el ambiente, son mandatorios cambios de especificaciones que reduzcan la probabilidad de una falla múltiple a un nivel tolerable para el dueño o usuario del activo.
b. En los casos donde el modo de falla es evidente y tiene consecuencias en la seguridad y en el ambiente, son mandatorios cambios de especificaciones que reduzcan la probabilidad de una falla múltiple a un nivel tolerable para el dueño o usuario del activo.
c. En casos donde el modo de falla es oculto y la falla múltiple asociada no tiene consecuencias en la seguridad ni en el ambiente, cualquier cambio de especificaciones debe ser costo-efectivo en opinión del dueño o usuario del activo.

d. En casos donde el modo de falla es evidente y no tiene consecuencias en la seguridad ni en el ambiente, cualquier cambio de especificaciones debe ser costo-efectivo en opinión del dueño o usuario del activo." (SAE JA1011, Sección 5.8.1.2)

En secciones anteriores de esta guía se enfatiza que la capacidad inicial (o confiabilidad inherente) de cualquier activo es establecida según su diseño y el modo en que es fabricado, y el mantenimiento no puede producir confiabilidad más allá de la inherente en el diseño. Esto lleva a dos conclusiones:

Primeramente, si la capacidad inicial de un activo es mayor que el desempeño deseado, el mantenimiento debe ayudar a lograr el desempeño deseado. La mayoría de los equipos están adecuadamente especificados, diseñados y ensamblados, de modo que normalmente es posible desarrollar programas de mantenimiento satisfactorios, como se describió previamente. En otras palabras, en la mayoría de los casos, MCC nos ayuda a obtener el desempeño deseado del activo en su configuración actual.

En segundo lugar, si el desempeño deseado excede la capacidad inicial, entonces ninguna cantidad de mantenimiento podrá entregar el desempeño deseado. En estos casos el "mejor" mantenimiento no podrá solventar el problema, de modo que se hace necesario ver más allá del mantenimiento para encontrar las soluciones. En la mayoría de los casos, esto produce cambios en la capacidad de uno de los tres elementos del sistema:

a. Un cambio de la configuración física del activo (que normalmente se refiere a un "rediseño" o "modificación"). Esto es, cualquier acción que deba producir un cambio de diseño o un cambio en la lista de las partes. Esto incluye el cambio en las especificaciones de un componente, agregar un nuevo elemento, reemplazar una máquina completa por una fabricada de otra manera o de otro tipo, o una re-localización de una máquina. (Nótese que si cualquiera de tales cambios se hacen, el proceso MCC necesitará ser aplicado completamente al nuevo diseño para asegurar que continúe la función para la cual es pretendido).

b. Un cambio de un proceso o procedimiento que afecta la operación del activo.
c. Un cambio en la capacidad de una de las personas envueltas en la operación o mantenimiento del equipo (esto normalmente vincula el entrenamiento de la persona involucrada como un método de tratar con un modo de falla específico).

El término "cambio de especificaciones" se utiliza en esta guía para referirse a estas intervenciones porque normalmente se hacen una sola vez en cualquier sistema específico, como oposición a las tareas programadas las cuales se realizan en intervalos regulares. Los siguientes párrafos bosquejan los objetivos concretos de los cambios de especificaciones para cada una de las principales categorías de consecuencias de falla.

14.1.1 CONSECUENCIAS EN LA SEGURIDAD O EL AMBIENTE— Si un modo de falla puede afectar la seguridad o el ambiente y no se puede encontrar una tarea programada o una combinación de tareas que reduzca el riesgo de falla a un nivel tolerable, se debe cambiar algo, simplemente porque ahora estamos tratando con una amenaza a la seguridad o al ambiente que no puede ser prevenida adecuadamente. En estos casos, normalmente se emprende el rediseño con uno de estos dos objetivos:

a. Para reducir la probabilidad de ocurrencia de un modo de falla no anticipado a un nivel que sea tolerable. Esto se hace normalmente tanto por el reemplazo del componente afectado por uno más fuerte o más confiable, como por hacer posible anticipar el modo de falla.
b. Para cambiar el elemento o el proceso de manera que el modo de falla no tenga consecuencias en la seguridad o en el ambiente. Esto se hace en la mayoría de las casos por la instalación de un dispositivo protector adecuado. Recuerde que si se añade tal dispositivo, sus requerimientos de mantenimiento también se deben analizar.

Las consecuencias en la seguridad o en el ambiente también se pueden reducir eliminando las amenazas materiales de un proceso, o incluso por el abandono total de un proceso peligroso. En esencia, si el nivel de riesgo asociado con cualquier modo de falla se considera como intolerable, MCC nos obliga tanto a prevenir la ocurrencia del modo de falla como a verificar que el proceso sea

seguro. La alternativa es aceptar las condiciones que se conocen como inseguras o que contaminan el ambiente. Esto ya no es aceptable en la mayoría de las industrias.

14.1.2 FALLAS OCULTAS — En el caso de falla ocultas, se puede reducir el riesgo de una falla múltiple realizando cualquiera de los siguientes cambios de especificaciones:

a. Hacer la falla oculta evidente adicionando otro dispositivo: Ciertas fallas ocultas se pueden hacer evidentes por adición de otro dispositivo (tales como "Equipo de Prueba Incorporado," o EPI), que atraiga la atención del operador hacia la falla oculta. Se necesita un cuidado especial en esta área, debido a que las fallas de funciones extras instaladas con este propósito, también tienden a ser ocultas. Si se adicionan muchas categorías de protección, se hace excesivamente difícil –si no imposible- definir tareas de detección de fallas sensatas. Un enfoque más efectivo consiste en sustituir una función evidente para la función oculta, como se explica en el siguiente párrafo.
b. Sustituir una función protectora cuya falla es evidente para la función oculta: En la mayoría de los casos esto significa sustituir un dispositivo o sistema cuya falla es genuinamente evidente por uno cuya falla no es evidente.
c. Sustituir el dispositivo protector existente por un dispositivo más confiable (pero todavía oculto): Un dispositivo más confiable (en otras palabras, uno que tenga un tiempo promedio entre fallas más alto) facultará a la organización para lograr uno de tres objetivos:

1. Reducir la probabilidad de una falla múltiple sin cambiar los intervalos de las tareas de detección de fallas. Esto incrementa el nivel de protección.
2. Incrementar el intervalo entre tareas sin cambiar la probabilidad de una falla múltiple. Esto reduce los requerimientos de los recursos.
3. Reducir la probabilidad de la falla múltiple e incrementar los intervalos de tarea.

d. Duplicar la función oculta: Si no es posible encontrar un solo dispositivo protector que tenga un TPEF suficiente alto para entregar el nivel de protección deseado, aún es posible lograr cualquiera de los tres objetivos anteriores por la duplicación (o incluso triplicación) de la función oculta. Sin embargo; tenga presente que la función de todos estos dispositivos podría aún necesitar estar sujeta a un análisis con la finalidad de identificar una política de manejo de fallas adecuada.
e. Hacer lo posible para ejecutar una tarea (por ejemplo por la mejora del acceso al dispositivo o sistema protector).

f. Reducir la tasa de demanda de la función protegida: Dependiendo de los modos de falla que lleven a la demanda de protección, al cambio de la configuración física del sistema y/o al cambio en la capacidad del operador o mantenedor de tal manera que el sistema probablemente requiera la protección con menos frecuencia.

14.1.3 CONSECUENCIAS OPERACIONALES Y NO OPERACIONALES— Para algunos modos de falla con consecuencias operacionales y no operacionales, la política de manejo de fallas más costo-efectiva podría ser cambiar el sistema para reducir los costos totales. Para lograr esto, los cambios deben buscar:

a. Reducir el número de veces que ocurre el modo de falla, o posiblemente eliminarlo del todo, de nuevo, por el robustecimiento de algún elemento del sistema, o por hacerlo más confiable.
b. Reducir o eliminar las consecuencias del modo de falla (por ejemplo, proveyendo una capacidad auxiliar).
c. Realizar una tarea programada costo-efectiva (por ejemplo, haciendo un componente más accesible).

Note que en este caso, las modificaciones deben ser costo-justificadas, considerando que son compulsivas si no hay ninguna otra manera de reducir el riesgo de fallas que tengan consecuencias en la seguridad o el ambiente a un nivel tolerable.

14.2 Operar hasta Fallar— "Cualquier política de operar hasta fallar seleccionada debe satisfacer los criterios apropiados como sigue:

a. En casos donde la falla es oculta y no hay ninguna tarea programada apropiada, la falla múltiple asociada no debe tener consecuencias en la seguridad ni el ambiente.
b. En casos donde la falla es evidente y no hay ninguna tarea programada apropiada, el modo de falla asociado no debe tener consecuencias en la seguridad ni en el ambiente." (SAE JA1011, Sección 5.8.2)

En el caso de algunas fallas que son evidentes y que no afectan la seguridad o el ambiente, o que son ocultas y la falla múltiple no afecta la seguridad o el ambiente, la política de manejo de falla más costo-efectiva podría ser simplemente permitir que las fallas ocurran y entonces tomar los pasos apropiados para repararlas. En otras palabras, "operar hasta fallar" es válido sólo si:

a. No se puede encontrar una tarea programada conveniente para una falla oculta, y la falla múltiple asociada no tiene consecuencias en la seguridad o el ambiente, y
b. No se puede encontrar una tarea proactiva costo-efectiva para fallas con consecuencias operacionales y no operacionales.

15. Selección de la Política de Manejo de Fallas

15.1 Dos Aproximaciones — Las últimas tres preguntas en el proceso MCC, discutidas en las secciones de la 10 a la 14 de esta guía, vinculan la selección de las políticas de manejo de fallas adecuadas para cada modo de falla identificado en el AMEF. Se pueden utilizar dos aproximaciones distintas para seleccionar las políticas de manejo de fallas. La primera es una aproximación rigurosa y la segunda es una aproximación de diagrama de decisión.

La aproximación rigurosa es más completa y produce una política de manejo de fallas totalmente costo-optimizada para tratar con cada modo de falla en el AMEF. Los diagramas de decisión son populares ya que son más rápidos y más económicos que la aproximación rigurosa. Sin embargo; cualquier enfoque de diagrama de decisión debe direccionar totalmente las consecuencias en la seguridad y en el ambiente de cada modo de falla. También se debe tener presente que el uso de diagramas de decisiones introduce un elemento de sub-optimización al proceso de selección de la política de manejo de fallas, desde el punto de vista del costo.

Note que cuando se aplican estas aproximaciones, la mayoría de las decisiones se deben hacer en ausencia de datos completos. Esto puede llevar a la tentación de confiar excesivamente en la "lógica predefinida", en que las decisiones se hacen automáticamente si los datos comprensivos no se encuentran disponibles rápidamente. Sin embargo; la aplicación de tal lógica puede llevar a decisiones incorrectas, especialmente en la evaluación de las consecuencias. En la práctica, la visión se debe dirigir, si es posible, hacia las repercusiones de tolerar demasiada incertidumbre, entonces las acciones deben girar en torno al cambio de las consecuencias del modo de falla – antes que contar con las decisiones predefinidas.

15.2 Aproximación Rigurosa— La aproximación rigurosa para la selección de la política de manejo de fallas requiere que los usuarios, al evaluar las consecuencias económicas y en la seguridad/ambiente de cada modo de falla, consideren todas las opciones de políticas de manejo de fallas técnicamente factibles que se puedan aplicar a cada modo de falla, y seleccionar una política de manejo de fallas que se ajuste más efectivamente tanto a las consecuencias económicas como a las consecuencias en la seguridad/ambiente. Este enfoque se aplica en las siguientes fases:

a. Separar las fallas evidentes de las fallas ocultas.
b. Para cada falla evidente:

1. Establecer la probabilidad real de que el modo de falla pueda dañar o matar a alguien.
2. Establecer la probabilidad tolerable de que el modo de falla pueda dañar o matar a alguien.
3. Establecer la probabilidad real de que el modo de falla pueda violar un estándar o una regulación ambiental.
4. Establecer la probabilidad tolerable de que el modo de falla pueda violar ese estándar o regulación.

5. Establecer las consecuencias operacionales y no operacionales totales del modo de falla.
6. En el caso de modos de falla que puedan tener consecuencias en la seguridad o en el ambiente, y en los que la probabilidad real de incurrir en estas consecuencias es mayor que la probabilidad tolerable, la identificación de todas las políticas de manejo de fallas podría reducir la probabilidad a un nivel tolerable.

7. Identificar todas las políticas de manejo de fallas (si existen) que puedan ser menos costosas que las consecuencias económicas del modo de falla cuando se comparan en el mismo período de tiempo.
8. Seleccionar la política de manejo de fallas que se ajuste más costo-efectivamente a las consecuencias económicas y en la seguridad/ambiente del modo de falla.

c. Para cada falla oculta:

1. Establecer la probabilidad real que la falla múltiple asociada pueda dañar o matar a alguien.
2. Establecer la probabilidad tolerable de que la falla múltiple pueda dañar o matar a alguien.
3. Establecer la probabilidad real de que la falla múltiple pueda violar un estándar o una regulación ambiental.
4. Establecer la probabilidad tolerable de que la falla múltiple pueda violar ese estándar o regulación.
5. Establecer las consecuencias operacionales y no operacionales totales del modo de falla y de la falla múltiple asociada.
6. En el caso de fallas múltiples que puedan tener consecuencias en la seguridad o en el ambiente, y en las que la probabilidad real de incurrir en estas consecuencias es mayor que la probabilidad tolerable, la identificación de todas las políticas de manejo de fallas podrían reducir la probabilidad de la falla múltiple a un nivel tolerable.
7. Identificar todas las políticas de manejo de fallas (si existen) que podrían ser menos costosas que las consecuencias económicas del modo de falla y de la falla múltiple combinadas cuando se comparan en el mismo período de tiempo.
8. Seleccionar la política de manejo de fallas que se ajuste más costo-efectivamente a las consecuencias económicas y en la seguridad/ambiente del modo de falla y de la falla múltiple.

15.3 Aproximación del Diagrama de Decisión— Todas las aproximaciones hacia el MCC de diagrama de decisión que cumplen con SAE JA1011 están basadas en la suposición de que las consecuencias en la seguridad/ambiente deben estar previamente ajustadas con las consecuencias económicas. Otra suposición fundada en la mayoría de estos diagramas es que algunas categorías de las políticas de manejo de fallas siempre son más costo-efectivas que otras.

Estas dos suposiciones se utilizan para establecer las jerarquías en las cuales los usuarios están alentados a seleccionar una política de manejo de fallas desde la primera categoría en la jerarquía que se considere técnicamente factible y que valga la pena hacer. Las suposiciones claves que se hacen durante el establecimiento de tales jerarquías se discutirán en los párrafos siguientes.

NOTA— A lo largo de esta sección, "falla" se refiere al modo de falla o a una falla múltiple.

15.3.1 JERARQUÍA DE CONSECUENCIAS— Toda aproximación hacia el MCC de diagrama de decisión válida asume que si una política de manejo de fallas trata satisfactoriamente con una falla que tiene consecuencias en la seguridad o en el ambiente, entonces tratará satisfactoriamente con las consecuencias económicas (operacionales y no operacionales) de esta falla. En la mayoría de los casos, esta suposición es válida, pero no es verdadera en todos los casos.

El resultado de esta suposición es que estos diagramas de decisión para MCC válidos son construidos de tal manera que si se consideran intolerables las consecuencias en la seguridad o en el ambiente, entonces los usuarios están obligados a encontrar una política de manejo de fallas que reduzca las consecuencias en la seguridad o en el ambiente a un nivel tolerable sin considerar las consecuencias económicas de la falla. Esta aproximación es inherentemente conservadora, con esto se asegura que las consecuencias en la seguridad y en el ambiente de cada falla son tratadas con propiedad. Como resultado, esto lleva a un programa de mantenimiento bueno ambientalmente y seguro que contiene un pequeño número de políticas de manejo de fallas que son más costosas de lo que necesitan ser.

15.3.2 JERARQUÍA DE POLÍTICAS— Dos suposiciones claves se incorporan al diseño de la mayoría de los diagramas de decisión para MCC. La primera suposición es que algunas categorías de política de manejo de fallas son inherentemente más costo-efectivas que otras. La segunda suposición es que algunas son inherentemente más conservadoras que otras. Si un diagrama de decisión utiliza una aproximación jerárquica para la selección de la política, las siguientes jerarquías reflejan con más precisión estas suposiciones:

a. Para modos de falla evidentes que puedan afectar la seguridad o el ambiente, las políticas de manejo de fallas se consideran en el siguiente orden: tareas basadas en condición, tareas de desincorporación/restauración programadas, combinación de tareas (usualmente basadas en condición y desincorporación programada), cambio de especificaciones.

b. Para modos de falla evidentes que no puedan afectar la seguridad o el ambiente, las políticas de manejo de fallas se consideran en el siguiente orden: tareas basadas en condición, tareas de desincorporación/restauración programadas, mantenimiento no programado, cambio de especificaciones.

c. Para modos de falla ocultos en los que la falla múltiple pueda afectar la seguridad o el ambiente, las políticas de manejo de fallas se consideran en el siguiente orden: tareas basadas en condición, tareas de desincorporación/restauración programada, detección de fallas, mantenimiento no programado, cambio de especificaciones.

d. Para modos de falla oculta en los que la falla múltiple no pueda afectar la seguridad o el ambiente, las políticas de manejo de fallas se consideran en el siguiente orden: tareas basadas en condición, tareas de desincorporación/restauración programadas, detección de fallas, mantenimiento no programado, cambio de especificaciones.

Las razones para direccionar las políticas de manejo de fallas en esa secuencia se discuten en los siguientes párrafos.

15.3.2.1 Tareas Basadas en Condición— Las tareas basadas en condición se consideran en primer lugar en el proceso de selección de tareas, por las siguientes razones:

a. Se pueden desarrollar casi siempre sin mover el activo desde su posición de instalación y normalmente mientras está en operación, así ellas pocas veces interfieren con las operaciones.

b. Normalmente son más fáciles de organizar.

c. Ellas identifican las condiciones de las fallas potenciales específicas para que las acciones correctivas estén claramente definidas antes de que comience el trabajo. Esto reduce la cantidad de trabajos de reparación a efectuar, y permite que sean realizadas más rápidamente.

d. Por la identificación del equipo en el punto de falla potencial, permiten comprender casi toda su vida útil.

15.3.2.2 *Tareas de Desincorporación Programada y Restauración Programada*— Si no se puede encontrar una tarea basada en condición conveniente para una falla en particular, la próxima opción es una tareas de desincorporación programada y restauración programada. Las desventajas de la restauración programada y de la desincorporación programada son estas:

a. En casi todos los casos, sólo se pueden hacer cuando los elementos están parados y (normalmente) se envían al taller, así las tareas casi siempre afectan las operaciones de alguna manera;
b. La longevidad límite aplica a todos los elementos, así muchos elementos o componentes que puedan haber sobrevivido a longevidades mayores serán removidos; y
c. Las tareas de restauración involucran talleres de reparación, así ellas generan un trabajo mucho mayor que las tareas basadas en condición.

Como se mencionó en la sección 13.2 de esta guía, la restauración programada y la desincorporación programada normalmente se consideran juntas porque ellas tienen mucho en común. Cuando estas tareas se encuentran en la práctica, comúnmente es obvio que el componente involucrado deba manejarse por una desincorporación programada o una restauración programada. Sin embargo, en el caso de algunos modos de falla, ambas categorías de tareas pueden satisfacer el criterio para la factibilidad técnica. En esos casos, se debe seleccionar la más costo-efectiva de las dos.

15.3.2.3 *Detección de Fallas*— El mantenimiento proactivo exitoso previene las fallas de los elementos, por cuanto la detección de fallas acepta que se invertirá algún tiempo –aunque no demasiado- en un estado de falla. Esto significa que el mantenimiento proactivo es inherentemente más conservador (en otras palabras, más seguro) que la detección de fallas, así esta última sólo se debe especificar si no se encuentra una tarea proactiva más efectiva. Por esta razón, los diagramas de decisión para MCC deben anteponer siempre las tres categorías de tareas proactivas ante la detección de fallas en el proceso de selección de tareas.

15.3.2.4 *Combinación de Tareas*— Hasta este punto, los diagramas de decisión tratan de encontrar una sola tarea que se relacionará apropiadamente con las consecuencias del modo de falla en consideración. Sin embargo; como se mencionó en la sección 13.4, algunas veces ocurre que no se puede encontrar una sola tarea que por si misma reduzca el riesgo de falla a un nivel bajo tolerable. En este punto, podría ser apropiado buscar una combinación de tareas, como se explicó en la sección 13.4. La mayor desventaja de la combinación de tareas es que es inevitablemente más costosa que las tareas solas.

15.3.2.5 *Operar hasta Fallar*— Cuando se evalúa la efectividad de las tareas proactivas concebidas para tratar con los modos de falla que tienen consecuencias económicas, la comparación siempre se hace entre el costo de la tarea y los costos asociados con el modo de falla no anticipado. En estos casos, sólo se seleccionan las tareas que reducen los costos totales de la falla. Si no se puede encontrar tal tarea, permitir que el modo de falla ocurra sería menos costoso que el mantenimiento proactivo, y de ahora en adelante se debe seleccionar el permitir que ocurra el modo de falla (operar hasta fallar) como una política de manejo de fallas apropiada. (Si los costos de permitir que ocurra el modo de falla se consideran aún muy excesivos, entonces la única opción es implementar un cambio de especificaciones como se discutió previamente). Como se explicó en la sección 14.2 de esta guía, operar hasta fallar no es una opción para modos de falla solos o para fallas múltiples que tengan consecuencias en la seguridad o el ambiente.

15.3.2.6 *Cambio de Especificaciones*— La confiabilidad, el diseño, y el mantenimiento están relacionados intrínsecamente. Esto puede llevar a la tentación de realizar cambios de especificaciones a los

sistemas existentes (especialmente modificaciones a equipos) antes de considerar sus requerimientos de mantenimiento. De hecho, todos los diagramas de decisión para MCC consideran el mantenimiento antes de los cambios de especificaciones por cuatro razones, como sigue:

a. La mayoría de las modificaciones toman de seis meses a tres años desde su concepción hasta su cometido, dependiendo del costo y de la complejidad del nuevo diseño. Por otro lado, la persona de mantenimiento debe mantener el equipo tal como existe hoy, no como lo que debería estar allí o lo que podría estar allí algún tiempo en el futuro. Así que las realidades de hoy deben tratarse con anterioridad a los cambios de diseño de mañana.
b. La mayoría de las organizaciones encaran muchos más las oportunidades de mejora de diseño deseables que son física y económicamente factibles. Por enfocarse en las consecuencias de la falla, el MCC es de gran ayuda en el desarrollo de un conjunto racional de prioridades para estos proyectos, especialmente porque separa los que son esenciales de aquellos que son meramente deseables. Claramente, tales prioridades sólo se pueden establecer después que se ha completado la revisión.
c. Los cambios de especificaciones son costosos. Estos incluyen el costo de desarrollar la nueva idea (el diseño de una nueva máquina, la incorporación de un nuevo procedimiento operacional), el costo de llevar la idea a la realidad (la fabricación de una parte nueva, la compra de una nueva máquina, la compilación de un nuevo programa de entrenamiento). Adicionalmente se incurre en costos indirectos si el equipo o las personas tienen que estar fuera de servicio mientas se está implementando el cambio.

d. Existe un riesgo de que el cambio fallará en la eliminación o incluso en el alivio del problema que está supuesto a resolver. En algunos casos, puede incluso crear más problemas.

Por todas estas razones las aproximaciones de los diagramas de decisión hacia el MCC buscan obtener el desempeño deseado de cualquier sistema en su configuración actual antes de intentar cambiar la configuración del sistema.

15.3.3 APLICANDO LA APROXIMACIÓN DEL DIAGRAMA DE DECISIÓN HACIA EL MCC— Alrededor del mundo se utilizan muchos diagramas de decisión diferentes. Algunos de estos diagramas están conformados muy cercanamente a los principios discutidos previamente, mientras que otros divergen sustancialmente (en algunos casos, a tal magnitud que no cumplen en absoluto con SAE JA011). Algunos de estos diagramas son propios, mientras que otros son del dominio público. Por estas razones, esta Guía no transmite ningún diagrama de decisión específico. Sin embargo; sólo con propósitos ilustrativos, en las Figuras 16 y 17 se dan dos ejemplos de diagramas de decisión que cumplen con los principios discutidos en 15.3.1 y 15.3.2. (Note los comentarios en 18.6, acerca de la necesidad de entrenamiento antes de utilizar cualquier diagrama de decisión).

Estos diagramas de decisión se aplican típicamente en tres fases, como sigue:

a. Trabajando desde el principio, utilice el diagrama de decisión para determinar las categorías de consecuencias que aplican al modo de falla en consideración.
b. Luego trabajando la columna de consecuencias relevantes, utilice el criterio de factibilidad técnica discutido en las Secciones de la 12 a la 14 de esta guía para evaluar la factibilidad técnica de las posibles políticas de manejo de fallas en cada categoría.

c. Seleccione una política de manejo de fallas desde la primera categoría que satisfaga el criterio de factibilidad técnica y que tratará efectivamente con las consecuencias del modo de falla en consideración.

SAE JA1012 Issued JAN2002 (Traducción)

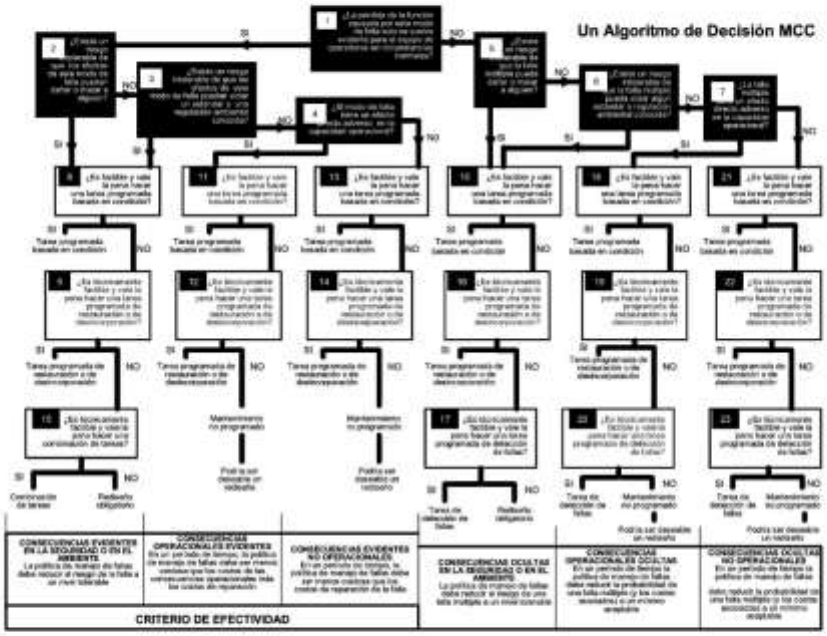


FIGURA 16— PRIMER EJEMPLO DE DIAGRAMA DE DECISIÓN

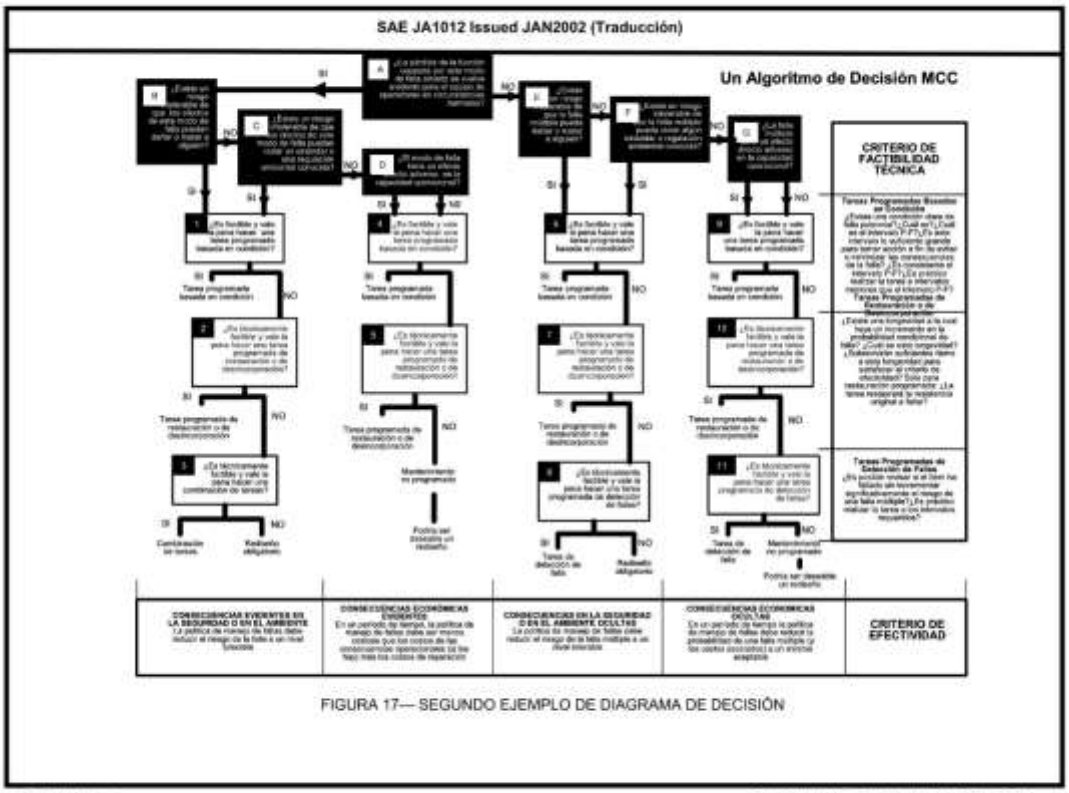


FIGURA 17— SEGUNDO EJEMPLO DE DIAGRAMA DE DECISIÓN

16. ***Un Programa de Vida*** — "Este documento reconoce que (a) Muchos de los datos usados en el análisis inicial son inherentemente imprecisos, y que los datos más precisos estarán disponibles en el tiempo, (b) La manera en la cual el activo es utilizado, junto a las expectativas de desempeño asociadas, también cambiarán con el tiempo, y (c) La tecnología de mantenimiento continúa evolucionando. De modo que, una revisión periódica es necesaria si el programa de manejo de activos del MCC derivado es asegurar que los activos continúen cumpliendo las expectativas funcionales actuales de sus dueños y usuarios." (SAE JA10111, sección 5.9.1)

"Por consiguiente cualquier proceso MCC debe proveer una revisión periódica de las decisiones y al mismo tiempo, de la información utilizada para soportar dichas decisiones. El proceso suele conducir de tal manera que una revisión debe asegurar que todas las siete preguntas de la sección 5 continúen siendo respondidas satisfactoriamente y en una manera consistente con el criterio que parte desde 5.1 hasta 5.8. [de SAE JA1011]." (SAE JA1011, sección 5.9.2)

Para asegurarse de que las siete preguntas de SAE JA1011 "continúan siendo respondidas satisfactoriamente y de manera consistente con el criterio que parte" de este documento, se deben responder preguntas específicas, incluyendo las siguientes:

a. Contexto operacional: ¿El contexto operacional del equipo ha cambiado suficiente para reemplazar alguna información registrada o las decisiones realizadas durante el intervalo inicial? (Por ejemplo, un cambio de una operación una guardia/5-días a una operación 24-horas/7-días, o viceversa.)
b. Expectativas operacionales: ¿Las expectativas operacionales han cambiado lo suficiente de modo que sea necesario revisar los estándares operacionales que fueron definidos durante el análisis inicial?
c. Modos de falla: Desde el análisis previo, ¿Ha resultado que algunos modos de falla existentes fuesen registrados incorrectamente, o han ocurrido algunos modos de falla no anticipados que deberían ser registrados?
d. Efectos de falla: ¿Algo debe ser agregado o cambiado en las descripciones de los efectos de falla? (Esto aplica especialmente a la evidencia de falla y los estimados de tiempos fuera de servicio.)
e. Consecuencias de falla: ¿Ha ocurrido algo que lleve a cualquier persona a creer que las consecuencias de falla se deben evaluar de una manera diferente? (Las posibilidades aquí incluyen cambios en las regulaciones ambientales, y el cambio en la percepción de los niveles tolerables de riesgo.)

f. Políticas de manejo de fallas: ¿Existe alguna razón para creer que alguna de las políticas de manejo de fallas seleccionada inicialmente ya no es apropiada?
g. Tareas programadas: ¿Alguien se ha concientizado de un método de desarrollo de una tarea programada que pueda ser superior a una de estas seleccionadas previamente? (en la mayoría de los casos, "superior" significa "más costo-efectiva", pero también podría significar técnicamente superior.)

h. Intervalos de tarea: ¿Existe alguna evidencia que sugiera que se deba cambiar la frecuencia de alguna tarea?
i. Ejecución de tarea: ¿Existe alguna razón que sugiera que una tarea o tareas se deban realizar por algún otro tipo de persona diferente a la seleccionada originalmente?
j. Modificaciones del activo: ¿El activo se ha modificado de modo que agregue o substraiga algunas funciones o modos de falla, o que cambie la adecuación de alguna política de manejo de fallas? (Se debe prestar atención especial a los sistemas de control y de protección.)

17. ***Formulación Matemática y Estadística***— "Cualquier formulación estadística y matemática que se pueda utilizar en la aplicación del proceso (especialmente aquellos usados para computar los intervalos de algunas tareas) debe ser lógicamente robusta, y debe estar disponible y ser aprobada por el dueño o usuario del activo." (SAE JA1011, sección 5.10.1)

Los procesos MCC algunas veces utilizan formulaciones matemáticas y estadísticas, especialmente para computar intervalos de tareas. Por ejemplo, esta Guía describe la formulación matemática que puede ser utilizada para computar los intervalos a los cuales se deben desarrollar las tareas de detección de fallas, tal como las fórmulas que se encuentran en las secciones 13.3.3.3 y 13.3.3.4.

Además, algunas veces los datos están disponibles de modo que permiten usar varias formulaciones matemáticas para refinar las frecuencias a las cuales se deben desarrollar los diferentes tipos de tareas proactivas.

Antes que un proceso MCC que conforme a la SAE JA1011 adopte cualquier formulación matemática y estadística como esta, se deben conocer dos criterios claves: la formulación debe ser lógicamente robusta, y debe estar disponible y ser aprobada por el dueño o usuario del activo.

17.1 **Lógicamente Robusta—** La formulaciones deben ser "lógicamente robustas". Esto significa que deben ser consistentes con la comprensión del comportamiento y el deterioro del equipo que yace en los fundamentos del MCC. En particular, significa que las formulaciones no deben ser hechas bajo suposiciones inapropiadas acerca de los patrones de falla que aplican a modos de falla individuales que puedan afectar el activo en consideración, o acerca de las relaciones entre variables tales como longevidad, TPEF e intervalos P-F.

17.2 **Disponible para el Dueño o Usuario—** Para que la formulación matemática esté "disponible y sea aprobada por el dueño o usuario del activo," se deben encontrar dos condiciones.

Primero, el proveedor de la formulación debe estar disponible para mostrar la fórmula al usuario, demostrando como se derivó y las suposiciones en las cuales está basada, y explicar por qué la fórmula propuesta debe ser utilizada.

Segundo, el usuario o dueño del activo debe comprender lo suficiente acerca de los principios fundamentales del manejo del activo físico de modo que sea capaz de evaluar por sí mismo si la formulación es, de hecho apropiada.

18. ***Consideraciones Adicionales Importantes—*** SAE JA1011 describe el criterio técnico mínimo que cualquier proceso debe cumplir para ser llamado "MCC", cuando se aplica a un activo específico. Para que el MCC sea exitoso, es esencial direccionar los asuntos de gerencia y recursos que se discuten en esta sección de esta guía bajo los siguientes títulos:

a. Priorizar los activos y establecer objetivos.
b. Planificación.
c. Nivel de análisis y límites del activo.
d. Documentación técnica.
e. Organización.
f. Entrenamiento.
g. Rol del software computacional.
h. Recolección de datos.
i. Implementación.

18.1 **Priorizar los Activos y Establecer Objetivos—** Diferentes dueños o usuarios seleccionarán la aplicación de MCC a diferentes activos. Uno puede seleccionar aplicar MCC a todos los activos. Otro podría seleccionar aplicar ahora MCC a algunos activos o partes de activos, esperando aplicar MCC al resto eventualmente. Estas decisiones dependerán en gran medida de las metas del análisis MCC, así como también de la importancia de estas metas en relación a otras iniciativas que estén siendo aspiradas por el dueño o usuario del activo.

Los dueños o usuarios deben fijar prioridades entre los activos conscientemente, usando los criterios que sean apropiados para sus organizaciones. Al fijar estas prioridades, note que la aplicación del MCC toma tiempo y cuesta dinero.

Como resultado, antes de emplear recursos en una escala significativa, cualquier organización debe establecer los beneficios que espera en retorno de los recursos invertidos. En la práctica, el MCC realza la efectividad total de las organizaciones que lo utilizan, en una amplia variedad de áreas, incluyendo:

a. Seguridad.
b. Integridad ambiental.
c. Desempeño operacional.
d. Costo-efectividad.
e. Calidad del producto y servicio al consumidor.
f. Eficiencia del mantenimiento.
g. Motivación individual.
h. Trabajo en equipo.
i. Producción del personal.
j. Auditorías.

No sólo se deben direccionar estos puntos cuando se analiza la priorización, también se deben considerar en detalle con respecto a cada análisis. Específicamente, antes de embarcarse en un análisis MCC de algún activo o sistema específico es esencial establecer la magnitud con la cual se espera que cada análisis mejore el desempeño en alguna o en todas las áreas mencionadas anteriormente, y para rastrear cuán bien los mejora con respecto al costo total del análisis.

18.2 Planificación— Antes de analizar cada activo, se debe idear un plan comprensivo que direccione los siguientes puntos:

a. Decida exactamente cuales equipos serán cubiertos por el análisis, como se discutirá en 18.3
b. Establezca los objetivos del análisis (cuantificando en donde sea posible), y acuerde cuando y como se medirán sus logros.
c. Estime cuánto tiempo se requerirá para realizar el análisis (horas hombre y tiempo transcurrido).
d. Decida el conjunto de habilidades que estarán involucradas en el proceso de análisis, y entonces identifique los participantes específicos por nombre.
e. Prescriba el entrenamiento apropiado en MCC para aquellos que no lo hayan recibido, como se discute más adelante.
f. Establezca las facilidades físicas apropiadas para que se realice el proceso.
g. Decida cuando y por quienes será revisado y aprobado el análisis. Esto trae consigo la seguridad de que el proceso MCC se ha aplicado correctamente, y que la información y las decisiones son aceptables para el dueño/usuario del activo.
h. Decida cuando, donde y por quienes serán implementadas las recomendaciones.
i. Instituya que el análisis se mantenga al día, como se discutió en la Sección 16 de esta guía.

18.3 Nivel de Análisis y Límites del Activo— Antes de analizar cualquier activo, es necesario establecer el nivel al cual será desarrollado el análisis (a veces llamado el nivel estipulado), y definir los límites del sistema.

Si se ha descrito una jerarquía de activos extensa y se ha tomado la decisión de analizar un activo particular a un nivel determinado, entonces el "sistema" normalmente de manera automática abarca todos los activos por debajo de este sistema en la jerarquía de activos. (Si no existe una jerarquía de activos, seleccionar una es útil pero no esencial.) Las únicas excepciones son subsistemas que se

hayan juzgado tan insignificantes que no serán analizados en absoluto, o subsistemas muy complejos que se coloquen a un lado para un análisis separado.

El nivel de análisis es el nivel estipulado de los equipos físicos a los que se les hará el análisis. Aunque no existe el mejor nivel para desarrollar un análisis MCC, normalmente existe un nivel óptimo (este nivel puede variar de sistema a sistema dentro de la jerarquía del activo). El nivel óptimo del análisis dependerá de varios factores. Estos factores incluyen, pero no se limitan a, si se realizará un análisis más completo o más limitado, si existe algún análisis previo y el nivel al cual fue desarrollado, y la complejidad del elemento al que se dirige.

Se debe ser cuidadoso al seleccionar el nivel del análisis que permitirá identificar las funciones de un modo razonablemente fácil de comprender, permitirá la identificación de un número manejable de modos de falla por función, y permitirá evaluar las consecuencias de falla sin dificultad. Un análisis a un nivel demasiado bajo incurrirá en trabajo extra de análisis y/o de tareas de producción, y también hará difícil la identificación de las funciones y los estándares de operación asociados, y hará mucho más difícil evaluar las consecuencias rápidamente. Un análisis a un nivel muy alto requiere la identificación de demasiados modos de falla por función, lo cual incrementa la probabilidad de que muchos modos de falla se pasarán por alto completamente. La opción lógica, entonces, es seleccionar un nivel intermedio al cual sea posible identificar un número manejable de modos de falla y evaluar sus consecuencias sensiblemente.

Cuando se aplica MCC a algún activo o sistema, por supuesto es importante definir claramente donde el "sistema" se comenzará a analizar y donde se terminará de analizar. Se debe tener cuidado para asegurar que los activos o componentes que se encuentran en los límites del análisis no "caigan entre las grietas". Esto aplica especialmente a elementos como válvulas y bridas.

18.4 Documentación Técnica— Antes de analizar algún sistema o subsistema en particular, es extremadamente útil obtener cualquier documentación que pueda estar disponible y que describa la configuración física del activo, sus componentes mayores y cómo trabaja.

Dependiendo de la complejidad del sistema y de cuan bien es entendido por quienes desarrollan el análisis, estos documentos podrían incluir algunos o todos los siguientes:

a. Planos de arreglo generales.
b. Diagramas de tuberías y de cableado, los cuales incluyen diagramas de proceso y de instrumentación.
c. Manuales de operación y mantenimiento.
d. Documentos de soporte de diseño.
e. Lista de partes.

Cuando no está disponible esta documentación, normalmente se puede obtener de los diseñadores del sistema y/o vendedores/fabricantes. La existencia de esta documentación normalmente debe ser suficiente para completar un análisis MCC. Si no existe una documentación específica (especialmente planos), sólo se deben crear si hacen que el análisis sea significativamente más exacto, y/o más fácil de completar.

18.5 Organización— Cualquier entidad que decida aplicar MCC a algún activo debe partir de una organización que incorpore los siguientes elementos:

a. Una persona o grupo de personas quienes se responsabilizarán de que el proceso MCC será utilizado cumpliendo con la norma SAE JA1011, y de que se establezcan planes claros acerca de qué será analizado (vea la sección 18.1), cuando será analizado y por quienes.
b. Una persona o grupo de personas quienes serán responsables de asegurar que los activos seleccionados sean analizados como se planificó.

c. Una persona o grupo de personas que lideren la aplicación del proceso.
d. Una persona que estará disponible para proveer la información y asistir en la toma de decisiones (representantes del dueño/usuario del activo, operadores, mantenedores, representantes de los diseñadores o vendedores (si es necesario), etc.).
e. Las facilidades físicas requeridas para llevar a cabo el análisis (oficinas, salones de reuniones, equipos de computación y software, etc.)

18.6 Entrenamiento— El proceso MCC incluye muchos conceptos que son nuevos para la mayoría de las personas, así, cualquier persona que desee aplicar MCC necesita aprender que significan estos conceptos, y como se acoplan juntos, antes de que puedan utilizar el proceso de manera segura.

Como resultado, se deben definir claramente los requerimientos de entrenamiento. Esto es esencial para asegurar que el proceso MCC se aplique correctamente, y que los resultados se puedan ver confiadamente. La cantidad de entrenamiento que requieren los miembros del equipo MCC variará de acuerdo a sus roles.

Para las personas que manejarán la aplicación del proceso, quienes participan como proveedores de la información, o quienes estarán involucrados en la implementación de los resultados de cada análisis, normalmente bastará con un curso formal de no menos de tres días de duración.

Para las personas que liderarán la aplicación del proceso ("analistas" o "facilitadores"), se requiere un entrenamiento más extenso. Este entrenamiento debe tomar la forma de mentor en sitio, quizás complementado por un entrenamiento formal extenso, hasta que el aprendiz sea competente en todas las habilidades requeridas.

18.7 Rol del Software Computacional— Durante un análisis MCC el hecho de almacenar la información recolectada y las decisiones tomadas en una base de datos computarizada le brinda mayor rapidez. De hecho, si se analizarán un gran número de activos, utilizar una computadora con este propósito es casi esencial. Un computador también se puede usar para asistir en lo siguiente:

a. Clasificar las tareas propuestas por intervalo y habilidades fijadas.
b. Revisar y refinar los análisis en la medida que se aprende y que cambia el contexto operacional.
c. Asistir con el desarrollo de cálculos estadísticos y matemáticos más complejos.
d. Generar una variedad de otro tipo de reportes (modos de falla por categoría de consecuencia, tareas por categoría de tareas, y así sucesivamente.)

El uso inapropiado de un computador para manejar el proceso podría tener una fuerte influencia negativa en la percepción del MCC. El énfasis exagerado en un computador significa que el MCC comience a ser visto como un ejercicio mecánico en la construcción de una base de datos, antes que como una exploración de las necesidades reales del activo en revisión.

18.8 Recolección de los Datos— Cuando se aplica MCC a algún activo en particular, existen cincos tipos de datos históricos que juegan un papel importante:

a. Datos históricos de las fallas, como se discutió en la sección 8.4.
b. Datos históricos del desempeño del activo, y los costos de operación y mantenimiento asociados.
c. Datos históricos del desarrollo del mantenimiento programado.
d. Tareas de mantenimiento programadas existentes, como se discutió en la sección 8.4.
e. Datos de otras cosas tales como consecuencias de falla, las maneras en las cuales el activo se degrada con el tiempo, y así sucesivamente.

En la mayoría de los casos los datos son generados, capturados, y registrados por los dueños/usuarios del activo, aunque en algunos casos los datos suplementarios pueden ser proporcionados por vendedores/fabricantes o usuarios de equipos similares. Para mantener estos datos actualizados, los sistemas se deben disponer para registrar todos estos tipos de datos, especialmente todos los modos de falla que realmente ocurren en la práctica. (Nótese que tales sistemas de registro deben hacer énfasis tanto en las causas de las fallas funcionales, y en las consecuencias asociadas (tales como el tiempo fuera de servicio del equipo), como en las acciones tomadas para repararlas.

En algunos casos, especialmente con sistemas complejos y arriesgados que involucran cantidades sustanciales de nueva tecnología, simplemente no existen los datos adecuados acerca de qué modos podrían ocurrir y con que frecuencia. En situaciones en las cuales las consecuencias de tal incertidumbre no se puede tolerar, se debe considerar seriamente el cambio de las consecuencias (en otras palabras, reconfigurando el sistema, o la manera en la cual es operado, de tal modo que las consecuencias de tal incertidumbre se puedan reducir a un nivel tolerable).

18.9 **Implementación—** Una vez que se ha completado un análisis MCC (y subsecuentes actualizaciones), se deben implementar los resultados. La implementación exitosa requiere la atención cuidadosa de cinco pasos claves:

a. Auditoría MCC: Toda recomendación debe ser aprobada formalmente (auditada) por los gerentes con responsabilidad sobre los activos. Esta auditoría se debe llevar a cabo en el contexto del MCC.
b. Descripciones de trabajos programados: las tareas derivadas del MCC finalmente se deben describir con suficiente detalle para asegurar que la tarea se hará correctamente por cualquier persona que la ejecute.
c. Cambio de especificaciones: todos los cambios de especificaciones recomendados se deben describir con suficiente detalle para asegurar que serán implementados correctamente.
d. Planificación y ejecución de las tareas programadas: Las tareas deben ser acopladas en bloques de trabajo ejecutables. Entonces se deben tomar los pasos para asegurar que estos bloques de trabajo sean desarrollados por las personas correctas en el momento justo y de la manera adecuada, y para asegurar que cualquier trabajo levantado desde las tareas se trate apropiadamente. Esto requerirá un sistema de programación y de planificación apropiado.

19. Notas

19.1 **Palabras Claves—** mantenimiento basado en condición, mantenimiento predictivo, mantenimiento preventivo, mantenimiento proactivo, MCC, mantenimiento centrado en confiabilidad, mantenimiento programado.

PREPARADO POR EL SUBCOMITÉ MCC SAE G-11 DEL
COMITÉ DE SOPORTABILIDAD SAE G-11

SAE JA1012 Issued JAN2002 (Traducción)

Razón— No aplicable.

Relación de la Norma SAE a la Norma ISO— No aplicable.

Aplicación— SAE JA1012 ("A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard") amplifica y clarifica cada uno de los criterios claves listados en SAE JA1011 ("Evaluation Criteria for RCM Programs"), y resume puntos adicionales que se deben dirigir para aplicar MCC exitosamente.

Sección de Referencias

SAE JA1011—Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes

Nowlan, F. Stanley, and Howard F. Heap, "Reliability-Centered Maintenance," Department of Defense, Washington, D.C. 1978. Report Number AD-A066579.

NAVAIR 00-25-403— "Guidelines for the Naval Aviation Reliability Centered Maintenance Process" (U.S. Naval Air Systems Command)

MIL-P-24534— "Planned Maintenance System: Development of Maintenance Requirement Cards, Maintenance Index Pages, and Associated Documentation" (U.S. Naval Sea Systems Command)

Moubray, John, "Reliability-Centered Maintenance," 1997

NES 45— Naval Engineering Standard 45, "Requirements for the Application of Reliability-Centred Maintenance Techniques to HM Ships, Royal Fleet Auxiliaries and other Naval Auxiliary Vessels" (Restricted-Commercial)

Anderson, Ronald T. and Neri, Lewis, "Reliability-Centered Maintenance: Management and Engineering Methods," Elsevier Applied Science, London and New York, 1990

Andrews, J.D. and Moss, T.R., "Reliability and Risk Assessment," Longman, Harlow, Essex (UK), 1993

Blanchard, B.S., Verma, D., and Peterson, E.L., "Maintainability: A Key to Effective Serviceability and Maintenance Management," John Wiley and Sons, New York, 1995

Cox, S.J. and Tait, N.R.S., "Reliability, Safety and Risk Management," Butterworth Heinemann, Oxford, 1991

"Dependability Management— Part 3-11: Application Guide— Reliability Centred Maintenance," International Electrotechnical Commission, Geneva, Document No. 56/651/FDIS.

Jones, Richard B., "Risk-Based Management: A Reliability-Centered Approach," Gulf Publishing Company, Houston, TX, 1995

MSG-3, "Maintenance Program Development Document," Air transport Association, Washington DC, Revision 2 1993

"Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis," Department of Defense, Washington, DC, Military Standard MIL-DTD. 1629A, Notice 2, 1984

"Reliability Centered Maintenance for Aircraft, Engines, and Equipment, United States Air Force," MIL-STD-1843 (NOTE: Cancelled without Replacement, August 1995)

"Reliability-Centered Maintenance Requirements for Naval Aircraft, Weapons Systems and Support Equipment," U.S. Naval Air Systems Command, MIL-HDBK 2173(AS). (NOTE: canceled without replacement, August 2001.)

Smith, Anthony M., "Reliability Centered Maintenance," McGraw-Hill, New York, 1993

Zwingelstein, G., "Reliability Centered Maintenance, A Practical Guide for Implementation," Hermés,Paris, 1996

Desarrollado por el Subcomité MCC SAE G11

Patrocinado por el Comité de Soportabildad SAE G11