

Análisis de la confiabilidad del sistema de molienda en una planta concentradora, basado en la criticidad

RECIBIDO: 20/03/14 ACEPTADO: 30/03/14

ESTHER BERGER VIDAL*
 LUIS MIGUEL NÚÑEZ RAMÍREZ**
 ANWAR JULIO YARÍN ACHACHAGUA***

RESUMEN

El objetivo del presente estudio es presentar el proceso de molienda en la planta concentradora de minerales de una empresa minera, describiendo las configuraciones de sus subprocesos y realizando el cálculo de la confiabilidad del sistema de molienda basado en la criticidad. Asimismo, se calculan los principales indicadores de mantenimiento por cada equipo del área de molienda. Los resultados facilitan a la empresa tomar decisiones de mantenimiento aplicando el monitoreo permanente de sus equipos de molienda, que son de uso cotidiano de los operarios, estableciendo la criticidad de cualquier equipo en general respecto a la ocurrencia de falla.

Palabras clave: criticidad, confiabilidad, mantenimiento

ANALYSIS OF SYSTEM RELIABILITY GRINDING IN A CONCENTRATOR, BASED ON THE CRITICALITY

ABSTRACT

ABSTRACT

The aim of this study is to present the process of grinding the ore concentrator plant a mining company, describing the settings of your threads and performing the calculation of the milling system reliability based on the criticality. Also, the main indicators are calculated for each team maintenance grinding area. The results enable companies maintenance decisions applying the constant monitoring of its milling equipment, which are of daily use of operators, establishing the criticality of any team in general regarding the occurrence of failure.

Keywords: criticality, maintenance, reliability

1. INTRODUCCIÓN

El estudio tiene por finalidad presentar los modelos utilizados en el proceso de molienda en la planta concentradora de minerales de una empresa minera y aplicar la simulación de diversos escenarios posibles para hallar la confiabilidad del sistema de molienda. Se determinan los indicadores de mantenimiento para los equipos de molienda del área de producción de la empresa.

La compañía es un complejo minero polimetálico ubicado en los Andes del Perú, que produce concentrados de cobre y zinc, y, como subproductos concentrados de molibdeno, plata y plomo. Para obtener los diferentes concentrados cuenta con una planta concentradora ubicada a más de

4,000 m.s.n.m., la cual procesa diversos tipos de minerales clasificados según los niveles de Cu, Zn, Bi y Pb. En la siguiente tabla presentamos los 8 tipos de minerales o campañas que dispone:

Tabla 1. Tipos de Campañas de Cobre

MINERALES DE COBRE
M1 : Cobre bajo bismuto
M2 : Cobre muy alto bismuto
M3 : Cobre alto bismuto
M4 : Cobre con bornita

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Tipos de Campaña de Zinc

MINERALES DE ZINC
M3 : Cobre-Zinc bajo bismuto
M4: Cobre -Zinc alto bismuto
M2 : Cobre-Zinc muy alto bismuto
M5 : Cobre-Zinc con bornita

Fuente: Elaboración propia.

* Master en Optimización. Profesora en la Facultad de Ciencias Matemáticas, Departamento de Investigación Operativa de la UNMSM. E-mail: esther_berger_v@yahoo.es

** Master en Matemática. Profesor en la Facultad de Ciencias Matemáticas, Departamento de Matemática de la UNMSM. E-mail: lnuneztassarel27@yahoo.com

*** Master en Gerencia del Mantenimiento. Profesor en la Escuela de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica-Energía de la Universidad Nacional del Callao. E-mail: anwayarin@gmail.com

Conocer la campaña permitirá tener una mejor gestión del mantenimiento, porque se logrará identificar qué equipos de la planta concentradora no se encuentran en funcionamiento, de esta manera se programará actividades correspondientes a su mantenimiento preventivo aprovechando la disponibilidad para su intervención.

Procesos claves de la empresa minera y concentradora:

Dentro del proceso de producción de concentrados de Cu y Zn, se lleva a cabo el siguiente flujo de procesos:

Tabla 3. Procesos Claves de la empresa minera y concentradora

OPERACIÓN en MINA	CONCENTRADO	PUERTO PUNTA LOBITOS
Minado	Molienda	Filtrado
Carguío y acarreo	Flotación	Almacenamiento en puerto
Chancadora primaria	Presa de relaves	Embarque de mineral
Traslado en faja	Minero ducto	
Apilamiento		

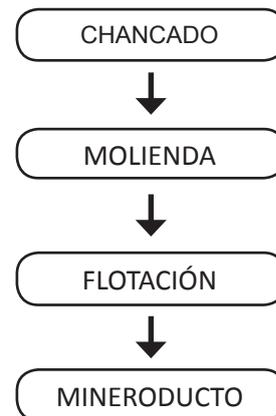
Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.



Fuente: Elaboración propia. Proceso de Extracción y Exportación.

Figura 2. Principales Procesos Claves



Fuente: Elaboración propia.

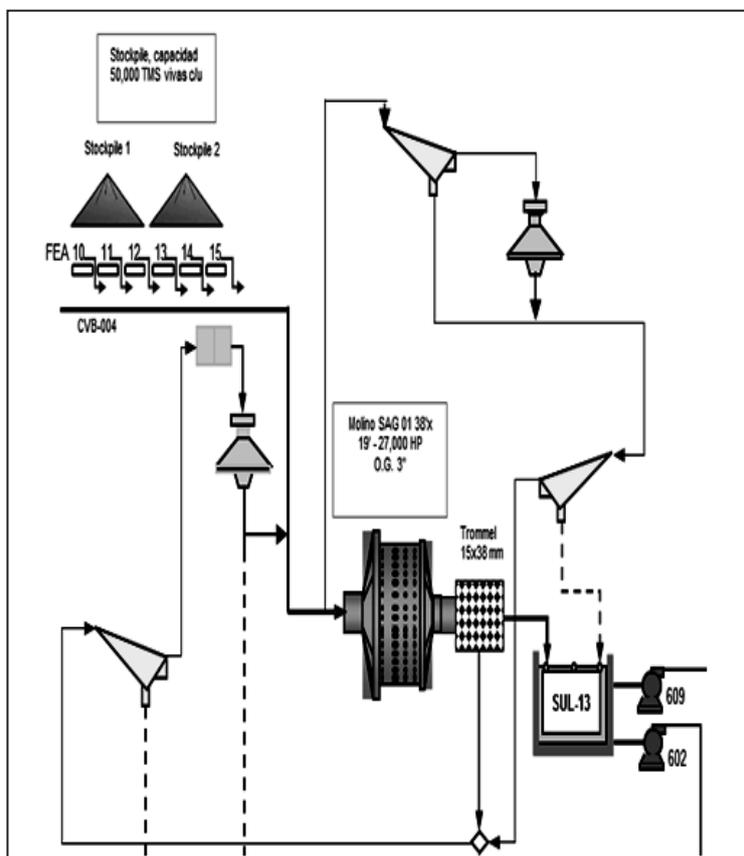
2. PROCESO DE MOLIENDA

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MOLIENDA
A. Zona de Acumulación de Material
Se cuenta con 2 Stackers :
El primer Stacker tiene la capacidad de formar 2 pilas:
Pila A (Bajo Bismuto-Cu): campañas M1-M3-M5-M6
Pila B (Alto Bismuto-Zn): campañas M2-M2A, M4,M4A
El segundo Stacker:
Sólo forma pila C, así, esta pila abarca a cualquier campaña.
Las pilas A y B alimentan a la faja CVB-004 a través de los apronfeeder :
Pila A: Utiliza los apronfeeder FEA-10, FEA-11, FEA-12.
Pila B: Utiliza los apronfeeder FEA-13, FEA-14, FEA-15.
Las pilas C alimentan a la faja CVB-626 a través de los apronfeeder :
Pila C: Utiliza los apronfeeder FEA-35, FEA-36, FEA-37.
B. Circuito SAG 01
La faja CVB-004 alimenta directamente al molino SAG 01. Se realiza la molienda a través de bolas de acero de 5 pulgadas ingresadas en el molino, también se suministra agua y reactivos para acondicionar el material para la fase de flotación (PAX-Cianuro-Cal, entre otros).
Realizada la molienda en el SAG 01 se envía el material al cajón SUL-013, este cajón cuenta con 2 bombas (Por confiabilidad solo 1 trabaja, la otra es de redundancia o Stand By) esta bomba envía la pulpa al distribuidor radial que corresponda:

PPS 609 → Envía al distribuidor STP 673 PPS 602 → Envía al distribuidor STP 674
C. Circuito SAG 02
La faja CVB-626 alimenta a la faja CVB 628 esta alimenta directamente al SAG 2, se utiliza el mismo mecanismo de molienda que el SAG 01 y se envía la pulpa al SUL-014, este cajón también cuenta con 2 bombas (por confiabilidad sólo una trabaja siendo la otra de redundancia o stand by). Esta bomba envía la pulpa al distribuidor radial que corresponda: PPS 600 → Envía al distribuidor STP 673 PPS 601 → Envía al distribuidor STP 674
D. Distribuidores Radiales
Los distribuidores radiales son dos: STP 673 y STP 674 (por confiabilidad sólo uno trabaja, la otra es de redundancia o Stand By). Este distribuidor radial envía a los cuatro cajones SUL que alimentarán a los cuatro nidos de ciclones (cada nido de ciclón cuenta con 13 ciclones). La distribución es la siguiente: Cajón SUL-01 → utiliza PPS-612 para alimentar al nido de ciclones 1

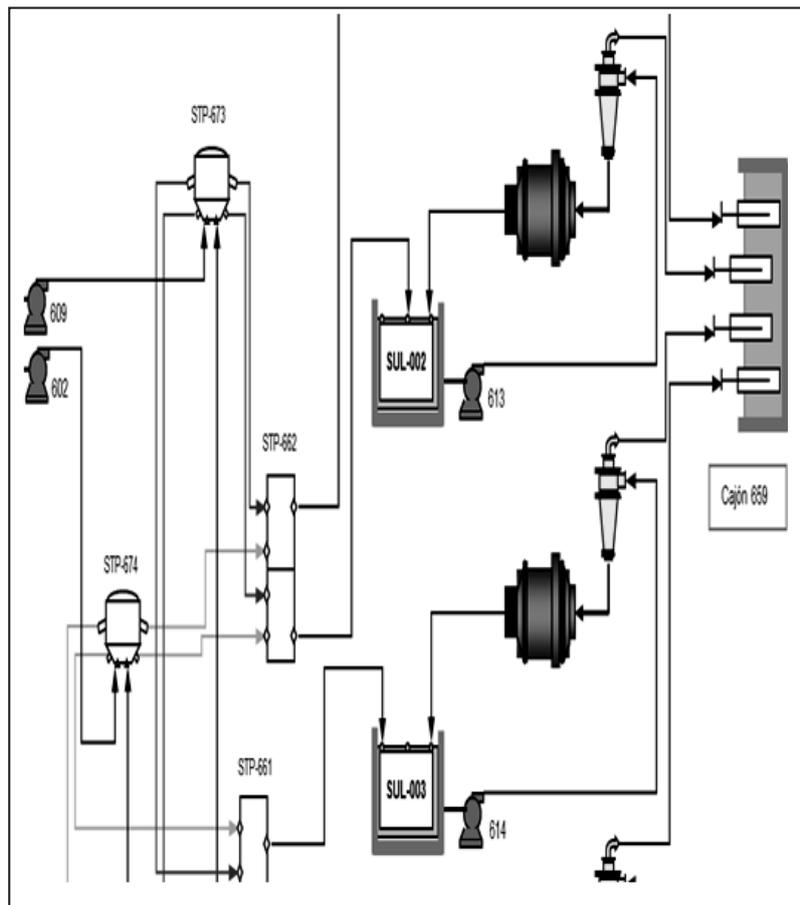
Cajón SUL-02 → Utiliza PPS-613 para alimentar al nido de ciclones 2 Cajón SUL-03 → Utiliza PPS-614 para alimentar al nido de ciclones 3 Cajón SUL-04 → Utiliza PPS-611 para alimentar al nido de ciclones 4
E. Nido de Ciclones
La función del nido de ciclones es clasificar el material. Material fino: Es enviado a la zona de flotación. Material grueso: Es ingresado al molino de bolas correspondiente. EL molino de bolas realiza el proceso de molienda con bolas de acero de 2 y 3 pulgadas de diámetro para obtener una menor granometría, terminado el proceso de molienda se envía nuevamente al SUL respectivo: Molino de Bolas MLB 001 → SUL 001 Molino de Bolas MLB 002 → SUL 002 Molino de Bolas MLB 003 → SUL 003 Molino de Bolas MLB 004 → SUL 004 Así, nuevamente las bombas envían la pulpa a los nidos de ciclones para su clasificación, realizándose el proceso en lazo cerrado.

Figura 3. Proceso de molienda 1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Proceso de molienda 2.



Fuente: Elaboración propia.

3. PROBLEMA

No existe en la empresa un proceso que permita identificar y monitorear permanentemente la confiabilidad del sistema de molienda y desarrollar un sistema eficiente de mantenimiento planificado o basado en la confiabilidad.

Por esta razón se plantea lograr los objetivos de:

- Establecer un proceso de identificación y monitoreo permanente de la confiabilidad del sistema de molienda.
- Utilizar el mantenimiento basado en la confiabilidad aplicado al sistema de molienda de la planta concentradora.
- Analizar los resultados del enfoque del mantenimiento basado en la confiabilidad y revisar las ventajas y desventajas que se puedan presentar en su proceso de implementación.

Asimismo, se desea alcanzar la meta de utilizar las herramientas del mantenimiento basado

en la confiabilidad como sistema de gestión del mantenimiento en la planta productora y concentradora.

Un resultado del estudio proporciona una herramienta de cálculo de los principales indicadores de mantenimiento, que permite definir oportunidades de mejora para elevar el nivel de desempeño y eficiencia del área de mantenimiento de la empresa. Se da el primer paso para complementar y mejorar el estudio de la confiabilidad de todos los procesos productivos claves de la empresa.

Asimismo, como resultado del estudio es posible identificar:

- La criticidad de cada equipo del sistema de molienda.
- Hallar el nivel de confiabilidad de cada equipo, basado en el análisis de criticidad.
- Por ser el primer trabajo, representa un piloto para futuros trabajos de análisis de confiabilidad basado en criticidad.

Los beneficiarios son:

- *Operaciones Concentradora*, que tras una gestión basada en la confiabilidad espera aumentar la disponibilidad de todos los equipos críticos de molienda.
- *Mantenimiento Concentradora*, con la optimización de las tareas de mantenimiento, proyectándose a hacer más eficientes sus actividades de mantenimiento preventivo y correctivo.
- *La empresa*, que con el mejoramiento de los niveles de disponibilidad se proyecta hacia una mayor producción y seguridad en las operaciones asociadas a mayores utilidades.

4. MARCO TEÓRICO

Mantenimiento

El mantenimiento es un componente importante del proceso de calidad de los productos y una estrategia para ejercer la competencia con éxito. Es un sistema paralelo y estrechamente ligado al sistema de producción.

Un sistema de producción se considera como un medio que convierte insumos como materias primas y mano de obra, en productos terminados que satisfacen las necesidades de los clientes, pero una salida secundaria es la falla de un equipo que genera una demanda de mantenimiento.

El *sistema de mantenimiento* toma esa demanda como entrada, agrega conocimiento especializado, mano de obra, reparación y *produce como salida un equipo que funciona correctamente y que tiene una capacidad de producción.*

Mientras que un sistema de producción tiene como objetivos maximizar las utilidades satisfaciendo la demanda del mercado, con la más alta calidad y oportunidad, *un sistema de mantenimiento contribuye a alcanzarlos objetivos minimizando los tiempos muertos, mejorando la calidad, aumentando la productividad y la eficacia en el cumplimiento oportuno de los pedidos a los clientes.*

Estrategias de Mantenimiento

Respecto al mantenimiento de equipos, existen diversas estrategias que se aplican individualmente o combinadas: Boreo (2009) [2]

Mantenimiento correctivo, de reparación o por fallas

Se realiza cuando el equipo ha interrumpido su operación por haber perdido su capacidad de trabajo debido a una falla. Es un mantenimiento no

planificado que ocurre cuando no se justifica o no es posible asumir el costo adicional del mantenimiento planificado. Ocurre en los equipos con componentes electrónicos o cuando no se dispone de recursos para remplazo o para mantenimiento preventivo.

Mantenimiento Planificado o Basado en la Confiabilidad, Smith (2007) [5]; Duffua (2009) [3], que comprende:

Mantenimiento preventivo basado en el tiempo o en el uso

Es un mantenimiento planificado para evitar o minimizar la posibilidad de falla en un equipo, con base en el tiempo o en un calendario de mantenimiento, o, se puede basar en el uso del equipo en un horizonte de tiempo.

Mantenimiento Predictivo o Mantenimiento Preventivo Basado en las Condiciones

Es un mantenimiento planificado que se realiza con base en las condiciones del equipo, determinadas mediante la observación de sus factores fundamentales a los que la condición de este afecta.

Mantenimiento de Oportunidad

Se realiza cuando se presenta un hecho que permite realizar un mantenimiento no planificado, por ejemplo, un paro general planificado en la planta de producción para mantenimiento de la planta, un paro fortuito por alguna razón laboral o por falta de energía.

Inspección para la detección de fallas

Se realiza para evaluar la posibilidad de existencia inicial de fallas.

Modificación del Diseño

Se modifica el diseño de un equipo para que alcance un estado adecuado de funcionamiento, implicando su mejora o la expansión de su capacidad.

Reparación General

Es la inspección detallada de todo el equipo y el restablecimiento del funcionamiento de todos sus elementos.

Reemplazo

El reemplazo puede ser planificado de acuerdo a una programación, es una estrategia que se aplica como resultado de una evaluación cuyo resultado indica que es más conveniente desde el punto de vista de los costos, de la calidad de los productos o de la obsolescencia tecnológica, reemplazar que hacer mantenimiento.

Las diferentes estrategias no son excluyentes, la combinación adecuada de estas permite desarrollar una política de mantenimiento óptima para la empresa.

Mantenimiento orientado a la Confiabilidad

Surgió con el objetivo de analizar la eficacia de las reparaciones generales de componentes complejos de los aviones, las cuales se basaban en el tiempo para verificar si se reducía la frecuencia y el costo por fallas. Se llegó a la conclusión que esas reparaciones no afectaban la frecuencia de fallas.

En los equipos complejos la máxima probabilidad condicional de falla ocurre en la edad temprana del equipo, luego, baja a una tasa constante de falla y al final de la vida útil del equipo se incrementa.

Se asume que una reparación general vuelve a cero la edad del equipo y que por lo tanto incrementa la probabilidad de falla.

Una *falla* está relacionada con eventos aleatorios que aceleran el deterioro del equipo, tales como: sobre voltajes, incorrecta lubricación, operación incorrecta.

En este caso, el *mantenimiento preventivo basado en las condiciones* es útil para hacer un seguimiento del funcionamiento del equipo.

El mantenimiento orientado a la confiabilidad analiza el tipo de falla, el efecto que produce la falla y su nivel de gravedad.

Proceso de mantenimiento orientado a la confiabilidad

1. Determinar cuáles son los subsistemas más importantes del equipo.
2. Definir la función esperada del equipo y que tipo funcional de falla puede tener.
3. Especificar las causas de la falla.
4. Especificar los efectos de la falla en una secuencia de eventos: producción, seguridad, ambiente.
5. Determinar el nivel de gravedad de la falla.
6. Usar el tipo de mantenimiento adecuado.
7. Determinar la acción de prevención de falla y su frecuencia de aplicación con base en análisis histórico.
8. Si no existe una acción preventiva, analizar si puede seguir operando hasta que falle.
9. Rediseñar en caso necesario.

Confiabilidad de Sistemas

Es la probabilidad que un sistema cumpla con sus funciones sin fallar, durante un tiempo determinado. Facilita el conocimiento de la relación entre el tiempo de uso del sistema y la pérdida de su capacidad de funcionamiento por el surgimiento de alguna avería que puede producirse al inicio del uso del equipo por problemas en su fabricación o durante su etapa de plena actividad por causas propias de la actividad del equipo o durante la decadencia del equipo por su antigüedad, desgaste u obsolescencia.

5. METODOLOGÍA

Presentamos en modo piloto la metodología de análisis del sistema molienda que se inicia con el Análisis de Criticidad aplicado a los equipos que pertenecen al sistema en mención, teniendo en cuenta lo siguiente: (Moubray (2004) [6].

$$\text{CRITICIDAD} = \text{Frecuencia de Falla} * \text{Consecuencia}$$

Donde:

Consecuencia = ((Nivel de producción x TMRP x Imp. Producción) + Costo de reparación + Impacto en seguridad + Impacto ambiental)

Figura 4. Tipos de criticidad

CRÍTICO
SEMICRÍTICO
NO CRÍTICO

Fuente: Elaboración propia.

Luego se debe elaborar el Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF) basándonos en el diagnóstico de criticidad, para nuestro caso en estudio los motores del sistema de molienda resultaron ser los más críticos.

En el Análisis de Modos y Efectos de Fallas se realiza un desagregado de los componentes de los motores, los cuales se detallan a continuación: estator, rotor y sistemas auxiliares. Amendola (2002) [1].

Asimismo para este análisis se ha tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- Efecto sobre el servicio.
- Valor Técnico Económico.
- Flexibilidad del equipo en el sistema.

- Dependencia Logística.
- Efecto de la falla.

Cabe mencionar que las ponderaciones consideradas en el Análisis de Criticidad de

Equipos están basadas en los criterios de expertos los cuales han realizado consultorías similares en diversas empresas del rubro minero. En este caso en particular se trabajó con la ponderación que se detalla a continuación:

Tabla 4. Ponderaciones consideradas en el Análisis de Criticidad

IMPACTO EN SEGURIDAD		
N°	CRITERIO	PUNTAJE
0	No origina heridas ni lesiones	0
1	Puede ocasionar lesiones o heridas con incapacidad de 1-7 días	2
2	Puede ocasionar lesiones o heridas graves con incapacidad de 8-20 días	4
3	Puede ocasionar lesiones con incapacidad superior a 21 días	6
4	Puede ocasionar incapacidad permanente	8
5	Muerte	10
IMPACTO EN EL MEDIO AMBIENTE		
N°	CRITERIO	PUNTAJE
1	No origina ningún impacto ambiental	0
2	Contaminación ambiental baja, impacto dentro de la planta, ocurrencia accidental	1
3	Contaminación ambiental media, impacto fuera de los límites de la planta, ocurrencia episódica	2
4	Contaminación ambiental alta, fuera de los límites de la planta, ocurrencia continua	3
5	Contaminación ambiental muy alta, fuera de los límites de la planta, ocurrencia continua, incumplimiento legal	4
IMPACTO EN PRODUCCIÓN		
N°	CRITERIO	PUNTAJE
1	No afecta la producción	0
2	1% - 25% de impacto	2
3	26% - 50% de impacto	4
4	51% - 75% de impacto	6
5	La afecta totalmente	8
NIVEL DE PRODUCCIÓN MANEJADO		
N°	CRITERIO	PUNTAJE
1	No afecta a la producción	0
2	Perdidas en la producción entre 1% - 25%	1
3	Perdidas en la producción entre 26% - 50%	2
4	Perdidas en la producción entre 51% - 75%	3
5	Perdidas en la producción entre 76% - 100%	4
TIEMPO PROMEDIO PARA REPARAR (TMR + MTR)		
N°	CRITERIO	PUNTAJE
0	Menor a 20 minutos	1
1	Entre 20 minutos y 1 hora	2
2	Entre 1 hora y 3 horas	3
3	Entre 3 horas y 8 horas	4
4	Entre 8 horas y 16 horas	5
5	Entre 16 horas a más	6
FRECUENCIA DE FALLA		
N°	CRITERIO	PUNTAJE
0	Menores 2 Fallos/año	1
1	Entre 2-4 Fallos/año	2
2	Entre 4-10 Fallos/año	3
3	Entre 10-30 Fallos/año	4
4	Entre 30-50 Fallos/año	5
5	Mayores a 50 Fallos/año	6
COSTOS DE REPARACIÓN		
N°	CRITERIO	PUNTAJE
1	Menos de \$f. 2000	1
2	Entre \$f. 2000 y \$f. 4000	2
3	Entre \$f. 4000 y \$f. 8000	3
4	Entre \$f. 8000 y \$f. 16000	4
5	Mayor a \$f. 16000	5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Análisis de Criticidad de Equipos de la Empresa

ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE EQUIPOS																	
Número de Equipo	Codigo de Equipo	Efecto sobre el Servicio	Valor Técnico Económico	La falla afecta				Probabilidad de Falta	Frecuencia del equipo en el sistema	Dependencia Lógica	Dependencia Trabajo	Facilidad de Reparación	RESULTADOS				
				Al equipo en si	Al Servicio en si	Al Operador	Al Seguridad						Alta	Medio	Baja		
1	310 CMB-001	Reduce 2	Alto 3	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
2	310 CMB-002	Reduce 2	Medio 2	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
3	310 CMB-003	Reduce 2	Medio 2	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
4	310 MLS-001	Reduce 2	Alto 3	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
5	310 MLS-002	Reduce 2	Alto 3	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
6	310 PPS-001	Reduce 2	Medio 2	Si	No	No	Sin Fallo	No	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
7	310 PPS-002	No para 0	Medio 2	Si	No	No	Sin Fallo	No	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
8	310 PPS-003	Reduce 2	Medio 2	Si	No	No	Sin Fallo	No	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
9	310 PPS-004	No para 0	Medio 2	Si	No	No	Sin Fallo	No	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
10	310 PPS-005	Reduce 2	Medio 2	Si	Si	Si	Sin Fallo	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
11	310 PPS-006	Reduce 2	Medio 2	Si	Si	Si	Sin Fallo	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
12	310 PPS-007	Reduce 2	Medio 2	Si	Si	Si	Sin Fallo	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
13	310 PPS-008	Reduce 2	Medio 2	Si	Si	Si	Sin Fallo	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
14	310 MLB-001	Reduce 2	Alto 3	Si	Si	Si	Fallo	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
15	310 MLB-002	Reduce 2	Alto 3	Si	Si	Si	Fallo	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
16	310 MLB-003	Reduce 2	Alto 3	Si	Si	Si	Fallo	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
17	310 MLB-004	Reduce 2	Alto 3	Si	Si	Si	Fallo	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Análisis del Modo de Fallo del Estator

ANÁLISIS DE MODO FALLA DE LOS MOTORES								
Análisis de modos de Fallo de los siguientes Equipos:		310-MLS-001	310-MLS-002	310-MLB-001	310-MLB-002	310-MLB-003	310-MLB-004	
COMPONENTE	SUB-COMPONENTE	FALLA POTENCIAL	MODO DE FALLA	FALLA FUNCIONAL	EFECTOS DE LA FALLA	TAREA PREDICTIVA	TECNOLOGIA PREDICTIVA/FRECUENCIA	
Estator	Transformadores de Potencia de 23 kV - 363V	Aumento de la temperatura del aceite sobre 55°C Aumento de la temperatura del devanado sobre 60°C	Pérdida del nivel de aislamiento de las bobinas	Corto circuito entre fase-fase o fase tierra	Incremento de la corriente	Monitoreo de la corriente a través un transformador de corriente de precisión	Uso de RTDs y red de imagen Térmica	Continuo
					Presencia de gases en el aceite aislante (Dieléctrico) del transformador.	Análisis del aceite dieléctrico	Cromatografía y análisis físico químico del aceite	Semestral
					Incremento de la temperatura en los radiadores	Inspección de la temperatura de los radiadores y del aceite	Uso de termómetro de aceite y Termografía a través de cámara Termográfica Fluke T52	Trimestral
	Cicloconvertidor	Incremento de temperatura del agua de refrigeración del intercambiador de calor	Sobrecalentamiento de los tiristores del cicloconvertidor	Corto circuito de los componentes de los tiristores	Desbalance de corriente entre las fases del estator	Monitoreo de la corriente por fase	Uso de RTDs para protección de desbalance de corriente	Continuo
					Incremento de temperatura de los componentes del cicloconvertidor	Inspección de la temperatura	Fotografía de los tiristores y de las barras del cicloconvertidor	Semestral
					Incremento de la temperatura de las bobinas	Inspección de la temperatura	Uso de RTDs y sensores de temperatura	Continuo
Bobinas del estator	Pérdida de aislamiento de las bobinas	Reducción de la capa de barniz	Corto Circuito entre espiras o Corto Circuito entre espira y tierra	Desbalance de corriente entre las fases del estator	Monitoreo fase a fase de fallas a tierra	Uso de sensores PD de registro de descargas parciales en las bobinas	Continuo	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Análisis del Modo de Falla del Rotor y Sistemas Auxiliares

Rotor	Transformadores de Potencia de 23 kV - 480V	Aumento de la temperatura del aceite sobre 55°C Aumento de la temperatura del devanado sobre 60°C	Pérdida del nivel de aislamiento de las bobinas	Corto circuito entre fase-fase o fase tierra	Incremento de la corriente	Monitoreo de la corriente a través un transformador de corriente de precisión	Uso de RTDs y red de imagen Térmica	Continuo
					Presencia de gases en el aceite aislante (SILCOX) del transformador.	Análisis del aceite dieléctrico	Cromatografía y análisis físico químico del aceite	Semestral
Rotor	Rectificador AC-DC	Incremento de temperatura del agua de refrigeración del intercambiador de calor	Sobrecalentamiento de los tiristores del rectificador	Corto circuito de los componentes de los tiristores	Incremento de la temperatura en los radiadores	Inspección de la temperatura de los radiadores y del aceite	Uso de termómetro de aceite y Termografía a través de cámara Termográfica Fluke T132	Trimestral
					Desbalance de corriente entre las fases del estator	Monitoreo de la corriente por fase	Uso de Fluke para protección de desbalance de corriente	Continuo
					Incremento de temperatura de los componentes del rectificador	Inspección de la temperatura	Transformadores de corriente y de los barras del subestación	Semestral
Anillos rozantes del Rotor	Incremento de la corriente de Arranque en el sistema del estator por compensación del sistema de excitación (Rotor)	Disminución de la corriente en el sistema de excitación por sub-corriente de alimentación.	Falla en el sistema de excitación por sub-corriente de alimentación.	Falla en el sistema de excitación por sub-corriente de alimentación.	Aumento de la corriente de operación del estator	Monitoreo de la corriente de arranque y de operación en el estator.	Uso de transformadores de corriente de precisión	Continuo
					Pérdida de la corriente en los taillas rozantes del rotor	Inspección de los carbonos y portacarbonos del sistema excitación del rotor	Uso de varillas para verificar el tamaño de los carbonos	cuatrimestral
					Sobrecalentamiento por falta de refrigeración	Monitoreo de temperatura en la bobina del estator	Uso de RTDs para monitoreo de temperatura.	Continuo
SISTEMAS AUXILIARES	Sistema de refrigeración	Bajo flujo de aire	Aumento de la temperatura de la bobina del estator por encima de 80°C	Detector del nivel de aislamiento de la bobina del estator	Sobrecalentamiento, desbalance en los rodamientos de los ventiladores (R)	Análisis de vibración de los ventiladores	Uso de sensores, analizadores de vibración y base de datos con software para estudio del nivel de vibraciones	Continuo
					Obstrucción y/o bajo flujo en intercambiador de calor agua/aire lateral del estator	Monitoreo de la temperatura del intercambiador de calor, registro de temperatura de flujo entrante y flujo saliente	Uso de sensores de temperatura para agua y aire	Continuo
					Trip en los motores por sobrecorriente	Monitoreo de corriente de arranque de los motores	Uso de transformadores de corriente de precisión	Continuo
					Aumento de temperatura en el eje del motor	Inspección de la temperatura	Termografía de los componentes mecánicos	Semestral
Sistema de lubricación	Incremento del tiempo de funcionamiento de las bombas para alcanzar los niveles de presión estandar	Aumento de la vibración de los motores y bombas hidráulicos	Falla en los rodamientos	Falla en los rodamientos	Trip en los motores por sobrecorriente	Monitoreo de corriente de arranque de los motores	Uso de transformadores de corriente de precisión	Continuo
					Aumento de temperatura en el eje del motor	Inspección de la temperatura	Termografía de los componentes mecánicos	Semestral
Sistema de frenado	Incremento del tiempo de funcionamiento de las bombas para alcanzar los niveles de presión estandar	Aumento de la vibración de los motores y bombas hidráulicos	Falla en los rodamientos	Falla en los rodamientos	Trip en los motores por sobrecorriente	Monitoreo de corriente de arranque de los motores	Uso de transformadores de corriente de precisión	Continuo
					Aumento de temperatura en el eje del motor	Inspección de la temperatura	Termografía de los componentes mecánicos	Semestral

Fuente: Elaboración propia.

6. CONCLUSIONES

1. Como resultado del Análisis de Criticidad de los Equipos se obtiene que los motores del sistema de molienta son los más críticos.
2. Utilizando el AMEF ha sido posible elaborar una herramienta para la operación y monitoreo de los motores del sistema de molienta, los cuales son usados por los operarios en sus labores cotidianas.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] AMÉNDOLA, L. (2002). Modelos Mixtos de Confiabilidad. DATASTREAM. España: Valencia.

[2] BOREO Carlos. (2009). Mantenimiento Industrial. Ed. Universitat. Córdoba.

[3] DUFFUA Salih; RAOUF A.; DIXON C. John. (2009). Sistemas de Mantenimiento, Planeación y Control. Limusa-Wisley. México.

[4] MOUBRAY, J. (2004). Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. RCM II. USA: Lillington.

[5] SMITH, A. (2007). Reliability Centered Maintenance, McGraw Hill. N.Y.