

# **Mantenimiento Eléctrico Preventivo (MEP) Eficaz para la infraestructura eléctrica de Pozos de Producción de hidrocarburos.**

Iván Alberto Gélvez Pinzón  
Oficinas 25 de Agosto Refinería Barrancabermeja  
E.mail: ivan.gelvez@ecopetrol.com.co  
Barrancabermeja, Colombia

## **Resumen**

En el contexto de la industria petrolera, la confiabilidad y disponibilidad de la infraestructura eléctrica son factores críticos que afectan directamente la operatividad y eficiencia de los campos de extracción de hidrocarburos. Donde equipos clave como motores eléctricos de inducción, transformadores de potencia y variadores de velocidad mostraron altas tasas de fallas, lo que impacta negativamente la producción y generan costos de mantenimiento adicionales significativos.

El propósito de este documento es desarrollar e implementar un programa de mantenimiento eléctrico preventivo (MEP) eficaz, basado en la metodología RCM-FMECA y en la NFPA 70B, orientado a mejorar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos eléctricos en los clústeres de un Campo de Producción. Se busca reducir las tasas de falla mediante la identificación y priorización de los modos de falla críticos y la definición de acciones de mantenimiento preventivo efectivas y eficaces. Este enfoque no solo contribuirá a mitigar las tasas de falla y mejorar la seguridad operacional, sino que también optimizará los recursos y reducirá los costos asociados al mantenimiento correctivo y a las pérdidas de producción.

Este escrito se fundamenta en la necesidad urgente de mejorar la gestión del mantenimiento eléctrico en la industria petrolera colombiana, donde la infraestructura eléctrica es esencial para la continuidad operativa de la producción de hidrocarburos. La implementación de

metodologías como RCM-FMECA y el cumplimiento de normativas internacionales como NFPA 70B son fundamentales para alcanzar este objetivo.

## **Recopilación y análisis de datos.**

Se recogen datos históricos y actuales relevantes sobre los elementos seleccionados, incluyendo información sobre fallas previas, mantenimiento realizado, y condiciones de operación. Posteriormente, estos datos son analizados para identificar patrones y tendencias que puedan influir en la estrategia de mantenimiento.

La recopilación y análisis de datos es una etapa clave en cualquier proyecto de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) o similar, ya que proporciona la base sobre la cual se realizan todas las decisiones posteriores. Estos datos permiten comprender el comportamiento histórico de los equipos o sistemas, las tendencias de fallas, las causas de los problemas y el rendimiento general del sistema. Sin datos precisos y bien analizados, las recomendaciones de mantenimiento serían especulativas y menos efectivas. Además, un análisis adecuado de los datos puede ayudar a identificar problemas subyacentes, optimizar recursos, reducir costos, y mejorar la confiabilidad y disponibilidad de los activos.

## **Aplicación Metodología RCM.**

La aplicación del RCM (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad) es la parte central de la metodología en proyectos de mantenimiento. Está es el núcleo metodológico del proyecto. Esta etapa tiene

como objetivo optimizar las estrategias de mantenimiento mediante un análisis detallado de la confiabilidad y el desempeño de los equipos.

### **Definir funciones.**

Consiste en identificar y documentar las funciones que cada componente o sistema debe cumplir dentro de la operación. Definir correctamente las funciones es esencial para el análisis posterior de las fallas, ya que las fallas funcionales se determinan en relación con la incapacidad de un sistema para cumplir con dichas funciones.

*Funciones principales:* Son las tareas o roles esenciales que un elemento debe cumplir para el correcto funcionamiento del sistema global. Estas funciones están directamente relacionadas con la misión del equipo dentro del proceso productivo.

*Funciones secundarias:* Son aquellas tareas que no son críticas para la operación principal, pero que contribuyen a la operación general o a otras necesidades del sistema, como aspectos de seguridad, protección medioambiental o confort.

### **Establecer las fallas funcionales.**

Se identifican las fallas funcionales, es decir, los escenarios en los que un sistema, equipo o componente no puede cumplir con las funciones para las que fue diseñado. Estas fallas funcionales se definen en términos de la incapacidad del sistema para realizar su función principal o secundaria según las expectativas operativas previamente establecidas.

Para la determinación de las fallas funcionales implica identificar y clasificar todas las situaciones en las que el equipo no cumple con su función de manera satisfactoria. Esto se hace a través de una evaluación sistemática de las funciones definidas previamente, identificando en qué condiciones el equipo podría fallar.

*Fallas funcionales totales:* El equipo o sistema no puede realizar ninguna parte de su función principal o secundaria.

*Fallas funcionales parciales:* El equipo sigue operando, pero no lo hace conforme a los parámetros esperados de rendimiento.

*Fallas funcionales intermitentes:* El equipo funciona correctamente en algunos momentos, pero falla de manera esporádica o bajo ciertas condiciones.

*Fallas de calidad:* El equipo cumple con su función, pero no de acuerdo con los estándares de calidad establecidos.

### **Definir los modos de falla.**

Se detallan los diferentes modos en que pueden ocurrir las fallas funcionales, explorando las causas y mecanismos específicos.

La definición de los modos de falla implica detallar cómo y por qué se producen las fallas funcionales, especificando las causas y los mecanismos que las generan. Este paso busca identificar de forma precisa los diferentes modos en los que un sistema o componente puede fallar, abordando:

*Causas específicas:* Pueden ser por desgaste, sobrecargas, mal mantenimiento, condiciones ambientales extremas, errores de operación, entre otros.

*Mecanismos de falla:* Se refiere al proceso físico o químico que lleva a la falla, como la fatiga del material, la corrosión o el sobrecalentamiento.

### **Determinar los efectos de los modos de falla.**

Se analizan las consecuencias de los modos de falla, considerando el impacto en la seguridad, la operación, y los costos.

Una vez definidos los modos de falla, es necesario determinar los efectos que tienen en el sistema o en el proceso. Esto incluye:

**Impacto en la seguridad:** El modo de falla puede poner en riesgo la vida de personas o causar accidentes graves.

**Impacto en la operación:** El modo de falla causa una interrupción del proceso o una reducción en la eficiencia de producción.

**Impacto económico:** Cuáles son los costos asociados con la falla, tanto en términos de reparaciones como de pérdida de productividad.

**Impacto ambiental:** El modo de falla puede causar derrames, emisiones o daños al entorno.

**Impacto en clientes e imagen:** El modo de falla afectará la satisfacción del cliente o dañará la reputación de la empresa.

**Evaluar el riesgo de los efectos de los modos de falla.**

Se evalúa el riesgo asociado a los efectos identificados, considerando la probabilidad de ocurrencia y la gravedad de las consecuencias, lo que permite priorizar los modos de falla que requieren atención inmediata.

Una vez identificados los efectos, se procede a evaluar el riesgo que cada modo de falla representa, utilizando una matriz de riesgo como la matriz RAM (Risk Assessment Matrix). Esta matriz permite analizar y clasificar el riesgo de los modos de falla en función de dos variables clave:

**Probabilidad de ocurrencia:** Qué tan frecuente o probable es que ocurra el modo de falla.

**Gravedad de las consecuencias:** La magnitud del impacto en términos de seguridad, costos, operación, ambiente, clientes e imagen.

En un análisis de riesgo mediante la matriz RAM, se evalúan las consecuencias y la probabilidad de los modos de falla utilizando una escala numérica y alfabética, respectivamente. Esto permite clasificar y

priorizar los riesgos de manera sistemática. A continuación, se describe cómo se numeran las consecuencias según la severidad y cómo se categoriza la probabilidad.

**Figura 1 Matriz RAM: Evaluación del Riesgo**

CONSECUENCIAS REALES					PROBABILIDAD					
					A	B	C	D	E	
Personas	Económica	Ambiental	Clientes	Imagen de la Empresa	10-A	10-B	10-C	10-D	10-E	
					No ha ocurrido en la industria	Ha ocurrido en la industria	Ha ocurrido en la Empresa en los últimos 10 años	Se espera que ocurra en la Empresa en un lapso entre 1 y 5 años	Se espera que ocurra en la Unidad, o Departamento, en el transcurso del año	
Uno o más fallecidos	Catastrófica > \$10M	Mayor	Vejo como proveedor	Internacional	5	5A-M	5B-M	5C-H	5D-H	5E-(VH)
Inspección permanente (Parcial o Total)	Grave \$1M a \$10M	Mayor	Pérdida de participación en el mercado	Nacional	4	4A-L	4B-M	4C-M	4D-H	4E-H
Inspección Temporal (En Taller)	Severa \$100K a \$1M	Localizado	Pérdida de clientes y/o desabastecimiento	Regional	3	3A-N	3B-L	3C-M	3D-M	3E-H
Lesión menor (con incapacidad)	Importante \$10K a \$100K	Menor	Quejas y/o Reclamaciones	Local	2	2A-N	2B-N	2C-L	2D-L	2E-M
Lesión leve (frecuente)	Marginal <\$10K	Leve	Incumplir especificaciones	Interna	1	1A-N	1B-N	1C-N	1D-L	1E-L
Ninguna lesión	Ninguna	Ningún Efecto	Ningún impacto	Ningún impacto	0	0A-N	0B-N	0C-N	0D-N	0E-N

**Muy alto:** Riesgo intolerable para ocurrir en el negocio.

**Alto:** Inevitable, deben buscarse alternativas.

**Medio:** Se deben tomar medidas para reducir el riesgo a niveles razonablemente prácticos.

**Bajo:** Discutir y gestionar mejoras de los sistemas de control y de calidad establecidos.

**Despreciable:** Riesgo muy bajo, usar sistemas de control y calidad establecidos.

NOTA: El Impacto económico sobre los instalaciones como los procesos y productos. Se expresa en Miles de dólares (M\$) o en millones de dólares (M\$).

Nota: La matriz de la gráfica sirve para poder determinar el riesgo y la criticidad de los equipos de forma didáctica y fácil de entender clasificándolos de despreciable en color verde a muy alto en color rojo, después de realizar el cruce entre las consecuencias por la probabilidad.

La Matriz RAM combina las escalas de severidad y probabilidad para obtener una evaluación del riesgo de cada modo de falla. Al cruzar ambos valores, se obtiene una calificación de riesgo que permite priorizar las acciones.

**Aplicar el diagrama lógico de decisión.**

Se utiliza un diagrama de decisión para clasificar los modos de falla y decidir la acción de mantenimiento más apropiada, según la norma SAE JA1011 y la SAE JA1012.

El diagrama lógico de decisión es una herramienta clave en el proceso de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), utilizado para evaluar y clasificar los modos de falla, y determinar la acción de mantenimiento más adecuada para mitigar cada uno. Este enfoque sigue los lineamientos establecidos en la norma SAE

JA1011, que describe los criterios para implementar un proceso de RCM.

El diagrama lógico de decisión es un esquema que, a través de una serie de preguntas y respuestas (sí o no), guía a los responsables del mantenimiento en la toma de decisiones sobre qué estrategia seguir para cada modo de falla. Cada respuesta lleva a una acción específica, como realizar mantenimiento preventivo, correctivo, predictivo, o implementar una estrategia de rediseño del equipo.

*¿El modo de falla afecta la seguridad o el entorno?*

*¿El modo de falla afecta la operación del sistema?*

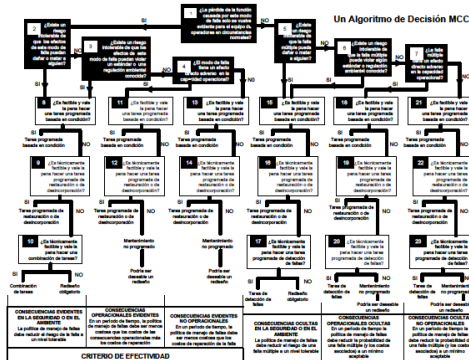
*¿El modo de falla tiene un impacto económico significativo?*

*¿Es detectable el modo de falla antes de que ocurra?*

*¿El costo de la falla es mayor que el costo del mantenimiento?*

*¿Es posible implementar una estrategia de rediseño para evitar la falla?*

**Figura 2** Ejemplo de diagrama de decisión, según la norma SAE JA1012.



Nota: el diagrama de decisión que se muestra en la figura es un de varios que la norma SAE JA1012 da como ejemplo para definir las recomendaciones de mantenimiento.

Los diagramas de decisión en la norma SAE JA1012 proporcionan un enfoque

estructurado para decidir la mejor estrategia de mantenimiento en función de la criticidad de cada modo de falla.

### Generar las recomendaciones de mantenimiento.

Basado en el análisis anterior, se generan recomendaciones específicas de mantenimiento que optimizan la confiabilidad y disponibilidad de los sistemas.

Estas recomendaciones deben estar alineadas con los resultados del diagrama lógico de decisión realizado previamente (SAE JA1011/JA1012) y enfocados en prevenir fallas o mitigar sus consecuencias.

### Proceso para Generar Recomendaciones de Mantenimiento Eléctrico Preventivo MEP Según NFPA 70B.

A continuación, se pretende enfatizar y delimitar la metodología a los equipos eléctricos basado en lo dispuesto en la norma NFPA 70B.

La norma NFPA 70B establece las directrices para el Mantenimiento Eléctrico Preventivo MEC de equipos eléctricos en instalaciones industriales y comerciales, con el objetivo de mejorar la confiabilidad, disponibilidad, y seguridad de los sistemas eléctricos. En el contexto del análisis previo de modos de falla y de las decisiones tomadas en el diagrama lógico, las recomendaciones de mantenimiento específicas deben alinearse con los principios y directrices de esta norma.

### Revisión de los Componentes Eléctricos Críticos

Basado en los modos de falla identificados, se debe crear una lista priorizada de los componentes eléctricos críticos que requieren acciones de mantenimiento. Esto incluye equipos como tableros de distribución, transformadores, motores, generadores, interruptores, disyuntores, y sistemas de protección.

## **Definir Tareas de Mantenimiento Específicas**

Según las recomendaciones de la NFPA 70B, las tareas de mantenimiento deben incluir las siguientes acciones:

**Inspección Visual Regular:** Inspeccionar visualmente todos los componentes eléctricos críticos en busca de signos de desgaste, corrosión, calentamiento excesivo, fugas de aceite, acumulación de polvo, entre otros.

### **Pruebas de Diagnóstico y Medición:**

Realizar pruebas específicas como:

**Termografía Infrarroja:** Detectar puntos calientes en conexiones eléctricas, interruptores y cables que podrían ser indicadores de sobrecalentamiento o mala conexión.

**Pruebas de resistencia de aislamiento:** Medir el aislamiento de los cables y equipos para detectar degradación en los aislamientos que puedan provocar cortocircuitos.

**Monitoreo de cargas y voltajes:** Verificar que los niveles de voltaje y corriente estén dentro de los parámetros operativos normales para evitar sobrecargas.

**Limpieza y Mantenimiento Preventivo:** Limpiar el equipo regularmente para eliminar polvo, suciedad y contaminantes que puedan reducir la eficiencia o aumentar los riesgos de fallas.

**Lubricar:** los componentes que lo requieran, como motores eléctricos y rodamientos, según las especificaciones del fabricante.

### **Establecer Frecuencias de Mantenimiento:**

De acuerdo con NFPA 70B, las frecuencias de mantenimiento pueden variar dependiendo del tipo de equipo y su criticidad. La norma sugiere intervalos de mantenimiento basados en:

-**Condiciones ambientales:** En áreas con polvo, humedad o temperaturas extremas, el mantenimiento debe ser más frecuente.

-**Horas de funcionamiento:** Los equipos que operan continuamente necesitan ser inspeccionados y mantenidos más frecuentemente que aquellos que tienen menor uso.

-**Historial de fallas:** Si se ha registrado un aumento en las fallas o problemas de rendimiento, se debe aumentar la frecuencia de inspecciones y mantenimiento.

### **Estrategias de Mantenimiento Basado en Condición:**

La NFPA 70B también fomenta el uso de mantenimiento basado en condición (CBM). Esto implica el uso de tecnologías predictivas para monitorear el estado del equipo y planificar el mantenimiento basado en datos reales de desgaste o fallo inminente:

-**Monitoreo de vibraciones:** Para motores y generadores, el monitoreo de vibraciones puede detectar desequilibrios o fallas mecánicas en etapas tempranas.

-**Análisis de aceites dieléctricos:** Para transformadores y otros equipos con aceite dieléctrico, es importante realizar análisis regulares para detectar la presencia de contaminantes o gases disueltos que puedan indicar una falla interna.

### **Recomendaciones para Optimizar la Confiabilidad y Disponibilidad**

#### **Mantenimiento preventivo programado:**

Desarrollar un calendario de mantenimiento basado en las mejores prácticas de la NFPA 70B, ajustado a las necesidades operativas específicas de la instalación.

**Actualización tecnológica:** Reemplazar o mejorar componentes antiguos con tecnologías más confiables (por ejemplo, instalar interruptores con capacidad de monitoreo remoto o equipos de protección más avanzados).

**Capacitación del personal:** Asegurar que el personal de mantenimiento esté adecuadamente capacitado en las técnicas de inspección y prueba recomendadas por la NFPA 70B.

**Documentación y Registro del Mantenimiento:** La norma NFPA 70B enfatiza la importancia de documentar todas las actividades de mantenimiento. Esto incluye:

- Registros detallados de las inspecciones, reparaciones, reemplazos y pruebas.
- Historial de condiciones de los equipos y cualquier anomalía detectada.
- Programas de mantenimiento futuros basados en el historial del equipo y los resultados de las pruebas.

Estas recomendaciones alineadas con la NFPA 70B podrán asegurar que los sistemas eléctricos operen con la máxima confiabilidad y disponibilidad, al mismo tiempo que se reducen los riesgos de fallas imprevistas y se optimizan los costos de mantenimiento.

### **Evaluación de la Efectividad del Mantenimiento (Índice de Efectividad del Mantenimiento - MEI).**

Se calcula el Índice de Efectividad del Mantenimiento (MEI) como la relación entre la reducción del riesgo económico anualizado y el costo anual del mantenimiento (POC).

$MEI = \frac{\text{Reducción riesgo económico anualizado}}{\text{Costo anual POC}}$

Donde:

Reducción del Riesgo Económico Anualizado: es la diferencia entre el costo anual esperado de no hacer mantenimiento (PONC) y el riesgo económico residual después de implementar el mantenimiento.

Costo Anual de Mantenimiento (POC): es el costo anual estimado de realizar las actividades de mantenimiento preventivo o correctivo recomendadas.

### **Interpretación del MEI.**

Interpretación de resultados para el cálculo del Índice de Efectividad del Mantenimiento (MEI).

#### **MEI > 1**

Interpretación: El mantenimiento es efectivo y rentable.

Acción: Se recomienda continuar con las estrategias de mantenimiento implementadas o incluso incrementarlas si es posible.

#### **MEI = 1**

Interpretación: El mantenimiento es justo rentable.

Acción: Evaluar posibles mejoras en la estrategia de mantenimiento para optimizar costos sin comprometer la confiabilidad

#### **MEI < 1**

Interpretación: El mantenimiento no es rentable.

Acción: Revisar y ajustar las estrategias de mantenimiento, considerando reducir la frecuencia de las tareas, optimizar los recursos utilizados o cambiar el enfoque de mantenimiento (por ejemplo, implementar mantenimiento predictivo).

Lo anterior describe las diferentes posibilidades de resultados y su interpretación para el cálculo del Índice de Efectividad del Mantenimiento (MEI).

### **Implementación del Mantenimiento Eléctrico Preventivo MEP**

#### **Realizar la planeación del mantenimiento.**

Elaborar un plan de mantenimiento detallado, incluyendo las tareas específicas, los recursos necesarios, y el cronograma de implementación. Con base en los resultados

obtenidos de los análisis anteriores, como el análisis de modos de falla y efectos (FMEA), la evaluación de costos (PONC y POC), y la efectividad de las recomendaciones (MEI). A continuación, se describe cómo se elabora un plan de mantenimiento detallado considerando estos análisis previos:

### **Definición de Tareas de Mantenimiento.**

Es un proceso sistemático que busca identificar y describir las actividades necesarias para asegurar el funcionamiento óptimo de los equipos e instalaciones. Esto incluye actividades preventivas, correctivas y predictivas, basadas en el análisis de fallas, especificaciones del fabricante, normativas aplicables y experiencia operacional.

### **Tipos de mantenimiento.**

Las actividades de mantenimiento recomendadas se clasifican según el tipo de mantenimiento.

*Mantenimiento Preventivo (MP):* Tareas programadas para prevenir fallas antes de que ocurran, basadas en intervalos de tiempo o uso (por ejemplo, inspecciones, lubricación, calibraciones).

*Mantenimiento Correctivo (MC):* Acciones realizadas después de una falla para restaurar el equipo a su estado operativo.

*Mantenimiento Predictivo (MPD):* Actividades basadas en la condición del equipo, utilizando técnicas como análisis de vibraciones, termografía o monitoreo de aceite.

### **Descripción Detallada de Tareas.**

Se realiza una descripción de forma metódica y estructurada para que sea de fácil el entendimiento de los involucrados en la ejecución. La descripción de la tarea debe contener como mínimo las siguientes descripciones:

*Nombre de la Tarea:* Definir un nombre claro y descriptivo para cada tarea, como

"Inspección de rodamientos", "Cambio de filtro de aire", etc.

*Descripción de la Actividad:* Proveer una descripción detallada de lo que se debe hacer, indicando los pasos específicos, procedimientos de trabajo seguro y cualquier instrucción especial.

*Frecuencia:* Establecer la frecuencia con la que se debe realizar cada tarea (diaria, semanal, mensual, anual) en base a datos históricos, recomendaciones del fabricante y análisis de riesgos.

*Personal Requerido:* Indicar el tipo de personal necesario (por ejemplo, electricista, mecánico) y el número de técnicos requeridos para la ejecución de la tarea.

*Herramientas y Equipos:* Listar las herramientas especiales y equipos necesarios para realizar la tarea, como multímetros, analizadores de vibraciones, herramientas manuales, etc.

*Materiales y Repuestos:* Detallar los materiales y repuestos necesarios (aceites, filtros, componentes de recambio), incluyendo sus especificaciones y cantidades.

### **Procedimientos y Normativas:**

En este paso se realiza la descripción de las instrucciones detalladas de las actividades de mantenimiento basadas en mejores prácticas, concepto de expertos y recomendaciones de fabricantes de equipos.

*Instrucciones de Trabajo:* Documentar las instrucciones de trabajo, asegurando que estén basadas en las mejores prácticas y que cumplan con las normativas aplicables (como NFPA 70B para equipos eléctricos).

*Normas de Seguridad:* Incluir todas las medidas de seguridad y precauciones que deben seguirse, como el uso de equipos de protección personal (EPP), procedimientos de bloqueo y etiquetado (LOTO), y evaluación de riesgos.

## **Revisión y Ajuste.**

Revisar periódicamente las tareas definidas en función del desempeño de los equipos y la experiencia operacional, ajustando las frecuencias y procedimientos según sea necesario.

Evaluar la efectividad de las tareas de mantenimiento mediante indicadores como el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio para reparar (MTTR).

Incorporar la retroalimentación del personal y los resultados del monitoreo para mejorar continuamente las tareas de mantenimiento.

## **REFERENCIAS**

[ 1 ] National Fire Protection Association, NFPA 70B: “Standard for Electrical Equipment Maintenance”, 2023 ed. Quincy, MA:NFPA, 2023.

[ 2 ] SAE International, SAE JA1011: “Evaluation Criteria for reliability-Centered maintenance (RCM) Processes”. Warrendale., PA: SAE International, 1999.

[ 3 ] SAE International, SAE JA1012: “A guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard. Warrendale., PA: SAE International, 2002.

Iván Alberto Gélvez Pinzón. Ingeniero electricista de la Universidad Industrial de Santander UIS, Especialista en Gerencia de Mantenimiento de la Universidad Industrial de Santander UIS, en curso: Maestría en gerencia de Mantenimiento de la Universidad Industrial de Santander UIS. Trabaja en Ecopetrol S.A., Cargo actual Ingeniero Integral de Mantto y Confiabilidad, hace 15 años. Cuenta con 26 años de experiencia en el sector Oil and Gas.

Datos personales

Nombre del autor: Iván Alberto Gélvez Pinzón.

Celular: 3125932328

Dirección: Carrera 31 #47-44 torre 2 apto 703.

Oficinas 25 de agosto, bloque 2, Refinería de Barrancabermeja.

E. mail: [ivan.gelvez@ecopetrol.com.co](mailto:ivan.gelvez@ecopetrol.com.co)

Barrancabermeja, Colombia