

# **Diseño de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad basado en el análisis causa raíz para aumentar la disponibilidad de los motores eléctricos jaula ardilla de la empresa Alicorp S.A.A.**

## **Design of a maintenance plan focused on reliability analysis based on root cause to increase the availability of electric motors squirrel cage Alicorp S.A.A.**

Edwin Ismael Quiñones Siccha<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Alumno de la facultad de Ingeniería Mecánica- Eléctrica, Universidad Cesar Vallejo-  
Trujilloedwinqs92@gmail.com

### **Resumen**

La presente investigación se fundamenta en el diseño de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad basado en la metodología análisis causa raíz "ACR" con la finalidad de aumentar la disponibilidad mecánica de los 32 motores eléctricos jaula ardilla de la empresa Alicorp S.A.A. los cuales accionan maquinas criticas como: secadores rotativos, ventiladores de tiro forzado, bombas de agua de alimentación, evaporadores, bombas de combustible, cocinadores y prensas, para los procesos de harinas, pastas y alimento balanceado. Se realizó una evaluación de las condiciones actuales de los motores eléctricos jaula ardilla en el año 2015 donde se obtuvieron 894.20 horas de reparación con un total de 663 intervenciones en ese mismo año. Obteniendo indicadores de gestión de mantenimiento en condiciones actuales como disponibilidad de 86%, confiabilidad de 78% con un tiempo promedio entre fallas de 8.56 horas útiles/falla y mantenibilidad de 12% con tiempo promedio para reparar de 1.35 horas de reparación/falla.

El análisis de criticidad a los motores eléctricos jaula ardilla se realizó a sus principales elementos tales como: cojinetes, estator, rotor, ventilador y eje de motor; basándose en 5 consecuencias tales como: Frecuencia de fallas, impacto operacional, flexibilidad operacional, costos de mantenimiento e impacto de seguridad y medio ambiente, encontrando como resultados a los elementos rotor, estator, ventilador y eje de motor. Las fallas de los elementos críticos fueron evaluadas mediante el desarrollo de hojas de información y hojas de decisiones del AMEF, evaluando 25 modos de falla funcional. Para luego a través del número de prioridad de riesgo, obtener 19 fallas inaceptables, 2 fallas reducibles deseables y 4 fallas aceptables. Para finalmente a través de diagramas de Ishikawa establecer la causa raíz de las fallas. El plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad basado en el análisis causa raíz, en condiciones de mejora estimó una disponibilidad de 95%, confiabilidad de 92% y mantenibilidad de 12%.

**Descriptores:** *ACR, mantenimiento, confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad*. [O1]

### **Abstract**

This research is based on the design of a maintenance plan reliability-centered methodology it based on root cause analysis "ACR" in order to increase the mechanical availability of the 32 electric motors

squirrel cage Alicorp S.A.A which drive critical machines such as rotary dryers, forced draft fans, feedwater pumps, evaporators, fuel pumps, cookers and presses for processes of flour, pasta and balanced food. An assessment of the current conditions of squirrel cage electric motors in 2015 which were obtained 894.20 hours of repair with a total of 663 interventions took place that year. Getting maintenance management indicators in current conditions and availability of 86%, 78% reliability with a mean time between failures of 8.56 hours useful / fail and maintainability of 12% average repair time of 1.35 hours for repair / failure.

The criticality analysis to squirrel cage electric motors to its main elements such as performed: bearings, stator, rotor, fan and motor shaft; based on 5 consequences such as: frequency of failures, operational impact, operational flexibility, maintenance costs and impact safety and the environment, finding such results to the rotor elements, stator, fan and motor shaft. The failure of the critical elements were assessed by developing fact sheets and leaves the FMEA decisions, evaluating 25 functional failure modes. Then through risk priority number, get 19 unacceptable failures, 2 and 4 faults desirable reducible acceptable faults. Finally through Ishikawa diagrams establish the root cause of failures. The maintenance plan focused on reliability based on root cause analysis, improvement in conditions estimated 95% availability, reliability and maintainability 92% to 12%.

**Keywords:** ACR, maintenance, reliability, availability, maintainability.

## 1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación tiene por objetivo diseñar y aplicar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad basado en el análisis causa raíz, con la finalidad de incrementar la disponibilidad mecánica de los 32 motores eléctricos jaula ardilla de la empresa Alicorp S.A.A. La importancia de la aplicación de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad, basado en el ACR, permitirá reducir las pérdidas económicas en plena producción y la compra de motores eléctricos debido a su corta vida por fallas no planeadas.

La metodología análisis causa raíz para reducir las pérdidas de producción con la eliminación de las fallas críticas, permite a la empresa Alicorp S.A.A estar un paso adelante frente a otras empresas del mismo rubro y también reducir las pérdidas de energía caloríficas y la cantidad de hierro evacuados al medio ambiente.

La empresa Alicorp S.A.A; cuenta con 32 motores eléctricos jaula ardilla los cuales accionan maquinas críticas como: Secadores rotativos, ventiladores de tiro forzado. Bombas de agua de alimentación, evaporadores, bombas de combustible, cocinadores y prensas, para los procesos de harinas, pastas y alimento balanceado. En su área de mantenimiento de la empresa, cuenta con mantenimientos clásicos:

correctivo y preventivo para dar solución a las diferentes fallas de los motores eléctricos, no logrando obtener buenos resultados debido al incremento de fallas, las cuales son causadas por el incremento de la corriente en las líneas trifásicas, desalineamiento del eje principal, incremento de voltaje superior a la tensión absorbida, desalineamiento entre líneas de cojinetes, mal aislamiento de los conductores, elevado voltaje de consumo en el motor, corriente de diseño del motor superior a la corriente de diseño del contactor, problemas en la lubricación de los cojinetes, etc.

El estudio que se presenta a continuación, consta de tres secciones, donde se describe la problemática planteada en torno a las fallas que se presentan en los motores eléctricos jaula ardilla de la empresa Alicorp S.A.A, se evalúan los tiempos del mantenimiento y tasas de mantenimiento determinando los indicadores en condiciones actuales; realizar un análisis de criticidad clasificándolos en críticos, semi-críticos y no críticos; desarrollar las hojas de información para cada elemento crítico determinando las fallas inaceptables según el número de prioridad de riesgo y evaluarlos en el diagrama causa raíz; desarrollar las hojas de decisiones para elaborar el plan de mantenimiento a través de un programa de actividades a los elementos; y finalmente determinar los indicadores de mantenimiento proyectados en la aplicación del

diseño del plan de mantenimiento y compararlos con los actuales.

Sección 2: Realidad problemática; se presenta la descripción actual de la empresa Alicorp S.A.A y se expone la formulación del problema, objetivos de la investigación, justificación del estudio, trabajos previos y la hipótesis; presentando claramente los motivos por los cuales se realiza la investigación.

Teorías relacionadas al tema; se desarrolla la teoría referente a la investigación, así como los fundamentos teóricos, definiciones, identificando de este modo la metodología a aplicar para el estudio de las fallas de los elementos de los motores eléctricos jaula ardilla.

Sección 3: Método; se describe el diseño de investigación, variables y Operacionalización, población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos y el método del análisis de datos; para el logro de cada uno de los objetivos planteados, en donde se identifica el de cada técnica de recolección de datos y análisis.

Sección 4: Resultados; se describe en forma detallada todo el procedimiento y cada una de las herramientas metodológicas que permitieron alcanzar los objetivos específicos planteados.

Por último, están las discusiones, conclusiones y recomendaciones de la investigación, culminando con las referencias bibliografía y los diversos anexos adquiridos durante el trabajo de investigación.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 [02] Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad:

El Mantenimiento Centrado en la confiabilidad o RCM en una planta industrial tiene por finalidad aumentar la fiabilidad de la instalación, es decir, la disminución del tiempo de parada por averías imprevistas que se ocasionan en plena operación, que impidan cumplir con los planes de producción y reducir los costes de mantenimiento [1].

Por lo tanto, el RCM, no es más que una herramienta que forma parte de la gestión del mantenimiento, a través de esta aplicación se permite maximizar la confiabilidad operacional de las maquinarias, equipos o activos, a partir de la determinación y evaluación de los requerimientos reales de mantenimiento, [1].

### 2.2 Las 7 preguntas del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad:

RCM se basa en reconocimiento de las causas que los provocan las fallas y determinan una serie de medidas preventivas para evitar dichas fallas de los equipos. En el desarrollo del proceso se plantean una lista de series de preguntas claves [1]:

- ✓ ¿Cuáles son las funciones y los estándares de funcionamiento en cada sistema?
- ✓ ¿Cómo falla cada equipo?
- ✓ ¿Cuál es la causa de cada fallo?
- ✓ ¿Qué parámetros monitorizan o alertan de un fallo?
- ✓ ¿Qué consecuencias tiene cada fallo?
- ✓ ¿Cómo puede evitarse cada fallo?
- ✓ ¿Qué debe hacerse si no es posible evitar un fallo?

## 2.3 Tipos de Mantenimiento:

**2.3.1 Mantenimiento Correctivo:** Son todas las actividades destinadas a reparar las averías imprevistas y especiales que quedan fuera del control del mantenimiento preventivo, busca diagnosticar y corregir las causas reales que provoca la falla.

Este método solo es aplicable cuando existe disponibilidad suficiente de equipos de repuesto y la sustitución es rápida, económica, y no supone interrupciones ni perjuicios en el proceso productivo. Esto suele ser así en el caso de máquinas sencillas y baratas y de las cuales existe varias unidades en la planta industrial, lo que permite con un repuesto reducido cubrir gran parte de los eventuales fallas [2].

**2.3.2 Mantenimiento Preventivo:** Es el mantenimiento más importante que se desarrolla dentro de las empresas. Se puede definir como el conjunto de actividades que deben realizarse periódicamente para prevenir el desgaste y mantener los equipos e instalaciones en perfectas condiciones de uso [2].

La frecuencia del mantenimiento preventivo dependerá de las partes de la máquina y siempre se deberá seguir el criterio que marque el fabricante. Así puede ser que ciertas zonas requieran de intervención cada determinada hora. Otras, sin embargo, deberán realizarse en periodos de tiempos más largos [2].

**2.3.3 Mantenimiento Predictivo:** Consiste en predecir las averías que pudiesen surgir. Esto se puede conseguir insertando en una maquinaria diversos sensores que proporcionen datos, como ruidos, vibraciones, temperaturas, etc. Con su posterior análisis se puede determinar si esos parámetros son correctos y están dentro de un rango de normalidad, o por lo contrario se encuentran fuera

de control, lo que implicaría una intervención del mantenimiento preventivo para solucionar el problema antes que se produzca la avería [2].

## 2.4 Tiempos de Mantenimiento:

### 2.4.1 Tiempo de reparación y tiempo entre fallas:

Se define como el tiempo medio real utilizado en la corrección de la falla y en la restauración de la función de un equipo, línea, maquinaria o proceso después de una falla funcional [3],[4].

$$TPR_i = \sum_{i=1}^n TPR_i \quad \text{Ec. 1}$$

$$TEF_i = T_{p_i} - TPR_i \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

TPR: Tiempo para reparar.

TEF: Tiempo entre fallas.

Tp: Tiempo programado.

### 2.4.2 Tiempo Medio Para Reparar (TMPR):

Generalmente es el tiempo que se espera para reparar que dicho elemento o máquina para que funcione de manera satisfactoria [3].

$$TMPR = \frac{\sum_{i=1}^n TPR}{i} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

TMPR: Tiempo medio de reparación.

TPR: Tiempo de operación de reparación.

i: Número total de intervenciones.

**2.4.3 Tiempo Medio Entre Fallas (TMEF):** Es el tiempo en el cual un equipo, línea, máquina, o planta realizan sus funciones sin tener interrupción debido a una falla funcional. Se obtiene con la fórmula siguiente [4]:

$$TMEF = \frac{\sum_{i=1}^n TEF}{i} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

TMEF: Tiempo Medio Entre Fallas.

TEF: Tiempo total de operación en el periodo.

i: Número total de intervenciones.

**2.5 Tasa de fallas:** La tasa de fallos o  $\lambda(t)$   $Z(t)$  es la probabilidad de que ocurra una falla del sistema o componente en un intervalo de tiempo dado. Se mide

las fallas por unidad de tiempo [3],[103] Matemáticamente la tasa de fallas se define como:

$$\lambda = \frac{1}{TMEF} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

TMEF: Tiempo Medio Entre Fallas.

**2.6 Tasa de reparaciones:** La tasa de reparaciones ( $\mu$ ) se mide las reparaciones por unidad de tiempo, [3].

Matemáticamente podemos definir la tasa de falla como:

$$\mu = \frac{1}{TMPR} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

TMPR: Tiempo medio de reparación.

## 2.7 Indicadores de Mantenimiento:

**2.7.1 Disponibilidad:** Probabilidad de que un equipo esté operando o sea disponible para su uso, durante un periodo de tiempo determinado [5].

La Disponibilidad puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$D(t) = \frac{TMEF}{TMEF + TMPR} * 100\% \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

TMEF: Tiempo medio entre fallas.

TMPR: Tiempo medio para reparación.

**2.7.2 Confiabilidad:** Es la probabilidad de que un sistema o equipo pueda ejercer su función requerida durante un intervalo de tiempo establecido y bajo condiciones de uso definidos [5]. La confiabilidad puede ser expresada por la siguiente ecuación, que representa una distribución exponencial (tasa de falla constante):

$$C(t) = e^{\frac{-\lambda t}{100}} * 100\% \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

C(t): Confiabilidad para un tiempo dado.

e: Base de los logaritmos neperianos ( $e = 2.303$ ).

$\lambda$ : Tasa de fallas (número total de fallas por periodo de operación).

t: Tiempo de operación previsto.

**2.7.3 Mantenibilidad:** Puede ser definida como la característica de un equipamiento o instalación de permitir un mayor o menor grado de facilidad en la ejecución de los servicios de mantenimiento. O de forma más simple es la probabilidad de que un equipo sea reparado en un tiempo determinado ya que produce una falla [5].

La mantenibilidad puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$M(t) = \left(1 - e^{-\frac{\mu t}{100}}\right) * 100\% \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

M(t): Mantenibilidad para un tiempo dado.

e: Base de los logaritmos neperianos (e = 2.303).

μ: Tasa de reparaciones (número de reparaciones realizadas en relación al total de horas de reparación de un equipo).

t: Tiempo de reparación previsto.

## 2.8 Análisis de Criticidad (AC):

El AC es una metodología que facilita establecer una jerarquía del equipo o sistema y también los prioriza, logrando así crear una estructura que permita tomar de decisiones y orientar el esfuerzo en las áreas donde sea más importante y necesario mejorar, se basa en la realidad actual.

Su objetivo principal es ofrecer una herramienta de ayuda, en la cual se determine la jerarquía de equipos y sistemas de una planta, que permita tener un manejo adecuado de manera controlada y en orden de prioridades [6].

Los criterios para la realización de un análisis de criticidad están vinculados con: frecuencia de fallas, impacto operacional, flexibilidad operacional, costo del mantenimiento, impacto de seguridad y medio ambiente [6].

Definiremos:

$$\begin{aligned} \text{CRITICIDAD TOTAL} \\ &= \text{Frecuencia de falla} \\ &* \text{Consecuencia} \quad \text{Ec. 10} \end{aligned}$$

Donde:

Frecuencia de falla: Número de fallas o intervenciones en un tiempo determinado.

$$\begin{aligned} \text{Consecuencia} = & (\text{I.O} * \text{F.O.} * \text{C.M.} \\ & * \text{I.S.M.A.}) \quad \text{Ec. 11} \end{aligned}$$

- ✓ Frecuencia de Fallas: Es el número de veces que se repite un evento que se considera como una falla dentro en un período de tiempo.
- ✓ Impacto Operacional (I.O.).
- ✓ Flexibilidad Operacional (F.O.).
- ✓ Costo del Mantenimiento (C.M.).
- ✓ Impacto de Seguridad y Medio Ambiente (I.S.M.A) [6].

Los criterios utilizados para la obtención de la criticidad total del equipo o sistema, se muestran en el siguiente cuadro:

Tabla 1: Puntuación para los criterios de criticidad.

Frecuencia de fallas	
Elevado mayor a 40 fallas/año	4
Promedio de 30-40 fallas/año	3
Buena de 10-20 fallas/año	2
Excelente menos de 10 fallas/año	1
Impacto Operacional	
Parada total del equipo	10
Parada parcial del equipo e influye a otro equipo o subsistema	7-9
Impacta a niveles de producción o calidad	5-6
Influye en costos operacionales asociado a disponibilidad	2-4
No produce ningún efecto significativo	1
Flexibilidad Operacional	
No existe opción igual o equipo similar de repuesto	4
El equipo puede seguir en funcionamiento	2-3
Existe otro igual o disponible fuera del sistema (stand by)	1
Costo de mantenimiento	
Mayor o igual a US\$ 400 (incorpora accesorios y repuestos)	2
Inferior a US\$ 400 (incorpora accesorios y repuestos)	1
Impacto de seguridad y medio ambiente	
Accidente desastroso	8
Accidente superior serio	6-7
Accidente inferior e incidente inferior	4-5
Cuasiaccidente o incidente inferior	2-3
Variado	1
No ocasiona ningún tipo de riesgo	0

Fuente: Amendola [9].

Luego de calcular la ecuación de riesgo y agrupando los resultados se visualizan en una matriz de criticidad, que se detalla a continuación [7]:

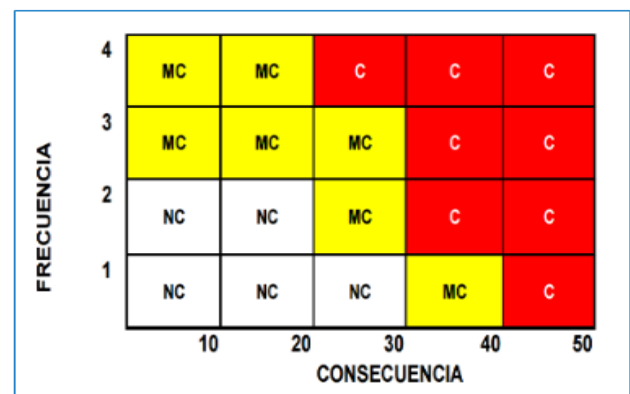


Figura 1: Matriz de Criticidad propuesta por el modelo CTR.

Fuente: Parra [7].

Donde:

C: Áreas de sistemas Críticos

MC: Áreas de sistemas Media Criticidad

NC: Áreas de sistemas No Críticos

## 2.9 Diagrama del Árbol lógico de decisiones de las actividades de mantenimiento:

En forma general, el esquema sugerido a realizar para manejar el MCC, se detalla a continuación en un diagrama de bloques, que muestra los siguientes pasos que deben seguirse:

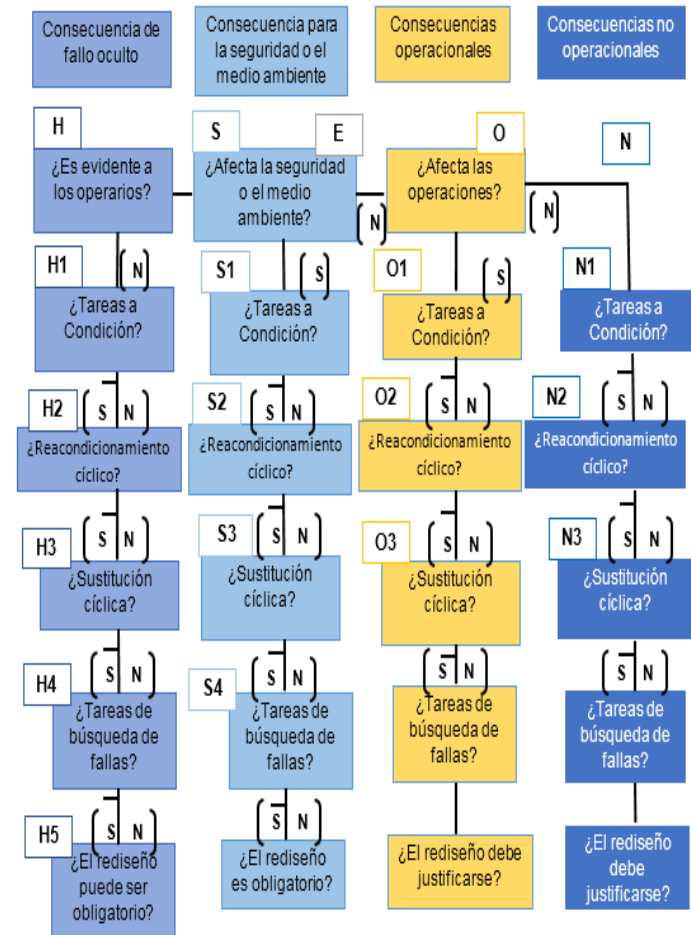


Figura 2: Arbol lógico de decisiones.  
Fuente: Moubray [8].

### 2.9.1 Hoja de Información:

Tabla 2: Hoja de información.

Nombre del equipo:			
Sistema:			
Pieza	Función que desempeña (F)	Modo de fallo funcional (FF)	Causas Potenciales de fallo (FM)
1			
2			
3			

Fuente: Amendola [9].

### 2.9.2 Hoja de Decisiones:

Tabla 3: Hoja de decisiones.

HOJA DE DECISIONES	Nombre del equipo:			Facilitador:	Fecha:	Hoja N° 1								
	Sistema:			Auditor:	Fecha:	de:								
Referencia de información	Evaluación de consecuencias	H1	H2	H3	Acción de falla de	Tarea Propuesta	Intervalo inicial (a-año, m-mes, s-semana, d-día)	A realizarse por						
		S1	S2	S3										
F	FF	FM	H	S	E	O	O1	O2	O3	H	H5	S4		
										4				

Fuente: Moubray [8].

### 2.10 Análisis Causa Raíz:

El ACR una de las metodologías que se utiliza con el fin de apoyar a los analistas de problemas a orientarse, en los pasos a realizar y en las consideraciones que deben ser tomadas para obtener una solución positiva y efectiva, el resultado del éxito de esta aplicación del Análisis causa raíz depende del esfuerzo de los integrantes del equipo de trabajo y por lo tanto se necesita de cierta experiencia para derrotar los paradigmas que frecuentemente aparecen en los procesos de análisis de fallas [7].

### 2.11 Análisis de Modo y Efecto De Fallas (AMEF)

Este análisis trata de evitar fallas acaecidas en nuestros procesos de mantenimiento, revisando de forma metodológica y sistemática. Es un medio esencial para lograr bucles de calidad, tanto a nivel de ingeniería de mantenimiento como de la propia ejecución o producción de mantenimiento, aprendido de fallas anteriores tras el análisis constructivo de los mismos, sin ánimo de búsqueda de culpables sino de causas de fallas, definiendo medidas correctas y preventivas para que no se repitan [10].

### 2.12 Diagrama de Ishikawa (Causa Efecto):

Este tipo de diagrama es un análisis de causa y efecto o sub-causa para la solución de diversos problemas,



enlazando un efecto con las posibles causas que lo ocasionen.

Se le conoce también como el diagrama de espina de pescado o diagrama de causa-efecto, que se muestra a continuación [9]:

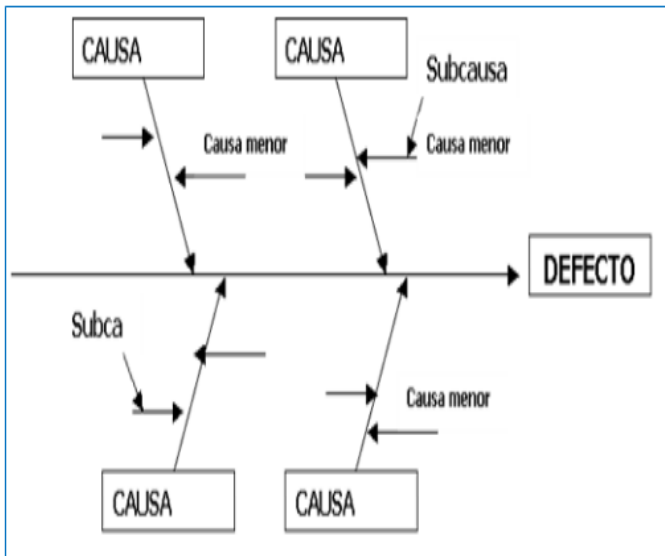


Figura 3: Diagrama de Ishikawa.  
Fuente: Ishikawa [9].

### 2.13 Puntaje del AMEF (Número de prioridad de riesgo):

Dentro del desarrollo del AMEF se calcula el NPR (Número de prioridad de riesgo), que se da por la multiplicación de los tres índices de probabilidad, los son: la Gravedad, Ocurrencia y Detección [11].

$$NPR = G * O * D \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

G: Gravedad: Hace referencia a la probabilidad de fallas en el proceso, se basa únicamente en el efecto de la falla.

O: Ocurrencia: Se refiere a la frecuencia en la cual se presentan las fallas, cuando se establece esta clasificación, se deben analizar dos probabilidades: la primera de que se produzca una falla, y la segunda ya una vez ocurrida la falla, esta provoque el efecto perjudicial indicado.

D: Detección: Este indica la probabilidad de que la causa y/o modo de falla, supuestamente registrado, llegue a ser comunicado.

Tabla 4: Puntuación para el AMEF.

Gravedad	
Descripción	Puntaje
Invisible, mínimo	1
Escasa, falla menor	2-3
Baja, falla próxima	4-5
Media, falla pero no para el sistema	6-7
Alta, falla crítica	8-9
Muy alta, con problemas de seguridad, no aprobada	10
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
Detección	
Descripción	Puntaje
Obvia	1
Escasa	2-3
Moderada	4-5
Frecuente	6-7
Alta	8-9
Muy Alta	10

Fuente: Amendola [9].

A continuación se muestran las características del análisis del Número de Prioridad de Riesgo (NPR):

- NPR > 200 Fallas Inaceptables (I).
- 125 < NPR ≤ 200 Fallas reducibles deseables (R).
- NPR ≤ 125 Fallas Aceptables (A).

### 2.14 Motores Eléctricos Jaula Ardilla:

El motor eléctrico de jaula ardilla, es también llamado de rotor en cortocircuito, es el más utilizado y sencillo de los demás motores eléctricos. La construcción del rotor es de chapas estampadas de acero al silicio en la parte interna, de las cuales se colocan unas barras, generalmente de aluminio.

En los anillos conductores que se denominan anillos extremos se conectan las barras del devanado, estos devanados tienen forma de jaula de ardilla [12].

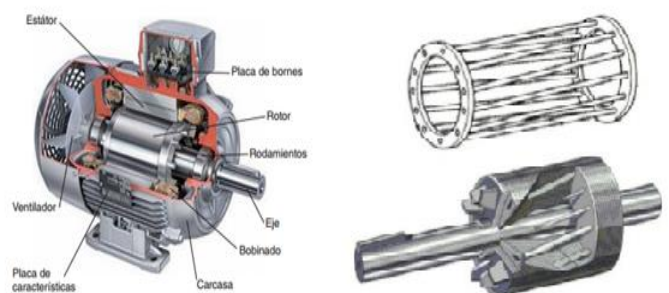


Figura 4: Motor eléctrico Tipo Jaula de Ardilla.  
Fuente: Canovas [13].

## 2.15 Descripción de las partes de un motor eléctrico jaula ardilla [12]:

• **El estator:** Es la parte fija del motor, conformado por una carcasa en la que se encuentra fijada una corona de chapas de acero al silicio equipado de unas ranuras. Los devanados o bobinados de sección adecuada están arreglados en dichas ranuras formando parte de las bobinas que se ubicarán en diversos circuitos como fases tenga red o línea a la que esté conectada la máquina.

• **El rotor:** Es la parte móvil del motor ubicado en el interior del estator y está conformado por un núcleo de chapas de acero al silicio agrupadas que conforman un cilindro, en cuyo interior se instala un bobinado eléctrico.

• **Caja de conexiones:** Generalmente en los motores se localiza en la parte superior de la carcasa; en el resto de motores va ubicada a la derecha. Para la conexión a tierra se coloca un borne en la caja de conexiones, debidamente marcado.

• **Carcasa:** Es la parte que protege y cubre al estator y al rotor, en ésta van alojados todos los componentes y a su vez adjunto la caja de conexiones, el material que por lo general que están hechas es de hierro fundido gris y elevada resistencia estructural en aplicaciones de trabajo pesado.

• **Ventilador:** Su función principal es la de refrigerar los devanados del motor, son de plástico. Proporciona el intercambio de temperatura que existe entre el aire interior del motor y el aire del medio ambiente, logrando así la refrigeración de la máquina.

• **Rodamientos:** Los rodamientos son tipos de cojinetes que son elementos mecánicos que reducen la fricción entre el eje y el rotor por medio de rodadura, que sirve de apoyo y facilita su desplazamiento.

• **Bobinados:** También llamados devanados o arrollamientos, los bobinados en el estator al ingresar las corrientes generan una inducción en la cual las fuerzas eléctricas crean un campo magnético con las chapas metálicas del rotor se cruzan y esto hace que el rotor empiece a girar.

## 3. MARCO METODOLÓGICO

### 3.1 Diseño de investigación:

Pre – Experimental: Ya que se evalúan las condiciones de mantenimiento de un antes y un después del plan.

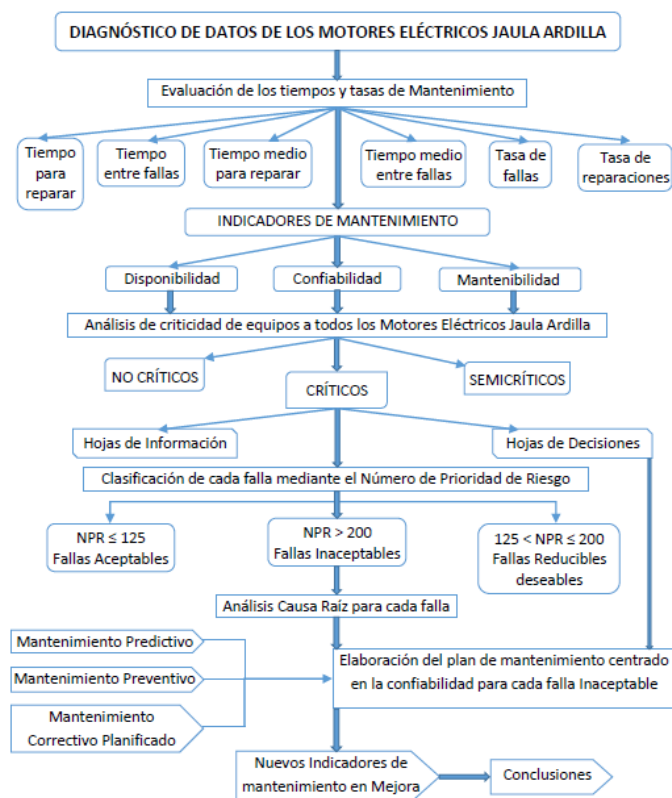


Figura 5: Diagrama de flujo, para la aplicación del RCM basado en el ACR a los Motores Eléctricos Jaula Ardilla.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5: Técnicas e Instrumentos para la recolección de datos de la presente investigación.

TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS	INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS	VALIDACIÓN
Análisis Documental	Ficha de Registro	Por Expertos
Encuesta	Cuestionario	Por Expertos

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2 Métodos de análisis de datos:

- En el primer procedimiento se determinarán los indicadores de mantenimiento tales como: Disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad.
- Como segundo procedimiento se determina la criticidad, que es la multiplicación de la frecuencia de fallas por la consecuencia, para clasificar las partes de los motores eléctricos jaula ardilla en críticos, no críticos y semicríticos.
- Para el tercer procedimiento evaluaremos los componentes críticos a través de hojas de



información para empezar las actividades del plan de mantenimiento.

- En el cuarto procedimiento determinaremos el número de prioridad de riesgos que es la multiplicación de tres factores adimensionales: Gravedad, Ocurrencia y Detección, para lo cual según los valores se clasificaran en fallas aceptables, reducibles deseables e Inaceptables.

- En el quinto procedimiento se analizará cada falla intolerable a través del análisis causa raíz en diagramas de Ishikawa, determinando causas, sub causas y efectos de las fallas.

- Como sexto procedimiento de desarrollaran las hojas de decisiones para elaborar un programa que nos permita calcular los indicadores en forma proyectada.

- Finalmente comparar los indicadores iniciales con los proyectados, sacando las conclusiones en función a los objetivos específicos.

#### 4. RESULTADOS

Evaluación de los tiempos del mantenimiento y los valores porcentuales de los indicadores de mantenimiento:



Figura 6: Tiempos de reparación con relación a cada falla.  
Fuente: Elaboración propia.

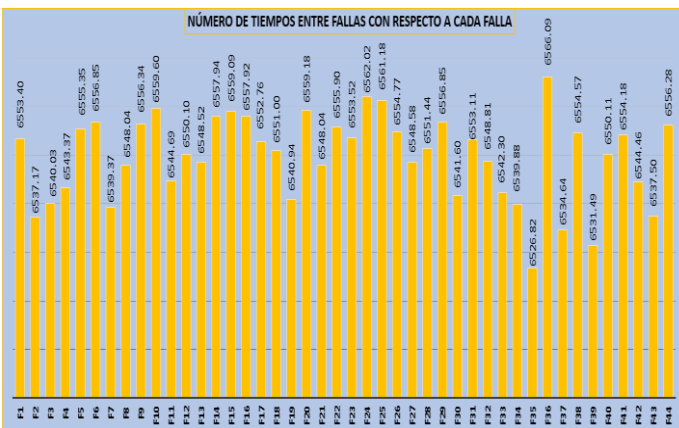


Figura 7: Tiempos entre falla con relación a cada falla.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 8: Número de intervenciones con relación a cada falla.  
Fuente: Elaboración propia.

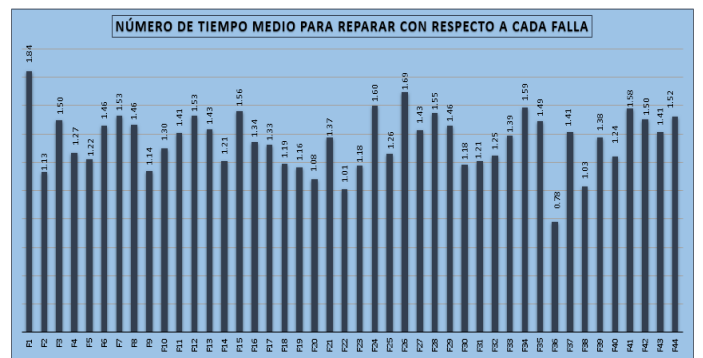


Figura 9: Número de tiempo medio para reparar con respecto a cada falla.  
Fuente: Elaboración propia.

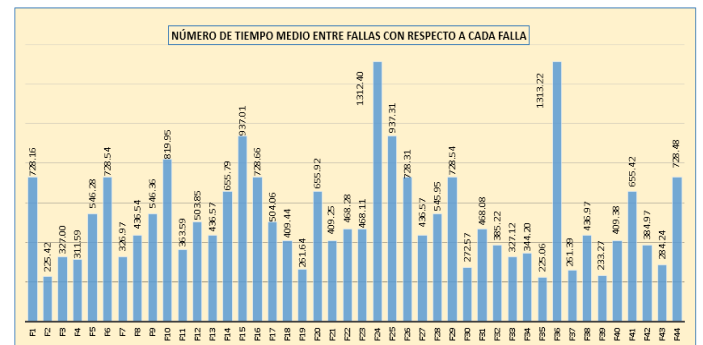


Figura 10: Número de tiempo medio entre fallas con relación a cada falla.  
Fuente: Elaboración propia.

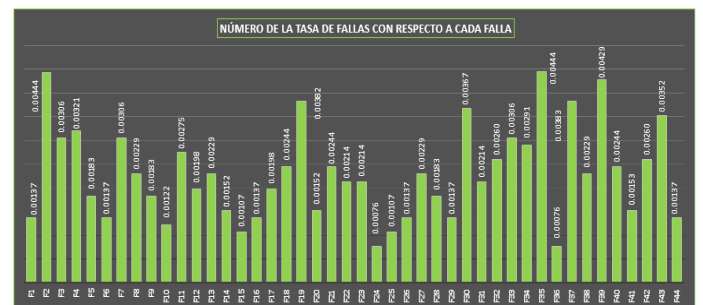


Figura 11: Número de la tasa de fallas con respecto a cada falla.  
Fuente: Elaboración propia.

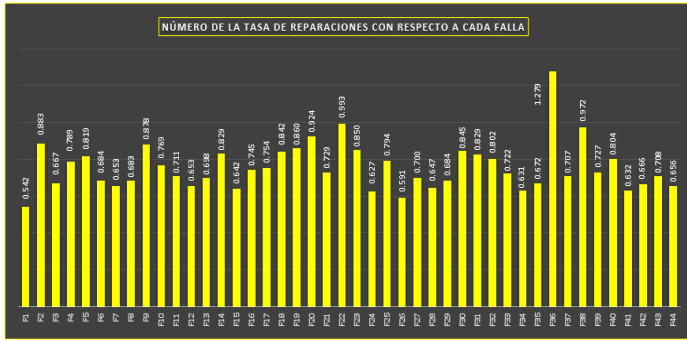


Figura 12: Número de la tasa de reparaciones con relación a cada falla.

Fuente: Elaboración propia.

Con los siguientes datos desarrollados en las gráficas anteriores, se calcula los indicadores de mantenimiento actuales:

Disponibilidad:  $D(t) = 86\%$   
 Confiabilidad:  $C(t) = 78\%$   
 Mantenibilidad:  $M(t) = 12\%$

Se Realiza un Análisis de criticidad a los elementos en falla de los motores eléctricos jaula ardilla obteniendo como resultado:

Tabla 6: Niveles de criticidad.

Nivel de Criticidad	Cantidad
<b>Críticos</b>	<b>25</b>
<b>Medio Crítico</b>	<b>13</b>
<b>No Crítico</b>	<b>6</b>
	<b>44</b>

Fuente: Elaboración propia.

Luego hacemos la evaluación de cada una de las fallas, a través del desarrollo de la hoja de información y decisiones del AMEF, que tomaremos al elemento "Rotor" para la descripción.

Tabla 7: Hoja de información del equipo rotor.

Nombre del Equipo: Rotor		Realizado Por: Quiñones Siccha Edwin Ismael	
Sistema: Eléctrico			
Pieza	Función que desempeña (F)	Modo de Fallo funcional (FF)	Causas Potenciales de Fallo (FM)
Rotor	1. Inducir corriente eléctrica, a través del movimiento relativo entre el campo y la rotación del rotor, dando un resultado de fuerza de torsión para dar vuelta el eje del motor.	A F3: Bobina cortocircuitada.	1 Elevadas RPM, superior a la de diseño. 2 Incremento de voltaje superior a la tensión absorbida.
		B F8: Circuito abierto en las líneas del motor.	1 Incremento de la corriente en las líneas trifásicas.
		C F15: Cortocircuito en las "colillas" de conexión.	1 Área de conductores mal dimensionada.
		D F17: Cortocircuito entre espiras.	1 Elevada corriente eléctrica, amperaje superior al amperaje nominal.
		E F34: Rotor trabado.	1 Desalineamiento del eje principal por exceso de temperatura a 50°C.
		F F43: Tierra.	1 Mala resistencia de la superficie. 2 Mala selección de conductores.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8: Hoja de decisiones del equipo rotor.

HOJA DE DECISIONES		Nombre del Equipo: Rotor		Facilitador: Quiñones Siccha Edwin Ismael		Fecha: 01/07/2016		Hoja N° 1						
		Sistema: Eléctrico		Auditor: Ing. Ronal Carbajal Salas		Fecha: 10/07/2016		de: 1/1						
Referencia de información	Evaluación de consecuencias	H1	H2	H3	Acción de falla de		Tarea Propuesta	Intervalo inicial (a=año, m=mes, s=semana, d=día)	A realizarse por					
		S1	S2	S3	H4	H5				S4				
F	FF	H	S	E	O	O1	O2	O3	H4	H5	S4			
		N1	N2	N3		N1	N2	N3						
1	A	1	N	N	S	N	N	N	N	N	N	Verificar e inspeccionar la velocidad de rotación de trabajo de la máquina que acciona el motor eléctrico.	1d	Técnico Mecánico/Electricista
1	A	2	N	N	S	N	N	N	N	N	N	Verificar el tablero general de consumo de voltaje en las líneas de absorción en los motores eléctricos.	1d	Técnico Mecánico/Electricista
2	B	1	N	N	N	N	N	N	N	N	N	Inspeccionar las líneas trifásicas de ingreso al motor.	1s	Técnico Mecánico/Electricista
3	C	1	N	N	S	N	N	N	N	N	N	Verificar a la superficie vertical el estado de conductores y correcto diámetro de ellos.	1m	Técnico Mecánico/Electricista
4	D	1	N	N	S	N	N	N	N	N	N	Verificar estado de corriente del motor eléctrico y máquina.	1d	Técnico Mecánico/Electricista

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, tenemos la determinación de las fallas Inaceptables de las máquinas críticas según el Número de Prioridad de Riesgo (NPR), obteniendo

Tabla 9: cantidad de fallas según NPR.

Escala	FALLA	Cantidad de Fallas
200 < NPR	Inaceptable	19
125 < NPR ≤ 200	Reducibles deseables	2
NPR ≤ 125	Aceptables	4

Fuente: Elaboración propia.

También se realiza el análisis causa raíz a través del Diagrama Ishikawa, elegimos al elemento "Rotor" para mostrar la causa raíz de cada falla.

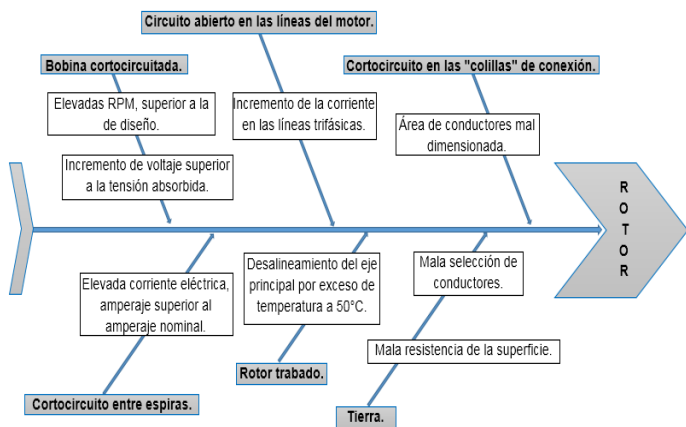


Figura 13: Diagrama Ishikawa del elemento Rotor  
Fuente: Elaboración propia.

Elegimos al elemento “Rotor” para ver elaboración del plan de mantenimiento RCM a través de un programa de actividades a los elementos críticos:

Tabla 10: Plan de mantenimiento RCM a través de un programa de actividades.  
Fuente: Elaboración propia.

ELEMENTO	ROTOR JAULA ARDILLA		
1 SEMANA	1. Verificar e inspeccionar la velocidad de Rotación de trabajo de la máquina que acciona el motor eléctrico.	120	PLANTA DE PROCESOS TÉRMICOS
1 SEMANA	2. Verificar el tablero general de consumo de voltaje en las líneas de absorción en los motores eléctricos.	120	
1 SEMANA	3. Inspeccionar las líneas trifásicas de ingreso al motor.	120	
4 SEMANAS	4. Verificar a la superficie vertical del estado de conductores y correcto diámetro de ellos.	160	
1 SEMANA	5. Verificar estado de corriente del motor eléctrico y máquina.	120	
1 SEMANA	6. Realizar cambio de lubricación periódicos cada 250 horas.	120	
1 SEMANA	7. Verificar resistencia de terrenos sobre el cual están instalados los motores, para obtener una resistencia normal de 25 ohmios.	120	
4 SEMANAS	8. Calibrar sección de conductores utilizando calibres americanos AWG.	120	

Posteriormente se realiza la estimación de los Indicadores de Gestión de mantenimiento con el Diseño del plan de mantenimiento MCC basado en el ACR y comparación con los parámetros actuales y en mejora:

Tabla 11: Estimación de los indicadores de gestión de mantenimiento.

Condición	N° Fallas	N° Intervenciones (i)	PARAMETROS DEL MANTENIMIENTO			
			TPR [Horas de reparaciones/año]	TEF [Horas de operación/año]	TMEF [Horas de operación/falla]	TMPR [Horas de reparación/falla]
Actual	44	663	894.20	5675.80	8.56	1.35
Mejora	19	276	363.16	6206.84	22.49	1.32
Comentario	<p>El análisis de criticidad encontró como resultado de 44 fallas en total, 25 Críticas no considerando las fallas Medias Críticas y No Críticas, teniendo 13 y 6 respectivamente, con un total de 19.</p> <p>El Diseño del plan de mantenimiento MCC basado en el ACR, soluciona las fallas críticas, no considerando las Intervenciones Medias Críticas y No Críticas las cuales tienen una cantidad de Intervenciones de 207 y 69 respectivamente lo cual entrega un total de 276.</p> <p>El Diseño del plan de mantenimiento MCC basado en el ACR, reducirá 531.04 horas de reparación al año en los Motores Eléctricos Jaula Ardilla.</p> <p>Los Motores Eléctricos Jaula Ardilla con el nuevo plan de mantenimiento, aumentará 531.04 horas de operación al año.</p> <p>Con la solución de las fallas críticas determinadas para reparar una falla el tiempo para que se redujo una moderadamente determinada falla a 1.32 horas con una diferencia ganada de 0.03 horas (1.8 minutos).</p>					

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en la figura 14 tenemos la comparación de los indicadores de mantenimiento actuales y en mejora:

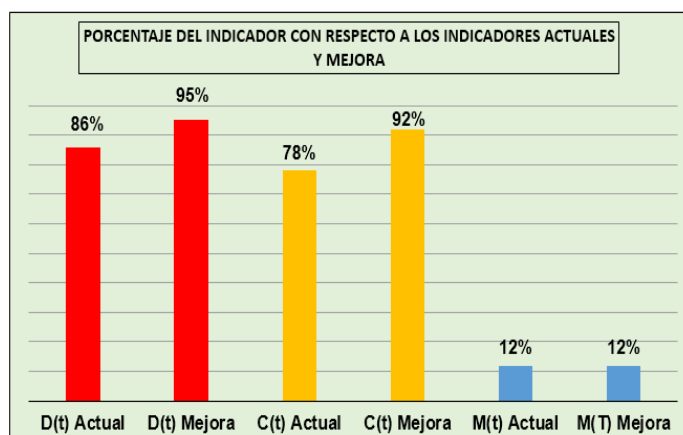


Figura 14: Porcentaje del indicador con relación a los indicadores actuales y mejora.

Fuente: Elaboración propia.

## 5. DISCUSIONES

- En la tesis de Martínez [14], se propuso mejoras para incrementar la confiabilidad de los equipos mediante la metodología causa raíz encontrando una confiabilidad en estado actual de 77.45% logrando aumentarla a un máximo de 86.11%, es decir con una variación positiva de 8.66%, en

comparación con el presente estudio se obtuvo una confiabilidad en estado actual para los motores eléctricos jaula ardilla de 78%, logrando aumentarla en 92%, es decir con una variación positiva de 14%.

- En la tesis de Abarca [15], se implementó una adecuada planificación de mantenimiento predictivo relacionado a los problemas de las altas temperaturas en los motores eléctricos encontrando a los motores eléctricos con temperaturas con un rango de temperaturas de 50 a 100 °C considerado como severo calentamiento en comparación a la presente tesis se encontraron registros de temperatura por debajo de los 50°C según el historial de mantenimiento considerándose como sobrecalentamiento desarrollado.
- En la tesis de Da Costa [16], se implementó un plan RCM basado en hojas de información y hojas de decisiones a 124 modos de falla, además de clasificar las fallas a través del número de prioridad de riesgos obteniendo 26 fallas inaceptables (21%), 43 fallas reducibles deseables (43.7%) y 55 fallas aceptables (44.3%), bajo la misma metodología del RCM se evaluaron los 32 motores eléctricos jaula ardilla con un total de 25 modos de falla, obteniendo 19 fallas inaceptables (76%), 2 fallas reducibles deseables (8%) y 4 fallas aceptables (16%).

## 6. CONCLUSIONES

- Para la evaluación de las condiciones actuales del mantenimiento se basó en el estudio del historial de mantenimiento de los motores eléctricos jaula ardilla del año 2015 con tiempos para reparar de 3.91 horas hasta 43.18 horas por cada falla; con tiempos útiles o entre fallas de 6526.82 horas a 6566.09 horas, para lo cual se obtuvo un número de intervenciones en el rango de 5 a 29, estableciendo que el tiempo promedio para reparar varía entre 0.78 a 1.84 horas de reparación por falla, el tiempo promedio entre falla entre 225.06 hasta 1313.22 horas útiles/falla; originando una tasa de fallas mínima de 0.00076 y un máximo de 0.00429 fallas/por horas útiles y una tasa de relaciones con un mínimo de 0.542 y máximo 1.279 fallas/horas de reparación. Concluyendo con una disponibilidad mecánica general de los motores eléctricos jaula ardilla de 86%, confiabilidad 78% y mantenibilidad 12%.
- Se realizó un análisis de criticidad a los 32 motores eléctricos jaula ardilla agrupando las 44 fallas de los motores en sus elementos principales como: rotor, estator, cojinete, ventilador y eje del motor, para su evaluación según 5 criterios tales como: frecuencia

de fallas, impacto operacional, flexibilidad operacional, costos de mantenimiento e impacto de seguridad y medio ambiente, obteniendo como elementos críticos: rotor, estator, ventilador y eje de motor los cuales representan un total de 25 fallas críticas. Además 13 fallas semi críticas y 6 no críticas.

- Se realizó una evaluación a cada una de las fallas críticas de los elementos críticos, a través del desarrollo de las hojas de información fundamentadas en las tres primeras preguntas del AMEF, tales como función que desempeña, modo de fallo funcional y causas potenciales de la falla.
- Se evaluaron las 25 fallas críticas a través del número de prioridad de riesgos, encontrando 19 fallas inaceptables, 2 fallas reducibles deseables y 4 fallas aceptables, para a través de diagramas de Ishikawa determinar la causa raíz de los elementos críticos.
- Para la elaboración del plan de mantenimiento basado en el análisis causa raíz se fundamentó en el desarrollo de hojas de decisiones resolviendo las 4 últimas preguntas del AMEF y del árbol lógico de decisiones, proponiendo tareas de mantenimiento e intervalos de ejecución.
- Se estimó un análisis comparativo de los parámetros de mantenimiento e indicadores de mantenimiento obteniendo un incremento de la disponibilidad de 9%, incremento en la confiabilidad de 14% y con una mantenibilidad constante del 12%. Lo cual origina una reducción de 25 fallas, 387 intervenciones, 531.04 horas de reparación y logrando un aumento en el tiempo promedio entre fallas de 13.93 horas útiles.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento a la prestigiosa Universidad César Vallejo y a los docentes por su enseñanza y dedicación en mi formación profesional, al Ing. Martín Sifuentes Inostroza por su dirección en este trabajo de investigación y su apoyo para guiar mis ideas en el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, agradecer a las personas que de una u otra forma me brindaron su apoyo en mi formación profesional.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] García S. Plan de mantenimiento basado en RCM. Empresa de ingeniería y de formación técnica

Renovetec [Revista en línea] 2009 [Consultado: 11 Octubre 2015] .Disponible en:

<http://www.ingenieriadelmantenimiento.com/index.php/26-articulos-destacados/17-plan-de-mantenimiento-basado-en-rcm>>.

[2] Ortega E. Montaje y mantenimiento mecánico. España: Enrique Ortega Varela editor; 2008.

[3] Reyes L, Ocampo J. Ingeniería de Mantenimiento. Teoría y Problemas Resueltos. Lima: Salvador Editores; 1996.

[4] Eda A. Análisis de Fallas de una Máquina Extrusora de Electrodo [Tesis]. Piura: Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Área Departamental de Ingeniería Industrial y de Sistemas; 2013.

[5] Hernandez M, Pirona F, Tovar J. Plan de Mantenimiento Preventivo a las Calderas Acuotubulares en el servicio autónomo del Hospital Universitario de Maracaibo (S.A.H.U.M) [Tesis]. Maracaibo: Universidad Privada Dr. Rafael Beloso Chacin. Facultad de Ingeniería. Escuela Industrial; 2013.

[6] Huerta R .El análisis de criticidad una metodología para mejorar la confiabilidad operacional. En: Libro de Ponencias : 2º Congreso Cubano de Ingeniería Mecánica, ISPJAE.Cuba; Ingeniería Mecánica; 2000. p. 13-19.

[7] Parra C, Crespo A. Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos. España: Ingeman; 2012.

[8] Moubrey MJ. RCM Reliability Centered Maintenance. United Kingdom: Aladon Ltd; 2004

[9] Ishikawa K. ¿Qué es el control total de la calidad? La modalidad Japonesa. Colombia: Grupo Editorial Norma; 1997.

[10] González F. Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado. Madrid: Fundación Confemetal; 2005.

[11] Améndola L. Modelos mixtos de confiabilidad. 3a ed. Valencia. Instituto PMM para el aprendizaje; 2002.

[12] Astudillo C. Máquinas Eléctricas. 3ª ed. Ecuador: Epoch; 2007.

[13] Ruz F, Cánovas FJ, Molina, JM. Motores y Máquinas Eléctricas. España: Marcombo S.A.; 2011.

[14] Martínez J. Propuesta para el incremento de la confiabilidad de los equipos críticos, basado en un análisis causa raíz [Tesis]. Venezuela: Universidad de Oriente. Núcleo de Anzoátegui. Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Departamento de Mecánica; 2009.

[15] Abarca D, Iglesias F. Elaboración de un plan de mantenimiento predictivo mediante la aplicación de termografía industrial en los motores eléctricos de la planta de Eurolit en la empresa Tubasec C.A [Tesis].

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de Mecánica. Escuela de Ingeniería de Mantenimiento; 2012.

[16] 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.