

Estudio de un sistema de mantenimiento centrado en la confiabilidad para aumentar la disponibilidad de los motores asíncronos trifásicos de la empresa Cogorno S. A. - Trujillo.

Study of a system of maintenance centered in the reliability to increase the availability of them motors asynchronous three phase of the company Cogorno S. A. - Trujillo.

Wilmer Francisco Idrogo Cruzado¹

RESUMEN

El presente estudio está dirigido a las empresas que cuenten con máquinas industriales que son accionadas por motores eléctricos asíncronos trifásicos de tipo jaula de ardilla o rotor de bobinado. El objetivo del presente artículo es mejorar el funcionamiento y ciclo de vida de dichos motores.

Esta investigación se basa principalmente en la aplicación de un sistema de mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM, en la planta de procesos térmicos de la empresa Cogorno S.A Trujillo, teniendo como finalidad: A través de la metodología del AMEF (análisis de modos y efectos de falla) y con el desarrollo del análisis de criticidad elaborar un programa de actividades de mantenimiento a los elementos críticos y semicríticos de los motores tipo rotor de bobinado y jaula ardilla; y, de este modo aumentar la disponibilidad, confiabilidad, reducir la mantenibilidad, costos de producción, mantenimiento y las paradas no planeadas.

Palabras clave: Motores eléctricos asíncronos, Jaula ardilla, Rotor de bobinado, Sistema de mantenimiento, Mantenimiento centrado en la confiabilidad, Crítico, Semicrítico, Disponibilidad, Confiabilidad, Mantenibilidad, Costos de producción y costos de mantenimiento.

ABSTRACT

The present study is directed to businesses with industrial machines that are driven by electric motors three-phase asynchronous squirrel cage type or rotor of winding. That aims to improve its functioning and life cycle.

This article is based mainly on the implementation of a maintenance system focused on reliability RCM, in the plant of thermal processes in the company Cogorno S.A Trujillo, taking as purpose: Through the methodology of the AMEF (analysis of modes and effects of failure) and with the development of the analysis of criticality develop an activities program of maintenance to the critical and semi critical engines elements of the type rotor of winding and squirrel cage. And so increase the availability, reliability, reduce the maintainability, their costs of production, maintenance and unplanned stops.

Keywords: Electric Motors squirrel cage asynchronous, Rotor winding, Maintenance system, Centered maintenance reliability, Criticize, Semi critical, Reliability, Availability, Maintainability, Costs of production and maintenance costs.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente existe mucha competencia en el ámbito industrial, el conocimiento de nuevas técnicas de mantenimiento las cuales constituyen un camino para alcanzar la mejora tanto en eficiencia y producción con la finalidad de eliminar costos de mantenimiento, paradas inesperadas, costos de operación y mantenimientos correctivos.

El Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM: Reliability Centered Maintenance), es una metodología utilizada para determinar sistemáticamente que debe hacerse para asegurar que los activos físicos continúen haciendo lo requerido por el usuario en el contexto operacional presente. Un aspecto clave de la metodología RCM es reconocer que el mantenimiento asegure que un activo continúe cumpliendo su misión de forma eficiente en el contexto operacional¹.

La aplicación del sistema de mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM, esta técnica tiene sus orígenes a finales de los 60' cuando la industria de la aviación comercial decidió enfrentar el desafío de aplicarlo, teniendo buenos resultados conduciendo a que la "American Society Automotive Engineers" publique la norma "Criterios de Evaluación del proceso de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)". Las mejoras que generará la aplicación de esta técnica, se verá reflejado al dar la mejor alternativa de organización del mantenimiento preventivo y correctivo de los motores asíncronos trifásicos a través de la metodología AMEF (análisis de modos y efectos de fallas), permitiendo reducir los costos de producción, costos de mantenimiento, disminuir las paradas no planeadas, incrementar la vida útil de los motores y logrando incrementar la disponibilidad.

El objetivo principal de este artículo se fundamenta en que los motores eléctricos accionan la mayoría de máquinas de proceso industriales en una empresa industrial. Su mal funcionamiento causaría problemas como paros de producción inesperados, pérdidas en costos de mantenimiento y operacional.

En este artículo se basa principalmente en la aplicación de un sistema de mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM a la Empresa Cogorno S.A ubicada en la ciudad de Trujillo - Perú. En su planta de procesos térmicos cuenta con 185 motores asíncronos trifásicos (49 de rotor bobinado y 136 de rotor jaula ardilla), los cuales accionan 11 máquinas o activos en común, como: ventiladores de fideos, elevadores de cangilones, fajas transportadoras, tornillos compresores, carritos enfardelados, tornillos de prensa, bombas hidrométricas, compresores frigoríficos, bombas de vacío, molinito de martillos y reductores de velocidad.

El área de mantenimiento de la empresa, cuenta con dos tipos de mantenimientos: correctivo y preventivo para dar solución a las diferentes fallas de los motores

eléctricos, no consiguiendo obtener buenos resultados debido al incremento de fallas. En el periodo 2015, se registraron 1582 intervenciones correctivas en todos los motores asíncronos trifásicos instalados en la planta de procesos, ocasionando un total de 8715 horas perdidas por fallas inesperadas en plena producción.

La empresa en el periodo 2015, tuvo una pérdida económica en producción debido a las horas perdidas de 741684.04 S/.año y en costos de mantenimiento 258043.10 S/.año, generando un total de 999727.14 S/.año.

Por medio de las técnicas e instrumentos de recolección de datos, se obtendrán datos de entrada como el número de motores asíncronos trifásicos, sistemas en fallas, número de fallas o intervenciones, costo unitario promedio útil de producción de los motores, obteniendo el tiempo promedio entre fallas que es el cociente de la sumatoria de los tiempos entre falla y número de fallas, tiempo promedio para reparar, que es el cociente de la sumatoria de los tiempos para reparar y el número de falla, tasa de fallas que es el valor inverso del tiempo promedio entre fallas y tasa de reparaciones que es el valor inverso del tiempo promedio para reparar.

En segundo lugar, se determinarán los indicadores de mantenimiento como: disponibilidad, la cual es el cociente entre el tiempo entre fallas y la suma del tiempo medio para reparar y el tiempo medio entre fallas; confiabilidad, que es la constante de Napier, elevado al negativo de la tasa de falla por el tiempo total para producir dividido entre cien y la mantenibilidad que es el valor unitario menos la constante de Napier, elevada al negativo de la tasa de reparaciones por el tiempo total para producir dividido entre cien en estado actual. Para luego a través de un análisis de criticidad de equipos, que se determina cuantitativamente, multiplicando la probabilidad o frecuencia de ocurrencia de una falla por las multiplicaciones de los impactos de la misma, estableciendo rasgos de valores para homologar los criterios de evaluación, determinando que motores son críticos, semicrítico y no críticos.

En tercer lugar, se desarrollaron las hojas de información y se determinó el número de prioridad de riesgo (NPR) que es la multiplicación de los tres índices: gravedad, ocurrencia, detección, para obtener las fallas indeseables y analizarlas en las hojas de decisiones y poder establecer un plan de mantenimiento.

En cuarto lugar, se determinarán la reducción de los costos de producción y costos de mantenimiento y los nuevos indicadores de mantenimiento, en los cuales se reflejará el aumento de la disponibilidad y la confiabilidad.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Motor eléctrico:

Los motores eléctricos son máquinas eléctricas que transforman en energía mecánica la energía eléctrica que absorben por sus bornes².

Atendiendo al tipo de corriente utilizada para su alimentación, La National Electrical Manufacturers Association NEMA (Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos) la clasifica en:

2.1.1 Motores de corriente continua:

- De excitación independiente.
- De excitación serie.
- De excitación (shunt) o derivación.
- De excitación compuesta (compound).

2.1.2 Motores de corriente alterna:

- a. Motores síncronos.
- b. Motores asíncronos:
 - Monofásicos.
 - De bobinado auxiliar.
 - De espira en cortocircuito.
 - Universal.
 - Trifásicos.
 - De rotor bobinado.
 - De rotor en cortocircuito (jaula de ardilla).

2.2 Constitución del motor asíncrono o inducción:

Como todas las máquinas eléctricas, un motor eléctrico está constituido por un circuito magnético y dos eléctricos, una colocado en la parte fija (estator) y otro en la parte móvil (rotor).

Según se muestra en la Figura 1.

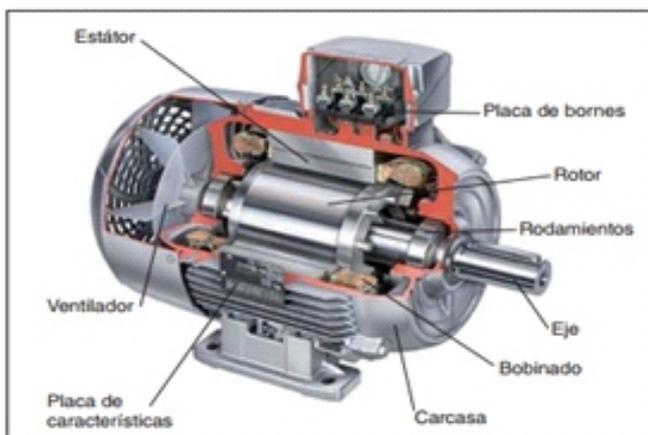


Figura 1: Sección de motor eléctrico.
Fuente: F. Cánovas².

2.2.1 Rotor de bobinado

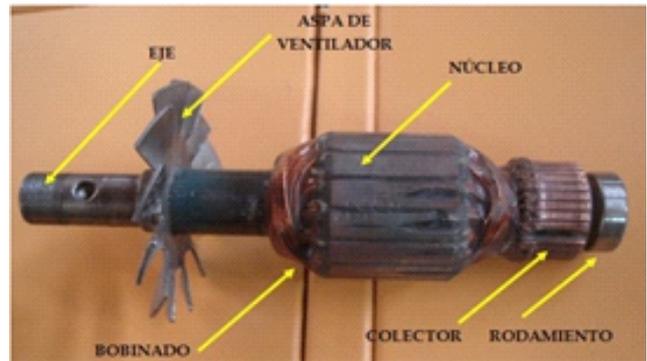


Figura 2: Partes principales del rotor de bobinado
Fuente: Cánovas².

2.2.2 Rotor en corto circuito (Jaula ardilla)



Figura 3: Partes principales del rotor de bobinado
Fuente: Cánovas².

2.3 Indicadores del mantenimiento:

2.3.1 Disponibilidad:

Es el objetivo principal del mantenimiento, puede ser definida como la confianza de que un equipo u/o máquina que sufrió mantenimiento, ejerza su función satisfactoriamente para un tiempo dado. En la práctica, la disponibilidad se expresa como el porcentaje de tiempo en que el sistema está listo para operar o producir³.

Matemáticamente la disponibilidad $D(t)$, se puede definir:

$$D(t) = \left(\frac{TMEF}{TMEF + TMPR} \right) * 100\% \quad \dots (03)$$

Donde:

- $D(t)$: Disponibilidad [%]
- TMEF: Tiempo medio entre fallas [horas de operación/falla].
- TMPR: Tiempo promedio para reparar [horas de reparación/falla].

2.3.2 Confiabilidad:

La confiabilidad puede ser definida como la “confianza” que se tiene de que un equipo u/o máquina desempeñe su función básica, durante un período de tiempo

preestablecido, bajo condiciones estándares de operación. Otra definición importante de confiabilidad es; probabilidad de que un equipo u/o máquina pueda desempeñar su función requerida durante un intervalo de tiempo establecido y bajo condiciones de uso definidas³.

La confiabilidad puede ser expresada a través de la expresión:

$$C(t) = \left(\frac{-\lambda * t}{e^{100 * N^{\circ} M.E}} \right) * 100\% \quad \dots(04)$$

Donde:

- R(t): Confiabilidad [%]
- t: Tiempo total de estudio [horas totales/año].
- N°M.E: Número de motores eléctricos
- λ: Tasa de fallas (número total de fallas con relación al tiempo promedio entre fallas del equipo) $\frac{\text{Fallas}}{\text{horas de operación}}$.

Y se expresa:

$$\lambda = \frac{1}{TMEF} \quad \dots(05)$$

- TMEF: Tiempo medio entre fallas [horas de operación/falla].

2.3.3 Mantenibilidad:

La mantenibilidad se puede definir como la expectativa que se tiene de que un equipo u/o máquina pueda ser colocado en condiciones de operación dentro de un periodo de tiempo establecido, cuando la acción de mantenimiento es ejecutada de acuerdo con procedimientos prescritos⁴.

La mantenibilidad puede ser expresada a través de la expresión:

$$M(t) = \left(1 - \frac{\mu * t}{e^{100 * 12 * N^{\circ} M.E}} \right) * 100\% \quad \dots(06)$$

Donde⁴:

- M(t): Mantenibilidad [%]
- t: Tiempo total de estudio [horas totales/año].
- μ: Tasa de reparaciones (número total de reparaciones efectuadas con relación al total de horas de reparación del equipo) [fallas/(horas de reparación)].
- N°M.E: Número de motores eléctricos

Y se expresa:

$$\mu = \frac{1}{TMPR} \quad \dots(07)$$

Donde:

- TMPR: Tiempo promedio para reparar [horas de reparación/falla].

2.3.4 RCM (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad):

El RCM es un conjunto de procedimientos sistemáticos para:

- Prever futuros indeseables en la funcionalidad de los procesos productivos (fallas funcionales).
- Determinar las consecuencias y el impacto de las fallas.
- Conducir a la determinación y programación de tareas predictivas (detección oportuna de fallas potenciales) y proactivas (acciones antes de la falla)⁵.

2.3.5 Metodología para la implementación del RCM según las normas SAE JA 1011, SAE JA 1012:

La metodología RCM, propone un procedimiento que permite identificar las necesidades reales de mantenimiento de los activos en su contexto operacional, a partir del análisis de las siguientes siete preguntas⁵.

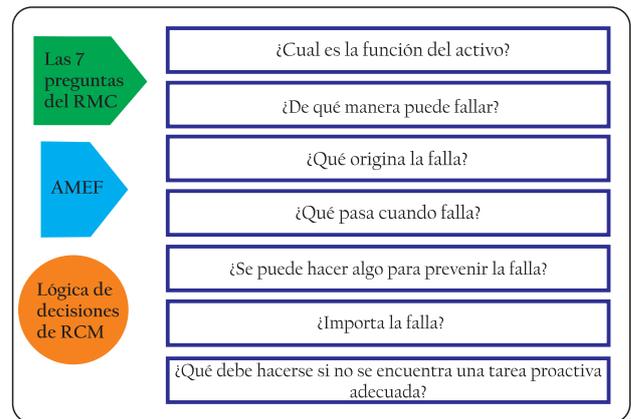


Figura 4: Preguntas básicas del RCM.

Fuente: Elaboración Propia.

2.3.6 Herramientas para la aplicación del RCM:

El AMEF (análisis de modo de fallas y efectos de fallos) y el árbol lógico de decisión, constituyen las herramientas fundamentales que utiliza el RCM que responderán las siete preguntas básicas⁵:

Herramienta que permite identificar los efectos o consecuencias de los modos de fallos de cada activo en su contexto operacional. A partir de esta técnica se logra:

1. Asegurar que todos los modos de falla concebibles y sus efectos sean comprendidos.
2. Identificar debilidades de diseño.
3. Proveer alternativas en la etapa de diseño.
4. Proveer criterios para prioridades de acciones correctivas.
5. Proveer criterios para prioridades de acciones preventivas.

2.3.7 Desarrollo de la AMEF:

Criterios del AMEF: Previamente a la realización del AMEF, elaboramos los criterios de análisis para la obtención del número de prioridad de riesgo; Considerando⁶:

Tabla 1: Gravedad

Gravedad	
Descripción	Puntaje
Ínfima, imperceptible	1
Escasa, falla menor	2-3
Baja, fallo inminente	4-5
Media, fallo pero no para el sistema	6-7
Elevada, falla crítica	8-9
Muy elevada, con problemas de seguridad, no conformidad	10

Fuente: Da Costa⁶.

Tabla 2: Ocurrencia

Ocurrencia	
Descripción	Puntaje
1 falla en más de 2 años	1
1 falla cada 2 años	2-3
1 falla cada 1 año	4-5
1 falla entre 6 meses y 1 año	6-7
1 falla entre 1 a 6 meses	8-9
1 falla al mes	10

Fuente: Da Costa⁶.

Se determina según la ecuación:

$$NPR = G * O * D \dots(08)$$

Tabla 4: Puntaje y clasificación de las fallas

$NPR \leq 125$	Falla Aceptable.
$125 < NPR \leq 200$	Falla reducible a deseable.
$NPR > 200$	Falla Indeseable.

Fuente: Moubray⁵.

- Desarrollo del diagrama de decisiones: Se elabora el árbol lógico de decisiones para el mantenimiento centrado en la confiabilidad en base al AMEF.

2.3.8 Hojas de información:

Previamente al desarrollo de la hoja de decisiones estratificamos la referencia de información para poder establecer las tareas propuestas mediante las hojas de información [6].

2.3.9 Hojas de decisión:

Es en esta etapa del análisis en la cual finalmente se integran las consecuencias y las tareas, y es en esta etapa en la que podremos responder a las últimas 3 preguntas de la metodología del RCM⁶:

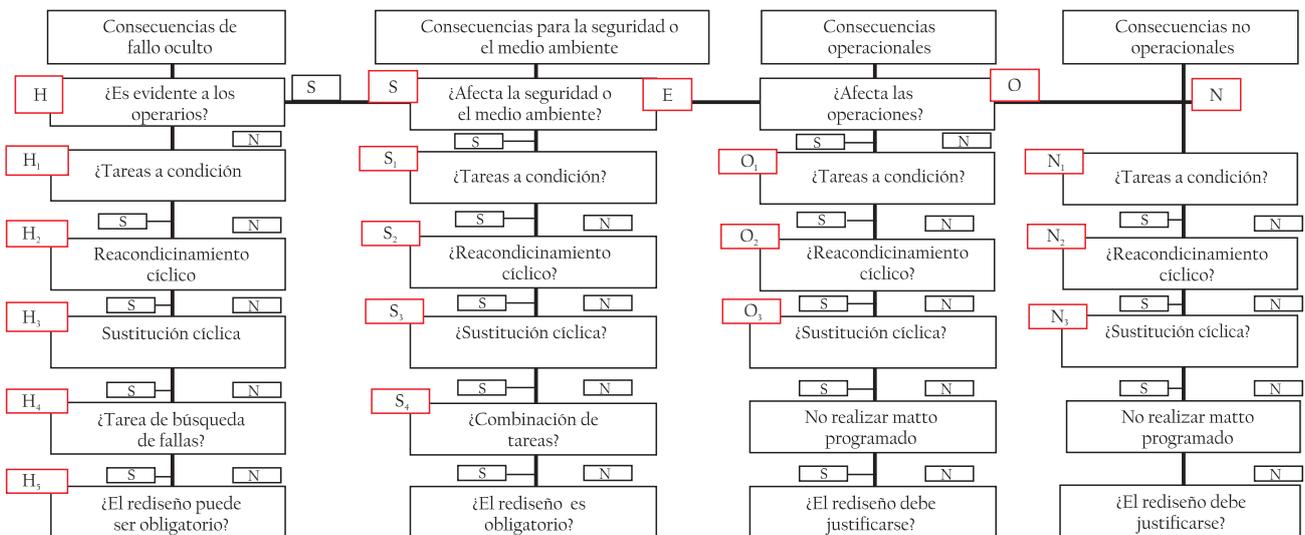


Figura 5. Árbol lógico de decisiones.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3: Detección

Detección (dificultad de detección)	
Descripción	Puntaje
Obvia	1
Escasa	2-3
Moderada	4-5
Frecuente	6-7
Elevada	8-9
Muy elevada	10

Fuente: Da Costa⁶.

- ¿Qué importa si falla?

- ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada falla?

- ¿Qué debe hacerse en caso de no encontrar una tarea proactivamente apropiada?

En la siguiente imagen se muestra la hoja de decisiones, el cual es uno de los documentos centrales utilizados en la metodología⁶.

HOJA DE DECISIONES				Sistema: subsistema:				Facilitador:		Fecha:		HOJA N°1 de:
Referencia de Información			Evaluación de Consecuencias				Acción a falta de			Tarea propuesta	Intervalo inicial (a=año, m=mes, s=semana, d=día)	A realizarse por
F	FF	FM	H	S	E	O	S1	S2	S3			
							O1	O2	O3			
							N1	N2	N3			

Figura 6. Hoja de decisiones.
Fuente: Da Costa⁶.

Tabla 5. Ejemplo de una hoja de información.

Nombre del equipo: Motor de combustión interna marca AJAX			
Sistema: Encendido			
Pieza	Función que desempeña (F)	Modo de fallo funcional (FF)	Causas potenciales de fallo (FM)
Bujía	1 Genera la chispa de encendido del motor.	A Golpeteo del motor	1 Suciedad
		B No hay chispa	2 Excesivo entrehierro
		C Ruido	1 Desgaste
		D Oscilaciones	1 Suciedad
		E Disminución de rpm	1 Excesivo entrehierro
Magneto	2 Genera la corriente que se suministra a la bujía.	A No hay chispa	1 Contaminación con grasa
		B Masa hace tierra	1 Corto circuito
		C Golpeteo del motor	1 Cable suelto
Bobina	3 Envía corriente a la bujía	A No hay chispa	1 Magneto con suciedad
Cable bujía	4 Envía chispa a bujía	A Circuito abierto	1 Cable roto
		B Golpeteo del motor	1 Pérdida de carga
		C Ruido	1 Cable corroído / sulfatado
Cableado eléctrico	5 Conexión eléctrica del motor	A Circuito abierto	1 Cable suelto
		B Ruido	1 Cable corroído / sulfatado
		C No hay chispa	1 Cable suelto

Fuente: Da Costa⁶.

2.3.10 Análisis de Criticidad de Equipos:

Es una metodología que permite jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global, con el fin de optimizar el proceso de asignación de recursos (económicos, humanos y técnicos). Para determinar la criticidad de una unidad o equipo se utiliza una matriz de frecuencia por consecuencia de la falla⁷.

$$V.C = I.F.F \times I \dots (09)$$

La criticidad se determina cuantitativamente, multiplicando la probabilidad o frecuencia de ocurrencia de una falla por las multiplicaciones de los impactos de la misma, estableciendo rasgos de valores para homologar los criterios de evaluación⁸.

Donde:
V.C: Valor crítico
I.F.F: Impacto de frecuencia de fallas
I: Consecuencias o impactos

Las consecuencias o impactos, se determina según la formulación:

$$I = I.C.P * I.C.M * I.P.M + I.P + I.A \dots (10)$$

Donde:
I.C.P: Impacto en los costos de producción
I.C.M: Impacto en los costos de mantenimiento
I.P.M: Ponderación del impacto al personal de mantenimiento
I.P: Impacto a la población
I.A: Impacto ambiental

La siguiente Tabla 6, se muestra los criterios para estimar la frecuencia.

Tabla 6. Criterios para estimar la frecuencia.

Categoría o frecuencia	Tiempo medio entre fallas TMEF, horas/falla	Interpretación
5	TMEF < 1	Es probable que ocurran varias fallas en una hora.
4	1 ≤ TMEF < 10	Es probable que ocurran varias fallas en 10 horas, pero es poco probable que ocurra en 1 hora.
3	10 ≤ TMEF < 100	Es probable que ocurran varias fallas en 100 horas, pero es poco probable que ocurra en 100 horas.
2	100 ≤ TMEF < 1000	Es probable que ocurran varias fallas en 1000 horas, pero es poco probable que ocurra en 100 horas.
1	TMEF ≥ 1000	Es poco probable que ocurran en 1000 horas.

Fuente: Pemex⁸.

Los Impactos en Los costos de producción (I.C.P) cuantifican las consecuencias que los eventos no deseados generan sobre el negocio. Para ellos se deben determinar los costos de producción respecto a las horas perdidas

$$C_p = (TPR \times C_{up}) \dots (11).$$

Donde:

- Cp: Costos de producción (S. /hora)
- TPR: Tiempo para reparar (horas de reparación/año)
- Cup: Costos unitarios de producción (S. /año) (S. /hora)

- Los impactos en los costos de mantenimiento I.C.M, se evaluarán considerando los siguientes factores:

- Equipos afectados
- Costos de Reparación
- Costos de mano de obra

$$C_m = (C.r + C.m.o) \dots (12)$$

Donde:

- Cm: Costos de mantenimiento (S. /año)
- C.r: Costos de repuestos (S. /año)
- C.m.o: Costos en mano de obra (S. /año)

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Diseño de investigación: Pre-experimental

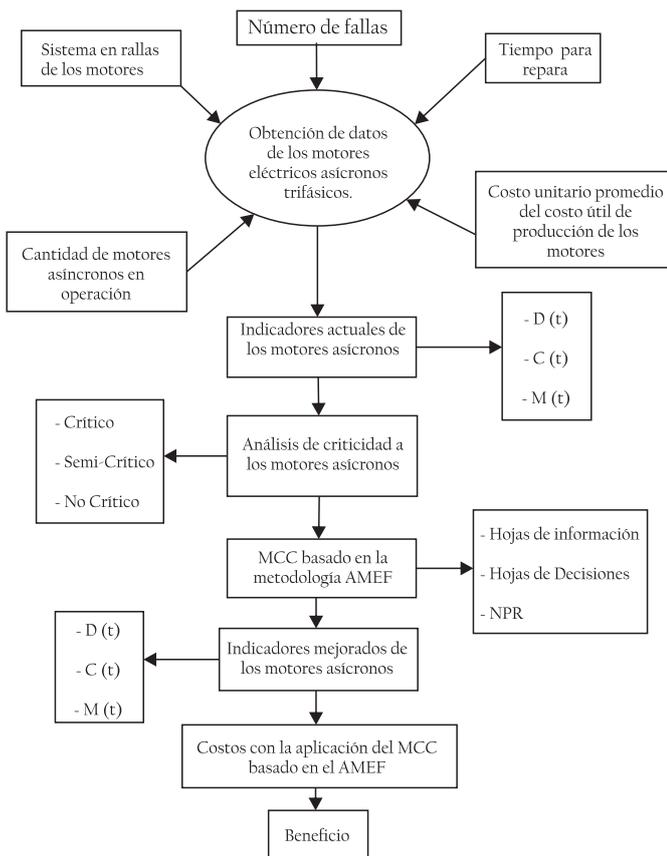


Figura 7: Metodología para el diseño de investigación. Fuente: Elaboración propia.

3.2 Variables de operacionalización:

3.2.1 Variables independientes:

Sistema de Mantenimiento enfocado en la confiabilidad.

- Análisis de modos y efectos de fallos AMEF.

3.2.2 Variables dependientes:

Disponibilidad de los motores asincronos trifásicos

- Confiabilidad operacional.
- Mantenibilidad.
- Costos totales

3.2 Población y muestra:

3.3.1 Población:

Motores eléctricos de la empresa Cogorno S.A Trujillo.

3.3.2 Muestra:

Motores eléctricos asincronos trifásicos de la empresa Cogorno S.A Trujillo.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Los principales procedimientos utilizados para lograr la información en el presente artículo son:

Tabla 7. Técnicas e instrumentos del proyecto.

Técnicas	Instrumentos
Análisis documental	Ficha de registro de fallas
Encuesta	Cuestionario

Fuente: Elaboración propia

4. RESULTADOS

4.1. Indicadores de mantenimiento globales de los motores asincronos trifásicos

En la figura 8, se presentan los indicadores de mantenimiento globales en estado actual de los motores asincronos

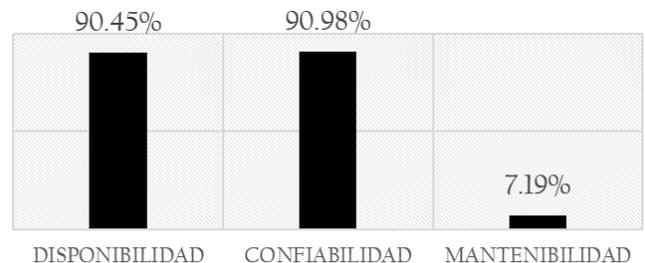


Figura 8. indicadores globales actuales de los ME Fuente: Fuente: Elaboración propia

4.2. Análisis de criticidad a los elementos de los motores eléctricos asincronos trifásicos

Para la evaluación del análisis de criticidad, son necesarios una serie de datos y cálculos previos, para poder clasificar los elementos de los motores asincronos en críticos, semi-

críticos y no críticos. A continuación, se detalla el procedimiento:

4.2.1. Determinación del tiempo para reparar y número de intervenciones por cada elemento, según el tipo de activo.

En la figura 9, se muestran los tiempos para reparar por cada elemento.

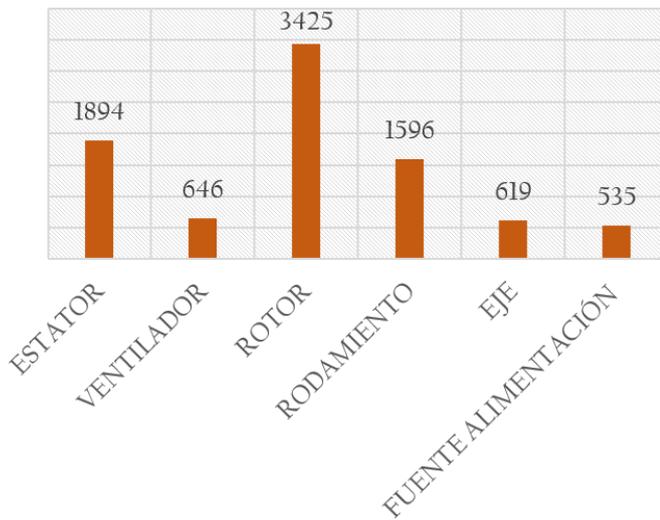


Figura 9. TPR por cada elemento de los motores eléctricos.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 10, se muestran la cantidad de intervenciones por cada elemento.

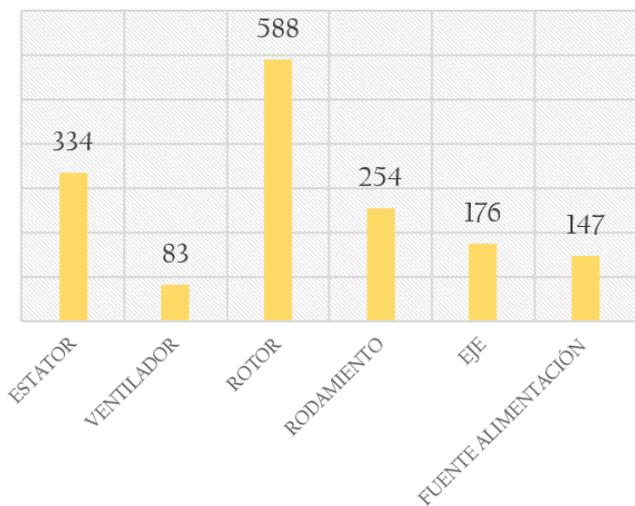


Figura 10: Cantidad de intervenciones “n”, por cada elemento de los motores eléctricos.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Determinación de los costos en pérdidas de producción por cada elemento de los motores eléctricos.

Para la determinación los costos de producción respecto

a las horas perdidas por fallas en los elementos de los motores asíncronos, se multiplicarán las horas perdidas de cada elemento por el costo unitario de cada área de la planta de procesos térmicos.

En la figura 11, se muestran los resultados de los costos de producción por cada elemento:

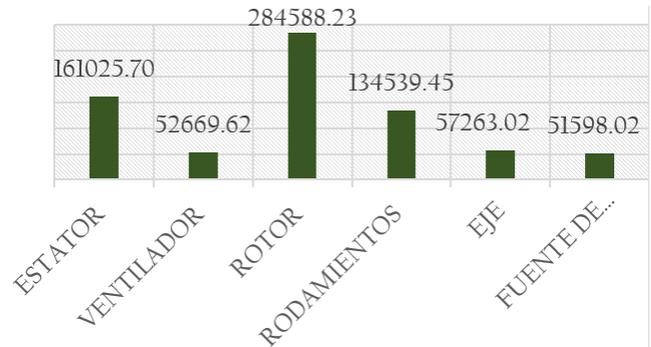


Figura 11: Costos en pérdidas de producción.

Fuente: Elaboración propia

Total: 741684.04 S/año.

4.2.3. Determinación de los costos en repuestos por cada elemento de los motores eléctricos.

En la figura 12, son detallados los costos en repuestos por cada elemento:

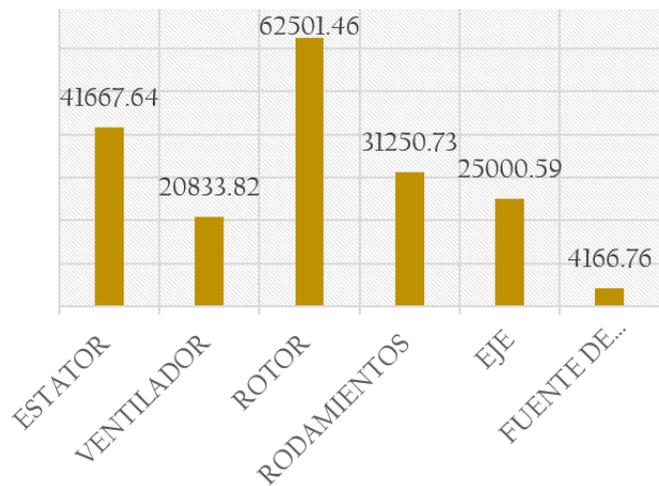


Figura 12: Costos en repuestos por elemento.

Fuente: Elaboración propia

Total: 185421 S/año.

4.2.3. Determinación de los costos de mano de obra por cada elemento de los motores eléctricos.

Para determinar los costos de mano de obra por cada elemento de los motores asíncronos trifásicos, se procedió a estandarizar el costo unitario de mano de obra de los técnicos mecánicos y eléctricos de la empresa, el cual se promedia a 8.333 S/hora.

Por lo tanto, para determinar los costos totales de mano de

obra por cada elemento se procedió a multiplicar el tiempo para reparar por el costo unitario de mano de obra.

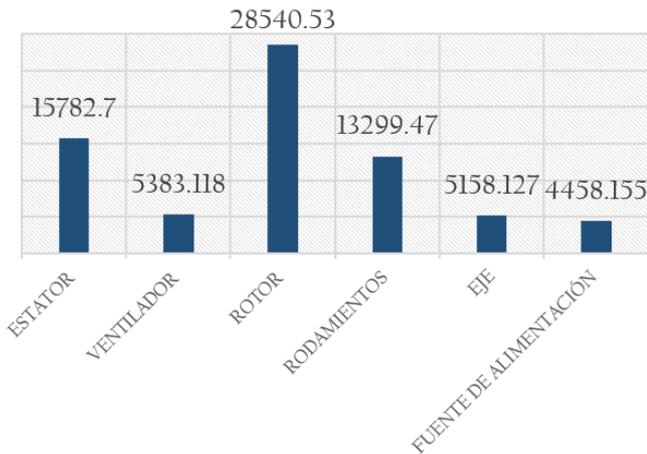


Figura 13. Costos en mano de obra por elemento.
Fuente: Elaboración propia

Total: 72622.1 S./año.

4.2.4. Determinación de los costos de mantenimiento por cada elemento de los motores eléctricos.

Para la determinación de este costo, se debe sumar los costos de repuestos con los costos de mano de obra.

En la figura 14, se muestran los resultados de los costos de mantenimiento por cada elemento.

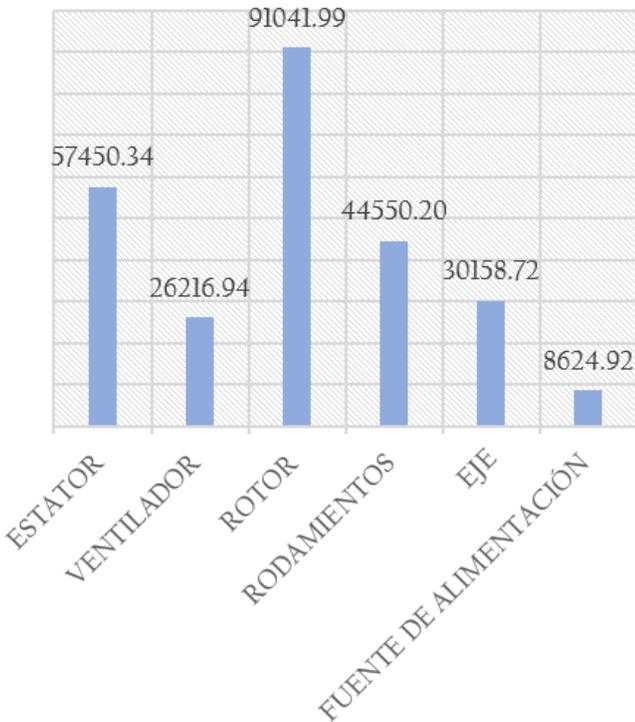


Figura 14. Costos en mantenimiento por elemento.
Fuente: Elaboración propia

Total: 258043.10 S/año

Tabla 9. Resultados del análisis de criticidad

N°	ELEMENTOS	I.F.F	I.C.P	I.C.M	I.P.M	I.P	I.A	Consecuencia	Valor Crítico	Clasificación
1	ESTATOR	3	4	4	1	1	1	16	48	SEMICRITICO
2	VENTILADOR	2	3	3	1	1	1	9	18	NO CRITICO
3	ROTOR	3	5	5	1	1	1	25	75	CRITICO
4	RODAMIENTOS	3	4	4	1	1	1	16	48	SEMICRITICO
5	EJE	2	3	4	1	1	1	12	24	NO CRITICO
6	FUENTE DE ALIMENTACIÓN	2	3	2	1	1	1	6	12	NO CRITICO

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 15, se detalla el valor crítico y la clasificación de cada elemento de los motores eléctricos.

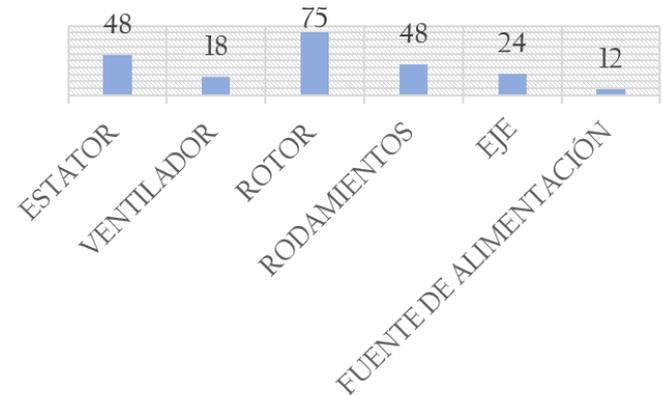


Figura 15. Valores de criticidad por cada elemento de los motores eléctricos.

Fuente: Elaboración propia

5. DESARROLLO DE LOS AMEF:

5.1. Determinación del número de prioridad de riesgos

En la figura 16, se muestran los porcentajes correspondientes a los tipos de fallas

5.2. Elaboración de un programa de actividades para el mantenimiento centrado en la confiabilidad aplicado a elementos críticos y semicritico

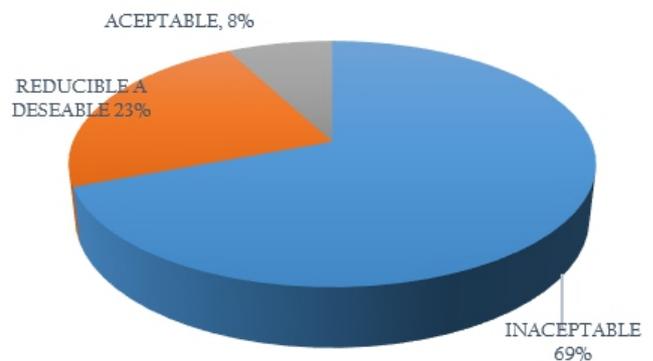


Figura 16. Porcentajes del NPR con respecto a los modos de fallas.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Hoja de información del Estator

HOJA DE INFORMACIÓN	Empresa: Cogorno SA	Realizado Por: Wilmer Francisco Idrogo Cruzado	Fecha: 05/06/2016
	Sistema: Eléctrico	Tipo de Motor: Asíncrono Trifásico	Hojas: 2
Elemento	Función (F)	Modo de Falla (MF)	Causas de Falla (CF)
	1. Constituye la parte fija del motor. El estator es el elemento que opera como base, permitiendo que desde ese punto se lleve a cabo la rotación del motor. El estator no se mueve mecánicamente, pero si magnéticamente.	<p>A. sobrecalentamiento en los bobinados</p> <p>B. Cortocircuito en el enrollamiento del estator</p> <p>C. Tensión de fase desbalanceada</p> <p>D. Arranques cíclicos</p>	<p>1. Ventiladores con sentido de rotación invertido</p> <p>1. Sobrecarga</p> <p>2. Tensión muy alta, consecuentemente, las pérdidas en el hierro son muy altas.</p> <p>3 Tensión muy alta debido al incremento de la corriente</p> <p>4. Sentido de rotación no compatible con el ventilador utilizado</p> <p>1. Fuente de alimentación defectuosa</p> <p>2. Bobina de retención del contactor magnetico defectuosa</p> <p>3. Circuito abierto en el tablero de control</p> <p>4. Terminales mal conectadas</p> <p>1. El rotor está bloqueado</p> <p>2. Al menos dos cables de alimentación están interrumpidos, sin tensión</p> <p>3. Problemas en las escobillas</p> <p>1. Torque de carga muy elevado durante el arranque</p> <p>2. Caída de tensión muy alta en los cables de alimentación</p> <p>3. Rotor con barras falladas o interrumpidas</p> <p>4. Tensión de alimentación muy baja</p>

Fuente: Elaboración propia

5.2. Elaboración de un programa de actividades para el mantenimiento centrado en la confiabilidad aplicado a elementos críticos y semicrítico

En la Tabla 10 se muestra el Programa de actividades para el mantenimiento centrado en la confiabilidad.

5.3 Determinación la reducción de los costos de producción y mantenimiento de los motores asíncronos trifásicos con la aplicación del plan RCM.

Este procedimiento corresponde a la reducción del tiempo para reparar solo de las fallas inaceptables, comprendidas dentro de un estudio de RCM.

En la tabla 13, se detallan los costos totales en condiciones actuales y de mejora con la aplicación del RCM. Los costos totales son la suma de los costos de mantenimiento y costos de producción.

5.4 Estimación de los indicadores de mantenimiento en condiciones de mejora

Para la estimación de los indicadores de mantenimiento, primero se debe establecer, los nuevos valores del TPR, TEF y n. Estimando que el RCM reducirá los problemas generales en un 69%, perdiéndose en condiciones de mejora 31%

En la figura 17 se muestran las condiciones actuales y de mejora de los indicadores globales de los motores asíncronos trifásicos de la empresa Cogorno S.A

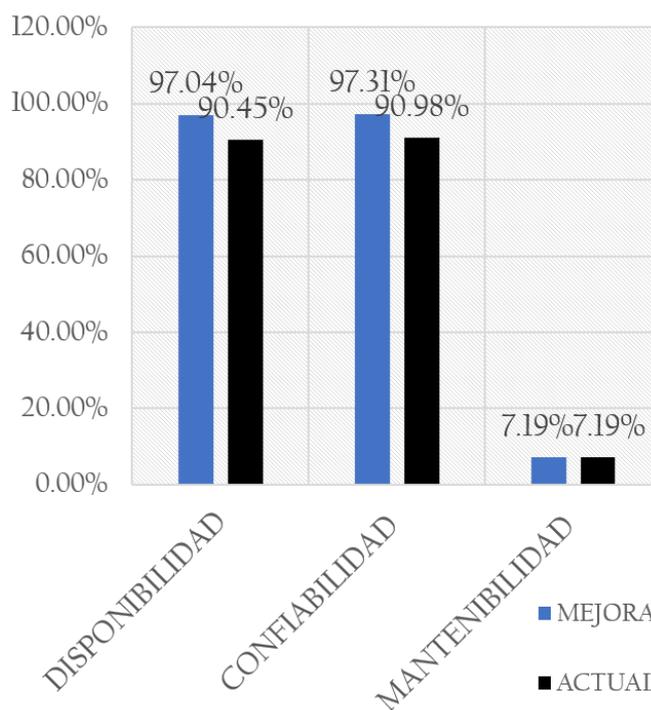


Figura 17: Comparación de los indicadores de mantenimiento globales.
Fuente: Elaboración propia

6. DISCUSIÓN:

6.1. En el estudio de Vásquez⁹ se aplica criterios del AMEF basándose en la elaboración de hojas de información y hojas de decisión, agrupando las fallas en sistemas de los

Tabla 10. Programa de actividades para el mantenimiento centrado en la confiabilidad

FRECUCENCIA DEL MANTENIMIENTO		ELEMENTOS CRÍTICOS Y SEMICRÍTICOS DE LOS MOTORES ASINCRONOS		
TAREA	ROTOR JAULA ARDILLA/BOBINADO			
MENSUAL	Inspeccionar: Redimensionar los cables			
MENSUAL	Hacer un test de continuidad			
2SEMANAS	Limpiar las anillas colectoras y el conjunto aislante			
SEMANTAL	Verificar la movilidad de las escobas en los alojamientos			
2MESES	Verificar la presión sobre cada escoba y corregir, si es necesario			
MENSUAL	Limpiar, lijar y pulir o torneear, cuando necesario			
3MESES	Asentar correctamente las escobas			
6MESES	Hacer limpieza y reemplazar o substituir el rodamiento			
MENSUAL	Recuperar el asiento en el eje y substituir el rodamiento			
6MESES	Substituya el rodamiento			
MENSUAL	Verificar: Reembobinar			
MENSUAL	Inspeccionar: Rehacer la conexión			
2MESES	Verificar y arreglar la bobina del rotor y dispositivo de corto circuito			
MENSUAL	Verifique las escobas pueden estar gastadas, sucias			NIVEL CRÍTICO
DIARIO	Medir tensión de conexión y ajustarle al valor correcto			
DIARIO	Inspeccionar: La caída de rotación del motor			
DIARIO	Inspeccionar: El ruido desaparece al desconectarse el motor			
MENSUAL	Medir la carga y comparar con el régimen en la placa			
2MESES	Limpiar las rejillas o los filtros si el motor dispone de ellos			
DIARIO	Verificar la tensión en todas las fases			
MENSUAL	Verificar la resistencia del estator en las tres fases			
MENSUAL	Verificar la tensión y comparar con la indicada en la placa			
2SEMANAS	Localizar con un probador de aislamiento y reparar			
DIARIO	Revisar las conexiones			
SEMANTAL	Verificar el entrehierro, condiciones de funcionamiento			
DIARIO	Verificar si hay desequilibrio de las tensiones o funcionamiento con dos fases y corregir			
MENSUAL	Verificar la deformación del eje o el desgaste de los rodamientos			
MENSUAL	Examinar las relaciones de accionamiento y acoplamiento			
2SEMANAS	Abrir y limpiar los canales de pasaje de aire			
TAREA	ESTATOR			
DIARIO	Analizar el ventilador en función del sentido de giro del motor.			
DIARIO	Medir la corriente del estator y disminuir la carga			
SEMANTAL	Verificar: No exceder en 110% la tensión nominal			
DIARIO	Verificar la tensión de alimentación y la caída de tensión en el motor			
DIARIO	Verificar el ventilador en función del sentido de rotación del motor			
DIARIO	Verificar la tensión en todas las fases, antes del interruptor de seguridad			
DIARIO	Verificar la tensión en la bobina de retención magnética			
SEMANTAL	Verificar la tensión en T1, T2 y T3			
SEMANTAL	Verificar la numeración y conexión de terminales			
SEMANTAL	Verificar los cables de conexión			NIVEL SEMICRÍTICO
DIARIO	Verificar el tablero de comando, los cables de conexión y los bornes			
MENSUAL	Inspeccionar las escobas puede estar gastadas, sucias o colocadas incorrectamente.			
DIARIO	No aplicar carga en la máquina accionada durante la partida			
MENSUAL	Verificar el cálculo de la instalación (transformador, grosor de los cables, verificar rieles y disyuntores)			
MENSUAL	Verificar y arreglar las bobinas del rotor (jaula y bobinado), hacer test dispositivo de cortocircuito.			
DIARIO	Medir la tensión de alimentación, ajustar el valor correcto			
TAREA	RODAMIENTOS			
MENSUAL	Retirar el tapón de escape de la grasa y dejar el motor funcionando hasta que se vea salir el exceso de la grasa			
DIARIO	Inspeccionar y de ser necesario disminuir el esfuerzo			
SEMANTAL	Corregir el eje y verificar el balanceamiento del rotor. Verificar el origen de la vibración y corregir			
SEMANTAL	Aumentar grasa en el rodamiento			NIVEL SEMICRÍTICO
6MESES	Substituir los rodamientos			
MENSUAL	Lavar los rodamientos y lubricar			
MENSUAL	Inspeccionar: Recuperar el asiento en el eje y substituir el rodamiento			
2SEMANAS	Reapretar y trabar los tornillos			
SEMANTAL	Verificar la alineación entre ejes (motor – maquina de accionamiento)			

Fuente: Elaboración propia

los motores ya que poseían las mismas características, esto permitiendo aumentar la disponibilidad hasta un 98% con un tiempo promedio de reparación de 3.084 horas reparación/falla. En similitud con el presente trabajo, se empleó la misma metodología, pero con la diferencia que los motores no se agruparon en sistemas, si no en elementos tales como: estator, ventilador, rotor, rodamiento, eje y fuente de alimentación, permitiendo aumentar la disponibilidad a 97.04 % con un tiempo promedio de reparación de 5.509 horas reparación/falla.

Tabla II. Reducción de las pérdidas de producción en los elementos de los M.E

Elementos	Costos en pérdidas de producción (S./año) (Actual)	Porcentaje de reducción	Reducción en pérdidas de producción (S./año) (RCM)
ESTATOR	161025.70	69%	111107.733
VENTILADOR	52669.62	0%	0
ROTOR	284588.23	69%	196365.8787
RODAMIENTOS	134539.45	69%	92832.2205
EJE	57263.02	0%	0
FUENTE DE ALIMENTACIÓN	51598.02	0%	0
	741684.04		400305.83

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Reducción en las pérdidas de los costos de mantenimiento de los elementos de los M.E

Elemento	Costos de mantenimiento S. /año (Actual)	Porcentaje de reducción	Reducción en pérdidas de mantenimiento (S./año) (RCM)
Estator	57450.34	69%	39640.7346
Ventilador	26216.94	0%	0
Rotor	91041.99	69%	62818.9731
Rodamiento	44550.20	69%	30739.638
Eje	30158.72	0%	0
Fuente de alimentación	8624.92	0%	0
	258043.10		133199.35

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Costos totales actuales y en mejora

Costos totales de los M.E S. /año (Actual)	Beneficio con la aplicación del RCM	Costos totales de los M.E S. /año (Mejora)
999727.14	533505.18	466221.96

Fuente: Elaboración propia

6.2. En el estudio de Camacho¹⁰, se implementó un plan RCM reduciendo en un 45% las fallas inaceptables a través del análisis de los índices de riesgo: gravedad, ocurrencia y detención. Este mismo análisis se utilizó en el presente trabajo para determinar los diferentes modos de falla, como: inaceptables, reducibles a deseables y aceptables; logrando reducir el 69% de fallas inaceptables.

6.3. En el estudio de Caltenco¹¹, se evalúan las condiciones críticas de un motor eléctrico, las cuales se deben basar en 6 aspectos, tales como: frecuencia de fallas, costos de producción, costos de mantenimiento, seguridad al personal de mantenimiento, seguridad a la población y medio ambiente. En comparación con el presente estudio, se aplicaron los mismos criterios de evaluación a cada elemento de los motores eléctricos, resultando como elemento crítico el rotor y semicríticos: estator y rodamientos.

6.4. En el estudio de Castañeda¹², se estableció que para evaluar un conjunto de fallas de una cierta máquina es necesario que el mantenimiento preventivo, se base en la metodología AMEF, logrando reducir en un 80% las fallas ocasionadas por perdidas de horas en plena producción. En comparación con el presente estudio, la aplicación del AMEF a los motores eléctricos solo redujo en un 69% las horas perdidas en producción.

7. CONCLUSIÓN

- Para el análisis actual del mantenimiento de los motores asíncronos trifásicos de la planta de procesos térmicos de la empresa cogorno S.A, fue necesario evaluar el comportamiento de los motores eléctricos en el periodo 2015, encontrando en operación constante a 185 motores, de los cuales 136 poseen rotor jaula ardilla y 49 poseen rotor de bobinado; además de perder 8715 horas de reparación en plena producción en 1582 intervenciones, con un tiempo medio para reparar global de 5.509 horas/falla y tiempo medio entre fallas de 52.155 horas/falla.
- Se pudo determinar los indicadores de mantenimiento, encontrando una disponibilidad entre el rango de 85% a 96.01%, confiabilidad de 80% a 93.63% y mantenibilidad de 4.34% a 22.93%. Por otro lado, los indicadores globales de todos los motores eléctricos en conjunto resultaron: disponibilidad 90.45%, confiabilidad 90.98% y mantenibilidad 7.19%.
- En determinación como todos los motores eléctricos, tienen las mismas características de diseño, se procedió a evaluar los elementos en fallas, tales como: Estator, ventilador, rotor, rodamiento, eje de transmisión y fuente de alimentación; dichos elementos fueron sometidos a un análisis de criticidad sustentado en 6 criterios o impactos

como: frecuencia de fallas, costos de producción, costos de mantenimiento, personal de mantenimiento, población y ambiente. La evaluación tuvo como único elemento crítico al rotor, y como semicríticos al estator y rodamientos, mientras el ventilador, eje y fuente de alimentación se clasificaron como no críticos.

- Se desarrollaron las hojas de información y decisiones para los 13 modos de fallas de los elementos críticos y semicríticos para luego a través del número de prioridad de riesgo concluir que 9 (69%) de las fallas ocurridas son de tipo indeseable, 3 (23%) fallas reducibles a deseables y 1 (8%) falla aceptable.
- Se elaboró un programa de actividades de mantenimiento centrado en la confiabilidad, basado en la solución descrita en las hojas de decisiones de los elementos críticos y Semicrítico de los motores asincronos trifásicos.
- Se establecieron los costos generales (costos de producción y costos de mantenimientos) en estado actual, obteniendo 999727.14 S/año, mientras que en estado de mejora los costos generales se redujeron a 466221.96 S/año, obteniendo un beneficio neto de 533505.18 S/año.
- La implementación del MBR, logro aumentar los indicadores de mantenimiento, la disponibilidad en el intervalo de 95.35% a 98.76% y confiabilidad de 93.75% a 98.14%, permitiendo mantener constante la mantenibilidad de 4.34% a 22.93%. Estos incrementos de los activos independientes, permite obtener los indicadores de mantenimiento en forma general en estado de mejora, obteniendo una disponibilidad del 97.04%, confiabilidad 97.31% y mantenibilidad constante de 7.19%.

8. AGRADECIMIENTO

A la empresa Cogorno S. A. por brindarme los datos, a los Ingenieros Jorge Antonio, Inciso Vásquez y Martín Teófilo, Sifuentes Inostroza; a mis padres por todo su apoyo moral, alentador y por darme la oportunidad de poder estudiar. Sobre todo, a DIOS, por darme la vida.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Chávez MA. Análisis y propuestas de acciones preventivas al sistema de gestión de mantenimiento (MAC) en el departamento de predictivos, planta San Miguel de Cementos Progreso S.A. [Tesis].Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Escuela de ingeniería Mecánica; 2006.
- [2] Ruz F, Cánovas FJ, Molina, JM. Motores y Máquinas Eléctricas. España: Marcombo S.A.; 2011.
- [3] Jimenez M. La Disponibilidad y la Fiabilidad Herramientas del Mantenimiento [Tesis].Mexico: Universidad Veracruzana. Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica; 2011.
- [4] Mesa DH, Ortiz Y, Pinzón M. La Confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento. *Scientia et Technica*. 2006;(30):155-160.
- [5] Moubray MJ. RCM Reliability Centered Maintenance. United Kingdom: Aladon Ltd; 2004
- [6] Da Costa M. Aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad a motores a gas de dos tiempos en pozos de alta producción [Tesis]. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería; 2010.
- [7] Améndola LJ. Modelos mixtos de confiabilidad. España: PMM Institute for Learning; 2002.
- [8] Pemex. Metodología Análisis de Criticidad. Sistemas de Confiabilidad Operacional. [Revista en línea] 2010 [Consultado 15 de Mayo de 2016]. Disponible en: http://aprendizajevirtual.pemex.com/nuevo/guias_pdf/guia_sco_analisis_criticidad.pdf.
- [9] Vásquez DE. Aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad rcm en motores detroit 16V-149TI en Codelco División Andina [Tesis]. Valdivia: Universidad Austral De Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela Ingeniería Civil Mecánica; 2008.
- [10] Camacho CY, Aguilar SE. Influencia del diseño e implementación de un plan mantenimiento centrado en la confiabilidad en la reducción, control de fallas y optimización de costos en el área de elaboración de azúcar en el complejo agroindustrial Cartavio S.A.A [Tesis] Trujillo: Universidad César Vallejo.
- [11] Caltenco M. Criterios de ingeniería aplicables en la selección optima de motores trifásicos de inducción tipo jaula ardilla. México: Instituto Politécnico Nacional; 2008.
- [12] Castañeda L, Carolina K, Mendoza G, Hernández M. Administración del mantenimiento preventivo a motores eléctricos de unidades de bombeo mecánico Distrito Poza Rica, para incrementar la producción [Tesis] Xalapa: Universidad Veracruzana. Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica; 2001.

