

<b>Fecha de elaboración:</b> 06.10.2021 [del RAI]			
<b>Tipo de documento</b>	TID:	Obra Creación:	Proyecto Investigación: X
<b>Título</b>	<b>Estructura metodológica análisis de causa raíz, monitoreo basado en condición y mantenimiento centrado en confiabilidad</b>		
<b>Autor(es)</b>	<b>José Andrés Salazar Alfaro</b>		
<b>Tutor(es)</b>	<b>Carlos Hernán Fajardo Toro</b>		
<b>Fecha de finalización</b>	07.10.2021		
<b>Temática</b>	<b>Métodos y herramientas de mantenimiento para mejorar la disponibilidad de equipos.</b>		
<b>Tipo de investigación</b>	<b>Tecnológico por que tiene como propósito aplicar el conocimiento científico para solucionar los diferentes problemas que benefician a la sociedad</b>		
<b>Resumen</b>			
<p>La gestión de activos es un proceso que procura y promueve las buenas prácticas en mantenimiento y operación, vela por la seguridad de las personas los equipos y la prolongación de vida útil de los activos.</p> <p>Se quieren presentar tres de las metodologías más usadas en la industria como lo son los análisis de causa raíz o por sus siglas (ACR), monitoreo basado en condición (MBC) y mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC). Finalmente, para todo el proceso la documentación de intervención y documentación de fallas es de vital importancia en el correcto desarrollo de la implementación de las metodologías propuestas en este documento. En líneas generales este es el proceso de desarrollo bajo un modelo de gestión que se desea implementar las metodologías seleccionadas, se pretende ser precisos y utilizar en los métodos seleccionados elementos prácticos y de fácil implantación, en búsqueda de mejorar los procesos en estado inicial de mantenimiento.</p>			
<b>Palabras clave</b>			
Gestión integral, mantenimiento centrado en confiabilidad, monitoreo basado en condición, análisis de causa raíz, ciclo Deming, implementación ejemplo práctico.			
<b>Planteamiento del problema</b>			
Es indispensable en la implementación de cualquier metodología en el proceso de gestión de activos evaluar la efectividad del proceso de mantenimiento, esta evaluación se puede realizar a través de una encuesta de manera auditoria que evalúa principalmente cinco áreas del proceso, con un total de 60 preguntas y basada en la auditoria MES			

(MAINTENANCE EFFECTIVENESS SURVEY). (Parra & Crespo Márquez, 2012) Las áreas a ser evaluadas son:

- Recursos Gerenciales
- Gerencia de la información (Software de gestión del mantenimiento)
- Equipos y técnicas del mantenimiento preventivo
- Planificación y ejecución
- Soporte, Calidad y Motivación

De acuerdo con los resultados que se tengan se definirá el estado de mantenimiento y una matriz de mejora de estado, que indicara el procesó ideal al que se quiera llegar de acuerdo con los objetivos de la empresa. Estos estados están definidos según la puntuación total.

- **300 – 261:** Categoría “Clase Mundial” /Nivel de excelencia de mantenimiento.
- **201 – 260:** Categoría “Muy buena” /Nivel de buenas prácticas de mantenimiento.
- **141 – 200:** Categoría “Por arriba del nivel promedio” / nivel aceptable en mantenimiento.
- **81 – 140:** Categoría "Por debajo del promedio"/nivel no muy bueno de mantenimiento, con oportunidades para mejorar.
- **Menos de 80:** Categoría "Muy por debajo del promedio" /nivel muy malo mantenimiento con muchas oportunidades para mejorar

La metodología plasmada en el presente documento se enfoca en aquellos resultados donde la calificación este por debajo de 141 donde se ubican procesos de mantenimiento por debajo del promedio. Consecuencias directas de esta calificación pueden ser: aumento del costo por reparaciones de fallas repentinas, bajo rendimiento y disponibilidad de las máquinas, desgaste y deterioro de equipos, riesgos e inseguridad de los trabajadores, retrasos en la producción, inadecuada utilidad de la mano de obra,

deterioro de la imagen y marca entre otras importantes repercusiones. (Parra & Crespo Márquez, 2012)

De continuar presentándose la situación antes descrita, la empresa objeto de estudio estaría en desventaja con otras que presten servicios similares; mientras que las continuas paradas por fallas en los equipos traen como consecuencia el aumento en los costos de mantenimiento y penalización por incumplimiento de indicadores de gestión. Por otra parte, a medida que aumenta el número de horas de operación de los equipos, se producen pérdidas en la disponibilidad de esos activos, lo cual ocasiona un descenso en la eficiencia y en la calidad del servicio, generando importantes pérdidas y en casos extremos, una detención súbita del proceso operativo y/o de producción.

### **Pregunta**

¿Implementar metodologías como MCC, ACR y MBC pueden mejorar el proceso de mantenimiento?

### **Objetivos**

#### **Objetivo General**

Diseñar la estructura de implementación de las metodologías ACR, MBC y MCC como herramientas de la gestión de activos.

#### **Objetivo Especifico**

1. Proponer una estructura acerca de modos de falla, efectos y criticidad de activos mantenibles, para equipos basados en jerarquización de criticidad total por riesgo.
2. Desarrollar las metodologías de mantenimiento centrado en confiabilidad y análisis de causa raíz, mitigando o eliminando así las fallas que generan indisponibilidad de los equipos enfocados en la atención de las causas físicas, humanas y latentes.
3. Proponer una estructura de monitoreo basado en condición para equipo crítico en sitio.

### **Marco teórico**

Resuma únicamente los principales referentes teóricos o artísticos que siguió su trabajo. Señale los números de las páginas de su documento en los que se encuentra la información completa.

**2021. Inspección y evaluación al proceso de confiabilidad de la división de ingeniería y planeación de mantenimiento (IPM) en mineros aluvial – pag.19**

**2019. Diseño de un sistema de gestión del mantenimiento para la empresa mane sucursal Colombia S.A – pag.20**

**2019. Propuesta de plan de mantenimiento centrado en confiabilidad para la maquinaria de una empresa cafetalera – pag.20**

**2019. Investigación para la mejora del mantenimiento preventivo utilizando la herramienta RCM para optimizar el servicio de mantenimiento a viviendas. – pag.20**

**2018. Aplicación de RCM como estrategia de implementación del mantenimiento predictivo para la metodología TPM. – pag.20**

**2018. Diseño de la estrategia de mantenimiento predictivo eléctrico y actualización de los procedimientos de diagnóstico para el contrato de operación y mantenimiento de Confipetrol en campo rubiales. – pag.21**

**2018. Propuesta de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), para la planta de tratamiento de aguas en Termosuria-meta. – pag.22**

**2017. Adaptación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en un sistema crítico de aire acondicionado de la Clínica Universitaria Bolivariana (CUB). – pag.22**

**2015. Diseño de un programa de análisis causa raíz (ACR) para el tratamiento de productos no conformes en una planta química. – pag.22**

**2015. Elaboración del plan de mantenimiento basado en condición para la flota vehicular de mezcladoras de concreto de una empresa productora de concretos, morteros y derivados. – pag.22**

**2015. Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento para los activos del centro de tecnologías del transporte CTT (SENA). – pag.23**

### **Método**

Resuma únicamente los principales elementos metodológicos que empleó en su investigación. Señale los números de las páginas de su documento en los que se encuentra la información completa.

El tipo de investigación que se desarrollara en este trabajo de grado es tecnológico por que tiene como propósito aplicar el conocimiento científico para solucionar los diferentes problemas que benefician a la sociedad, para este caso y como referencia al desarrollo bibliográfico planteado se busca implementar metodologías de mantenimiento para incrementar la disponibilidad y confiabilidad de los activos sujetos de estudio.

El diseño de la investigación es no experimental y de tipo transversal ya que se considera que esta implementación aplicaría para todo tipo de equipo sujeto a mantenimiento.

Previo al desarrollo del proyecto, la persona, equipo o empresa que desee implantar esta metodología debe tener un listado de equipos definido y caracterizado como lo recomienda la norma ISO 14224, determinando los límites de operación y así tener una taxonomía básica de los mismos. Se realiza la explicación como se presentan los equipos mediante una relación taxonómica y posterior la jerarquización de ellos utilizando la metodología de criticidad total por riesgo para responder así el primer objetivo específico pag.26 a pag.30

Se da una explicación y posteriormente ejemplos de la metodología de análisis de causa raíz y mantenimiento centrado en confiabilidad donde se enfocan los principales criterios en mantenimiento para definir los planes adecuados a los modos de falla identificados pag.31 a pag.34

Se presenta la estructura de un programa de monitoreo basado en condición, metodología y herramienta básica para mejorar y optimizar las labores de mantenimiento pag.35 a pag.37.

Finalmente se presenta la estructura metodológica para la implementación de las técnicas anteriormente citadas pag.38 y pag.39.

### **Resultados, hallazgos u obra realizada**

Presente el resumen de los principales resultados o hallazgos de su investigación o una sinopsis de la obra creada. Señale los números de las páginas de su documento en los que se encuentra la información completa.

N/A

### **Conclusiones**

Presente el resumen de las conclusiones a las que llegó. Señale los números de las páginas de su documento en los que se encuentra la información completa.

1. Se desarrollaron adecuadamente los objetivos específicos propuestos, explicando las características básicas y como podrían ser aplicados en cualquier organización de mantenimiento.
2. El desarrollo de las metodologías tiene un componente teórico el cual presenta muchas variantes de desarrollo, se explicaron las metodologías de una manera resumida y de fácil implementación.

3. La estructura metodológica propuesta puede ser respaldada bajo la visión de la gerencia de proyectos con el enfoque en la gestión de calidad y gestión de los recursos del proyecto, entendiendo que la gerencia de un proyecto como lo es el mantenimiento tiene un largo plazo de desarrollo, por lo que es indispensable utilizar herramientas que permitan mantener la calidad del producto y responder a los indicadores de gestión definidos en la gestión de alcance.
4. Podemos definir también en la gerencia de proyectos la posibilidad de innovar con estas técnicas las labores de mantenimiento, permitiendo ir más allá de la estructura del mantenedor de reparar cuando falla o cambiar cuando falla y entender el cómo falla y como puedo evitar que el equipo falle.

**Productos derivados**

Referencie los artículos, libros, capítulos de libro, ponencias, etc., que fueron resultado de su proceso investigativo.

N/A

**Estructura metodológica análisis de causa raíz, mantenimiento basado en condición  
y mantenimiento centrado en confiabilidad**

José Andrés Salazar Alfaro

Cod. 11213006

Corporación Universitaria Unitec  
Escuela de Ingeniería  
Especialización en Gerencia de Proyectos  
Bogotá, Distrito Capital  
02 de marzo de 2021

**Estructura metodológica análisis de causa raíz, mantenimiento basado en condición  
y mantenimiento centrado en confiabilidad**

José Andrés Salazar Alfaro

Cod. 11213006

Carlos Hernán Fajardo Toro

Director

Corporación Universitaria Unitec

Corporación Universitaria Unitec

Escuela de Ingeniería

Especialización en Gerencia de Proyectos

Bogotá, Distrito Capital

02 de noviembre de 2021



*Este trabajo está dedicado a mi esposa y a mis hijos que han representado la inspiración y motivación para realizarlo, los amo con todo mi corazón.*

## Tabla de contenido

<b>Resumen</b> .....	3
<b>Palabras clave</b> .....	5
<b>Planteamiento del problema</b> .....	6
<b>Justificación</b> .....	8
<b>Pregunta de investigación</b> .....	10
<b>Objetivo General</b> .....	11
<b>Objetivo Especifico</b> .....	11
<b>Marco teórico</b> .....	12
<b>Jerarquización de equipos</b> .....	15
<b>Análisis de modos de falla</b> .....	16
<b>Mantenimiento centrado en confiabilidad</b> .....	17
<b>Monitoreo basado en condición</b> .....	18
<b>Antecedentes</b> .....	19
Hipótesis.....	24
Marco Metodológico .....	25
Conclusiones .....	40
Bibliografía .....	41

### Tabla de figuras

<b>Figura 1.</b> Crecientes expectativas en el mantenimiento.....	13
<b>Figura 2.</b> Ciclo Deming Mantenimiento .....	14
<b>Figura 3.</b> Modos de falla de una Bomba .....	16
<b>Figura 4.</b> Taxonomía de equipos.....	26
<b>Figura 5.</b> Matriz de criticidad de equipos. ....	28
<b>Figura 6.</b> Taxonomía ejemplo. ....	29
<b>Figura 7.</b> Modos de falla para equipo eléctrico.....	31
<b>Figura 8.</b> Acciones de mantenimiento a implementar.....	32
<b>Figura 9.</b> Análisis Ishikawa falla motor .....	34
<b>Figura 10.</b> Flujo de trabajo procedimiento de monitoreo basado en condición.....	36
<b>Figura 11.</b> Estructura monitoreo basado en condición.....	37
<b>Figura 12.</b> Estructura metodología ACR, MBC, MCC.....	38

### Tabla de ecuaciones

<b>Ecuación 1.</b> Cálculo de criticidad total por riesgo .....	28
-----------------------------------------------------------------	----

## Resumen

La gestión de activos es un proceso que procura y promueve las buenas prácticas en mantenimiento y operación, vela por la seguridad de las personas los equipos y la prolongación de vida útil de los activos.

En relación con el proceso de gestión de activos, la industria implementa las más efectivas metodologías en mantenimiento las cuales constan de una serie de herramientas que tienen como fin cumplir con los objetivos del área de mantenimiento, garantizando la creación de ventajas competitivas, desarrollo del personal e implementación de mejores prácticas en la industria.

Se quieren presentar tres de las metodologías más usadas en la industria enfocando su desarrollo e implementación en las mejores prácticas como lo son los análisis de causa raíz o por sus siglas (ACR), monitoreo basado en condición (MBC) y mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC); teniendo estas como finalidad disminuir las fallas presentes en equipos; donde los interesados en la implementación de las mismas cumplan con efectividad los procesos planteados procurando siempre la satisfacción del cliente interno y externo.

Con referencia al objetivo de operación de equipos con el mínimo de fallas, la implementación de estas metodologías se basa en un modelo de gestión de activos el cual se enfoca en el ciclo de Deming de planear, hacer, verificar, actuar y se desarrolla en la implementación de 4 pasos a saber:

1. Jerarquización de equipos y análisis de puntos débiles en el proceso de documentación y reporte: Se busca priorizar las actividades de mantenimiento de los activos críticos, para disminuir la tasa de fallas, para iniciar con esta labor se usarán herramientas de clasificación como el PARETO, donde se entiende que atacando el veinte por ciento de las causas se eliminan el ochenta por ciento de los

defectos. Por otra parte, para equipos nuevos se puede realizar la clasificación de jerarquización por métodos de criticidad total por riesgo.

2. Implementación de Mantenimiento centrado en confiabilidad o por sus siglas (MCC): El mantenimiento centrado en confiabilidad se sustenta bajo el análisis de modos de falla efectos y criticidad de equipo o por sus siglas en ingles FMECA. La base fundamental del MCC es proponer las rutinas de mantenimiento ya sean de índole preventivo, predictivo o reactivo a los equipos críticos que se identificaron en la jerarquización de quipos, ordenando en primera medida su función principal, sus funciones secundarias para finalmente establecer sus modos de fallo y a si proponer las medidas de contención y prevención.
3. Mantenimiento Basado en Condición o por sus siglas (MBC): De acuerdo con la guía EPRI 1001032 de auto evaluación del monitoreo predictivo se propone realizar una estructura trayendo algunos pasos que van alineados con el enfoque de la norma ISO 17359 que brinda una guía general del monitoreo de condición y diagnóstico de equipos. Se desarrollarán unos pasos básicos para la implementación de este para su completa implementación una vez se tenga una madurez en el desarrollo del proceso.
4. Análisis de Causa Raíz: Se enfoca principalmente en identificar en tres niveles la causa raíz del fallo que conllevo a tener el equipo a estado indisponible, estos niveles se definen como: Causas raíz físicas, casus raíces humanas y causas raíz latente.

Finalmente, para todo el proceso la documentación de intervención y documentación de fallas es de vital importancia en el correcto desarrollo de la implementación de las metodologías propuestas en este documento. En líneas generales este es el proceso de desarrollo bajo un modelo de gestión que se desea implementar las metodologías seleccionadas, se pretende ser precisos y utilizar en los métodos seleccionados elementos prácticos y de fácil implantación, en búsqueda de mejorar los procesos en estado inicial de mantenimiento.

**Palabras clave**

Gestión integral, mantenimiento centrado en confiabilidad, monitoreo basado en condición, análisis de causa raíz, ciclo Deming, implementación ejemplo práctico.

## Planteamiento del problema

Es indispensable en la implementación de cualquier metodología en el proceso de gestión de activos evaluar la efectividad del proceso de mantenimiento, esta evaluación se puede realizar a través de una encuesta de manera auditoria que evalúa principalmente cinco áreas del proceso, con un total de 60 preguntas y basada en la auditoria MES (MAINTENANCE EFFECTIVENESS SURVEY). (Parra & Crespo Márquez, 2012) Las áreas a ser evaluadas son:

- Recursos Gerenciales
- Gerencia de la información (Software de gestión del mantenimiento)
- Equipos y técnicas del mantenimiento preventivo
- Planificación y ejecución
- Soporte, Calidad y Motivación

De acuerdo con los resultados que se tengan se definirá el estado de mantenimiento y una matriz de mejora de estado, que indicara el procesó ideal al que se quiera llegar de acuerdo con los objetivos de la empresa. Estos estados están definidos según la puntuación total.

- **300 – 261:** Categoría “Clase Mundial” /Nivel de excelencia de mantenimiento.
- **201 – 260:** Categoría “Muy buena” /Nivel de buenas prácticas de mantenimiento.
- **141 – 200:** Categoría “Por arriba del nivel promedio” / nivel aceptable en mantenimiento.

- **81 – 140:** Categoría "Por debajo del promedio"/nivel no muy bueno de mantenimiento, con oportunidades para mejorar.
- **Menos de 80:** Categoría "Muy por debajo del promedio" /nivel muy malo mantenimiento con muchas oportunidades para mejorar

La metodología plasmada en el presente documento se enfoca en aquellos resultados donde la calificación este por debajo de 141 donde se ubican procesos de mantenimiento por debajo del promedio. Consecuencias directas de esta calificación pueden ser: aumento del costo por reparaciones de fallas repentinas, bajo rendimiento y disponibilidad de las máquinas, desgaste y deterioro de equipos, riesgos e inseguridad de los trabajadores, retrasos en la producción, inadecuada utilidad de la mano de obra, deterioro de la imagen y marca entre otras importantes repercusiones. (Parra & Crespo Márquez, 2012)

De continuar presentándose la situación antes descrita, la empresa objeto de estudio estaría en desventaja con otras que presten servicios similares; mientras que las continuas paradas por fallas en los equipos traen como consecuencia el aumento en los costos de mantenimiento y penalización por incumplimiento de indicadores de gestión. Por otra parte, a medida que aumenta el número de horas de operación de los equipos, se producen pérdidas en la disponibilidad de esos activos, lo cual ocasiona un descenso en la eficiencia y en la calidad del servicio, generando importantes pérdidas y en casos extremos, una detención súbita del proceso operativo y/o de producción.



## **Justificación**

Para lograr una ventaja competitiva en el contexto actual, todas las empresas deben desarrollar modelos de gestión rentables y equilibrados que se encuentren alineados con los planes de negocio, promoviendo las buenas prácticas en sus líneas de producción cualquiera que ella sea, logrando satisfacer el cliente tanto interno como externo entregando un valor agregado a la materia final.

Muchas empresas han tenido un crecimiento exponencial en el desarrollo de negocios de mantenimiento y operación. Este crecimiento acelerado y las exigencias de tiempo por parte del cliente traen retos estratégicos que buscan procurar en la etapa de montajes la mitigación y eliminación de fallos funcionales en equipos en etapa prematura (Después de instalaciones o antes de sus primeros mantenimientos preventivos.)

Las estrategias de mantenimiento a equipos se pueden asemejar a trajes a la medida de diseñador. De acuerdo al entorno, sistema o línea de negocio este “traje” debe ser el adecuado para cumplir con los objetivos de mantenimiento, en relación con lo anterior es importante no caer en la improvisación de implementar herramientas de mantenimiento de “moda” o que tuvieron resultados en otro tipo de industria, la idea expuesta impulsa una creación de modelo de gestión integral de mantenimiento basado en las metodologías de monitoreo basado en condición (MBC), análisis de causa raíz (ACR) y mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC) con base en normas y estándares internacionales a través de los cuales se mitiguen o eliminen las fallas recurrentes en los equipos de interés. Pero es necesario que esta iniciativa de proyecto este enmarcada y alineada con los objetivos, misión y visión de la empresa, tener respaldo de las

gerencias de operación, producción, mantenimiento y la disposición de los grupos de trabajo en la etapa de implementación de las metodologías.

Por último, la gestión de activos

*se enfoca en la toma de decisiones a través de todo el ciclo de vida del activo físico, desde su creación o adquisición, utilización, mantenimiento y renovación o disposición final. Para esto, la gestión de activos conjunta conceptos y técnicas de diferentes ámbitos, tales como finanzas, ingeniería, tecnología, operaciones, etc. (Parra & Crespo Márquez, 2012)*

En consecuencia, el desarrollo del modelo facilitara la consecución de los objetivos propuestos por la gerencia de mantenimiento. Mejora las actuaciones de los mantenedores al enfrentar una falla, crea equipos de trabajo para el desarrollo de ACR y genera una cultura de cuidado del activo con la implementación de MBC.

### **Pregunta de investigación**

¿Implementar metodologías como MCC, ACR y MBC pueden mejorar el proceso de mantenimiento?

### **Objetivo General**

Diseñar la estructura de implementación de las metodologías ACR, MBC y MCC como herramientas de la gestión de activos.

### **Objetivo Especifico**

Proponer una estructura acerca de modos de falla, efectos y criticidad de activos mantenibles, para equipos basados en jerarquización de criticidad total por riesgo.

Desarrollar las metodologías de mantenimiento centrado en confiabilidad y análisis de causa raíz, mitigando o eliminando así las fallas que generan indisponibilidad de los equipos enfocados en la atención de las causas físicas, humanas y latentes.

Proponer una estructura de monitoreo basado en condición para equipo critico en sitio.

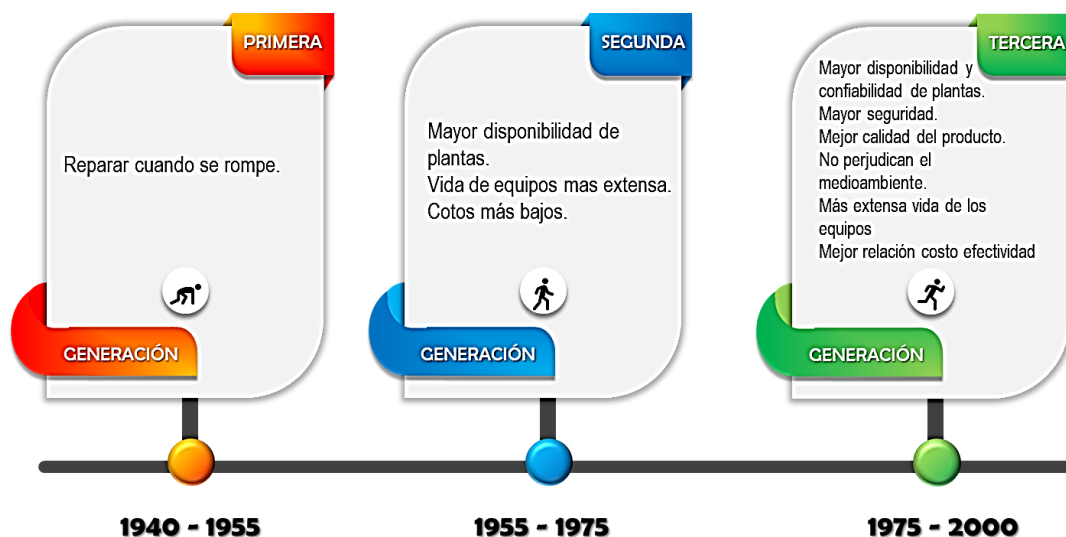
### **Marco teórico**

En la industria la labor de mantenimiento se caracteriza por ser un componente primordial para desarrollar productos y servicios; es por ello por lo que las empresas buscan invertir en procesos óptimos que logren una tasa de retorno de inversión estándar o por encima de las expectativas. Lo anterior hace referencia a que un programa de mantenimiento mediocre o que no cumpla los objetivos de las organizaciones impactara en el presupuesto de la empresa y/o industria provocando así falta de rentabilidad en los procesos, sobrecosto en mano de obra y repuestos.

El cambiante escenario de equipos que en la actualidad son intervenidos por las áreas de mantenimiento han provocado en las organizaciones el interés de implementar herramientas que ayuden a mitigar las fallas, aunado a la situación las fallas de los equipos pueden inferir en la seguridad, el medio ambiente y la calidad final del producto. Razón por la cual desde la gerencia e ingeniería se crean estrategias de mantenimiento que se adapten a los diferentes procesos, evitando así inconvenientes en las etapas tempranas del proceso. (Moubray, 2002)

A continuación, se muestra en la figura 1 la evolución de las expectativas en mantenimiento de acuerdo con (Moubray, 2002).

**Figura 1.** *Crecientes expectativas en el mantenimiento.*



Como se puede observar a través de los años el mantenimiento ha evolucionado para ofrecer mayor confiabilidad y disponibilidad a los equipos, esta evolución va de la mano de la implementación de herramientas claves para el éxito de este. Atendiendo a estas consideraciones los mantenedores han logrado aumentar el ciclo de vida de los activos, disminuir el gasto de componentes y procurar por mantener índices de eficacia y eficiencia en los sectores de aplicabilidad. (Arata & Furlanetto, 2015)

En consecuencia, el mantenimiento se puede clasificar en una serie de conjuntos para su análisis e implementación estos son: Confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad. La confiabilidad se puede definir como la probabilidad de que un equipo no falle, se expresa en un porcentaje, la disponibilidad es capacidad que tiene un equipo de desempeñar una función requerida bajo determinadas condiciones, durante un intervalo de tiempo específico, asumiendo que existan los recursos externos requeridos y finalmente la mantenibilidad es la probabilidad del que el programa de mantenimiento pueda ser ejecutado.

La labor de mantenimiento se puede clasificar en dos tipos principalmente; mantenimiento planificado y mantenimiento no planificado. El mantenimiento no planificado se refiere a todas intervenciones de urgencias debido a fallas no controladas, causando pérdidas

económicas; el mantenimiento planificado se define como todas las labores que se enfocan en prevenir ese tipo de fallas, dentro del mismo existen una serie de metodologías a saber: Preventivo, correctivo, predictivo y mejorativo. (Arata & Furlanetto, 2015)

El mantenimiento preventivo son las intervenciones programadas que mejoran los porcentajes de confiabilidad de los equipos.

El mantenimiento correctivo son las intervenciones no programadas que logran mantener los porcentajes de confiabilidad y disponibilidad del equipo.

El mantenimiento predictivo son las acciones programadas de inspección que salvaguardan la integridad de los activos y ayudan a mantener tanto la confiabilidad como la disponibilidad del equipo, el producto final de esta metodología es crear ordenes de atención correctivas por monitoreo que serán programadas o anexadas a las labores de mantenimiento preventivo.

Finalmente, el mantenimiento mejorativo es la optimización de los anteriores tipos de mantenimiento donde se establecen retroalimentación de las mejores prácticas desarrolladas en cada modelo. El mantenimiento mejorativo cumple con el ciclo de Deming. Como se muestra a continuación.

**Figura 2.** *Ciclo Deming Mantenimiento*



Atendiendo a estas consideraciones las labores de mantenimiento mencionadas se pueden enmarcar dentro de un plan de mantenimiento el cual se puede resumir como un conjunto de tareas y labores a realizar en cualquier instalación, estas tareas se pueden definir en un primer momento basado en las recomendaciones del fabricante, principalmente en etapas prematuras donde lo importante es asegurar la garantía del activo, posterior a esta fase el plan puede evolucionar y modificarse a el establecimiento de protocolos dependiendo de las características de operación y mantenimiento observadas. Finalmente, lo más recomendado es llevar un plan de mantenimiento basado en la caracterización de modos de fallo, donde resalta como herramienta y metodología principal la implementación de mantenimiento centrado en confiabilidad.

### **Jerarquización de equipos**

El proceso de jerarquización de equipos es clave a la hora de enfocar esfuerzos humanos, económicos y tecnológicos. La jerarquización de los equipos depende de muchos factores inmersos en el análisis como tal, una técnica utilizada en gran parte por los mantenedores es la jerarquización por criticidad del equipo, esta criticidad a su vez se puede definir por varias variables dependiendo de las necesidades, objetivos y estrategias de mantenimiento. Por ello se hace necesario definir que atributos se van a tener en cuenta para agrupar los equipos, entre los más conocidos están:

- *flexibilidad operacional (disponibilidad de función alterna o de respaldo)*
- *efecto en la continuidad operacional/capacidad de producción*
- *efecto en la calidad del producto*
- *efecto en la seguridad, ambiente e higiene*
- *costos de paradas y del mantenimiento*
- *frecuencia de fallas / confiabilidad*
- *condiciones de operación (temperatura, presión, fluido, caudal, velocidad)*
- *flexibilidad / accesibilidad para inspección & mantenimiento*
- *requerimientos / disponibilidad de recursos para inspección y mantenimiento*
- *disponibilidad de repuestos*



Una vez definidos los atributos de criticidad se procede a jerarquizar los activos mantenibles dando relevancia a aquellos que impactan en las variables definidas siendo estos los equipos prioritarios para establecer rutinas y programas de mantenimiento, así como definir la cantidad de repuestos en almacén para atender sus posibles fallas críticas. (Parra & Crespo Márquez, 2012)

### **Análisis de modos de falla**

Un modo de falla es cualquier evento que causa una falla funcional del equipo, la mejor manera de mostrar la conexión y la diferencia entre los estados de falla y los eventos que podrían causarlas, primero se debe hacer un listado de falla funcionales y luego registrar los modos de falla que podrían causar cada falla funcional. El modo de falla está involucrado principalmente a una función genérica de un proceso dada por un equipo y/o componente que permiten cumplir con dicha función, con referencia a lo anterior este indica que tipo de causa se podría dar a nivel del componente o equipo imposibilitando que este pueda satisfacer la función principal del proceso. (Moubray, 2002).

Se muestra a continuación un ejemplo de cómo se registran estos modos de fallos.

**Figura 3. Modos de falla de una Bomba**

SISTEMA					
<i>SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE AGUA</i>					
SUBSISTEMA					
No	FUNCION	FALLA FUNCIONAL		MODO DE FALLA	
1	Transferir Agua del tanque X al tanque Y a no menos de 800 litros por minuto.	A	Incapaz de transferir Agua	1	Rodamiento Falla
				2	El propulsor se suelta
				3	Propulsor atascado por un objeto extraño
				4	Campana de enganche falla por fatiga
		B	Transfiere menos de 800 litros por minuto	5	Se quema el motor
				6	Válvula de entrada tapada
				7	Propulsor desgastado
				8	Línea de succión Parcialmente bloqueada.

De la figura anterior podemos concluir que los modos de falla permiten conocer a fondo el proceso, los equipos y componentes que están involucrados en una función y como afecta esta al proceso o sistema al que pertenece, nos indica también el nivel de atención, repuesto y esfuerzo que debo programar para prevenir que el modo de falla tenga lugar. Posterior a esta

definición y clasificación de modos de falla se procede a implementar la metodología conocida como mantenimiento centrado en confiabilidad.

### **Mantenimiento centrado en confiabilidad**

El Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (MCC) es una metodología altamente usada en la industria dando resultados favorables, cuando se aplica correctamente, puede generar mejoras significativas en la confiabilidad del equipo y el rendimiento de la planta. Al mismo tiempo puede garantizar la optimización de los recursos que se invierten en los programas de mantenimiento predictivo y preventivo.

MCC es un proceso estructurado que se hace secuencialmente, se tienen en cuenta en la literatura las siguientes siete preguntas sobre el activo o sistema bajo revisión:

- Funciones: ¿cuáles son las funciones y los estándares de desempeño asociados del activo en su contexto operativo actual?
- Fallos funcionales: ¿de qué forma no cumple con sus funciones?
- Modos de falla: ¿qué causa cada falla funcional?
- Efectos de las fallas: ¿qué sucede cuando ocurre cada falla?
- Consecuencias de las fallas: ¿de qué manera importa cada falla?
- Tareas proactivas: ¿qué se puede hacer para predecir o prevenir cada falla?
- Acciones predeterminadas: ¿qué se debe hacer si no se puede encontrar una tarea proactiva adecuada?

Finalmente se crea un programa de mantenimiento enfocado en los resultados anteriormente mostrados, el cual se va modificando de acuerdo con el ciclo PHVA explicado con anterioridad. (Moubrey, 2002)

## **Monitoreo basado en condición**

El monitoreo basado en condición (MBC) o el mantenimiento predictivo se define como las acciones necesarias para prevenir o predecir modos falla que afectaran la producción o la función de un equipo. Vela por mantener los índices de confiabilidad y disponibilidad de los equipos y de él subyacen tecnologías para tal fin, las más representativas son el análisis por termografía infrarroja, el análisis de vibraciones y el análisis de aceite lubricante o tribología.

El MBC también se estructura en los procesos de análisis da falla de equipo y tiene su desarrollo principal en la metodología de MCC donde se enfoca a aquellos equipos considerados críticos. La norma ISO 17359 plantea un flujo de trabajo para su implementación, es importante aclarar que la implementación de esta metodología debe ir acompañada de una estrategia corporativa ya que conlleva costos de capacitación del personal, adquisición de equipamiento y costos a futuro como son recertificaciones y calibración de los equipos.

El analista en monitoreo basado en condición se destaca por tener un conocimiento alto de lo equipos a monitorizar, son personas con cultura de organización y criterio de decisión al momento de identificar anomalías en los equipos. La clave del proceso es mantener un histórico de mediciones de equipos para así desarrollar diagnósticos claros y acertados.

## **Antecedentes**

En concepto de gestión integral de mantenimiento donde, se busca garantizarle al cliente interno o externo la disponibilidad de los activos fijos, cuando lo requieran con Confiabilidad y Seguridad Total, durante el tiempo óptimo necesario para operar con las condiciones tecnológicas exigidas previamente, para producir bienes o servicios que satisfagan necesidades, deseos o requerimientos de los usuarios, con los niveles de calidad, cantidad y tiempo solicitados, en el momento oportuno, al menor costo posible y con los mayores índices de productividad, rentabilidad y competitividad. (Palencia, s. f.).

Para lograr tal fin es importante el uso de herramientas metodológicas como el monitoreo basado en condición (MBC), análisis de causa raíz (ACR) y el mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC) entre otras. Estas técnicas ampliamente usadas en la industria para optimizar los modelos de mantenimiento existentes buscan como objetivo principal disminuir la tasa de fallas. Ejemplos de los mismos son los que a continuación se presentaran cronológicamente como antecedentes del proyecto de investigación a desarrollar.

### **2021. Inspección y evaluación al proceso de confiabilidad de la división de ingeniería y planeación de mantenimiento (IPM) en mineros aluvial**

El proyectó de grado del ingeniero Víctor Daniel Henao Sánchez para optar al título de ingeniero mecánico de la universidad de Antioquia busca realizar una comparativa del modelo de confiabilidad actual y el ideal, encontrando deficiencia en la metodología MCC y en AMFE. Explica en el mismo documento las características básicas de los análisis de causa raíz y evalúa

el monitoreo basado en condición que presta una empresa contratista proponiendo un control más estricto en el análisis de aceites. (Sánchez, 2021)

### **2019. Diseño de un sistema de gestión del mantenimiento para la empresa mane sucursal Colombia S.A**

El informe final de grado de los ingenieros Hernán Darío Ramírez Escobar y Juan David Ospina Díaz del Instituto tecnológico Metropolitano de la ciudad de Medellín plantean una evaluación del programa de mantenimiento detectado carencia en cuanto a la cantidad de personal de mantenimiento y metodologías aplicables, explican con mayor acentuación MCC y la importancia de definir programas de MBC así como estructurar de mejor manera el mantenimiento preventivo, no se da información detallada de la metodología de ACR. (Ramirez & Ospina, 2019)

### **2019. Propuesta de plan de mantenimiento centrado en confiabilidad para la maquinaria de una empresa cafetalera**

El proyecto de grado de maestría en ingeniera de calidad por el ingeniero Ricardo Vallejo Alemán de la universidad de Veracruzana de Xalapa propone un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC) para disminuir el paro de producción provocado por la máquina de fabricación de café (Despulpadora, hidrolavadora, secadora, morteadora y tostadora), en este documento se nombran las herramientas de MBC y ACR más como un referente teórico que como una metodología a utilizar. (Vallejo, 2019)

### **2019. Investigación para la mejora del mantenimiento preventivo utilizando la herramienta RCM para optimizar el servicio de mantenimiento a viviendas.**

El proyecto de grado de bachiller en Ingeniería Industrial de la universidad Católica San Pablo de la ciudad de Arequipa por la ingeniera Valery Fabrice Begazo Carreño. Describe las

fases de implementación de la metodología de MCC o RCM por sus siglas en inglés, con un análisis básico de análisis de modos de falla efectos criticidad explica cómo se puede crear un plan de mantenimiento predictivo, en este documento no se introducen los temas de MBC ni el ACR. (Begazo, 2019)

### **2018. Aplicación de RCM como estrategia de implementación del mantenimiento predictivo para la metodología TPM.**

La tesis presentada para obtener el grado de magister en Ingeniería Mecánica de la universidad Nacional de Colombia por el Magister Jhonny Alexander Maya Velásquez. A partir de la metodología de mantenimiento productivo total, desarrollo un MCC que reestructuraba el plan actual de mantenimiento, garantizando así que mediante la creación de acciones para mitigar o eliminar los modos de falla detectados se implementara el MBC. No se describe el ACR como metodología para mejorar MPT. (Maya, 2018)

### **2018. Diseño de la estrategia de mantenimiento predictivo eléctrico y actualización de los procedimientos de diagnóstico para el contrato de operación y mantenimiento de Confipetrol en campo rubiales.**

El proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero eléctrico de la universidad distrital Francisco José de Caldas presentada por las ingenieras Judith Adela Canchila Rivera y Yazmín Astrid Nieto Valbuena. El proyecto de grado se enfoca en el desarrollo del MBC para el contrato que tiene la empresa CONFIPETROL en el área eléctrica, desarrollaron una matriz de intervención de acuerdo a un análisis de modos de falla sin implementar el MCC que hubiera dado más peso al resultado del proyecto. (Canchila & Yazmín, 2018)

### **2018. Propuesta de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), para la planta de tratamiento de aguas en Termosuria-meta.**

El anteproyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico de la universidad libre de Colombia presentado por el ingeniero Andrés Felipe Trujillo Amaya. El proyecto de grado desarrolla un MCC muy específico y se desarrolla de manera precisa se enfoca en el desarrollo del MBC para el contrato que tiene la empresa CONFIPETROL en el área eléctrica, desarrollaron una matriz de intervención de acuerdo con un análisis de modos de falla sin implementar el MCC que hubiera dado más peso al resultado del proyecto. (Trujillo, 2018)

**2017. Adaptación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en un sistema crítico de aire acondicionado de la Clínica Universitaria Bolivariana (CUB).**

La tesis para el grado de maestría en ingeniería biomédica de la universidad pontificia Bolivariana por el magister Félix Harley Gandur Peña. En este proyecto se muestra el estudio de mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC), aplicado al sistema de aire acondicionado más crítico, en el marco teórico se enfatiza en la importancia de esta metodología y sus principales ventajas en la aplicación. (Gandur, 2017)

**2015. Diseño de un programa de análisis causa raíz (ACR) para el tratamiento de productos no conformes en una planta química.**

El examen complejo para el grado de maestría en productividad y calidad de la escuela superior politécnica del litoral por el magister Henry Edwin Freire Araujo. En este documento se exaltan las bondades de la técnica de ACR en un caso práctico se explica al detalle la estructura y algunas metodologías de análisis. (Feire, 2015)

**2015. Elaboración del plan de mantenimiento basado en condición para la flota vehicular de mezcladoras de concreto de una empresa productora de concretos, morteros y derivados.**

La monografía para optar al título de Especialistas en Gerencia de Mantenimiento de los Especialistas Leonardo Andrés Gutiérrez Arismend y Holman Bocanegra Galeano de la escuela colombiana de carreras industriales (ECCI) hablan respecto al tema de MBC enfocado en una flota vehicular y en la técnica de tribología para definir planes de mantenimiento de su equipo

rodante con antelación a las fallas identificadas previamente bajo el AMEF. (Gutiérrez & Holman, 2015)

**2015. Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento para los activos del centro de tecnologías del transporte CTT (SENA).**

La tesis para optar al título de Especialistas en Gerencia de Mantenimiento de los Especialistas David Felipe Mora Ariza y Hernan David Mendoza Galindo de la escuela colombiana de carreras industriales (ECCI). En esta tesis se trabajó la matriz de criticidad para evaluar el estado de los activos que prestan servicio a este centro y así definir con prioridad riesgo beneficio la mejor rutina de mantenimiento. (Mora & Mendoza, 2015)

Como se pudo mostrar en los antecedentes anteriormente citados se observa que la aplicación de las metodologías de ACR, MCC y MBC son necesarias y afirman el planteamiento realizado respecto a optimizar las labores de mantenimiento y reducir las fallas de los activos a interés. Por ello se hace necesario detallar una metodología que ayude a cualquier persona vinculada a mantenimiento a su rápida implementación conociendo sus beneficios su estructura y sus posibles resultados.



## **Hipótesis**

La aplicación de metodologías de ACR, MBC y MBC podrían incrementar la disponibilidad y confiabilidad a los equipos que sean objeto de estudio.

### **Marco Metodológico**

El tipo de investigación que se desarrollara en este trabajo de grado es tecnológico por que tiene como propósito aplicar el conocimiento científico para solucionar los diferentes problemas que beneficien a la sociedad, para este caso y como referencia al desarrollo bibliográfico planteado se busca implementar metodologías de mantenimiento para incrementar la disponibilidad y confiabilidad de los activos sujetos de estudio.

El diseño de la investigación es no experimental y de tipo transversal ya que se considera que esta implementación aplicaría para todo tipo de equipo sujeto a mantenimiento.

Previo al desarrollo del proyecto, la persona, equipo o empresa que desee implantar esta metodología debe tener un listado de equipos definido y caracterizado como lo recomienda la norma ISO 14224, determinando los límites de operación y así tener una taxonomía básica de los mismos. A continuación, se muestra un ejemplo de la taxonomía propuesta por la norma.

**Figura 4.** *Taxonomía de equipos.*



Una vez tengamos caracterizados los equipos sujetos de análisis el paso a seguir es jerarquizarlos en orden de prioridad, este puede enfocarse por el histórico de fallas, información que se extraerá del software de mantenimiento o bien asignarle un valor de acuerdo análisis de criticidad total por riesgo.

En el caso que tengamos información de fallas de: unidad de equipo, subunidad de equipo, componente, ítem mantenible o parte, se aplicara el método PARETO donde al atacar el 20% de las fallas se resolverían el 80% de los problemas. Para definir una estrategia acorde a la gestión de activos en lo posible es recomendable asignarle una unidad de valor “dinero” a cada falla identificada para la correcta aplicación método.

De no tener ninguna información se propone utilizar la metodología de criticidad total por riesgo sugerida por (Parra & Crespo Márquez, 2012) proceso semicuantitativo que se soporta en el concepto de riesgo. Este bajo el enfoque de multiplicar la frecuencia del fallo por la severidad de este. Esta metodología se estudia a profundidad en (Smith, 2011), (Kiran, 2017).

Se explica a continuación basados en un ejemplo como se caracterizaría y jerarquizaría un grupo de equipos basados en la metodología propuesta.

Para comenzar se tiene las siguientes categorizaciones.

1. Factor de frecuencia de fallos (FF) (1-3)

3: Frecuente: Mayor a 2 Eventos al año

2: Bueno: 0,5 y un 1 evento al año

1: Excelente: Menos de 0,5 eventos al año

2. Factores de Consecuencias

2.1. Impacto Operacional (IO) (1-10)

10: Perdidas de generación superior 60%

7: Perdidas de generación entre 30% y 40%

5: Perdidas de generación entre 15% y 30%

1: Perdidas de generación menor a 15%

2.2. Impacto por flexibilidad operacional (FO) (1-4)

4: No se cuenta con unidades de reserva para cubrir la producción, tiempos de reparación y logística muy grandes.

2: Se cuenta con unidades de reserva que logran cubrir de forma parcial el impacto de producción, tiempos de reparación y logística intermedios.

1: Se cuenta con unidades de reserva en línea, tiempos de reparación y logística pequeños.

2.3. Impacto en Costos de Mantenimiento (CM) (1-3)

4: Costes de reparación, materiales y mano de obra superiores a 300.000 dólares.

2: Costes de reparación, materiales y mano de obra inferiores entre 100.000 y 300.000 dólares.

1: Costes de reparación, materiales y mano de obra inferiores a 100.000 dólares.

2.4. Impacto en Seguridad, Higiene y Ambiente (SHA) (1-8)

8: Riesgo alto de pérdida de vida, daños graves a la salud del personal y/o Incidente ambiental mayor (catastrófico) que exceden los límites permitidos.

6: Riesgo medio de pérdida de vida, daños importantes a la salud, y/o Incidente ambiental de difícil restauración.

3: Riesgo mínimo de pérdida de vida y afección a la salud (recuperable en el corto plazo) y/o incidente ambiental menor (controlable), derrames fáciles de contener y fugas repetitivas.

1: No existe ningún riesgo de pérdida de vida, ni afección a la salud, ni daños ambientales.

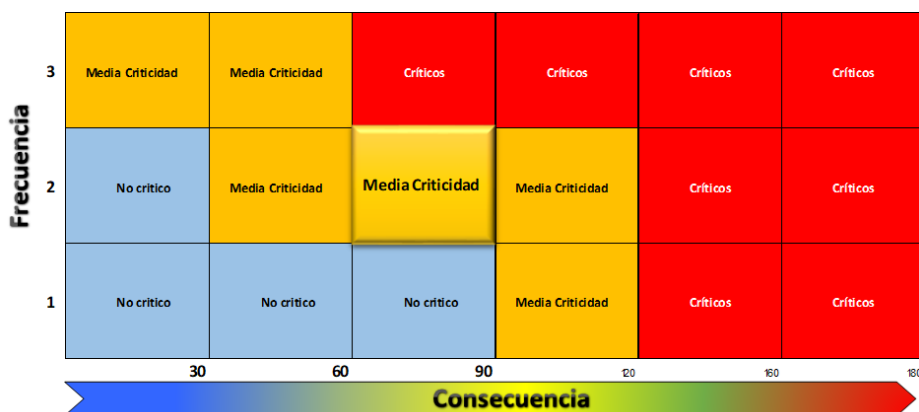
Con el listado anteriormente mostrado se asignaría un valor de acuerdo con la siguiente fórmula.

**Ecuación 1.** *Cálculo de criticidad total por riesgo*

$$CTR = FF * ((IO * FO) + CM + SHA)$$

Esta metodología busca definir de manera semicuantitativa a partir de factores exclusivos de operación y mantenimiento que equipos sujetos a análisis requieren mayor esfuerzo por parte de la gestión de mantenimiento. Podríamos definir una matriz de 3 x 6 de acuerdo con la caracterización previamente dicha.

**Figura 5.** *Matriz de criticidad de equipos.*

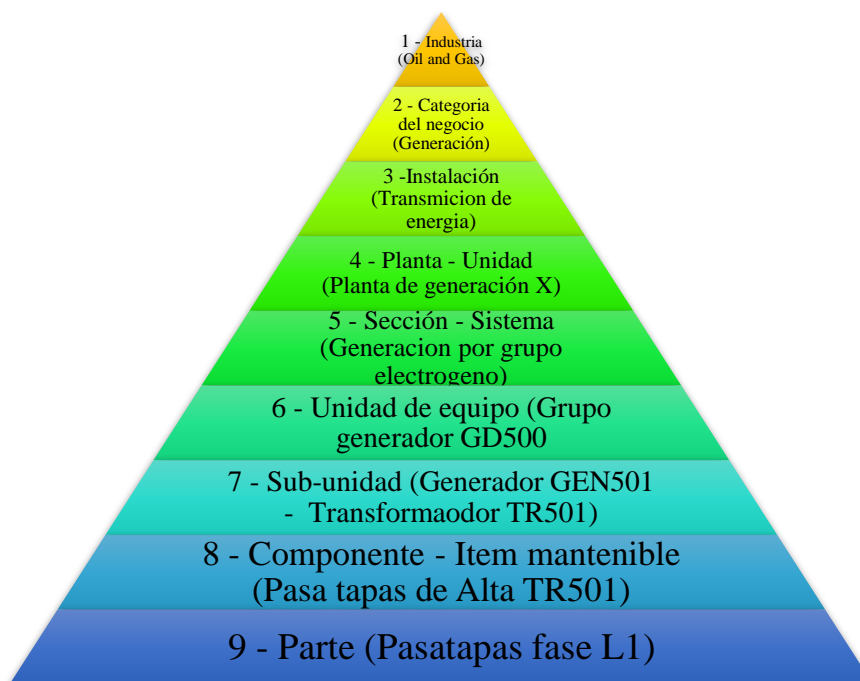


Definiendo unos equipos de generación eléctrica comunes para aplicar la matriz de caracterización tenemos los siguientes resultados.

Se tiene la planta de generación X con motores de combustión interna conectados a un transformador elevador y conectados a una subestación de transmisión. Solo analizaremos los

equipos correspondientes al sistema de generación y el transformador. De acuerdo con la taxonomía de equipos sugerida por la norma ISO 14224 tendríamos la siguiente jerarquización.

**Figura 6.** Taxonomía ejemplo.



Como se puede observar tenemos equipos principales como lo es la unidad generadora y el transformador de potencia, estos a su vez tienen componentes y partes al interior que conformarían el conjunto principal, en el caso de la unidad de generación esta estaría compuesta por grupos como: Turbos, sistema de combustible, sistema de lubricación, sistema de arranque, sistema de refrigeración, control, potencia y otros. Si aplicamos la matriz a un elemento como el transformador tendríamos los siguientes resultados.

**Frecuencia de fallos:** Supongamos que históricamente estos equipos tienen una tasa de fallos de un evento al año por lo que se le asignaría el valor de 2.

**Impacto operacional:** El impacto operacional para los transformadores específicamente es alto ya que sin la función operativa de este equipo no se tendría generación. De acuerdo con la puntuación que tenemos debemos de calcular porcentualmente la pérdida de esta unidad a cuanto

equivaldría, suponiendo que son 6 equipos de generación la ausencia de este sería aproximadamente 16% por lo que asignaríamos un valor de 5.

Impacto por flexibilidad operacional: Esto indica como podría responder en el caso de perder la función de generación. Como este tipo de equipos generalmente no tienen respaldo le asignamos el valor de 4.

Impacto en los costos de mantenimiento: Dependiendo de los modos de falla que analizaremos con profundidad más adelante, cada falla tiene un costo diferente, para este ejercicio definiremos como modo de fallo disparo por calentamiento en una de las fases debido a un punto caliente. Este costo representaría valores entre 100.000 y 300.000 dólares por lo que asignaremos un valor de 2.

Impacto en seguridad, higiene y medio ambiente: Es un factor importante para el análisis de criticidad para el caso de estudio el impacto de esta falla es nula por lo que asignaremos un valor de 1.

Finalmente tendríamos los siguientes valores sustituyendo en la ecuación 1.

$$CTR = 2 * ((5 * 4) + 2 + 1)$$

$$CTR = 46$$

Ubicando en la matriz de la figura 5 tendríamos una criticidad media. Este ejercicio nos ayuda a decir jerárquicamente los equipos que tienen más riesgo a fallos, los equipos con más fallos y los equipos en los que más costo incurre la empresa para retornarlos a su función operativa, para finalmente generar una estrategia integral para su mantenimiento y prevención.

Dicho lo anterior finalizaríamos con la explicación correspondiente al primer objetivo específico.

Dentro de este marco de jerarquización de equipos, podemos desarrollar los componentes metodológicos de mantenimiento centrado en confiabilidad y posteriormente el análisis de causa raíz. Como resultado a la jerarquización de equipos y definición taxonómica de los elementos podemos implementar el análisis de modos de falla efectos y criticidad, anteriormente se desarrolló un ejemplo en el marco teórico explicado en la figura 3. Para lograr este tipo de análisis se requiere la reunión de un equipo multidisciplinar para desarrollar de la mejor manera

un análisis de modos de falla de los componentes. La norma ISO14224 explica y propone algunos de los modos de falla más comunes para varios equipos entre ellos: equipo rotativo, equipo eléctrico, equipos de potencia y control, equipo de uso de plataforma en el océano, etc. A continuación, se muestra los ejemplos dados en la norma.

**Figura 7.** Modos de falla para equipo eléctrico.

Equipment class (see table A.4) <sup>a</sup>	Failure mode			
	Description of failure of failure mode	Examples of failure modes	Code <sup>b</sup>	Type <sup>c</sup>
X	Fail to function on demand	Doesn't start on demand	FTF	1
X	Faulty output frequency	Wrong/oscillating frequency	FOF	2
X	Faulty output voltage	Wrong/unstable output voltage	FOV	2
X	Loss of redundancy	One or more redundant units not functioning	LOR	2
X	Erratic output	Oscillating, hunting, instability	ERO	2
X	Overheating	Machine parts, exhaust, cooling water	OHE	3
X	Parameter deviation	Monitored parameter exceeding limits, e.g. High/Low alarm	PDE	2 (3)
X	Spurious operation	Unexpected operation	SPO	2
X	Minor in-service problems	Loose items, discoloration, dirt	SER	3
X	Other	Failure modes not covered above	OTH	-
X	Unknown	Too little information to define a failure mode	UNK	-

<sup>a</sup> The codes shown apply to equipment classes marked with X

<sup>b</sup> A proposed abbreviated code for the failure mode.

<sup>c</sup> Three types of failure modes are shown as follows:

1. *desired function is not obtained* (e.g. fail to start);
2. *specified function lost or outside* accepted operational limits (e.g. spurious stop, high output);
3. *failure indication* is observed, but there is no immediate and critical impact on equipment unit function. These are typical non-critical failures related to some degradation or incipient fault condition

En cuanto al mantenimiento centrado en confiabilidad de acuerdo con (Moubray, 2002) todas las acciones para mitigar o eliminar los modos de falla se enmarcan en la metodología anteriormente descrita.

Se muestra a continuación dentro de este marco un ejemplo de las acciones a seguir para corregir, mitigar o eliminar los modos de falla detectados en las reuniones del equipo de trabajo multidisciplinar.



**Figura 8.** *Acciones de mantenimiento a implementar*

No	ACTIVIDAD DE MANTENIMIENTO	ACCIÓN DE MANTENIMIENTO A EJECUTAR	FRECUENCIA A APLICAR
1.A.1	Implementación de mantenimiento predictivo	Inspección por vibraciones apoyos de la correa. Establecer línea base y verificar tendencias	3 Meses
1.A.2	Implementación de mantenimiento proactivo	Verificación prediódica por parte del operador, registro en planilla diaria del estado del propulsor. En caso de persistir objeto extraño realizar mantenimiento preventivo.	Diario
1.A.3	Implementación de mantenimiento proactivo		
1.A.4	Implementación de mantenimiento predictivo	Inspección por vibraciones apoyos de la campana. Establecer línea base y verificar tendencias	3 Meses
1.B.5	Implementación de mantenimiento predictivo	Inspección por termografía motor. Establecer línea	3 Meses
1.B.6	Implementación de mantenimiento proactivo	Verificación prediódica por parte del operador, registro en planilla diaria de la válvula.	Diario
1.B.7	Implementación de mantenimiento predictivo - preventivo	Inspección por ultrasonido acústico y vibraciones verificar estado del impulsor. Inspección visual por parte del mantenedor cuando este equipo este en programación de mantenimiento.	3 Meses
1.B.8	Implementación de mantenimiento proactivo	Verificación prediódica por parte del operador, registro en planilla diaria del estado del propulsor. En caso de persistir objeto extraño realizar mantenimiento preventivo.	Diario

Como se puede observar el proceso de mantenimiento centrado en confiabilidad esta alineado con establecer las acciones necesarias para mitigar las posibles fallas que puede desarrollar un equipo. En la figura 8 se observa actividad y acción de mantenimiento a cada modo de fallo observado, estos como se comentó están enfocados en los modos de fallo representados en la figura 3.

Se identificaron los elementos que complementan el MCC, partiendo de la jerarquización de equipos basado en el método de criticidad total por riesgo, se presentó también cuales son los aspectos básicos para iniciar con las herramientas presentas. Como complemento a las herramientas previamente mostradas se presentará la técnica de análisis de causa raíz para finalmente establecer la metodología que se desarrollará con el objetivo de reducir la indisponibilidad de los equipos.

El análisis de causa raíz se enfoca en establecer cuáles son las causas físicas, humanas y latentes en un fallo de equipo, este proceso en la metodología expuesta cumple el rol de asegurar aquellas fugas o desviaciones en el proceso, identificando el problema y desarrollando una estrategia de impacto para que la misma no se repita.

Existen en la literatura un gran número de técnicas y herramientas para definir la causa raíz, aquí nos enfocaremos en dos: 5 porque y el análisis de espina de pescado o análisis Ishikawa. Estas por su facilidad de implementación y su rápida respuesta de resultados.

La técnica de los 5 porque durante el análisis de la falla y luego de exponer las posibles hipótesis de la causal de la falla pregunta cinco veces el porqué de esta para definir finalmente la causa raíz de la falla (Leon, 2000). A continuación, se presenta un ejemplo de la técnica mencionada.

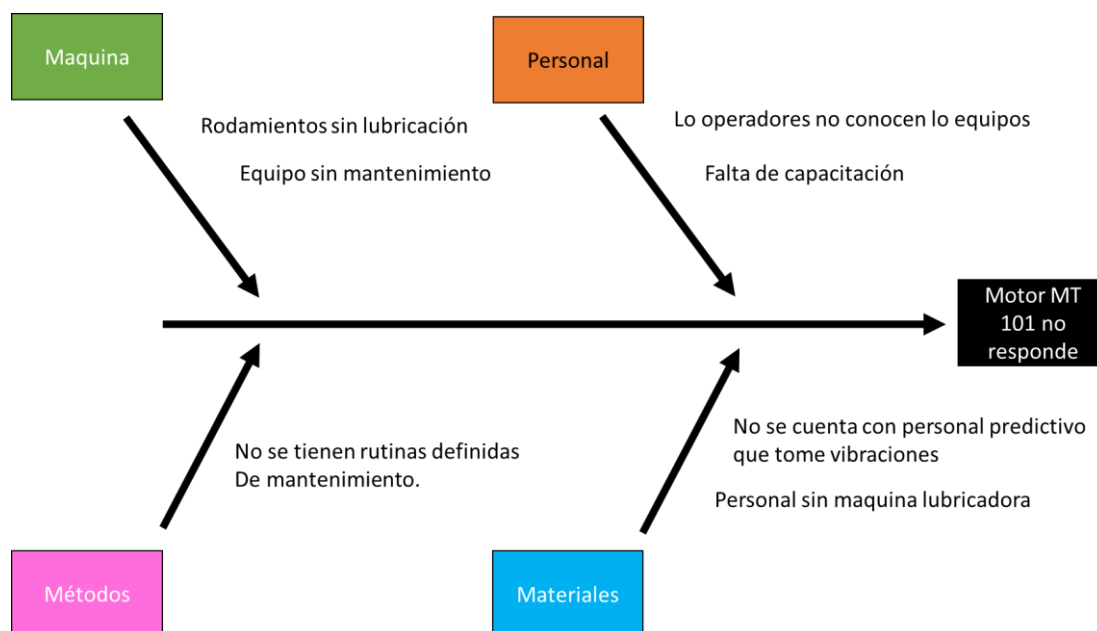
Se presento una falla en la locación de extracción de crudo ZQ411. A las 03:45 am el operador informa que el motor MT101 no responde por lo que acciona el motor de respaldo MT102 para reestablecer el sistema. Se inicia el 5 por que: ¿Por qué el motor MT101 no responde al comando dado al operador? Por qué presenta un fallo en los rodamientos que evita que este inicie operación. ¿Por qué los rodamientos presentan fallo? Los rodamientos presentan fallo porque no fueron lubricados en la última visita de mantenimiento. ¿Por qué no fueron lubricados? Por qué no existe una rutina de lubricación periódica. ¿Por qué no existe una rutina de lubricación? Por qué no se han implementado metodologías de mantenimiento preventivo para estos equipos. ¿Por qué no se han implementado las metodologías? Porque la organización no cuenta con los recursos ni el personal para esta tarea.

En el ejemplo se observa con claridad la causa física que en este caso es el fallo de rodamientos, la causa humana que es la falta de lubricación de estos equipos por desconocimiento o por desorganización en las labores de mantenimiento y la causa latente que apunta a la organización la cual es la responsable de definir las acciones de mantenimiento para evitar este tipo de fallos en los equipos.

El análisis de causa y efecto o análisis de Ishikawa busca definir la causa raíz de una falla desde distintas categorías como lo es el medio, métodos, personas, equipo y materiales. Principalmente para mitigar el factor de disuadir e inclinarse por una causa raíz en particular.

Definiendo para el mismo ejemplo anterior el análisis Ishikawa tendríamos.

**Figura 9.** *Análisis Ishikawa falla motor*



Con referencia a la figura 9 podríamos definir las causales propias de la falla analizada y proponer en este análisis un gran número hipótesis para desarrollar cada elemento que proporciona la herramienta y así tener más profundidad en la raíz del problema.

Este tipo de análisis más que buscar culpables procura identificar cuáles son las raíces de los problemas encontrados y así plantear una solución y finalmente un seguimiento a las acciones requeridas.

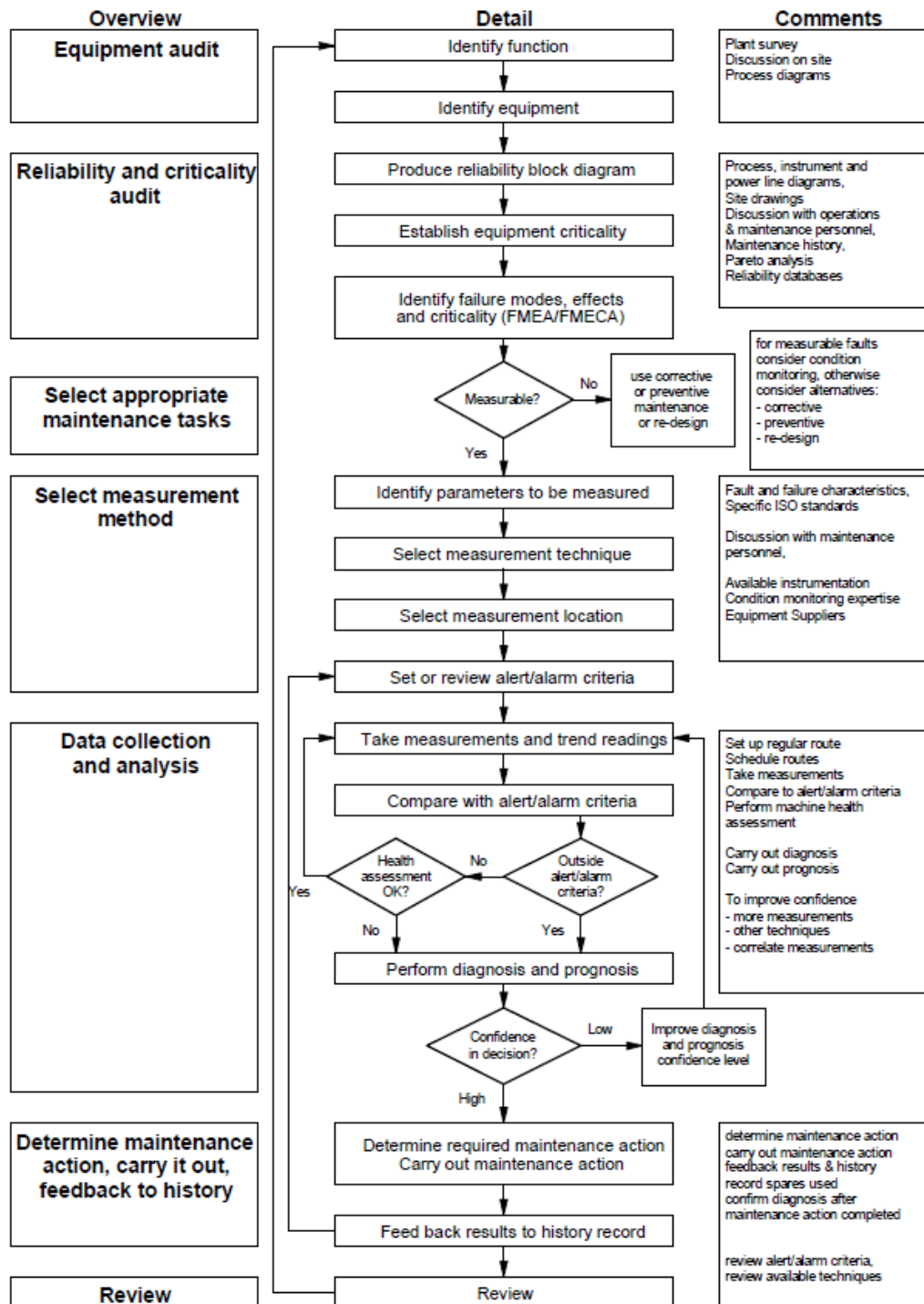
El último paso de los análisis de causa raíz son las recomendaciones realizadas de acuerdo con los problemas identificados, cada causa raíz debe tener una recomendación y un seguimiento de esta.

Se identificaron los cimientos de lo que más adelante se utilizara suministro a la metodología y la estructura propuesta, aclarando así el segundo objetivo específico.

Finalmente, una de las herramientas más importantes en el mantenimiento es la implementación de las técnicas predictivas, estas técnicas ayudan a establecer el estado del equipo bajo el análisis de acuerdo con ciertos modos de falla particulares y en caso de identificar una falla se podría diagnosticar la gravedad de esta y así programar la atención de la misma.

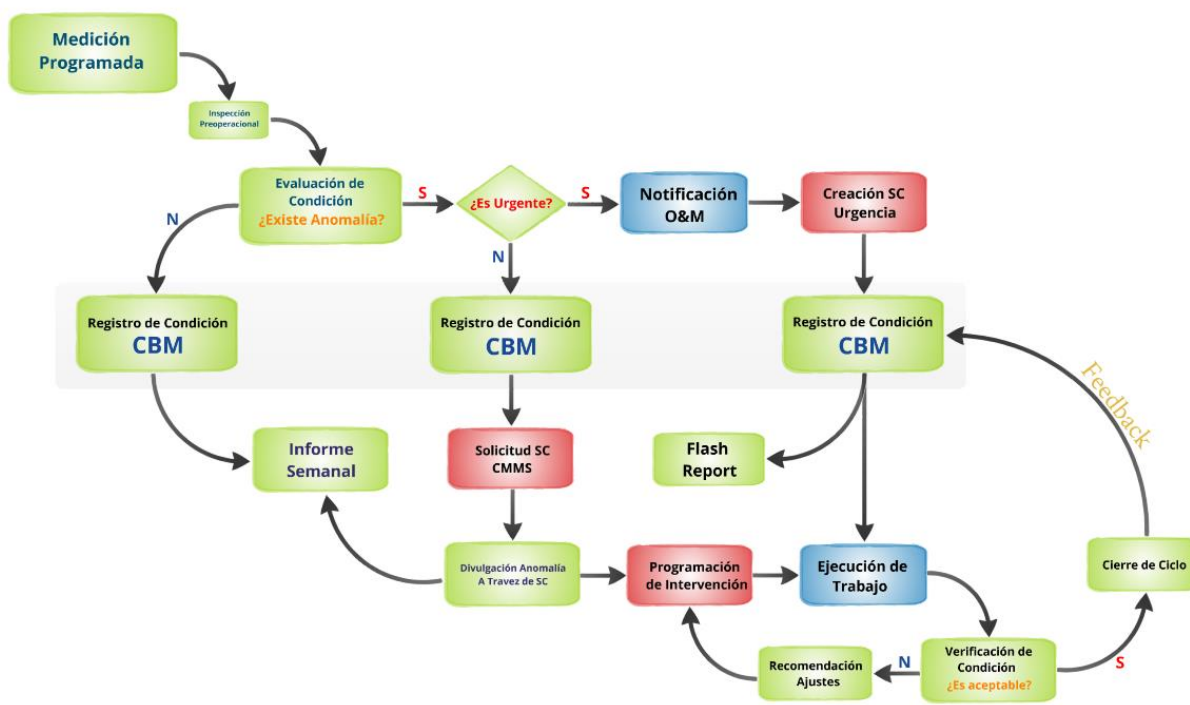
La implementación de este tipo de técnicas tiene como consecuencia directa costos para su desarrollo, uno de ellos son los equipos que se utilizan dependiendo de la técnica usada, segundo la capacitación que se considera obligatoria para el personal que tendrá a cargo el análisis y la inspección y por último el costo de calibración de las herramientas para ciertas técnicas y recertificación del personal técnico, para estos últimos este gasto se realizaría cada cinco años que es la media de la duración de los certificados. Desde el punto de vista financiero la inversión inicial es alta, pero se recupera rápidamente con los primeros hallazgos que se logren, es allí donde se justifica la implementación. El análisis costo riesgo beneficio dependerá del costo de los equipos a analizar, su disponibilidad en caso de un fallo y segundo de la importancia que estos equipos permanezcan cumpliendo una función determinada. Existen técnicas predictivas que se ajustaran a las necesidades propias de la aplicación, planta, negocio o equipo a mantener. Entre ellas encontramos: Análisis termográfico, análisis de vibraciones y análisis tribológico que se enfoca en el estudio de parámetros de aceite lubricante, combustible y demás. Estos son los más importantes de acuerdo con (EPRI, 2006). Sin embargo, existen técnicas como: ultrasonido acústico que se presenta en la ISO 29281, ultrasonido defecto lógico presente en la ISO 22232, análisis por tintas penetrantes, análisis por partículas magnéticas que están presentes en la norma ISO 25108 y por último la guía para implementación de un programa de monitoreo basado en condición que se tiene en la norma ISO 17359. Esta norma toma como base la norma EPRI 1001032 y construye una estructura de implementación para un programa de mantenimiento predictivo que se muestra a continuación.

Figura 10. Flujo de trabajo procedimiento de monitoreo basado en condición.



El flujo de trabajo básico como explica la norma es el más común y enlaza con las técnicas anteriormente explicadas como lo es la jerarquización de equipos, análisis de modos de fallo, mantenimiento basado en confiabilidad y el análisis de causa raíz. Sin embargo, se propone a continuación una estructura para la implementación de este.

**Figura 11.** Estructura monitoreó basado en condición



En la figura 11 se desglosa información presentada en la ISO17359 figura 10 proponiendo actividades que bajo la experiencia de implementación de las diferentes técnicas se ha construido.

Con referencia a el monitoreo de condición, este es una ayuda para definir anomalías de equipos antes de su fallo, las cuales podrán atenderse en los mantenimientos preventivos o en las paradas por oportunidad del equipo lo que directamente aumenta la disponibilidad de los equipos. Sirve como herramienta para mitigar problemas identificados en los análisis de causa

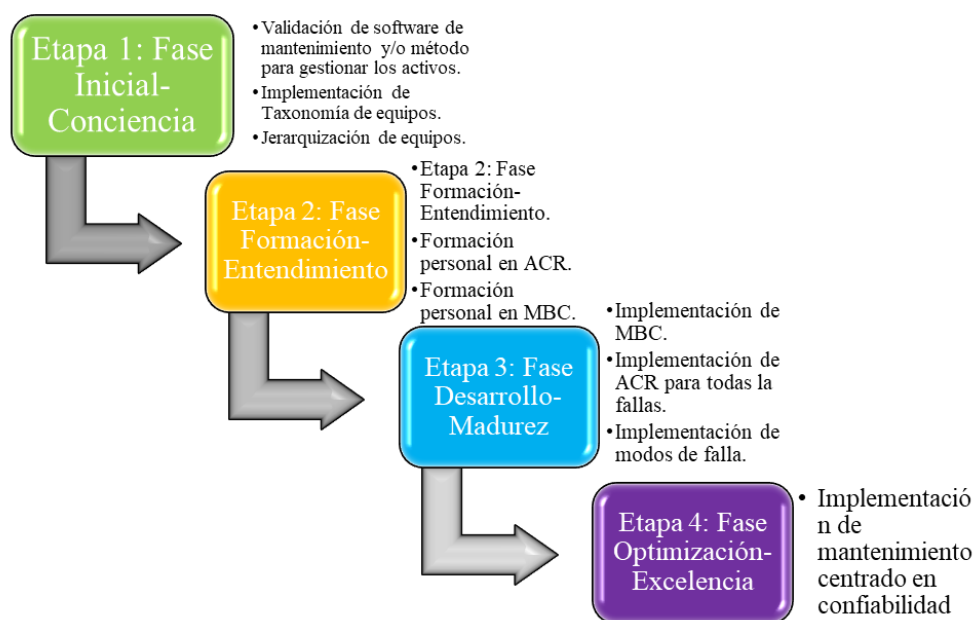
raíz y finalmente complementa las actividades de mantenimiento en los análisis de modos de falla identificados en la aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad.

Así se desarrolla el tercer objetivo específico propuesto, a continuación, se plantea la estructura metodológica de análisis de causa raíz, monitoreo de condición y mantenimiento basado en confiabilidad.

Como se puede ver cada una de las metodologías explicadas individualmente aportan al mantenimiento, pero en conjunto brindan una fuerte respuesta a mitigar o llevar a cero las fallas presentes en cualquier tipo de instalación.

Es por lo anterior que se pretende diseñar una estructura que integre las distintas metodologías para que el personal de mantenimiento con unas competencias básicas pueda implementarlo en su operación.

**Figura 12.** Estructura metodológica ACR, MBC, MCC.



La figura 12 muestra la estructura metodológica sugerida para la implementación de las distintas metodologías se definieron cuatro fases: Inicial – conciencia, Formación - Entendimiento, desarrollo – madurez y optimización – excelencia. Cada fase tiene unas características para desarrollar enfocado en el desarrollo de los objetivos específicos previamente explicados.

El éxito de esta implementación depende primero de los recursos que la organización quiera invertir para combatir la tasa de fallas que tenga en su operación, el componente humano es muy importante en la implementación ya que el personal seleccionado tiene que enfocarse en el desarrollo adecuado de las metodologías explicadas y finalmente el apoyo de un software o herramientas para la gestión de los activos a mantener.



## Conclusiones

5. Se desarrollaron adecuadamente los objetivos específicos propuestos, explicando las características básicas y como podrían ser aplicados en cualquier organización de mantenimiento.
6. El desarrollo de las metodologías tiene un componente teórico el cual presenta muchas variantes de desarrollo, se explicaron las metodologías de una manera resumida y de fácil implementación.
7. La estructura metodología propuesta puede ser respaldada bajo la visión de la gerencia de proyectos con el enfoque en la gestión de calidad y gestión de los recursos del proyecto, entendiendo que la gerencia de un proyecto como lo es el mantenimiento tiene un largo plazo de desarrollo, por lo que es indispensable utilizar herramientas que permitan mantener la calidad del producto y responder a los indicadores de gestión definidos en la gestión de alcance.
8. Podemos definir también en la gerencia de proyectos la posibilidad de innovar con estas técnicas las labores de mantenimiento, permitiendo ir más allá de la estructura del mantenedor de reparar cuando falla o cambiar cuando falla y entender el cómo falla y como puedo evitar que el equipo falle.

## Bibliografía

- Arata, A., & Furlanetto, L. (2015). *Manual de Gestion de Activos y Mantenimiento*. RIL editores.
- BALANTA, I. A. (2009). *RealibilityWEB.com - Modelo de gestión de mantenimiento*. Obtenido de <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/modelo-de-gestion-de-mantenimiento>
- Begazo, V. (2019). *INVESTIGACIÓN PARA LA MEJORA DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO UTILIZANDO LA HERRAMIENTA RCM PARA OPTIMIZAR EL SERVICIO DE MANTENIMIENTO A VIVIENDAS*.  
<https://core.ac.uk/download/pdf/225490451.pdf>.
- Canchila, J., & Yazmín, N. (2018). *DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO ELÉCTRICO Y ACTUALIZACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS DE DIAGNÓSTICO PARA EL CONTRATO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE CONFIPETROL EN CAMPO RUBIALES*.  
<https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/13837>.
- Diego Viteri Toquica, C. G. (2015). Análisis de Confiabilidad en Subestaciones eléctricas tipo maniobra Implementando el transformador de tensión con núcleo de Potencia. *Revista Ingeniería*, 65-82.
- EPRI. (2006). *Predictive Maintenance Self assessment guidelines for nuclear plants*. Palo Alto California: Epri.
- Feire, H. (2015). *DISEÑO DE UN PROGRAMA DE ANÁLISIS CAUSA RAÍZ (ACR) PARA EL TRATAMIENTO DE PRODUCTOS NO CONFORMES EN UNA PLANTA QUÍMICA*.  
<https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/37707>.
- Forero, L. A. (s.f.). *Predictiva21*. Obtenido de ISO 55000 Gestión de activos, una visión general: <https://predictiva21.com/iso-55000-gestion-de-activos-una-vision-general/>
- Gandur, F. (2017). *Adaptación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en un sistema critico de aire acondicionado de la clinica Universitaria Bolivariana (CUB)*. <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/3577>.

- Gutiérrez, L., & Holman, B. (2015). *ELABORACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN PARA LA FLOTA VEHICULAR DE MEZCLADORAS DE CONCRETO DE UNA EMPRESA PRODUCTORA DE CONCRETOS, MORTEROS Y DERIVADOS*. <https://repositorio.ecci.edu.co/handle/001/183>.
- Kiran, D. (2017). *Total Quality Management: Key Concepts and Case Studies*. India: Elsevier.
- Leon, J. S. (2000). *ACADEMIA*. Obtenido de [https://www.academia.edu/9027743/Sociedad\\_Latinoamericana\\_para\\_la\\_Calidad](https://www.academia.edu/9027743/Sociedad_Latinoamericana_para_la_Calidad)
- Márquez, C. A. (2015). TÉCNICAS DE ANÁLISIS CAUSA RAIZ (ACR)(RootCause Analysis: RCA). *TÉCNICAS DE ANÁLISIS CAUSA RAIZ (ACR)(RootCause Analysis: RCA)* (pág. 82). ELITE TRAINING.
- Maya, J. (2018). *Aplicación de RCM como estrategia de implementación del mantenimiento predictivo para la metodología TPM*. Medellín: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/64727>.
- Mora, D., & Mendoza, H. (2015). *PROPUESTA DE UN MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PARA LOS ACTIVOS DEL CENTRO DE TECNOLOGÍAS DEL TRANSPORTE CTT (SENA)*. [https://repositorio.ecci.edu.co/bitstream/handle/001/150/PROPUESTA%20DE%20UN%20MODELO%20DE%20GESTION%20INTEGRAL%20DE%20MANTENIMIENTO%20PARA%20LOS%20EQUIPOS%20DEL%20SERVICIO%20NACIONA\\_0.pdf?sequence=1](https://repositorio.ecci.edu.co/bitstream/handle/001/150/PROPUESTA%20DE%20UN%20MODELO%20DE%20GESTION%20INTEGRAL%20DE%20MANTENIMIENTO%20PARA%20LOS%20EQUIPOS%20DEL%20SERVICIO%20NACIONA_0.pdf?sequence=1).
- Moubray, J. (2002). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*. Estados Unidos: Industrial Press.
- Pablo Viveros, R. S. (2013). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. *Revista chilena de ingeniería*, 125-138.
- Palencia, O. (s. f.). *Gestión Integral de Mantenimiento Basada en Confiabilidad*. Obtenido de ReliabilityWeb.com: <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/gestion-integral-de-mantenimiento-basada-en-confiabilidad/>
- Parra, C., & Crespo Márquez, A. (2012). Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la Gestión de Activos. En C. Parra, & A. Crespo, *Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la Gestión de Activos* (pág. 13). INGEMAN.
- Pistarelli, A. J. (2010). *Manual de Mantenimiento. Ingeniería, Gestión*. ARGENTINA: Edición del autor.
- Ramirez, H., & Ospina, J. (2019). *DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO PARA LA EMPRESA MANE SUCURSAL COLOMBIA S.A.* Medellín: <https://repositorio.itm.edu.co/handle/20.500.12622/2051>.
- SAMI. (s.f.). *The Model*. Obtenido de <http://samicorp.com/the-sami-pyramid/>

Sánchez, V. D. (2021). *INSPECCIÓN Y EVALUACIÓN AL PROCESO DE CONFIABILIDAD DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y PLANEACIÓN DE MANTENIMIENTO (IPM) EN MINEROS ALUVIAL*. <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/18383>.

Smith, D. D. (2011). *Realiability Manitainability and Risk*. Oxford: Elsevier.

Trujillo, A. (2018). *PROPUESTA DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM), PARA LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS EN TERMOSURIA-META*. <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/11606>.

Vallejo, R. (2019). *PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD PARA LA MAQUINARIA DE UNA EMPRESA CAFETALERA*. <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/1944/49415/VallejoAlemanRicardo.pdf?sequence=1>.

Wikipedia. (25 de Diciembre de 2020). *Gestión de activos*. Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Gesti%C3%B3n\\_de\\_activos](https://es.wikipedia.org/wiki/Gesti%C3%B3n_de_activos)

Por intermedio del presente documento en mi calidad de autor o titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra que adjunto, titulada **Estructura metodológica análisis de causa raíz, monitoreo basado en condición y mantenimiento centrado en confiabilidad**, autorizo a la Corporación universitaria Unitec para que utilice en todas sus formas, los derechos patrimoniales de reproducción, comunicación pública, transformación y distribución (alquiler, préstamo público e importación) que me corresponden como creador o titular de la obra objeto del presente documento.


La presente autorización se da sin restricción de tiempo, ni territorio y de manera gratuita. Entiendo que puedo solicitar a la Corporación universitaria Unitec retirar mi obra en cualquier momento tanto de los repositorios como del catálogo si así lo decido.

La presente autorización se otorga de manera no exclusiva, y la misma no implica transferencia de mis derechos patrimoniales en favor de la Corporación universitaria Unitec, por lo que podré utilizar y explotar la obra de la manera que mejor considere. La presente autorización no implica la cesión de los derechos morales y la Corporación universitaria Unitec los reconocerá y velará por el respeto a los mismos.

La presente autorización se hace extensiva no sólo a las facultades y derechos de uso sobre la obra en formato o soporte material, sino también para formato electrónico, y en general para cualquier formato conocido o por conocer. Manifiesto que la obra objeto de la presente autorización es original y la realicé sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es de mi exclusiva autoría o tengo la titularidad sobre la misma. En caso de presentarse cualquier reclamación o por acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión asumiré toda la responsabilidad, y saldré en defensa de los derechos aquí autorizados para todos los efectos la Corporación universitaria Unitec actúa como un tercero de buena fe. La sesión otorgada se ajusta a lo que establece la ley 23 de 1982.

Para constancia de lo expresado anteriormente firmo, como aparece a continuación.

Firma



---

Nombre José Andrés Salazar Alfaro

CC. 80215098