



**UNIVERSIDAD  
DEL AZUAY**

**Departamento de Posgrado**

**Maestría en Gestión de Mantenimiento**

**Propuesta de mejora del plan de mantenimiento del  
molino vertical de carbón de la industria cementera  
UCEM, Planta Guapán.**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:  
Magister en Gestión de Mantenimiento**

**Autor:**

**Ing. Diego Fernando Padrón Saeteros**

**Director:**

**Ing. Robert Rockwood Iglesias Mgst.**

**CUENCA-ECUADOR**

**2020**

# Propuesta de mejora del plan de mantenimiento del molino vertical de carbón de la industria cementera UCEM, Planta Guapán.

**Diego Fernando Padrón Saeteros.**

*dpadronsaeteros@gmail.com*

## **Resumen-**

En este estudio se presenta un plan de mejora de mantenimiento para un molino vertical de carbón, el cual opera en la cementera UCEM planta Guapán. El plan formulado se basa en la metodología del mantenimiento basado en condición (CBM), a través del cual se logró identificar señales tempranas de fallos en componentes críticos, y así planificar las intervenciones de forma oportuna y planificada.

El estudio contempló la elaboración de una matriz para identificar los equipos y componentes críticos, la cual se estableció en base al análisis de modos de fallo, efectos, y criticidad (AMFEC), el plan de mantenimiento CBM se realizó en base a los lineamiento de la norma ISO 17359, 2011, con el cual se identificaron parámetros de medición y de monitoreo, además se calcularon las frecuencias de adquisición de parámetros para conocer su estado funcional. El análisis se lo realizó en base al registro de fallos existente.

## **Abstract-**

This study presents a maintenance improvement plan for a vertical coal mill, which operates at UCEM cement plant, Guapán. The formulated plan is based on the condition-based maintenance methodology (CBM), through which it was possible to identify early signs of failures in critical components and the interventions were planned in a timely and organized manner.

The study contemplated the development of a matrix to identify critical equipment and components, which were established based on the analysis of failure modes, effects, and criticality (AMFEC). The CBM maintenance plan was carried out based on the guidelines of ISO 17359, 2011, with which measurement and monitoring parameters were identified. In addition, parameter acquisition frequencies were calculated to determine their functional status. The analysis was performed based on the existing fault record.

Ing. Diego Padrón Saeteros  
Author

Ing. Robert Rockwood Iglesias  
Thesis Director

  
UNIVERSIDAD DEL  
AZUAY  
Dpto. Idiomas

  
Translated by  
Ing. Paúl Arpi

***Palabras Clave- CBM, AMFEC, Criticidad, Frecuencia, Inspección, Mantenimiento, fallos.***

## INTRODUCCIÓN

Unión Cementera Nacional (Planta Industrial Guapán) es una empresa que produce y comercializa cemento portland puzolánico, en Sacos de 50 kg, granel y hormigón, teniendo una capacidad productiva nominal de 1100 toneladas de clinker por día 45.8 ton/h utilizados para una producción de 1600 toneladas de cemento por día 66.66 ton/h, la planta está ubicada en la provincia del Cañar en el cantón Azogues, empresa que nació con fondos públicos hasta septiembre del año 2016 donde pasó a ser parte del grupo industrial Gloria del Perú manejándose actualmente como empresa privada.

La inversión de la empresa privada ha llevado a la búsqueda de mejores rendimientos y rentabilidad de la empresa, directamente a la reducción de costos de producción para lo cual una de las principales propuestas fue la de cambiar la matriz energética en la producción de clinker, pasando de utilizar combustible líquido fuel oil # 4 a combustible sólido carbón, para ello se realizó la inversión en un sistema de molienda de carbón con un molino vertical Loesche D 19.20, debido a su gran eficiencia energética y su excelente capacidad de secado.

La tendencia general hacia los molinos verticales se hizo evidente en el momento en que la industria del cemento evolucionó hacia plantas cada vez más grandes y de mayor capacidad de producción. Hoy en día, hornos con capacidades de hasta 10000 ton/día son alimentados por molinos de rodillos. Pruebas realizadas a nivel industrial con un molino grande en una fábrica de cemento han confirmado la posibilidad de un ahorro de energía, con respecto al molino de bolas, del 10-25% en la molienda de clinker para cementos de buena calidad [1]. Sin embargo los costos de mantenimiento de estos molinos son elevados ya

que los elementos de desgaste de los molinos verticales resultan un poco más costosos, en precio por kg, que los correspondientes a los molinos de bolas, sobre todo al moler carbón, cuya abrasividad es muy superior a la del crudo de cemento [1].

Estudios recientes de la eficacia de la gestión de mantenimiento indican que un tercio de cada dólar US por costos de mantenimiento se pierde como resultado de la innecesaria o la forma indebida de llevar a cabo el mantenimiento [2], también una ineficaz gestión de mantenimiento afecta significativamente la capacidad de fabricar productos de calidad que sean competitivos en el mercado mundial. Así las pérdidas de producción, y por calidad de los productos que resultan de la mala o inadecuada gestión de mantenimiento han tenido un impacto dramático en la capacidad de las industrias, llevándolas a buscar alternativas, y a poner en práctica filosofías de mantenimiento más avanzadas, y competir en un mercado global.

Al implementar un plan de mantenimiento basado en condición (CBM) se busca optimizar el plan de mantenimiento preventivo, detectando señales tempranas de un fallo en componentes críticos; e intervenir de forma oportuna y planificada. Según referencia de la norma ISO 17359 el objetivo de todo programa de monitoreo de condición es conocer el actual estado de desempeño de los sistemas en su conjunto, de modo que nos permita establecer si un equipo está en condiciones de seguir operando, de manera segura, eficiente y económica. Las técnicas de monitoreo están dirigidas a la medición de variables físicas no perceptibles a través de los sentidos y que son indicadores de la condición de la máquina, esta información se compara con valores normales, obtenidos de los registros históricos, determinando el estado funcional del componente. (ISO 17359, 2011) [3]. Implementar un plan de mantenimiento basado en condición en el molino vertical para la molienda de carbón de la Unión Cementera Nacional Planta Industrial Guapán, permitirá optimizar los recursos de mantenimiento evitando hacer mantenimientos innecesarios.

# I. METODOLOGÍA APLICADA AL MEJORAMIENTO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PARA UN MOLINO VERTICAL.

## A. Descripción del objeto y condiciones de operación.-

El objeto de este estudio es un molino vertical Loesche con clasificador modelo LM 19.2 D con barrido por aire y un separador dinámico integrado. El principio de trabajo de este tipo de molinos se basa en unos rodillos que se mueven en una trayectoria circular y girando alrededor de su eje, sobre un lecho de material de alimentación situado sobre una placa, pista o bandeja de molienda horizontal giratoria, como se puede apreciar en la figura I.

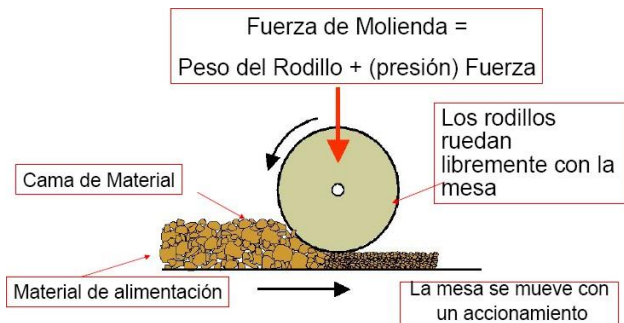


Figura I. Principio de molienda [4]

El principio de funcionamiento de este equipo está basado en separación (clasificador), molienda (molino) y el accionamiento (motor y reductor), el material que se está moliendo en la actualidad es carbón con una granulometría de alimentación de máximo 50mm, en la tabla I se detallan las especificaciones técnicas del molino [4].

Tabla I. Características del sistema de molienda. Elaboración propia [4]

Datos característicos, molino de rodillos LOESCHE	
Año de construcción	2016
Altura	aprox. 8.4 m
Ancho	aprox. 4.1 m

Profundidad	aprox. 4.0 m
Datos de producción, molino de rodillos LOESCHE	
Designación	Valor
Material de molienda	Petcoke
Tamaño de alimentación del material de molienda antes del molino Loesche (mm)	max. 50 mm
Índice Hardgrove (HGI)	≥ 49
Componentes volátiles	max. 10.7 %
Componentes de ceniza	max. 0.35 %
Humedad del material de molienda	max. 10 % H <sub>2</sub> O
Rendimiento	12 ton/h
Finura del producto	≤ 10 % R 0.074 mm
Humedad del producto	≤ 1.0 % H <sub>2</sub> O
Condiciones locales	
País:	Ecuador
Ubicación:	Guapán
Temperatura [° C]:	min -10
Temperatura en el molino [° C]:	min 5
La humedad atmosférica (relativa) [%]:	II. min 60 - 65
Altura sobre el nivel del mar:	2520 metro
Fuente de alimentación:	60 hz 110/440V 4.16KV
Hardgrove Índice *	> 50

## B. Identificación de la Normativa.-

La norma ISO 17359 proporciona las directrices para la monitorización de estado y diagnóstico de máquinas que utilizan parámetros tales como la vibración, la temperatura, la tribología, velocidades de flujo, la contaminación, potencia y velocidad típicamente asociados con los criterios de rendimiento, condición y calidad [3].

En este documento se presenta una visión general de un procedimiento genérico recomendado para ser utilizado en la aplicación de un programa de monitorización de estado, y proporciona más detalles sobre los pasos que deben seguir.

De esta manera la normativa estableció un procedimiento genérico que se utilizó en la aplicación para este estudio, desde la definición de los equipos críticos y sus funciones, AMFEC, identificar parámetros de medición y sus frecuencias, mismo que se describe en el diagrama de flujo Fig. II.

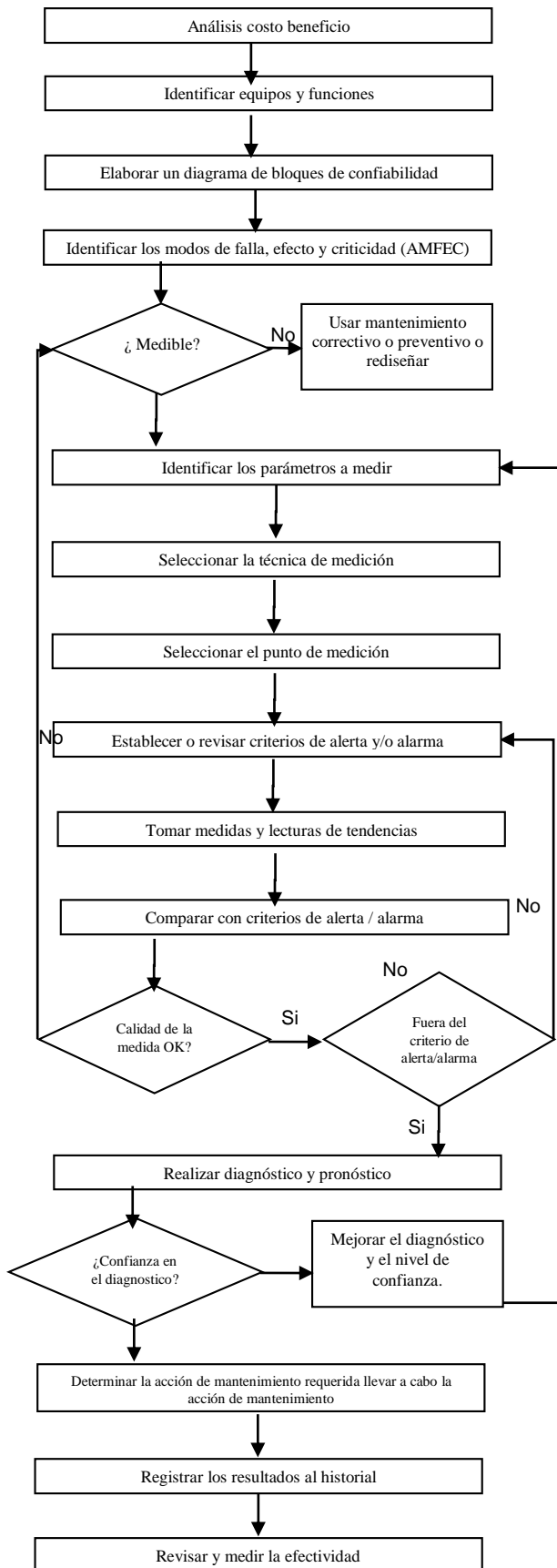


Fig. II Diagrama de flujo procedimiento Monitoreo de Condiciones en base a la norma ISO 17359, 2011 [3]

### C. Identificar equipos críticos del molino Vertical.-

Una evaluación de la criticidad de todas las máquinas se recomienda con el fin de crear una lista priorizada de las máquinas para ser incluido (o no) en el programa de monitorización de estado [3]. De esta manera, se identificaron los equipos críticos del molino vertical Loesche 19.2D mismo que está conformado por 5 sistemas y 22 subsistemas [4] a los cuales se aplicaron los criterios de evaluación para determinar la criticidad de los equipos en la operación del molino siendo estos: Consecuencia del fallo = (Impacto operacional\*redundancia) + Costos de Reparación + Daños al personal + Impacto Ambiental, y la ocurrencia del fallo considerando una frecuencia de fallo  $1 \leq TMEF < 5$ , este análisis nos llevó a determinar que 12 de 22 subsistemas del molino son críticos.

Tabla II Equipos críticos. Elaboración propia [2]

Subsistema/Equipo	
1	Molino vertical Loesche
2	Motor eléctrico de accionamiento principal del molino
3	Motor eléctrico de la bomba del sistema hidráulico principal
4	Reductor principal del molino
5	Bomba hidráulica del sistema hidráulico principal
6	Motor eléctrico del clasificador
7	Reductor del clasificador
8	Clasificador del molino de carbón
9	Motor eléctrico del ventilador del molino ID
10	Ventilador
11	Motor eléctrico del ventilador del booster
12	Ventilador

### D. Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC)

AMFEC (FMECA, por sus siglas en inglés), en combinación con una calificación o jerarquización del grado de criticidad del riesgo, es normalmente empleada para la planeación del mantenimiento, ya que nos permite lograr un entendimiento global del sistema, así como el funcionamiento y la forma en la que pueden presentarse las fallas de los equipos que componen un sistema. Las acciones de recomendación derivadas de un FMECA o AMFEC quedan definidas como acciones o tareas de

mantenimiento.

Lo que permite diseñar una estrategia completa de mantenimiento aplicando criterios de riesgo para cada activo o equipo.

D.1 Análisis funcional.-

Es necesario para poder identificar los modos de falla, ya que se requiere conocer e identificar cuáles son aquellas funciones que el usuario espera o desea que su activo desempeñe. Se requiere identificar tanto la función principal y secundaria.

El primer paso es definir la función principal y falla funcional de cada equipo y a continuación evaluar la severidad, ocurrencia y detectabilidad correspondiente a cada falla funcional [5].

Cabe señalar que para determinar la severidad de cada falla funcional, la norma ISO-14224 identifica las causas de esta falla funcional como “Mecanismos de falla” y que son: Falla mecánica, falla material, falla instrumentación, falla eléctrica.

D.1.1 Equipo Eléctrico.

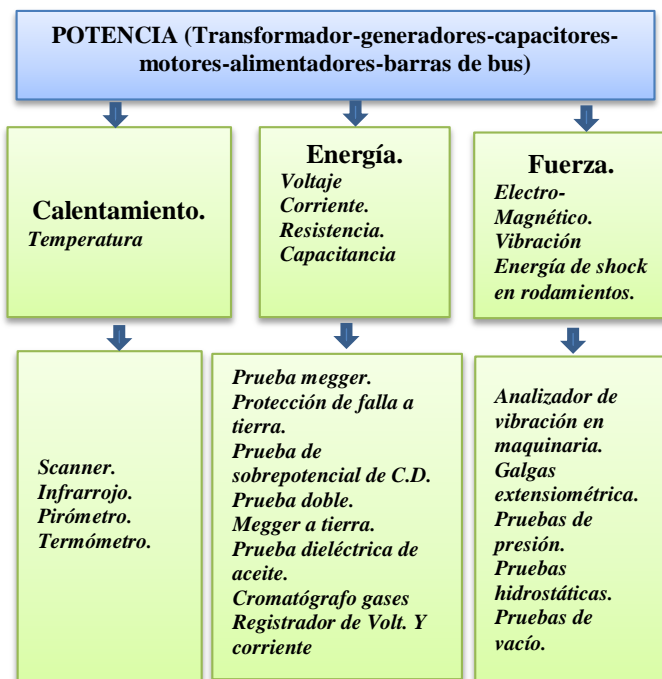
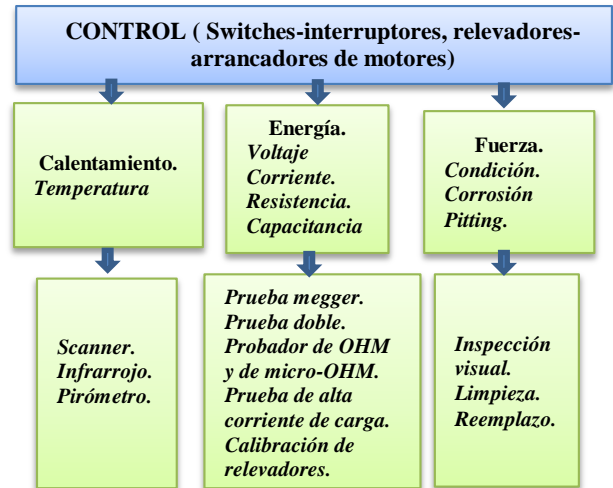


Fig. III Mecanismos de falla equipo eléctrico según la norma ISO-14224:2006



D.1.2 Equipo Mecánico.

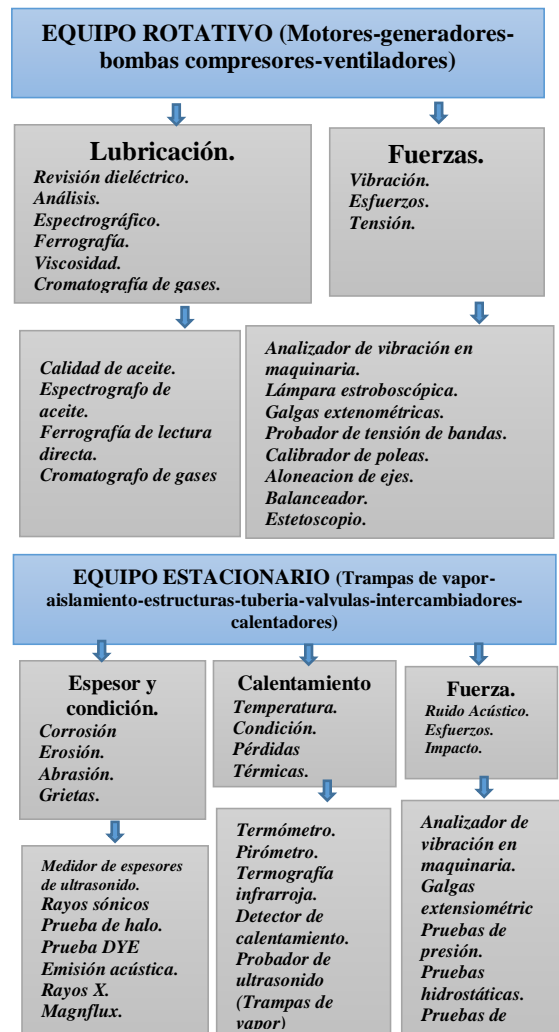


Fig. IV Mecanismos de falla equipo Mecánico según la norma ISO-14224:2006.

El análisis funcional fue realizado tomando como referencia las fichas técnicas de los equipos, manual de operación y lo establecido en la norma ISO 14224:1999 Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. (ISO, 2006) [5].

Tabla III Análisis funcional equipos críticos. Elaboración propia [2]

Análisis funcional	
1)	Triturar el combustible sólido pasando de una granulometría de 50mm a 0.074mm
2)	Transmitir 250 Kw de potencia para girar el reductor del molino a una velocidad máxima de giro de 893 RPM
3)	Transmitir 2.6 Kw de potencia para girar la bomba de lubricación a una velocidad máxima de giro de 1770 RPM
4)	Generar el torque necesario para el girar de la mesa de molienda del molino vertical
5)	Poner en circulación el aceite a un caudal de 7.2 l/min a una presión de 21 Mpa.
6)	Transmitir 15 Kw de potencia para girar el reductor del clasificador a una velocidad máxima de giro de 1777 RPM
7)	Reducir la velocidad de 1777 RPM entrada a una velocidad de salida 216 RPM
8)	Clasificar el material de acuerdo a la granulometría deseada
9)	Transmitir 230 Kw de potencia para girar ventilador a una velocidad máxima de giro de 1195 RPM
10)	Poner en circulación el aire a un caudal de 58421 m3/h a una presión total de 0.925 MPa.
11)	Transmitir 55 Kw de potencia para girar ventilador a una velocidad máxima de giro de 891 RPM
12)	Poner en circulación el aire a un caudal de 45751 m3/h a una presión total de 20 mbar.

### D.2 Identificación de Modos de falla

Un modo de falla se define como la forma en la que un activo pierde la capacidad de desempeñar su función, o en otras palabras, la forma en que un activo falla. A cada modo de falla le corresponde una acción de mitigación o prevención, dentro del proceso de Administración del Riesgo estas acciones pueden ser orientadas a desviaciones del

proceso, factores humanos, etc., o bien, como en este caso, donde el objetivo del FMECA es diseñar un plan de mantenimiento, a cada modo de falla le corresponderá una tarea de mantenimiento [6].

### D.3 Efectos y consecuencias de la falla.

Los efectos de la falla son considerados como la forma en la que la falla se manifiesta, es decir, como se ve perturbado el sistema ante la falla del equipo o activo, ya sea local o en otra parte del sistema, estas manifestaciones pueden ser: aumento / disminución de nivel, mayor / menor temperatura, activación de señales, alarmas o dispositivos de seguridad, entre otras; similarmente, se considera también la sintomatología de la falla, ruido, aumento de vibración, etc.

De esta manera se desarrolló la matriz de análisis de modos de fallo y efecto, para lo cual se tomó de referencia los citados por el fabricante del molino Loesche y que sólo 13 modos de fallo posibles están presentes dentro de los equipos identificados como críticos, sin embargo luego del análisis la probabilidad de fallo de los demás equipos hemos identificado 207 modos de fallo mismos que no solo están presentes en el molino y clasificador, sino en equipos rotativos como los reductores, motores eléctricos, bombas, sistemas de lubricación que por el contexto operativo en la planta cementera pueden fallar de manea especial por contaminación, falta de lubricación entre otros, así en la tabla IV se muestran los modos de falla y efecto de acuerdo a la norma ISO-14224, la cual identifica las causas de esta falla funcional como “Mecanismos de falla” se logró asociar por equipo similar los modos de falla.

Tabla IV Análisis AMFEC. Elaboración propia [3,4,5,6]

Subsistema	Fallos Funcionales	Modos de fallo	Efectos
Molino vertical Loesche	Operación de molienda inestable	Anillo de retención desgastado (Dam ring)	Impacto directo en la altura de la cama Actúa sobre la potencia absorbida y la eficiencia de molienda Actúa sobre las vibraciones del molino
		Excesivo desgaste de las placas de molienda	Impacto directo en la altura de la cama. Producción del molino disminuye y no se puede

			mantener, aun y cuando la presión de trabajo de los rodillos es aumentada.	
		Excesivo desgaste de la llanta de los rodillos	Modificación de los ángulos de corte y presión	
	Altas vibraciones	Granulometría del material de alimentación demasiado grande	Mucho reciclaje hace que la cama sea demasiado fina e inestable. Los tres sensores principales que son útiles para corregir el rendimiento del molino: DP Molino, Vibraciones, Kwh/ton	
	Los rodillos no pueden elevarse lo suficiente durante el arranque del molino	Baja presión de la bomba	Si los rodillos no son elevados hidráulicamente desde la pista de molienda antes de poner en marcha el motor, el molino no puede arrancar en vacío o lleno con un par de arranque bajo.	
		Fuga interna de cilindros		
		Acumulación de material en caja de los roker arm		
		Deterioro de electroválvulas		
	Alta temperatura en los rodillos de molienda	Nivel de aceite en el rodillo demasiado bajo	Fisuras superficiales de las pistas de rodadura. Descascarillados pitting en el rodamiento. Fisuras producidas por alta temperatura	
		El aceite está en mal estado	Desprendimientos de material. Oxidación ataque corrosivo al rodamiento.	
	La resistencia del molino aumenta	Anillo de armadura desgastado (Armour ring)	Ineficiente flujo de gas hacia el centro del molino. Pérdida de protección del cuerpo del molino.	
		Rodillo bloqueado	Perdida de eficiencia del molino.	
Motor eléctrico	El motor no gira	Bobinado roto o quemado	Motor se detiene súbitamente. Calentamiento excesivo. Disminución de la vida útil. Perdidas de energía. Costos extras por operación y mantenimiento.	
		Terminal de conexión del cable eléctrico de alimentación defectuoso		
		Fallo de alimentación del motor (no recibe corriente eléctrica)		
		Eje bloqueado por rodamientos dañados		
	Altas vibraciones	Eje doblado	Calentamiento excesivo. Desgaste y destrucción del equipo. Disminución de la vida útil. Perdidas de energía. Costos extras por operación y mantenimiento.	
		Rodamientos en mal estado		
		Desalineación con el elemento que mueve		
		Desequilibrio en rotor del motor		
		Acoplamiento dañado		
	La protección por exceso de consumo (el "térmico") salta	Soltura mecánica	Motor no arranca. Operación inadecuada de dispositivos de control y protección. Destrucción de componentes electrónicos. Sobre corrientes. Perdidas de energía.	
		Uno de los apoyos del motor no asienta correctamente		
		Térmico mal calibrado		
		Bobinado roto o quemado		
		Rodamientos en mal estado		
	La protección por cortocircuito salta	Desequilibrios entre las fases	Motor no arranca. Variaciones de voltaje y corriente.. Operación inadecuada de dispositivos de control y protección.	
		Sobrecarga		
		Bobinado roto o quemado		
	Ruido excesivo	Terminal defectuoso	Paros indebidos. Altas vibraciones, salta protecciones. Calentamiento excesivo. Destrucción de equipos.	
		Elemento de protección en mal estado		
		Eje doblado		
Rodamientos en mal estado				
Rozamientos entre rotor y estator				
Alta temperatura de la carcasa externa	Rozamientos en el ventilador	Calentamiento excesivo. Destrucción de equipos. Conatos de incendio Pérdidas de energía. Paros indebidos.		
	Mala lubricación de rodamientos (rodamientos "secos")			
	Rodamientos en mal estado			
	Suciedad excesiva en la carcasa			
Reductor principal del molino	Ruido excesivo	Ventilador roto	Alta temperatura Destrucción de partes y piezas Paros inesperados Costos elevados de mantenimiento y reparación	
		Lubricación defectuosa en rodamientos		
		Impurezas en el aceite lubricante		
	Temperatura de trabajo es demasiado alta.	Rodamiento dañado o desgastado.		Alta temperatura Destrucción de equipos
		Engranajes en mal estado		
	Nivel de aceite en el reductor es demasiado bajo.	Alta temperatura Destrucción de partes y piezas Paros inesperados Costos elevados de mantenimiento y reparación		
	Nivel de aceite es demasiado alto. Aceite envejeciendo y/o muy contaminado.			



		Filtros de aceite saturados	
		Taponamiento de boquillas de spray de lubricación	
		Mal funcionamiento del sistema de refrigeración de aceite.	
	Desgaste de la superficie del diente o corrosión.	Mala selección del aceite lubricante o contiene impurezas.	Destrucción de partes y piezas Paros inesperados
		Mala alineación del engranaje	
	Fractura del diente de engranaje.	Sobrecargas.	Destrucción de partes y piezas Paros inesperados
		Desgaste excesivo de los dientes	Altos costos de reparación y mantenimiento.
		Mala alineación del engranaje	
	Fractura del eje de entrada.	Fuerza radial es demasiado grande.	Paros indebidos. Calentamiento excesivo. Destrucción de equipos.
		Trabamiento de eje	
Bomba hidráulica del sistema hidráulico principal	La presión de trabajo baja demasiado rápido	Sellos del pistón en el cilindro hidráulico en mal estado	Fuga de lubricante. Baja la presión.
		Válvulas de retención en mal estado	Restricción del flujo de lubricante.
		Fugas del fluido hidráulico	Desperdicios de lubricante, contaminación del sistema, pérdidas de presión.
		Presencia de aire en el sistema	Desgaste acelerado de partes y piezas por cavitación
		Desgaste interno de la bomba	Baja presión y flujo de lubricante, paros indebidos.
Clasificador del molino de carbón	Clasificador funcionamiento inestable.	Rotor; cuchilla defectuosa	Ineficiente separación del material.
		Desbalanceo del rotor	Excesivo retorno de material fino a la mesa. Material grueso como producto terminado.
	Aumento de temperatura en la unidad de clasificador	Falla en rodamientos	Altas vibraciones.
		Falla unidad de lubricación	Alto consumo de energía. Sobre calentamiento.
Ventilador	Alta vibración	Pegaduras de material en los alabes del ventilador	Desbalanceo. Altas vibraciones.
		Desbalanceo del rotor	Se generan altas vibraciones
		Rodamientos en mal estado	Vibraciones. Paros indebidos
		Desgaste irregular	Vibraciones.
		Desalineamiento	Vibraciones. Desgaste de partes y piezas.
	Bajo caudal de aire	Rotura de alabes	Bajo flujo de aire. Vibraciones. Desgaste de partes y piezas.
		Mal funcionamiento del damper de alimentación y descarga	Flujo de aire reducido.

### **E. Método de seguimiento.**

#### **E.1 Medición técnica.**

Los parámetros medidos pueden ser simples mediciones de valores o valores globales promediados en el tiempo. Para ciertos parámetros, como corriente, tensión, y la vibración, las mediciones simples de valores generales podrían no ser suficiente para mostrar la ocurrencia de un fallo. Técnicas tales como el espectro en el tiempo y medición de fase pueden ser requeridas para revelar cambios causados por fallos [3].

#### **E.2 Viabilidad de la supervisión.**

Diversas técnicas predictivas para el análisis de equipos mecánicos y eléctricos, junto a monitoreos

básicos de condición serán las estrategias que ayudarán a una detección temprana de una falla potencial.

Se debe considerar la posibilidad de adquirir la medición, incluyendo la facilidad de acceso, la complejidad del sistema de adquisición de datos requerida, nivel de procesamiento de datos requerido, los requisitos de seguridad, costo, y si existen sistemas de vigilancia o control que ya se están midiendo parámetros de interés [3].

Se realizó un análisis de los parámetros o variables de operación que ya están siendo monitorizados en línea por equipo.

Sistema Molino vertical Loesche: Se está

monitoreando en línea la temperatura de aire a la entrada y salida del molino, temperatura del motor eléctrico, vibración del molino, potencia del motor eléctrico, la presión diferencial del molino.

Sistema Clasificador del molino de carbón: Se está monitoreando la velocidad del separador, retenido del material.

Sistema ventilador ID (colector). Se está monitoreando la velocidad del VTI (ventilador de tiro inducido), Potencia del VTI, Porcentaje de apertura del Damper.

Sistema del ventilador booster..

Se está monitoreando la velocidad del VTI, Potencia del VTI, Porcentaje de apertura del Damper.

En base a esta información se pudo determinar la técnica de monitoreo a utilizar por modo de fallo que se presenta en cada uno de los equipos, se planteó la matriz de las técnicas apropiadas para la monitorización de estado y diagnóstico de máquinas que utilizan parámetros tales como vibración, temperatura, tribología, velocidades de flujo, la contaminación, potencia y velocidad típicamente asociado con los criterios de rendimiento, condición y calidad, en la tabla V se detalla la acción predictiva relacionada con los equipos, cuyos modos de falla son correspondientes, y que la medición puede ser aplicada independiente de la función propia del equipo [8].

Tabla V Análisis Métodos de medición por equipo. Elaboración propia [3,5,8]

Subsistema	Inspección visual	Vibraciones	Termografía	Ultrasonido	Análisis de aceite	Mediciones desgaste
Molino vertical Loesche						
Motor eléctrico de accionamiento principal del molino						
Motor eléctrico de la bomba del sistema hidráulico principal						
Reductor principal del molino						
Bomba hidráulica del sistema hidráulico principal						
Motor eléctrico del clasificador						
Reductor del clasificador						
Clasificador del molino de carbón						
Motor eléctrico del ventilador del molino ID FAN						
Ventilador						
Motor eléctrico del ventilador del BOOSTER FAN						
Ventilador						

### **F. Intervalos de monitoreo.**

Se debe considerar que el intervalo entre las mediciones y si se requiere el muestreo continuo o periódico. El intervalo de monitorización depende principalmente del tipo de fallo, su tasa de progresión y, por lo tanto, la velocidad de variación de los parámetros relevantes. El tiempo transcurrido entre la detección de fallos y fallo real se conoce como el tiempo de espera a un fallo (LTF) y, particularmente, influye en el intervalo de medición (frecuencia de las mediciones) y el tipo de sistema de vigilancia necesario detectar la síndrome de fallo particular.

Sin embargo, el intervalo de monitoreo también está influenciado por factores tales como las condiciones de operación, costos, y criticidad del equipo [3].

F.1. Criterio analítico estadístico. (técnicas de análisis y modelos probabilísticos de fallos): en este criterio se sintetiza la experiencia que brinda el historial de fallas e intervenciones asociadas con los activos combinado con técnicas de análisis cualitativo de fallos (por ejemplo FMEA/FMECA, HAZOP, árboles de fallo (FTA), técnicas de Análisis Causa Raíz (RCA) y otras de la misma naturaleza [7]

**F.2. Criterio basado en la experiencia.** (de expertos y personal relacionado con el activo): El criterio de determinación de frecuencias de actividades basado en la experiencia del personal relacionado tiene ventajas fundamentales. Se basa en el dominio del particular contexto operacional donde se desenvuelve el activo. Es el criterio que puede combatir con más efectividad a los fallos inducidos por errores de operación y mantenimiento y garantizar las condiciones de ejercicio que respeten las exigencias de seguridad y ambientales. Ha sido la base del éxito del mantenimiento autónomo o auto-mantenimiento (introducido como un pilar del Mantenimiento Productivo Total, TPM) [7].

**F.3. Criterio de evaluación de la condición.** (resultado de diagnósticos): La evaluación de la condición es un criterio principal para determinar y ajustar frecuencias de actividades de mantenimiento. Es la base del mantenimiento basado en condición y fase inviolable para cualquier modelo de pronóstico de mantenimiento predictivo. Sin embargo, no todos los fallos pueden identificarse durante una fase temprana de su desarrollo ni tampoco hay parámetros síntomas de medición efectivos para todos los tipos de fallos, se requiere de personal con competencias particulares, instrumentación y equipos de diagnóstico. Esta última característica hace que sea necesario también evaluar si vale la pena de realizarlo en cada caso [8].

El método más usado para establecer la frecuencia de monitoreo es el intervalo P-F cuando se dispone de datos históricos de fallo, en el caso del molino vertical no se cuenta con datos relevantes de fallo por lo cual se han adoptado técnicas como el modeloprobabilístico de fallos, experiencia y el criterio de evaluación de la condición.

Este estudio probabilístico de falla se aplicó a los equipos críticos del sistema de Molino vertical: Motores eléctricos, reductores, bombas hidráulicas, clasificador y ventiladores, realizando

el cálculo de probabilidad de fallo en un lapso de operación de 5 años, donde identificamos la tasa de fallos para el cálculo de la fiabilidad e infiabilidad del sistema, esto nos ayuda a determinar el momento en que el sistema deja de ser confiable, vemos el cruce de las curvas en el tiempo, esto técnicamente es viable ya que no representaría un riesgo de fallo catastrófico del equipo y que implique paros prolongados por reparación y reposición del equipo, en las tablas y figuras siguientes se detalla el cálculo por equipo.

## II. ANÁLISIS DE RESULTADOS.-

Se desarrolló el análisis de las variables de operación del molino vertical con registros desde enero 2019, para el caso se toma la data del histórico de fallas donde se cuenta con información de cantidad de fallos en un delta de tiempo adicional se tiene el cálculo del MTBF, rata de fallos, fiabilidad del sistema y su infiabilidad tal como se muestra en la Tabla VI y VII.

Tabla VI Fallos registrados en el molino un año de operación. Elaboración propia.

MODOS DE FALLO	TIEMPO PREVISTO DE OPERACIÓN EN OCHO MESES (Horas)	OCURRENCIA DEL FALLO EN UN AÑO DE OPERACIÓN	Σ Hr DE PARADA POR CADA MODO DE FALLO
1.- Los rodillos no pueden elevarse lo suficiente durante el arranque del molino	1936	1	1
2.- Fuga de aceite por cañería gabinete hidráulico		1	4
3.- Fallo de electroválvula gabinete hidráulico		1	8
4.- Descalibración Pfister		2	11
5.- Falla válvula K-006		1	4
6.-Alto amperaje motor molino		1	5

Tabla VII Cálculo de indicadores. Elaboración propia.

Nº	$\lambda$	MTBF (Horas)	MTTR (Horas)	R(t) (%)	F(t) (%)
1	0,000516529	1936	1,0	36,788%	63,21%
2	0,000516529	1936	4,0	36,788%	63,21%
3	0,000516529	1936	8,0	36,788%	63,21%
4	0,001033058	968	5,5	13,534%	86,46%
5	0,000516529	1936	4,0	36,788%	63,21%
6	0,000516529	1936	5,0	36,788%	63,21%
	0,003615702				

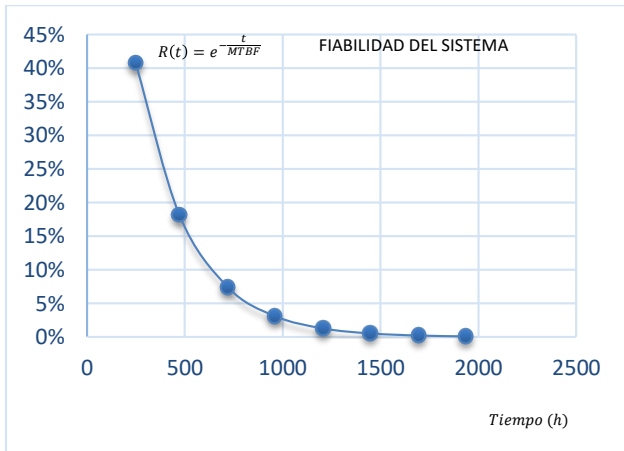


Fig. V Curva de fiabilidad del sistema actual del molino vertical.

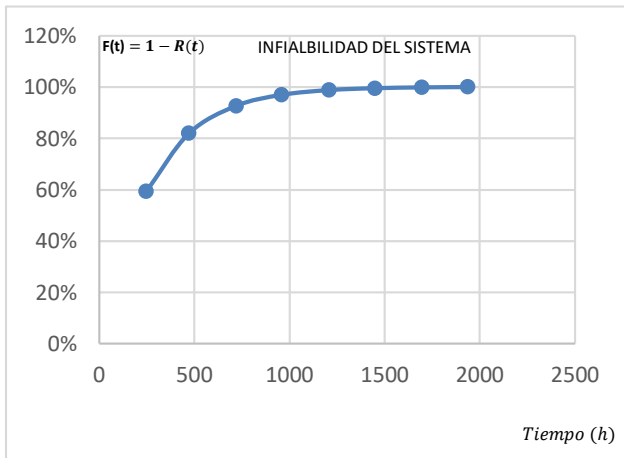


Fig. VI. Curva de in fiabilidad del sistema actual del molino.

Con el análisis de fallos registrados en la operación del molino vertical se observa que dentro de las 500 horas ya el sistema tiene una in fiabilidad sobre el 60%, lo que nos indica que debemos tomar acciones para incrementar la fiabilidad del sistema.

Luego de realizar el estudio probabilístico por equipo podemos indicar que la metodología es técnicamente aplicable, en el caso del molino

vertical la in fiabilidad del sistema está dentro de las 600 horas de operación, en los motores eléctricos aproximadamente 800 horas, en los reductores 900 horas, en el caso de las bombas hidráulicas 1500 horas, clasificador 1700 horas y en los ventiladores 700 horas, lo que relaciona las frecuencias con las que podemos realizar las respectivas mediciones por equipo como se observan en las figuras 7 a la 12, y no poner en riesgo de que estos sufran daños catastróficos sin que hayan sido detectados.

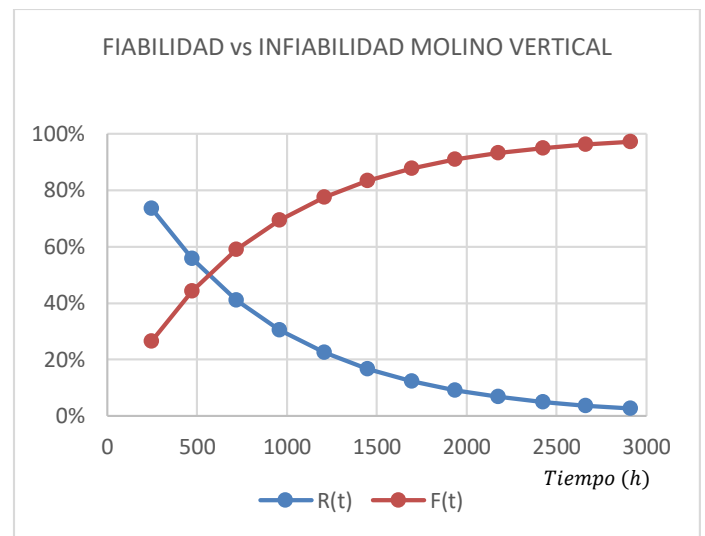


Fig. VII Curva de fiabilidad e in fiabilidad del Molino Vertical. Elaboración propia.

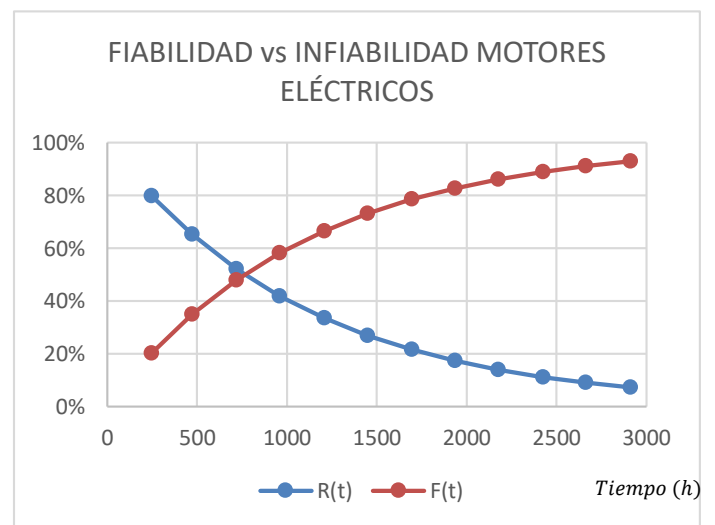


Fig. VIII Curva de fiabilidad e in fiabilidad de los Motores Eléctricos. Elaboración propia.

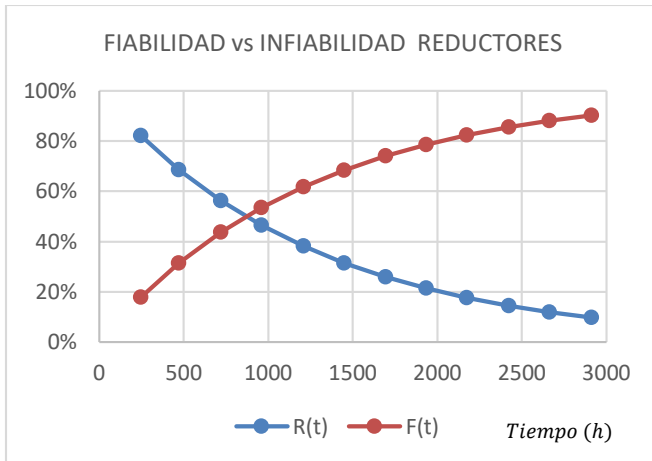


Fig. IX Curva de fiabilidad e infiabilidad de los Reductores. Elaboración propia.

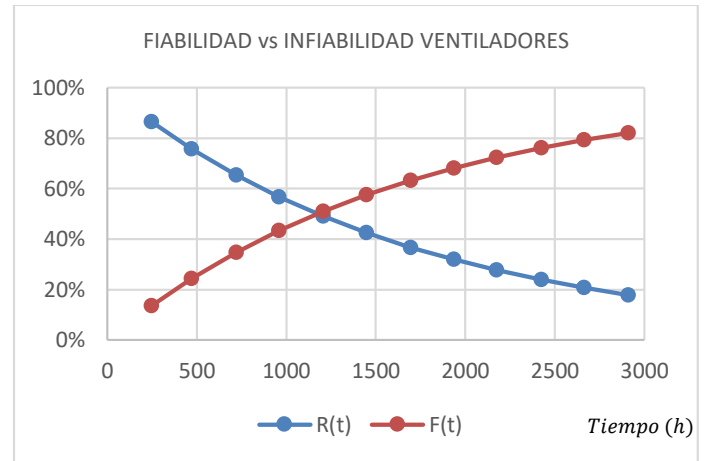


Fig. XII Curva de fiabilidad e infiabilidad de los Ventiladores. Elaboración propia.

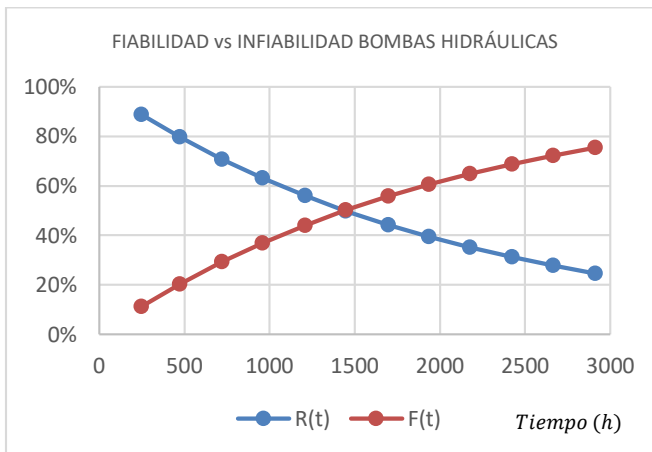


Fig. X Curva de fiabilidad e infiabilidad de los Reductores. Elaboración propia.

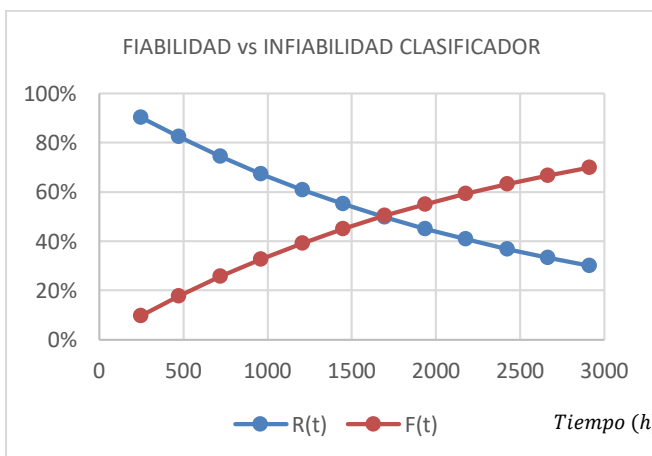


Fig. XI Curva de fiabilidad e infiabilidad del Clasificador. Elaboración propia.

### III. CONCLUSIONES.

1. El mantenimiento basado en condición (CBM) es una técnica de mantenimiento que es aplicable para un molino vertical, en el análisis de falla del sistema en el periodo de operación de un año se determinó que la fiabilidad del sistema es menor al 60% en las primeras 500 horas de operación, con la aplicación de esta técnica se espera incrementar la confiabilidad del molino vertical, por ser un equipo importante dentro de la línea de clinker ya que aporta a la reducción de costos de producción porque permite moler y utilizar un combustible más económico, de aquí la importancia de la eficiencia y confiabilidad que debe tener este sistema, los paros no programados producto de fallos en el sistema pueden afectar a la salud y medio ambiente así como generar costos por pérdidas de producción y costos de reparación, sabiendo además que los costos de mantenimiento de estos molinos son elevados porque los elementos de desgaste de los molinos verticales resultan un poco más costosos, adicional están los costos fijos, la técnica propuesta del mantenimiento basado en condición es aplicable para estos equipos vemos que la mayoría de

parámetros son medibles y detectables.

2. El proveedor LOESCHE citó 13 posibles modos de fallo dentro de los equipos identificados como críticos, sin embargo luego del análisis AMFEC y con soporte en la norma ISO-14224 se identificaron 207 modos de fallo mismos que no solo están presentes en el molino y clasificador, sino en equipos rotativos como los reductores, motores eléctricos, bombas, sistemas de lubricación, y que cuyos fallos pueden ser detectados por monitoreo de condiciones, como: vibraciones, contaminación o degradación del lubricante, desgastes, altas temperaturas de operación, entre otros.
3. En base a esta información se pudo determinar la técnica de monitoreo a utilizar por modo de fallo que se presenta en cada uno de los equipos, se planteó la matriz de las técnicas apropiadas para la monitorización de estado y diagnóstico de máquinas que utilizan parámetros tales como vibración, temperatura, tribología, velocidades de flujo, la contaminación, potencia y velocidad típicamente asociado con los criterios de rendimiento, condición y calidad.
4. Mediante el análisis probabilístico de fallos se identificó los tiempos en horas de operación a las cuales pudieran realizarse las mediciones de condición por equipo, criterio que se sintetiza la experiencia que brinda el historial de fallas e intervenciones asociadas con los activos combinado con técnicas de análisis cualitativo de fallos en este caso aplica a nuestro estudio ya que contribuyo a determinar la frecuencia de monitoreo basado en la probabilidad de fallo por cada equipo, para el incremento de la confiabilidad del sistema, adicional a que pudimos determinar que para cada

modo de fallo de los equipos críticos producto de este estudio es aplicable una medición de la condición.

5. Los objetivos del estudio fueron completados, se identificó la normativa del mantenimiento basado en condición, se siguió un procedimiento que permitió establecer la metodología para la aplicación de esta técnica de mantenimiento, se identificaron las técnicas de medición y su frecuencia.

#### REFERENCIAS.

- [1] Juan M. Hidalgo de Cisneros.; Los molinos verticales en la industria del cemento, Loesche Española de Ingeniería, S.L. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Licencia Creative Commons 3.0 España, <http://materconstrucc.revistas.csic.es>
- [2] Mobley, R. K. (2002). An introduction to predictive maintenance. Butterworth-Heinemann.
- [3] ISO 17359, I. (2011, Abril). ISO 17359:2011 Condition monitoring and diagnostics of machines -- General guidelines. Retrieved from ets out guidelines for the general procedures to be considered when setting up a condition monitoring programme for machines and includes references to associated standards required in this process. ISO 17359:2011 applies to all machines.: <https://www.iso.org/standard/39912.html>. Morales, “Generación y desarrollo de un plan de mantenimiento preventivo en base a criticidad, según criterios de estadísticas de falla en empresa química CLARIANT.”
- [4] Operating Instructions LOESCHE mill with classifier Type: LM 19.2d with LSKS 27 Dr, Document No: T20184-M30X00.980 en Rev.A Original Operating Intrucctions, Date of issue: 2016-10-26.
- [5] ISO 14224, “Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data

- for equipment,” Iso, vol. 2016, p. 982, 2016.
- [6] Aguilar-Otero, José R.; Torres-Arcique, Rocío Magaña-Jimenz, Diana. Analisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad, Tecnología, Ciencia, Educación, vol. 25, Núm. 1, 2010, pp. 15-26, Instituto Mexicano de ingenieros Químicos AC Monterrey, México.
- [7] Electronic Document: Sexto, Luis Felipe. ¿CÓMO DETERMINAR LA FRECUENCIA DE MANTENIMIENTO? SEIS CRITERIOS TÉCNICOS DE DECISIÓN [en línea]. Marzo de 2017. [fecha que se cita xx/xx/20xx]. Disponible en Internet: blog master Sostenibilidad, Mantenimiento & Gestión de Activos, <<https://se-gestiona.radicalmanagement.com>> y Portal Radical Management <<https://www.radicalmanagement.com>>.
- [8] Cardona Andrés, (2014, OCTUBRE) Propuesta de un plan de mantenimiento basado en la condición de los equipos rotativos críticos según la norma ISO 17359 Universidad de Oriente Núcleo Anzoátegui Escuela de ingeniería y ciencias aplicadas , Departamento de Mecánica.
- [9] Al-Najjar, B. (2012). Sobre el establecimiento deg mantenimiento basado en condición rentable. Revista de calidad en ingeniería de mantenimiento, 401-406.