

MODELO DE MANTENIMIENTO BASADO EN RCM PARA LAS UNIDADES  
RECTIFICADORAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA (URPC) PARA UN  
GASODUCTO DE TRANSPORTE

IVÁN FERNANDO RINCÓN ROA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO  
BUCARAMANGA

2017

MODELO DE MANTENIMIENTO BASADO EN RCM PARA LAS UNIDADES  
RECTIFICADORAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA (URPC) PARA UN  
GASODUCTO DE TRANSPORTE

IVÁN FERNANDO RINCÓN ROA

Monografía de grado presentado como requisito para optar el título de  
Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Director

CARLOS BORRÁS PINILLA

Ph. D. Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO  
BUCARAMANGA

2017

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi esposa Catalina Gutiérrez por su apoyo incondicional, paciencia, sacrificio y mucho amor, porque cada día que sentía que no podía más allí estaba ella para darme unas palabras de aliento, y decirme que sí se puede.

A mis padres por su amor, palabras de apoyo y orgullo al saber que su hijo una vez más estaba luchando por alcanzar un objetivo trazado.

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	15
1. SITUACIÓN ACTUAL DEL TRANSPORTE DE GAS .....	16
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	16
1.1.1 Costos relacionados con la corrosión. ....	17
1.1.1.1 Mantenimiento Excesivo/Reparación/Reemplazo .....	17
1.1.1.2 Pérdida de Producción/Pérdida de Tiempo por Paros .....	17
1.1.1.3 Contaminación de Producto .....	18
1.1.1.4 Pérdida de Producto .....	18
1.1.1.5 Pérdida de Eficiencia - Sobredimensiones y Costos por Exceso de Energía .....	19
1.1.1.6 Accidentes .....	19
1.1.1.7 Incremento de Costos de Capital - Sobre diseño.....	19
1.1.1.8 Limpieza de Contaminación Ambiental – Multas .....	20
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	20
1.3 OBJETIVOS.....	21
1.3.1 Objetivo General .....	21
1.3.2 Objetivos Específicos.....	21
2. LA CORROSIÓN .....	23
2.1 DEFINICIÓN DE CORROSIÓN .....	23
2.2 CORROSIÓN DE TUBERÍAS ENTERRADAS.....	24
2.3 DEFINICIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA (PC).....	25
2.4 TIPOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA .....	25
2.4.1 Sistema de protección catódica por corriente impresa .....	25

2.5 CRITERIOS PARA LA PROTECCIÓN CATÓDICA .....	27
3. UNIDAD RECTIFICADORA DE PROTECCIÓN CATÓDICA (URPC) .....	29
3.1 DESCRIPCIÓN DE ETAPAS Y COMPONENTES DEL SISTEMA .....	30
3.1.1 Etapa de encendido y apagado .....	31
3.1.2 Etapa de reducción y regulación de tensión de AC .....	32
3.1.3 Etapa de rectificación AC a DC.....	34
3.1.4 Etapa de Filtrado.....	35
3.1.5 Etapa de medición .....	36
3.1.6 Etapa de protección contra sobrecargas.....	37
3.2 MODO DE OPERACIÓN .....	37
3.2.1 Tensión constante.....	37
3.3 PRUEBA DE RECTIFICADORES.....	38
4. GENERALIDADES DEL MANTENIMIENTO.....	40
4.1 HISTORIA DEL MANTENIMIENTO .....	40
4.2 LA FINALIDAD DEL MANTENIMIENTO .....	42
4.3 OBJETIVOS DEL MANTENIMIENTO .....	42
4.4 TIPOS DE MANTENIMIENTO .....	44
4.4.1 Mantenimiento Correctivo .....	44
4.4.2 Mantenimiento Preventivo.....	45
4.4.2.1 Mantenimiento Sistemático .....	46
4.4.2.2 Mantenimiento Predictivo o Condicional (CBM).....	46
5. MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM) .....	48
5.1 HISTORIA DEL RCM.....	49
5.2 OBJETIVOS PARA EL PROGRAMA DE MANTENIMIENTO .....	50
5.3 BENEFICIOS DE IMPLEMENTAR .....	51
5.4 PASOS DE UN PROYECTO DE RCM .....	52
5.5 ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA .....	52

5.6 ANÁLISIS DE EFECTOS Y DE RIESGOS (CRITICIDAD).....	53
5.7 DETERMINACIÓN DE TAREAS DE MANTENIMIENTO.....	54
6. RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS.....	57
6.1 CONTEXTO OPERACIONAL.....	57
6.1.1 Condiciones Ambientales.....	57
6.1.2 Descripción específica de los sistemas.....	58
6.1.3 Circuito externo DC.....	59
6.1.4 Unidad de Monitoreo Remoto.....	59
6.2 MODELO DE MANTENIMIENTO HALLADO.....	59
6.3 HISTORICOS DE OPERACIÓN.....	61
6.4 HISTORIAL DE FALLAS Y TIEMPOS DE MANTENIMIENTO.....	69
6.5 LISTADO Y CODIFICACIÓN DE CADA SISTEMA, EQUIPO Y COMPONENTES DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA.....	72
7. DESARROLLO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN LA METODOLOGÍA RCM EN UNIDADES RECTIFICADORAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA.....	73
7.1 CONDICIONES DE LA METODOLOGÍA RCM.....	73
7.2 TAXONOMÍA Y FRONTERAS DE UNA UNIDAD RECTIFICADORA DE PROTECCIÓN CATÓDICA.....	75
7.3 IDENTIFICACIÓN DE ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA, EFECTOS Y CRITICIDAD “FMECA” ASOCIADOS AL RECTIFICADOR.....	78
7.3.1 Proceso de análisis de modos y efectos de falla de un rectificador (FMEA).....	79
7.3.2 Proceso de análisis de criticidad (AC) del Rectificador.....	82
7.4 DETERMINACIÓN DE TAREAS DE MANTENIMIENTO.....	87
7.5 ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE LOS SUBSISTEMAS.....	89
7.6 DISEÑO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO.....	94
7.6.1 Mantenimiento condicional o predictivo.....	95
7.6.2 Mantenimiento sistemático.....	96

8. CONCLUSIONES .....	98
9. RECOMENDACIONES.....	100
BIBLIOGRAFÍA.....	101
ANEXOS.....	104

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Pila de corrosión básica – Circuito electroquímico .....	24
Figura 2. Sistema de protección catódica por corriente impresa .....	26
Figura 3. Imagen típica de un rectificador.....	29
Figura 4. Mecanismo de un interruptor termomagnético.....	32
Figura 5. Esquema de un transformador de tensión. ....	33
Figura 6. Rectificador monofásico con puente de rectificación de onda completa. ....	34
Figura 7. Esquema unifilar de un rectificador con tensión constante monofásico. ....	38
Figura 8. Como es el mundo hoy. ....	41
Figura 9. Daño por corrosión, de una tubería de transporte de combustible. ....	44
Figura 10. Inspección de parámetros operacionales de una URPC. ....	46
Figura 11. Diagrama de flujo del RCM.....	48
Figura 12. Un algoritmo de decisión RCM. ....	55
Figura 13. Historial de fallas de las URPC año 2014 del Gasoducto Santanderes. .....	69
Figura 14. Relación Fiabilidad vs Mantenimiento de las URPC en el año 2014. ....	71
Figura 15. Proceso de Gestión del Mantenimiento aplicando el análisis de modos de falla y sus efectos y criticidad, AMFEC. ....	74
Figura 16. Taxonomía de una Unidad Rectificadora de Protección Catódica. ....	77
Figura 17. Diagrama de flujo simplificado de una Unidad Rectificadora de Protección Catódica.....	78
Figura 18. Porcentaje de valoración de criticidad del sistema. ....	86
Figura 19. Esquema de mantenimiento. ....	94
Figura 20. Tipo de decisión de tareas de mantenimiento de las URPC´s según metodología RCM. ....	96

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Características técnicas e interfaces de entrada/salida del sistema de estudio .....	58
Tabla 2. Histórico de parámetros operacionales URPC Pamplona - año 2014. ....	63
Tabla 3. Histórico de parámetros operacionales URPC Bucaramanga - año 2014. ....	64
Tabla 4. Histórico de parámetros operacionales URPC Girón - año 2014. ....	65
Tabla 5. Histórico de parámetros operacionales URPC Barrancabermeja - año 2014. ....	66
Tabla 6. Histórico de parámetros operacionales URPC Berlín - año 2014. ....	67
Tabla 7. Histórico de parámetros operacionales URPC Lebrija - año 2014. ....	68
Tabla 8. Codificación del sistema de protección catódica. ....	72
Tabla 9. Clasificación de la planta. ....	75
Tabla 10. Análisis de modos y efectos de falla del Rectificador. ....	79
Tabla 11. Matriz de evaluación de Criticidad – RAM. ....	84
Tabla 12. Valoración de Criticidad. ....	85
Tabla 13. Resultados del análisis de criticidad del Rectificador. ....	85
Tabla 14. Tabla de toma de decisiones para los Modo de Falla de criticidad media. ....	87
Tabla 15. Análisis de modos y efectos de falla de subsistemas. ....	89
Tabla 16. Resultados del análisis de Criticidad de los subsistemas. ....	93

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Cronograma de mantenimiento preventivo de los Rectificadores. ....	104
Anexo B. Planilla de registro e histórico operacional de un Rectificador. ....	105
Anexo C. Plantilla de mantenimiento predictivo. ....	106
Anexo D. Plantilla de repuestos por Rectificador. ....	107
Anexo E. Control de costos por Rectificador. ....	108

## RESUMEN

**TÍTULO:** MODELO DE MANTENIMIENTO BASADO EN RCM PARA LAS UNIDADES RECTIFICADORAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA (URPC) PARA UN GASODUCTO DE TRANSPORTE.<sup>1</sup>

**AUTOR:** IVÁN FERNANDO RINCÓN ROA.<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVES:** GASODUCTO, RECTIFICADOR, PROTECCIÓN CATÓDICA, MANTENIMIENTO, RCM, MODO DE FALLA, EFECTOS DE FALLA.

### **DESCRIPCIÓN O CONTENIDO:**

La aplicación de este plan de mantenimiento centrado en confiabilidad se propone realizar para un gasoducto de transporte; orientado a las URPC's críticas y subsistemas directamente relacionados (Sistema de energía eléctrica, camas anódicas, unidades de monitoreo remoto, etc.), para minimizar fallas y establecer frecuencias óptimas de operación; con el fin de prevenir posibles fallas a largo o mediano plazo por corrosión, que afecten la integridad de los ductos asociados a la inoperatividad de cada sistema, optimización de costos generado por el mantenimiento planificado de los activos, control adecuado de materiales de repuesto y equipos en stand by; ya que solo de esta manera se podrá cumplir con los requerimientos y demandas operativas que la empresa requiere.

Esta monografía está orientada al problema de continuidad del suministro de corriente impresa de protección catódica, que forma parte del concepto más general de la confiabilidad del servicio. En el desarrollo de este trabajo, trataremos la confiabilidad para brindar nuevas estrategias de planeación de mantenimiento para mejorar los indicadores de disponibilidad, disminuir la frecuencia de fallas y aumentar la velocidad de reparación de las URPC's.

Por otro lado, intenta establecer un modelo de mantenimiento que apunte a reducir los tiempos de indisponibilidad de las Unidades Rectificadoras de Protección Catódica (URPC's), y métodos que permitan actuar preventivamente ante las potenciales fallas que puedan presentarse en estos equipos, a la vez optimizar recursos y reducir costos por pérdida de elementos y repuestos en fallas comunes; logrando de esta manera mayor productividad y competitividad en el mercado.

---

<sup>1</sup> Monografía.

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Director: Carlos Borrás Pinilla, PhD. Ingeniero Mecánico.

## SUMMARY

**TITLE:** RCM-BASED MAINTENANCE MODEL FOR CATHODIC PROTECTION RECTIFIER UNITS (URPC) FOR A GAS TRANSPORT PIPELINE.<sup>3</sup>

**AUTHOR:** IVÁN FERNANDO RINCÓN ROA.<sup>4</sup>

**KEYWORDS:** GAS PIPELINE, RECTIFIER, CATHODIC PROTECTION, MAINTENANCE, RCM, FAILURE MODE, FAILURE EFFECTS.

### **DESCRIPTION OR CONTENTS:**

The application of this Reliability Centered Maintenance plan is proposed for a gas transport pipeline, and is oriented to the critical URPCs and they directly related subsystems (electrical power system, anodic beds, remote monitoring units, etc.), to minimize failures and establish the optimum operating frequencies; in order to prevent possible long-or medium-term corrosion failures, affecting the integrity of the ducts associated with the inoperative of each system, optimization of the costs generated by the planned maintenance of the assets, adequate control of the spare parts and equipment in stand-by; since only in this way will be able to comply with the operational requirements and demands that the company requires.

This monograph is oriented to the problem of continuity of printed cathodic protection current supply, which is part of the more general concept of service reliability. In the development of this work, we will address the reliability to provide new maintenance planning strategies to improve availability indicators, reduce the frequency of failures and increase the repair speed of the URPCs.

Besides, it tries to establish a maintenance model focused into reduce the unavailability times of the Cathodic Protection Rectifying Units (URPC's), and methods that allow to establish preventive actions against potential failures that may occur in these equipment, and at the same time optimize resources and reduce costs for loss of elements and spare parts in common failures; thus achieving greater productivity and competitiveness in the market.

---

<sup>3</sup> Monograph.

<sup>4</sup> Faculty of Engineering Physics and Mechanics. Mechanical Engineering School. Specialization in Maintenance Management. Director: Carlos Borrás Pinilla, PhD. Mechanical Engineer.

## INTRODUCCIÓN

Se buscan establecer nuevas metodologías de mantenimiento como optimizar esquemas de programación con base en asignación de recursos (humanos, herramientas, materiales, y equipos) para garantizar la mejora continua de los procesos operativos de cada sistema y tomar decisiones acertadas, nuevos sistemas de información y herramientas de análisis para optimizar la gestión, planeación, ejecución y control de la producción. Para alcanzar óptimos resultados es necesario del trabajo en equipo, apoyo gerencial, integración de los sistemas y otras prácticas de las organizaciones de clase mundial.

Si se lograran mantener los indicadores operacionales y de confiabilidad de las URPC's en un nivel alto y a un bajo costo derivado de la disminución de recursos destinados en las reparaciones, repuestos, fallas prematuras, daños colaterales, el estado de los demás activos (tubería) estarían en óptimas condiciones operativas y la empresa no tendría preocupación alguna en cuanto a la baja de su producción de transporte de gas natural y su demanda frente a otras sería mayor.

## **1. SITUACIÓN ACTUAL DEL TRANSPORTE DE GAS**

El aumento indiscriminado de la población y el desarrollo industrial de Colombia en las últimas décadas, ha requerido de mayores recursos económicos, provenientes en su mayoría de las industrias de hidrocarburos, las cuales se han visto en la necesidad de aumentar sus niveles de producción y transporte de combustible. Esto ha llevado a las empresas a construir e instalar diferentes tipos de líneas de transporte de gas, que, por factores ambientales, topográficos y de seguridad, han tenido que ser enterradas, viéndose necesaria la instalación de algún sistema de protección, para evitar su exposición a sufrir daños por corrosión en un futuro.

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Esta monografía está orientada al problema de continuidad de suministro de corriente impresa de protección catódica que forma parte del concepto más general de la confiabilidad del servicio. En el desarrollo de este trabajo, trataremos la confiabilidad para brindar nuevas estrategias de planeación de mantenimiento para mejorar los indicadores de disponibilidad, disminuir la frecuencia de fallas y aumentar la velocidad de reparación de las Unidades Rectificadoras de Protección Catódica (URPC); con el fin de disminuir los costos relacionados con la corrosión.

En los Estados Unidos, las pérdidas directas debidas a la corrosión son de más de \$276 billones de dólares anuales o el 3.1% del Producto Interno Bruto (PIB). Estas pérdidas incluyen productos domésticos tales como automóviles, calentadores de agua, plomería, y de superficies expuestas tales como canales en techos y cañerías de salida de agua. También incluye el costo de la corrosión en la industria, y pérdidas debidas al deterioro de infraestructura pública incluyendo puentes,

edificios, sistemas de abastecimiento y desecho de agua y de otras empresas de servicio público.

El costo de la corrosión no puede ser eliminado completamente. Aún si la tecnología de control de corrosión pudiera eliminarla totalmente, habría que considerar el costo de las medidas de control en el análisis de reducción de los costos de corrosión. Como veremos, es usualmente más económico simplemente controlar la corrosión a un cierto límite, que eliminarla completamente.

### **1.1.1 Costos relacionados con la corrosión.**

**1.1.1.1 Mantenimiento Excesivo/Reparación/Reemplazo.** Si la corrosión no es propiamente considerada en el diseño inicial de un sistema, esto puede causar frecuentes paros no programados y la necesidad de mantenimiento excesivo, reparaciones y reemplazo de piezas dañadas para mantener el sistema en operación.

El costo de estos factores comúnmente excede el costo de evitar la corrosión durante la etapa de diseño, mediante la selección de un material más resistente, cambios en las condiciones de operación del sistema, o la aplicación de otras medidas de control.

**1.1.1.2 Pérdida de Producción/Pérdida de Tiempo por Paros.** Cuando el daño por corrosión ocurre y mantenimientos y reparaciones son requeridas, es usualmente necesario parar la producción. Estas interrupciones resultan en pérdida o reducción de ingresos a la empresa, resultando en un gran impacto económico.

Adicionalmente, puede haber altos costos en el paro y arranque de una planta industrial. Por ejemplo, el paro forzado y arranque de una planta eléctrica a base de combustibles fósiles puede costar más de \$500,000 dólares al considerar costo de mano de obra, combustibles y otros costos asociados.

**1.1.1.3 Contaminación de Producto.** En muchas industrias, la contaminación de producto debido a productos de corrosión entrando a la corriente del proceso puede ser muy nociva. Esto es particularmente cierto para la industria procesadora de alimentos y farmacéutica, pero igual aplica a muchos otros procesos. El costo directo de este tipo de contaminación es la pérdida de valor de los productos contaminados; la contaminación también puede tener costos indirectos, pero esto será discutido más tarde.

**1.1.1.4 Pérdida de Producto.** La pérdida de producto debido a fugas puede tener significantes costos, directos e indirectos. Los costos directos incluyen el valor del producto en sí, el costo de reparaciones, y los costos asociados al tiempo de falta de producción, incluyendo la salida o disparo de la planta y el restablecimiento de operación o arranque. Sin embargo, las fugas por corrosión pueden tener otros costos. Por ejemplo, la pérdida de materiales puede causar un daño colateral o de mayor efecto que el costo del producto perdido.

**1.1.1.5 Pérdida de Eficiencia – Sobredimensiones y Costos por Exceso de Energía.** En muchos casos, la corrosión puede ser prevenida empleando un sobredimensionamiento del sistema. Sumado a este costo directo, esto puede tener otros efectos económicos directos. Por ejemplo, el sobre diseño de tubos de un intercambiador de calor reducirá la eficiencia de intercambio, lo cual incrementará el consumo de combustible. El ensuciamiento de los tubos por productos de corrosión tiene un efecto similar.

**1.1.1.6 Accidentes.** La corrosión puede y desafortunadamente ha causado graves accidentes, resultando en lesiones a personas y pérdida de vidas.

Los costos de accidentes relacionados con la corrosión tienen consecuencias económicas directas para cubrir esas pérdidas, y otros costos indirectos e implicaciones sociales. Por ejemplo, si una planta o industria ha tenido antecedentes negativos en sus registros de seguridad debido a corrosión u otras causas, el costo del seguro será mucho más alto que si un buen registro de seguridad hubiera sido mantenido.

**1.1.1.7 Incremento de Costos de Capital - Sobre diseño.** Como se mencionó anteriormente, el aumento de material extra en un sistema para tener mayor tolerancia a la corrosión, incrementa el costo de capital. Aquí también se incluyen los costos iniciales de otras medidas de control de corrosión, tales como recubrimientos, sistemas de protección catódica y equipos de inyección de inhibidores al sistema.

**1.1.1.8 Limpieza de Contaminación Ambiental – Multas.** Los costos de limpieza ambiental por derrame de productos se han incrementado considerablemente, debido a que se ha creado una conciencia de los efectos potenciales a corto y a largo plazo que estos derrames pueden tener en el medio ambiente. Hoy en día, la limpieza de derrames es un requerimiento legal. Aún si la compañía responsable del problema ya no es la propietaria del sistema afectado, la compañía propietaria de este sistema al tiempo del accidente o derrame puede ser responsable del costo de la limpieza. En caso de negligencia, la multa puede ser a los dueños del sistema o a los operadores del mismo. Estas multas son considerables y han excedido el millón de dólares.<sup>5</sup>

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

El presente trabajo intenta establecer un modelo de mantenimiento que apunte a reducir los tiempos de indisponibilidad de las Unidades Rectificadoras de Protección Catódica (URPC's), y establecer métodos que permitan actuar preventivamente ante las potenciales fallas que puedan presentarse en estos equipos, a la vez optimizar recursos y reducir costos por pérdida de elementos y repuestos en fallas comunes; logrando de esta manera mayor productividad y competitividad en el mercado.

Hoy en día el control de la corrosión (Protección Catódica) en estructuras metálicas es un tema a tratar muy importante para los propietarios de las compañías del sector oil and gas, de ahí el valor del proceso del mantenimiento para la conservación de la infraestructura por parte de la gerencia, tener personal capacitado en protección

---

<sup>5</sup> NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS (NACE). Curso de corrosión básica. Manual del Estudiante. Houston: La Asociación, 2014. pp. 3-6.

catódica, recubrimientos, y corrosión en general en las áreas de integridad y/o mantenimiento.

Es necesario elaborar este plan de mantenimiento como estrategia para despertar habilidades gerenciales, apropiar e involucrar a todo el personal de integridad y/o mantenimiento, documentar las operaciones, fallas y demoras de los equipos de una forma más eficiente para tomar decisiones de manera proactiva y así poder controlar directamente el MTTR, mejorando la disponibilidad de los sistemas y por consiguiente protegiendo los activos de las compañías.

### **1.3 OBJETIVOS**

**1.3.1 Objetivo General.** Proponer un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad para las Unidades Rectificadoras de Protección Catódica (URPC) de tuberías de transporte de gas.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Recopilar información de operación de cada una de las URPC's y elaboración de históricos de operación para establecer la criticidad de los activos y factores de criticidad de cada sistema, siguiendo los lineamientos de las normas de OREDA, SAE JA 1011-1012.
- Realizar un estudio detallado del funcionamiento de las URPC's y subsistemas basado en condición y demás metodologías empleadas en mantenimiento (FMEA, FMECA, RCA, etc.) para garantizar los niveles de

confiabilidad y disponibilidad de equipos y sistemas requeridos por el negocio.

- Diseñar una propuesta gerencial de plan maestro de mantenimiento basado en RCM, bajo parámetros de excelencia operacional, optimización de costos (stock de repuestos), calidad y seguridad en los procesos. Propuesta Gerencial que asegure la confiabilidad operacional de los activos de las URPC's.

## 2. LA CORROSIÓN

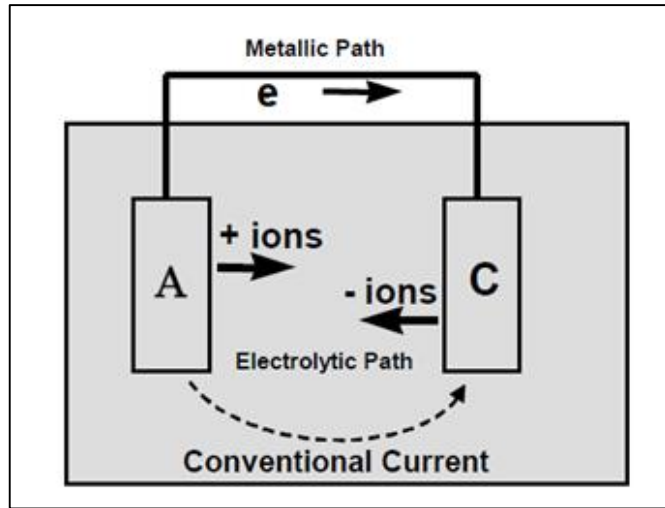
### 2.1 DEFINICIÓN DE CORROSIÓN

NACE International define la corrosión como el deterioro de un material, generalmente un metal, resultante de la reacción con su medio. Es un proceso electroquímico en el cual tiene lugar un flujo de electrones e iones. La pérdida de metal (corrosión) tiene lugar en el ánodo.

En el cátodo no hay pérdida de metal (el cátodo está protegido). La corrosión electroquímica implica la transferencia de electrones a través de interfaces metal/electrolito. La corrosión tiene lugar dentro de una celda de corrosión, la cual consta de cuatro partes (ver figura 1), saber:

- Ánodo
- Cátodo
- Electrolito
- Conexión o camino metálico

Figura 1. Pila de corrosión básica – Circuito electroquímico



Fuente: OTERO HUERTA, Enrique. Corrosión y degradación de materiales. Madrid: Editorial Síntesis, 2001. pp. 210-216.

## 2.2 CORROSIÓN DE TUBERÍAS ENTERRADAS

Uno de los medios donde se puede producir la corrosión es en el suelo, el cual es un electrolito que puede contener agua y sales al mismo tiempo, con resistencia específica que varía según el contenido de los mismos, aumentando o disminuyendo el grado de agresividad del terreno. Hoy en día, existe una gran cantidad de estructuras metálicas, que por requerimientos de instalación deben estar enterradas y están en contacto con este tipo de electrolito, entre ellas las tuberías de transporte de agua, gas, crudo, cables eléctricos, entre otros.<sup>6</sup>

<sup>6</sup> OTERO HUERTA, Enrique. Corrosión y degradación de materiales. Madrid: Editorial Síntesis, 2001. pp. 210-216.

## **2.3 DEFINICIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA (PC)**

Método de reducir o eliminar la velocidad de corrosión de un metal, haciendo que, la superficie de este, funcione completamente como cátodo cuando se encuentra sumergido o enterrado en un electrolito. Esto se consigue desplazando el potencial del metal en la dirección negativa mediante el uso de una fuente de potencia externa (denominada corriente impresa CP) o utilizando un ánodo de sacrificio. En el caso de un sistema de corriente impresa, se imprime una corriente sobre la estructura por medio de una fuente de alimentación, denominada rectificador (URPC), y un ánodo enterrado en el suelo.<sup>7</sup>

## **2.4 TIPOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA**

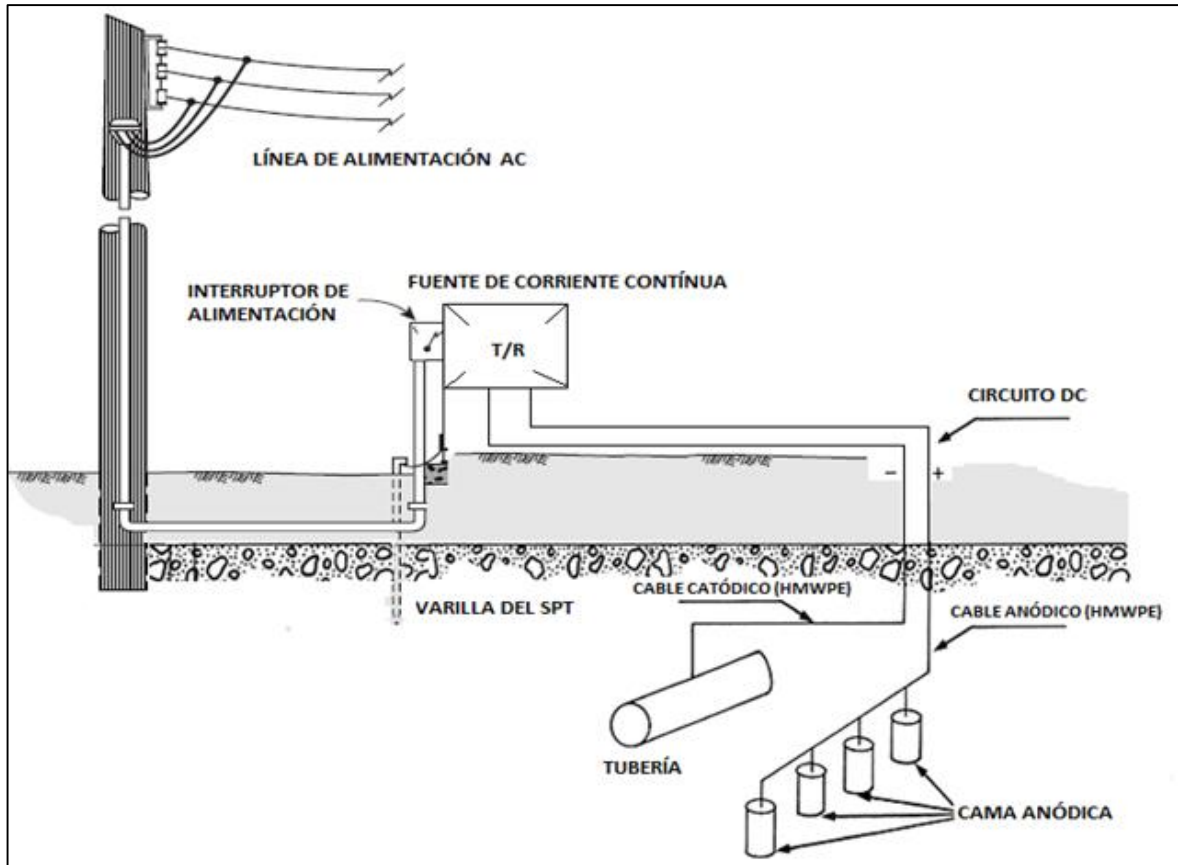
Existen dos tipos de protección catódica: sistemas de protección catódica por ánodos galvánicos, conocidos como ánodos de sacrificio y sistemas de protección catódica por corriente impresa, conocidos como Unidades Rectificadoras de Protección Catódica (URPC). Dado que esta Monografía se basa en sistemas por corriente impresa, se describirá a continuación solo este tipo de sistema de protección catódica.

**2.4.1 Sistema de protección catódica por corriente impresa.** Los componentes de un sistema de protección catódica por corriente impresa son ánodos, relleno anódico, una fuente de energía (Rectificador), cableado y conexiones, ver figura 2.

---

<sup>7</sup> PEABODY, A. W. Peabody's control of pipeline corrosion. Second Edition. Houston: National Association of Corrosion Engineers (NACE), 2001. p. 6. ISBN 1-57590-092-0.

Figura 2. Sistema de protección catódica por corriente impresa



Los ánodos usados en sistemas de PC de corriente impresa son diferentes de los que se usan en sistemas galvánicos. Los ánodos de corriente impresa se fabrican con materiales que se consumen lentamente. Los sistemas de PC por corriente impresa generalmente funcionan a niveles más altos de corriente y voltaje que los sistemas de ánodos galvánicos.

Se dedicará más adelante un capítulo aparte a la Unidad Rectificadora de Protección Catódica debido a su importancia en este documento, ya que esta monografía aplica específicamente a esta unidad funcional.

Los sistemas por corriente impresa se usan comúnmente:

- Para requerimientos de corriente grandes, especialmente en estructuras desnudas o mal recubiertas
- En electrolitos de cualquier resistividad
- Como una forma económica de proteger estructuras en las que los ánodos galvánicos se han consumido
- Para corregir problemas de corrientes vagabundas o interferencia catódica
- Para el interior de tanques de almacenamiento de agua y enterrados
- Para el exterior de fondos (tanto primarios como secundarios) de tanques de almacenamiento a nivel
- Para componentes sumergidos en estructuras marítimas (off-shore).<sup>8</sup>

## **2.5 CRITERIOS PARA LA PROTECCIÓN CATÓDICA**

En la Norma NACE RP0169 se da una lista de criterios de protección catódica, los cuales cuando se cumplen por separado o colectivamente indicarán que se ha alcanzado la protección catódica adecuada de una tubería en su electrolito. A continuación, se presentan los criterios más usados hoy en día referidos a los valores de potenciales tubo a suelo alcanzados al recibir la corriente protectora:

- Un potencial negativo (catódico) de al menos 850 milivoltios con la corriente de protección catódica aplicada. Este potencial se mide contra un electrodo de referencia de cobre-sulfato de cobre saturado en contacto con el electrolito. Las caídas de voltaje distintas de las que ocurren a través de la

---

<sup>8</sup> PEABODY, A. W. Peabody's control of pipeline corrosion. Second Edition. Houston: National Association of Corrosion Engineers (NACE), 2001. pp. 98 - 99. ISBN 1-57590-092-0.

interface estructura-electrodo, deben considerarse para hacer una interpretación válida de esta medición.

- Un potencial polarizado negativo de al menos 850 milivoltios con respecto a un electrodo de referencia de cobre-sulfato de cobre saturado (potencial denominado como Instant Off).
- Un mínimo de 100 milivoltios de polarización catódica entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia estable en contacto con el electrolito. A fin de satisfacer este criterio, puede medirse la formación o la pérdida de la polarización.

### 3. UNIDAD RECTIFICADORA DE PROTECCIÓN CATÓDICA (URPC)

La fuente de energía más común para ser usada en la protección catódica por corriente impresa es un transformador/rectificador, normalmente referido simplemente como un Rectificador o URPC, ver figura 3. Un rectificador convierte la tensión de corriente alterna AC al voltaje requerido y luego lo convierte a corriente continua.

Los rectificadores están disponibles tanto con refrigeración por libre convección de aire, o bien por inmersión en baño de aceite. Los rectificadores son normalmente alimentados por un sistema de energía de corriente alterna.

Figura 3. Imagen típica de un rectificador.



La entrada al rectificador consiste en un voltaje de alterna disponible de la red eléctrica o bien de un motogenerador. Un transformador con ajustes en el lado del

bobinado secundario provee un método para reducir y ajustar el nivel de tensión de salida, aislando al mismo tiempo el circuito de corriente continua del sistema de entrada. Un circuito rectificador convierte el voltaje de alterna para producir un voltaje de continua en la salida del rectificador.

### **3.1 DESCRIPCIÓN DE ETAPAS Y COMPONENTES DEL SISTEMA**

Las etapas del sistema son:

- Encendido y apagado
- Reducción de tensión AC
- Regulación de tensión AC y DC
- Rectificación AC a DC
- Filtrado
- Instrumentos de Medición
- Protecciones contra transitorios o sobrecargas

Los componentes principales de un rectificador son los siguientes:

- Gabinete
- Interruptores automáticos (Breaker's)
- Transformador reductor
- Tap's o planchuelas
- Diodos o puentes rectificadores compactos
- Condensadores y/o bobinas (Filtros)
- Medidores de tensión, corriente y horómetros
- Lightning Arrestor, fusibles y DPS.

Otros componentes secundarios del Rectificador:

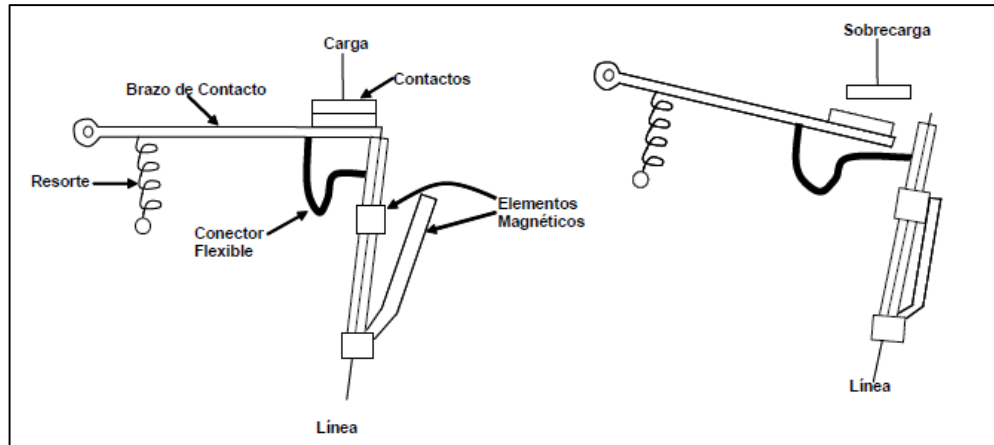
- Baquelita
- Cables
- Borneras
- Terminales y accesorios
- Disipador de calor
- Señales luminosas

**3.1.1 Etapa de encendido y apagado.** Su principal y único componente es un interruptor termomagnético o *breaker*. Las funciones de un interruptor del circuito es la de desconectar la tensión de alterna AC cuando se trabaja en el panel frontal o energizar/des-energizar el equipo, proveer protección a los componentes del rectificador de sobrecargas o transitorios de corriente. Una función adicional del Interruptor es permitir el ciclado de la unidad para obtener mediciones del tipo ON-OFF.

Los interruptores son instalados normalmente en el circuito de alimentación de AC, con la palanca expuesta en el panel frontal del rectificador. Existen tres tipos de interruptores: térmicos, magnéticos y termomagnéticos.

El interruptor termomagnético es similar a un interruptor térmico, con la excepción de que tiene una placa magnética adosada al elemento bimetálico, de forma de aumentar la velocidad en interrumpir el circuito. Una sobrecarga de corriente genera un campo magnético alrededor de la placa, la que a su vez es atraída hacia otra placa, interrumpiendo el circuito antes de que sea el propio elemento bimetálico que actúa por sobrecalentamiento. La figura 4 muestra uno de los interruptores más utilizados en la construcción de Rectificadores.

Figura 4. Mecanismo de un interruptor termomagnético.

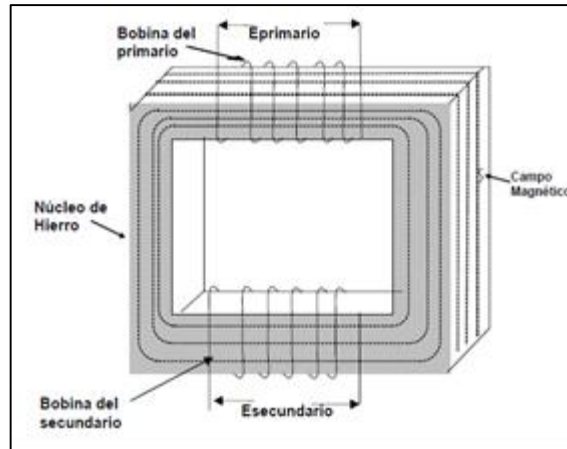


Fuente: NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS (NACE). CP2 - Cathodic Protection Technician Manual Course. Houston: La Asociación, 2010. p.2.

**3.1.2 Etapa de reducción y regulación de tensión de AC.** La función de un transformador es “elevar” o bien “bajar” la tensión de AC suministrada. También podría ser utilizado como un elemento de aislación o de separación con el mismo voltaje. Dependiendo del diseño del transformador, este puede suministrar un voltaje de AC ajustable dentro de un cierto rango.

El transformador consiste en un núcleo de hierro con dos conjuntos de arrollamientos alrededor de él. Una de las bobinas o arrollamientos es conectada a la tensión de alterna de alimentación y se denomina bobinado primario o simplemente primario, y el campo magnético alterno creado induce un voltaje en la segunda bobina o arrollamiento, denominado bobinado secundario o simplemente secundario, ver figura 5.

Figura 5. Esquema de un transformador de tensión.



Fuente: NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS (NACE). CP2 - Cathodic Protection Technician Manual Course. Houston: La Asociación, 2010. p.5.

La relación entre el voltaje del primario y el voltaje en el secundario, está en relación del número de vueltas del bobinado primario al número de vueltas del secundario, como se expresa a continuación.

$$\frac{E \text{ Primario}}{E \text{ Secundario}} = \frac{\text{No. Vueltas Primario}}{\text{No. Vueltas Secundario}}$$

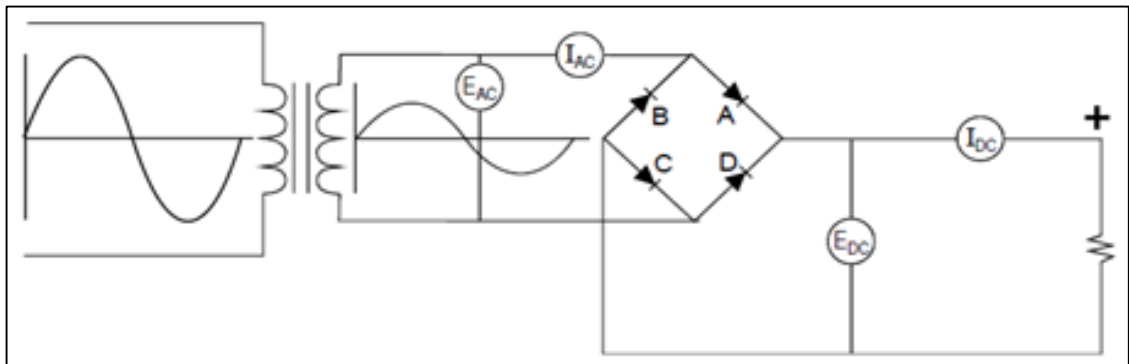
El bobinado del secundario puede ser conectado a intervalos, lo que hace cambiar el número de vueltas y cambia así, en forma proporcional la tensión de AC en el secundario. Moviendo estas conexiones (denominadas taps), el número de vueltas se modifica, variando la tensión. Este tipo de conexión es la más común en los rectificadores de voltaje constante.

Por lo general los rectificadores se ajustan cambiando los elementos de regulación sobre el secundario (tap's). Estos ajustes cambian el voltaje AC suministrado al puente rectificador. Los elementos de ajuste se encuentran en el panel frontal de la

unidad y consisten en planchuelas de vinculación para ajuste fino y grueso. Antes de modificar la posición de estas planchuelas debe apagarse el rectificador con el interruptor. Los cambios deben hacerse de a uno por vez.

**3.1.3 Etapa de rectificación AC a DC.** Los rectificadores pueden tener alimentación monofásica o trifásica. Aunque los rectificadores con alimentación monofásica pueden contar con un puente de rectificación de media onda (1 único diodo), con conexión al centro (2 diodos) y rectificación de onda completa (4 diodos), el puente de rectificación de onda completa es el más utilizado y se presenta en la figura 6 (A, B, C, D).

Figura 6. Rectificador monofásico con puente de rectificación de onda completa.



Fuente: NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS (NACE). CP2 - Cathodic Protection Technician Manual Course. Houston: La Asociación, 2010. p.6.

Los rectificadores actuales utilizan placas de selenio o diodos de silicio para proveer la acción de rectificación. Los diodos son elementos que permiten el paso de la corriente en una dirección, pero bloquean a la corriente en la dirección opuesta. Una unión tipo PN consigue esto, con una interfase semiconductor en donde de un lado

de la unión hay un agregado de elementos portadores de cargas positivas y del otro lado de la unión un agregado de elementos portadores de cargas negativas.

Si se aplica un potencial de valor positivo al semiconductor “dopado” con cargas positivas, la conducción puede tener lugar en esa dirección (de positivo a negativo) pero si el potencial positivo es aplicado al semiconductor N (dopado con portadores negativos) la corriente es bloqueada. De esta forma el diodo puede conducir en un medio ciclo de la onda de AC y no conduce en el siguiente hemiciclo. Conectando apropiadamente cuatro diodos para el caso de un rectificador monofásico, un ciclo completo de corriente AC puede pasar a través del puente, pero la parte positiva del ciclo en la dirección del terminal positivo de salida, y la porción negativa del ciclo en la dirección del terminal negativo de salida.

El resultado entonces es una rectificación completa del ciclo de AC. Sin embargo, esta no es una verdadera corriente continua (DC) en el sentido que la señal de salida (tensión de salida en realidad) no es constante sino más bien una señal siempre en una dirección, pero variable.

**3.1.4 Etapa de Filtrado.** Se usan filtros de eficiencia para disminuir el rizado “Ripple” AC de la salida DC, lo que disminuye el costo de funcionamiento del rectificador. Los filtros se usan por lo general en rectificadores monofásicos de onda completa y rectificadores con conexión central. Consisten en inductancias (chokes), condensadores, o una combinación de ambos.

Los condensadores que se utilizan como filtros en tienen que ser de elevada capacidad, con el fin de eliminar la ondulación de la señal continua; por eso generalmente son electrolíticos. Debido a las cargas y descargas del condensador se produce una tensión de rizado  $V_0$ . Se puede establecer una relación entre la

tensión de rizado y la capacidad del condensador a través de la expresión mostrada a continuación.

$$V_0 = \frac{I}{f * C}$$

Donde:

$V_0$ = Tensión de rizado en voltios.

$I$ = Intensidad de la corriente continua en amperios.

$f$ = Frecuencia del rizado en hercios.

$C$ = Capacidad del condensador en faradios.

**3.1.5 Etapa de medición.** La importancia de los instrumentos electrónicos de medición es incalculable, ya que mediante el uso de ellos se miden y se monitorizan magnitudes eléctricas, como corriente, tensión y potencial On/Off, o medir las horas uso de un equipo en funcionamiento. Además, que permiten determinar las causas de una operación defectuosa en los aparatos eléctricos, en los cuales, como es bien sabido, no es posible apreciar su funcionamiento en una forma visual, como en el caso de un aparato mecánico.

La información que suministran los instrumentos de medición eléctrica se da normalmente en una unidad eléctrica estándar: ohmios, voltios, amperios y horas. Los instrumentos de medición utilizados en un rectificador son: Horómetro, Voltímetro y Amperímetro.

La medición de corriente en un circuito de protección catódica es un procedimiento necesario para poder evaluar la eficiencia del sistema.

**3.1.6 Etapa de protección contra sobrecargas.** Se usa para proteger al rectificador de los rayos producidos por fenómenos naturales y descargas eléctricas, también por cortocircuitos generados por mala manipulación del equipo, deterioro de los componentes o contacto con elementos externos.

Entre los más usados tenemos: Lightning Arrestor en AC y DC, fusibles de acción rápida o ultrarrápida y un dispositivo de protección contra sobretensiones “DPS”.

## **3.2 MODO DE OPERACIÓN**

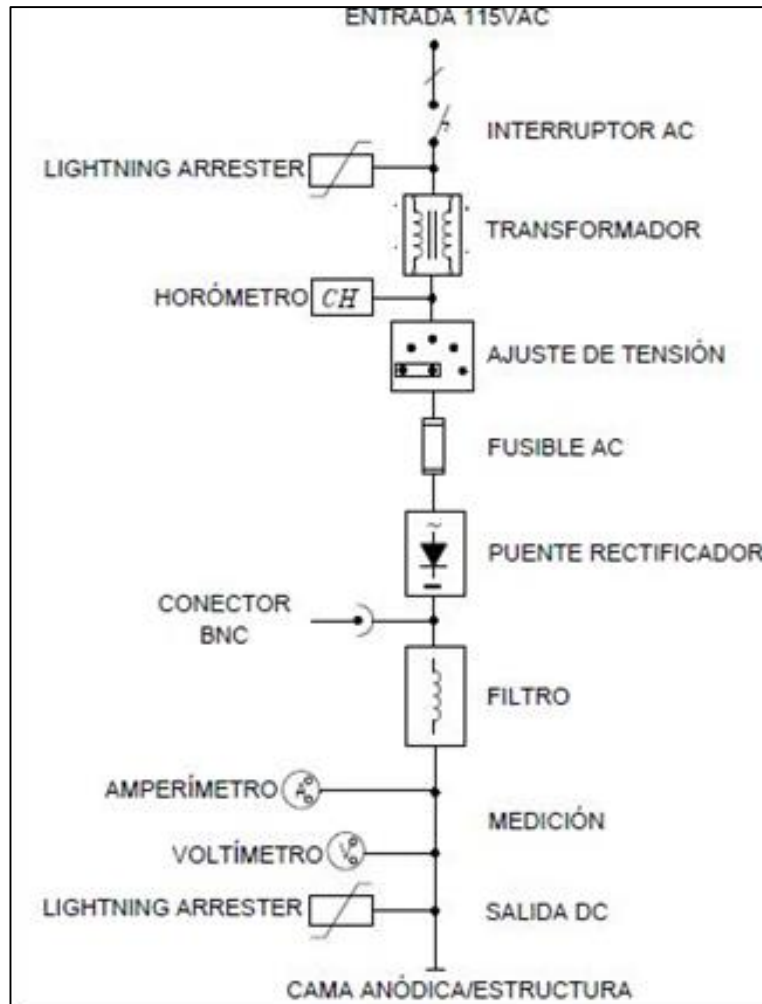
Los modos más comunes de operación de los rectificadores son:

- Tensión Constante
- Corriente Constante
- Potencial Constante

**3.2.1 Tensión constante.** En estos rectificadores, la tensión de salida se ajusta cambiando las conexiones en el secundario del transformador (taps). La salida del rectificador depende de la resistencia del circuito externo (ánodo-suelo-estructura). Esta forma de control es útil cuando no hay cambios importantes en la resistencia externa.

La figura 7 presenta un esquema unifilar de un rectificador con control de tensión de salida, es el tipo de Rectificador del cual hará parte la realización de esta monografía.

Figura 7. Esquema unifilar de un rectificador con tensión constante monofásico.



### 3.3 PRUEBA DE RECTIFICADORES

Hay que monitorear regularmente el drenaje de corriente y voltaje de la fuente para asegurarse de que está funcionando. Los datos básicos de funcionamiento de un rectificador incluyen:

- Entrada de voltaje AC
- Salida de voltaje DC y salida de corriente DC

- Etapas de regulación (gruesa/fina) y/o posición de valor de potencial (si se trata de un rectificador de potencial constante o posición de valor de la corriente (si se trata de uno de corriente constante)
- Resistencia ánodo-estructura.<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS (NACE). CP2 - Cathodic Protection Technician Manual Course. Houston: La Asociación, 2010. pp. 1 - 21.

## 4. GENERALIDADES DEL MANTENIMIENTO

### 4.1 HISTORIA DEL MANTENIMIENTO

En los últimos cincuenta años, el mantenimiento ha sufrido una serie de transformación en su filosofía, a principios de la década de los 50's, se conocía sólo la práctica de mantenimiento correctivo donde el estándar consistía en reparar los equipos una vez que fallaban.

A finales de los 50's los fabricantes introducen recomendaciones de mantenimiento para alargar la vida útil de los equipos, introduciendo con ello el concepto de mantenimiento preventivo.

En los años 60's, los esfuerzos se orientan a obtener la máxima eficiencia de las máquinas y el mantenimiento se focaliza en extender la vida útil de los equipos y el óptimo de utilización de la capacidad nominal.

En las décadas de los 70's y 80's, nace en Japón, orientado a las nuevas filosofías de calidad total (círculos de calidad, gerencia de la calidad total) el Mantenimiento Productivo Total que se basa en cinco principios fundamentales:

- Incrementar la confiabilidad de los equipos buscando cero fallas (equipos libres de mantenimiento).
- Mantenimiento autónomo, basado en que el operador debe efectuar parte del mantenimiento.
- Prevención del mantenimiento, que implica equipos de trabajo entre las gerencias de ingeniería, proyectos y mantenimiento para prevenir fallas desde el diseño.
- Gente: Adiestramiento centrado en formar mantenedores multi-oficio. Programas de motivación personal.

- Trabajo basado en pequeños grupos, integrados por operadores y mantenedores en la búsqueda de la causa raíz de las fallas de los equipos.

En los años 90's se conjugan los elementos principales de las filosofías o tendencias como TPM (Mantenimiento Productivo Total), RBM (Mantenimiento basado en Confiabilidad), RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad) para constituir una filosofía llamada Mantenimiento Clase Mundo, que sirve como referencia para determinar el nivel de excelencia de las empresas.<sup>10</sup>

Figura 8. Como es el mundo hoy.



Fuente: ORTÍZ PLATA, Daniel. Memorias de clase de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga, 2016.

<sup>10</sup> ROMERO, Claudia; ARIAS, Álvaro y SARMIENTO, Leonardo. Estrategia de mantenimiento basada en RCM para un gasoducto de transporte tramo Otero - Santana. [En línea]. Monografía Especialista en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento, 2012. 130 p. [Consultado el: 10 de mayo de 2017]. Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2012/146754.pdf>

## **4.2 LA FINALIDAD DEL MANTENIMIENTO**

La finalidad del mantenimiento es conseguir el máximo nivel de efectividad en el funcionamiento del sistema productivo y de servicios con la menor contaminación del medio ambiente y mayor seguridad para el personal al menor costo posible.

Lo que implica: conservar el sistema de producción y servicios funcionando con el mejor nivel de fiabilidad posible, reducir la frecuencia y gravedad de las fallas, aplicar las normas de higiene y seguridad del trabajo, minimizar la degradación del medio ambiente, controlar, y por último reducir los costos a su mínima expresión.<sup>11</sup>

## **4.3 OBJETIVOS DEL MANTENIMIENTO**

Los objetivos de mantenimiento deben alinearse con los de la empresa y estos deben ser específicos y estar presentes en las acciones que realice el área.

Estos objetivos serán los que mencionamos a continuación:

Máxima producción:

- Asegurar la óptima disponibilidad y mantener la fiabilidad de los sistemas, instalaciones, máquinas y equipos.
- Reparar las averías en el menor tiempo posible.

Mínimo costo:

- Reducir a su mínima expresión las fallas.
- Aumentar la vida útil de las máquinas e instalaciones.

---

<sup>11</sup> TORRES, Leandro Daniel. Mantenimiento su implementación y gestión. Segunda edición. Córdoba: Universitas Editores, 2005. p. 19.

- Manejo óptimo de stock.
- Manejarse dentro de costos anuales regulares.

#### Calidad requerida:

- Cuando se realizan las reparaciones en los equipos e instalaciones, aparte de solucionar el problema, se debe mantener la calidad requerida.
- Mantener el funcionamiento regular de la producción sin distorsiones.
- Eliminar las averías que afecten la calidad del producto.

#### Conservación de la energía:

- Conservar en buen estado las instalaciones auxiliares.
- Eliminar paros y puestas de marcha continuos.
- Controlar el rendimiento de los equipos

#### Conservación del medio ambiente:

- Mantener las protecciones en aquellos equipos que pueden producir fugas contaminantes.
- Evitar averías en equipos e instalaciones correctoras de poluciones.

#### Higiene y seguridad:

- Mantener las protecciones de seguridad en los equipos para evitar accidentes.
- Adiestrar al personal sobre normas para evitar los accidentes.
- Asegurar que los equipos funcionen en forma adecuada.

#### Implicación del personal:

- Obtener la participación del personal para poder implementar el RCM.

- Implicar a los trabajadores en las técnicas de calidad.<sup>12</sup>

#### 4.4 TIPOS DE MANTENIMIENTO

**4.4.1 Mantenimiento Correctivo.** Consiste en ir reparando las averías a medida que se van produciendo. El personal encargado de avisar de las averías es el propio usuario de las máquinas y equipos, y el encargado de realizar las reparaciones es el personal de mantenimiento.

Figura 9. Daño por corrosión, de una tubería de transporte de combustible.



Fuente: SERNA, José Aníbal. Memorias de clase de Integridad y Confiabilidad Operacional de Equipos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga, 2016.

---

<sup>12</sup> TORRES, Leandro Daniel. Mantenimiento su implementación y gestión. Segunda edición. Córdoba: Universitas Editores, 2005. pp. 123 - 124.

El principal inconveniente con que nos encontramos en este tipo de mantenimiento, es que el usuario detecta la avería en el momento que necesita el equipo, ya sea al ponerlo en marcha o bien durante su utilización.

Sus características son:

- Está basada en la intervención rápida, después de ocurrida la avería.
- Conlleva discontinuidad en los flujos de producción y logísticos.
- Tiene una gran incidencia en los costos de mantenimiento por producción no efectuada.
- Tiene un bajo nivel de organización.
- Se denomina también mantenimiento accidental”.

**4.4.2 Mantenimiento Preventivo.** Es la ejecución planificada de un sistema de inspecciones periódicas, cíclicas y programadas y de un servicio de trabajos de mantenimiento previsto como necesario, para aplicar a todas las instalaciones, máquinas o equipos, con el fin de disminuir los casos de emergencias y permitir un mayor tiempo de operación en forma continua.

Es decir, el mantenimiento preventivo, se efectúa con la intención de reducir al mínimo la probabilidad de falla, o evitar la degradación de las instalaciones, sistemas, máquinas y equipos.<sup>13</sup>

---

<sup>13</sup> TORRES, Leandro Daniel. Mantenimiento su implementación y gestión. Segunda edición. Córdoba: Universitas Editores, 2005. p. 130.

Figura 10. Inspección de parámetros operacionales de una URPC.



**4.4.2.1 Mantenimiento Sistemático.** Es el efectuado de acuerdo con un plan establecido según el tiempo o el número de unidades fabricadas.

Este requiere de amplios conocimientos de la fiabilidad de las instalaciones, máquinas o equipos con los que se está trabajando, es decir, se asegura que existe el conocimiento previo del comportamiento de los materiales. Una herramienta muy valiosa, es el estudio estadístico, el que permite determinar los tiempos óptimos de intervención.<sup>14</sup>

**4.4.2.2 Mantenimiento Predictivo o Condicional (CBM).** Este mantenimiento consiste en el análisis de parámetros de funcionamiento cuya evolución permite detectar un fallo antes de que este tenga consecuencias más graves.

---

<sup>14</sup> TORRES, Leandro Daniel. Mantenimiento su implementación y gestión. Segunda edición. Córdoba: Universitas Editores, 2005. p. 132.

En general, el mantenimiento predictivo, consiste en estudiar la evolución temporal de ciertos parámetros y asociarlos a la evolución de fallos, para así determinar en qué periodo de tiempo, ese fallo va a tomar una relevancia importante, y así poder planificar todas las intervenciones con tiempo suficiente, para que ese fallo nunca tenga consecuencias graves.

Ahora bien, los objetivos más importantes de este mantenimiento son: reducción de los tiempos muertos, de los inventarios, de tiempos extras, de compras de piezas emergentes; lo cual se refleja en un mayor rendimiento de los presupuestos hechos principalmente a los departamentos encargados de mantenimiento.<sup>15</sup>

Las unidades de monitoreo remoto (UMR) son sistemas altamente integrados que combinan un hardware probado y confiable y un sitio web poderoso que provee una solución de monitoreo de integridad completo. Al proporcionar flexibilidad para su implementación, los usuarios pueden vigilar uno o varios rectificadores en los terminales o depósitos de almacenamiento, en gasoductos, oleoductos y pozos, sistemas de protección catódica por corriente impresa, protección de muelles y plataformas de puentes.

En este documento se hará un análisis de fallas para una UMR, equipo que permite monitorizar los parámetros operacionales de los rectificadores de corriente impresa y está involucrado con el plan de mantenimiento que se planteará para reducir tiempos, número de tareas manuales y rutinarias de los técnicos de integridad o mantenimiento. Además, para brindar una mayor seguridad y confiabilidad de la operación del sistema.

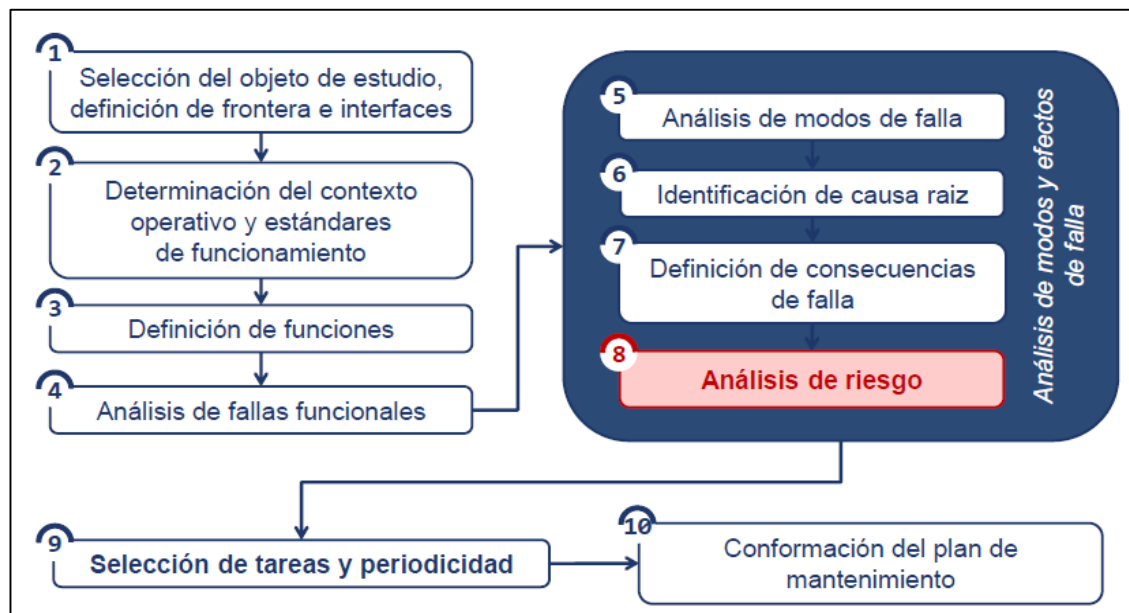
---

<sup>15</sup> TORRES, Leandro Daniel. Mantenimiento su implementación y gestión. Segunda edición. Córdoba: Universitas Editores, 2005. p. 136.

## 5. MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM)

El autor John Moubray define el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad como un proceso utilizado para determinar que se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual.<sup>16</sup>

Figura 11. Diagrama de flujo del RCM



Fuente: ORTÍZ PLATA, Daniel. Memorias de clase de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga, 2016.

<sup>16</sup> MOUBRAY, John. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Edición en Español. Leicester: Aladon Ltd, 2004. p. 7. ISBN 09539603-2-3.

El corazón del RCM es una técnica llamada Análisis de Modos y Efectos de Fallas (en inglés FMEA). El RCM es un proceso entonces que se basa en determinar los procesos funcionales o la funcionalidad de los activos, entendiendo como funcionalidad un concepto amplio que involucra no solo lo productivo sino también conceptos de seguridad y medio ambiente, para luego pasar a un riguroso análisis de fallas potenciales y así determinar el mantenimiento a aplicar, pasando desde el mantenimiento preventivo, correctivo hasta el rediseño de los elementos y los equipos.<sup>17</sup>

## **5.1 HISTORIA DEL RCM**

El RCM fue desarrollado a fines de los sesenta por la industria aeronáutica, la cual vio la necesidad de identificar la mejor técnica de mantenimiento adecuada al sector de la aviación. Esta forma de mantenimiento posibilitaría una eficaz operación del Boeing 747(\*), evitando estar mucho tiempo en tierra para mantenimiento preventivo. Los resultados fueron sorprendentes y en muy poco tiempo era herramienta estándar de las fuerzas militares norteamericanas y de la industria nuclear. Los otros sectores industriales fueron tentados a su práctica en los ochenta (petróleo, energía y minería). El proceso ha permitido definir cuales tareas de mantenimiento son adecuadas para cualquier activo físico.

Debido a la proliferación de variaciones de la metodología, la Society of Automotive Engineers, Inc. (Sociedad de Ingenieros Automotrices) generó una norma que

---

<sup>17</sup> MANTILLA, Enry y ORTÍZ, Henner. Diseño del plan de mantenimiento basado en RCM para equipos de tratamiento de crudo en campo moriche de la empresa Mansarovar Energy Colombia Ltd (mecl). [En línea]. Monografía Especialista en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento, 2015. p. 11. [Consultado el: 11 de mayo de 2017]. Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2015/158947.pdf>

define los criterios para llamar a un proceso de mejoramiento del plan de mantenimiento como RCM. Esa norma es la JA1011 y la complementa la JA1012 para la guía de implementación. La norma SAE JA1011 (RCM), especifica los requerimientos que debe cumplir un proceso para poder ser denominado como RCM.

Según esta norma, las 7 preguntas básicas del proceso RCM<sup>18</sup> son:

1. Funciones: ¿Cuáles son las funciones y patrones de desempeño del equipo en su contexto operacional actual?
2. Fallas funcionales: ¿De qué forma falla el equipo al cumplir sus funciones?
3. Modo de Falla: ¿Qué ocasiona cada falla funcional?
4. Efectos de Falla: ¿Qué efectos genera cada falla?
5. Consecuencias de Falla: ¿En qué formas afecta cada falla funcional?
6. Tareas pro-activas y frecuencia: ¿Qué debe hacerse para predecir o prevenir cada falla funcional?
7. Tareas por omisión: ¿Qué debería hacerse si no se pueden hallar tareas proactivas aplicables?

## **5.2 OBJETIVOS PARA EL PROGRAMA DE MANTENIMIENTO**

- Mantener las funciones con la seguridad requerida.
- Mantener la seguridad inherente y los niveles de confiabilidad.
- Optimizar la disponibilidad.

---

<sup>18</sup> MANTILLA, Enry y ORTÍZ, Henner. Diseño del plan de mantenimiento basado en RCM para equipos de tratamiento de crudo en campo moriche de la empresa Mansarovar Energy Colombia Ltd (mecl). [En línea]. Monografía Especialista en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento, 2015. pp. 74 - 75. [Consultado el: 11 de mayo de 2017]. Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2015/158947.pdf>

- Obtener la información necesaria para mejorar el diseño de los elementos con una confiabilidad inadecuada.
- Alcanzar las metas de mínimo costo de ciclo de vida.
- Obtener la información necesaria para establecer un programa de mantenimiento dinámico, que pueda ser revisado y mejorado sistemáticamente.

### 5.3 BENEFICIOS DE IMPLEMENTAR

La implementación del RCM debe llevar a equipos más seguros y confiables, reducción de costos (directos e indirectos), mejora en la calidad del servicio, y en el cumplimiento de las normas de seguridad y medio ambiente. El RCM también está asociado a beneficios humanos, como mejora continua en la relación entre distintas áreas de la empresa, fundamentalmente un mayor entendimiento entre mantenimiento y operaciones. Los puntos más sobresalientes de implementar una metodología de RCM son:

- Costos: Reducción de los niveles de mantenimiento programado (alrededor de 10% al 50% de disminución).
- Calidad: Aumento en la disponibilidad de los activos generando mayor continuidad y confiabilidad en la operación o servicio.
- Tipo de servicio: Disminución de paradas no programadas.
- Tiempo: Reducción de tiempos de reparación (MTTR) e incremento de tiempos entre fallas (MTBF).
- Riesgo: Disminución en los impactos relacionados con medio ambiente, infraestructura y población.<sup>19</sup>

---

<sup>19</sup> ORTÍZ PLATA, Daniel. Memorias de clase de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga, 2016.

## 5.4 PASOS DE UN PROYECTO DE RCM

- Preparación del estudio.
- Taxonomía de la planta.
- Recolección y análisis de datos.
- Selección de objetos para el estudio.
- Definición de fronteras e interfaces.
- Definición de funciones.
- Análisis de fallas funcionales.
- Análisis de modos de falla.
- Análisis de efectos y criticidad (Riesgo).
- Selección de tareas de mantenimiento.
- Determinación de la frecuencia.
- Definir plan preliminar.
- RCM vivo.
- Aplicación general (El proyecto).<sup>20</sup>

## 5.5 ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA

El modo de falla puede ser establecido como el evento que CAUSA una falla funcional, o el efecto por el cual una falla es observada sobre el elemento que falla; algunos autores definen el modo de falla como uno de los estados posibles de un ítem que falla, para una función específica requerida.

---

<sup>20</sup> ORTÍZ PLATA, Daniel. Memorias de clase de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga, 2016.

Moubray presenta el concepto como aquellos hechos que, de manera razonablemente posible, pueden haber causado cada estado de falla. De todas las definiciones se destacan los siguientes conceptos: primero, que es un evento o hecho “razonablemente” creíble por la cual la falla funcional se presentó o se puede presentar; segundo, que es la razón por la cual se da la falla funcional; y, tercero, que está referenciado sobre un elemento que falla.

Así, con estas definiciones, las reglas para redactar el modo de falla son las siguientes:

1. La descripción del modo de falla debe tener como mínimo un sustantivo y un verbo más una descripción del mecanismo de falla, ejemplo:
  - Motor quemado por sobre voltaje
  - Tubería obstruida con sedimentos
  - Recipiente roto por sobrepresión.
2. Evite usar los verbos: Falla, Daño, Mal funcionamiento. Use uno que indique la causa precisa.
3. La descripción del modo de falla debe tener un nivel de detalle que facilite la selección de tareas de mantenimiento adecuadas. Este depende de la importancia operacional.
4. Si la descripción contiene el nombre del elemento o parte donde se presenta el evento redundará posteriormente a favor de la estructuración de la tarea.

## **5.6 ANÁLISIS DE EFECTOS Y DE RIESGOS (CRITICIDAD)**

Toda falla tiene algún efecto, grande o pequeño, pero lo tiene. No hay nada gratis o nada que no genere una consecuencia. El análisis de efectos debe iniciar con una descripción “lo más completa posible” de lo que le sucede al equipo que falla y/o a los equipos (cuando hay fallas ocultas) que están interactuando con el que presenta

la falla. Con esta descripción podremos analizar la importancia de cada falla y determinar cuáles son los modos de falla críticos que merecen la pena una tarea de mantenimiento o, incluso, un rediseño inmediato.

Lo que debe incluir la descripción de los efectos de cada falla, como mínimo, es:

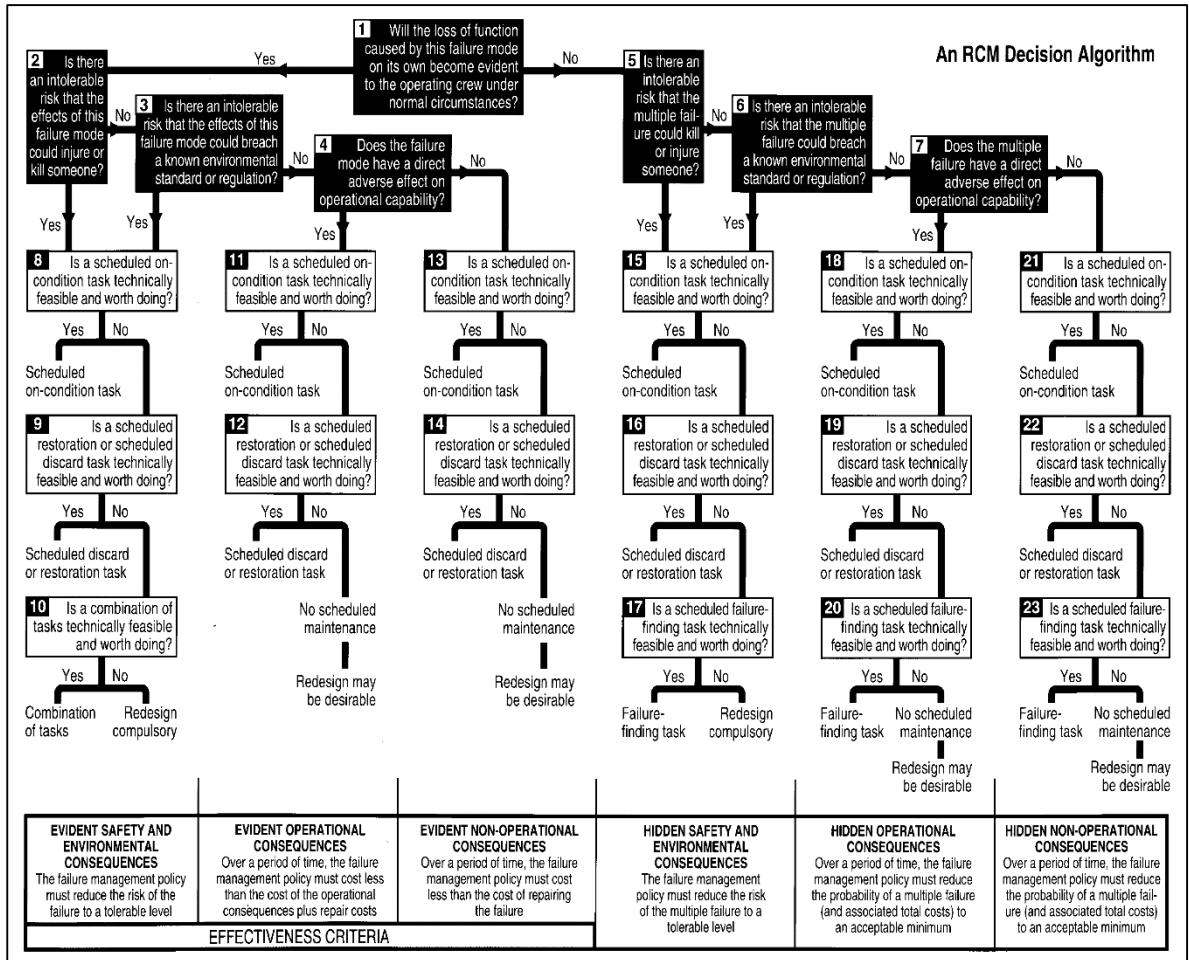
- La evidencia de que el modo de falla se ha presentado. Si es una falla oculta, deberá especificarse como tal.
- Las consecuencias previsibles, creíbles y probables que, sobre las personas, el ambiente y la empresa tendrá la falla. Incluir, cuando es una falla oculta, la descripción del impacto sobre todo lo que le rodea incluyendo la imagen de la empresa.
- Los daños en los equipos y la infraestructura con sus costos de reparación o restablecimiento, con los impactos directos en la producción / operación.
- Las acciones que se deben realizar para restablecer la funcionalidad.

## **5.7 DETERMINACIÓN DE TAREAS DE MANTENIMIENTO**

Definir la tarea de mantenimiento con la cual se bajará el riesgo (impacto al ambiente, a la seguridad, a la economía y/o a la imagen de la empresa) a niveles aceptables es el penúltimo gran paso del proceso.

Para la toma de decisión de la tarea que se ha de adoptar o desarrollar se requiere disponer/construir un diagrama o árbol de decisiones, ver figura 12. En caso de aceptación de uno ya construida, por ejemplo, el de una norma en particular o el de una de las metodologías con derechos de autor registrados, es preciso que la empresa tenga los debidos derechos de utilización.

Figura 12. Un algoritmo de decisión RCM.



Fuente: SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard SAE JA1012. Washington: La Sociedad, 2002. p. 48.

De todos modos, tal como lo dice la metodología, independiente de la opción que se tome, el orden secuencial de prioridad para elegir una tarea es la siguiente:

- Actividades de monitoreo de condición (predictivas en línea o condición puntual)
- Actividades de reacondicionamiento o cambio (preventivas)

- Actividades de detección de fallas ocultas (Detectivo, en caso de que se esté trabajando sobre este tipo de fallas)
- Actividades combinadas de las anteriormente citadas
- Actividades de rediseño (en caso de que el riesgo no se pueda bajar a niveles tolerables con alguna de las opciones anteriores)
- Ninguna actividad de mantenimiento (correr a falla, cuando los riesgos son tan bajos que hasta por costos no da para ejecutar una labor de mantenimiento).<sup>21</sup>

---

<sup>21</sup> ORTÍZ PLATA, Daniel. Memorias de clase de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga, 2016.

## 6. RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

**Nota:** Tener en cuenta que la información y datos técnicos presentados en esta monografía han sido extraídos de hechos reales en diferentes empresas. Todos los nombres, circunstancias y detalles han sido alterados. Cualquier parecido a informes, reportes empresariales o situaciones reales son solo coincidencias.

### 6.1 CONTEXTO OPERACIONAL

Los Rectificadores Pamplona, Berlín, Bucaramanga, Girón, Lebrija, Barrancabermeja hacen parte del Gasoducto Santanderes, una troncal que transporta gas combustible desde los municipios de Pamplona a Barrancabermeja ubicados en los departamentos de Norte de Santander y Santander respectivamente; a través de una tubería que tiene un diámetro de 16", y entrega gas a 8 remitentes a una presión de línea de 1200 PSIG (+/-10). (PSIG=Libra/pulgada cuadrada manométrica).

El transporte de gas natural se lleva a cabo a través de un sistema de gasoductos, el cual está compuesto por los siguientes sistemas:

- Gasoducto Pamplona-Bucaramanga – Sistema 1
- Gasoducto Bucaramanga-Barrancabermeja – Sistema 2

#### 6.1.1 Condiciones Ambientales.

- Temperatura ambiente promedio Sist.1 (Pamplona, Berlín, Bucaramanga):  
20 +/-10°C

- Temperatura ambiente promedio Sist.2 (Girón, Lebrija, Barrancabermeja): 31+/- 6°C
- Humedad promedio Sist.1: 71 +/- 5%
- Humedad promedio Sist.2: 55 +/- 7%
- Los rectificadores se encuentran protegidos con un gabinete galvanizado instalado en una caseta.

### 6.1.2 Descripción específica de los sistemas.

- Circuito eléctrico AC:
  - Media tensión (MT) AC: 13200V (15kVA)
  - Baja Tensión (BT) AC: 240/120V
- Rectificadores:
  - Sist.1: Pamplona, Berlín, Bucaramanga
  - Sist.2: Girón, Lebrija, Barrancabermeja

Tabla 1. Características técnicas e interfaces de entrada/salida del sistema de estudio

SISTEMA DE ESTUDIO	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SISTEMA	INTERFASES (Entradas/Salidas)
Unidad Rectificadora de Protección Catódica "URPC" <b>RECTIFICADOR</b>	Frecuencia 60Hz	Corriente eléctrica AC (0-10A)
	Corriente eléctrica máxima de entrada 10A AC y de salida 30ADC	Corriente eléctrica DC (0-30A)
	Tensión de entrada 120/240VAC y tensión de salida máxima 50VDC	Energía Térmica (30-40°C)
	No. de tap's 5-5(Gruesos A-E / Finos 1-5)	Acción manual de Tap's (Gruesos A-E / Finos 1-5) e Interruptor
	Temperatura máxima de operación 50°C	Medida de corriente eléctrica DC (Exactitud +/-0,3%)
	No. De fases: 1	Medida de Tensión DC (Exactitud +/-0,3%)
	Tipo de medidores digitales	Medida de horas de trabajo (Error de +/- 0,01%)
	Sistema de enfriamiento (aire)	Humedad del medio ambiente y animales
	Sistema monofásico bifilar	Corrientes parasitas AC

### 6.1.3 Circuito externo DC.

- Longitud troncal: 137 Km
- Diámetro: 16"
- Espesor de la tubería: 0,344"
- Revestimiento: Epoxy de adhesión por fusión (Fusion Bonded Epoxy - FBE).
- Tubería: API 5LX 60
- Temperatura operación tubería: 13 +/- 10 °C
- Tipo de Cable: HMWPE No.2
- No. y clase de Ánodos de corriente impresa: 10 ánodos de MMO

### 6.1.4 Unidad de Monitoreo Remoto

- Alimentación VAC: 120V
- Tipo de Comunicación: Satelital
- Variables eléctricas de Monitoreo: Tensión y Corriente eléctrica en AC/DC, Potencial On/Off.

**Nota:** Cada rectificador está diseñado para suministrar suficiente densidad de corriente en forma continua para que todas las partes de la estructura a una longitud de 20 Km se polaricen hasta alcanzar un criterio aceptable de protección catódica.

## 6.2 MODELO DE MANTENIMIENTO HALLADO

El plan de mantenimiento que se encontró en el momento de la recolección de información de las Unidades Rectificadoras de Protección Catódica del gasoducto Santanderes, era realizar actividades preventivas mensuales programadas la última

semana de cada mes con una duración promedio de 4 horas, el día dependía de la disponibilidad de los técnicos de integridad o mantenimiento para ejecutar la labor.

Las actividades preventivas mensuales realizadas más relevantes, se mencionan a continuación:

- Limpieza general interna del gabinete de la URPC y de la caseta o la instalación del rectificador si se encuentra a la intemperie.
- Inspección visual del estado físico de cada uno de sus componentes verificando ausencia de humo, olor a quemado o color negro alrededor de ellos.
- Registro de la lectura del consumo de energía eléctrica presente en el contador de energía.
- Registro de horas uso del rectificador.
- Medición y registro de los siguientes parámetros operacionales del rectificador: IAC y VAC de entrada (suministro de energía eléctrica), VAC en los tap's de regulación, IDC y VDC en la salida (Circuito externo DC), y potencial On/Instant Off.
- Con las mediciones de las variables anteriormente nombradas se calcula la cargabilidad y la eficiencia del rectificador.
- Con el criterio de aceptación establecido en la empresa de un potencial Instant Off medido de  $-1100\text{mVCSE}$  en la estación de prueba más cercana al Rectificador, es la base para realizar cualquier ajuste de los tap's y por lo tanto variar la tensión y corriente de salida (Calibración del Rectificador). Este potencial On/Off depende de diversas variables externas como lo son: resistividad del terreno, cloruros, Ph, condiciones del recubrimiento, interferencias, etc.

Si el equipo se encuentra en falla cuando se va a realizar la actividad de mantenimiento preventivo, se pasa inmediatamente a una actividad correctiva, que consiste en el diagnóstico y localización de la falla; si se tiene en stock el

componente averiado se cambia, si no, se realiza la solicitud del mismo y se programa el mantenimiento correctivo, este tiempo de programación depende de si es un componente que afecta la funcionalidad o no del equipo.

Las hojas de registro de lecturas, mediciones y mantenimiento realizado se encuentran en las tablas del siguiente capítulo.

### **6.3 HISTORICOS DE OPERACIÓN**

En las tablas 2 a 7 se encuentra recopilada la información e histórico de operación de cada una de las URPC's en el año 2014.

En estos anexos se encontrarán todos los datos de mediciones de cada variable eléctrica de los Rectificadores de acuerdo a una periodicidad mensual que había sido establecida para la elaboración de sus mantenimientos preventivos, sus componentes averiados, algunas causas de fallas, el estado y eficiencia de trabajo de cada equipo.

Como se puede observar en las siguientes tablas de históricos de operación la programación preventiva mensual no se cumple a cabalidad, lo que afecta para desarrollar un estudio más exhaustivo de las causas de los modos de falla, y realizar un análisis preciso de horas uso y cálculo de consumo de energía.

Esta información recolectada es la base de trabajo para establecer la criticidad de los activos y factores de criticidad de cada sistema, elaboración del RCM para un Rectificador el cual aplica para cada uno de ellos porque independientemente de su contexto operacional al ser equipos de naturaleza eléctrica-electrónica su funcionamiento no se ve afectado por diversos factores como lo son la temperatura, humedad y altitud. La diferencia que se encuentra en cada uno de ellos está en los

parámetros o variables eléctricas que se programan y/o se miden porque dependen de su sistema externo y el fin para el cual fue diseñado e instalado el Rectificador (Suministrar suficiente densidad de corriente en forma continua para que todas las partes de la estructura se polaricen hasta alcanzar un criterio aceptable de protección catódica y controlar los problemas de corrosión en las tuberías).

Tabla 2. Histórico de parámetros operacionales URPC Pamplona - año 2014.

ITEM	FECHA	Contador de Energía kWh	Suministro de Energía AC		HOROMETRO Horas	Tap's (Regulación AC)		Circuito DC (+/-)			CARGABILIDAD		Potencial P/S		EFICIENCIA $\eta$	TIPO MANTENIMIENTO		OBSERVACIONES
			VAC (V)	IAC (A)		VAC (V)	IAC (A)	VDC (V)	IDC (A)	% VDC	% IDC	ON (mV <sub>CASE</sub> )	OFF (mV <sub>CASE</sub> )	Preventivo VO		Correctivo VO		
1	14/01/2014	499	124,0	0,6	60720	B-4	14,89	3,8	11,5	3,3	38%	28%	-1520	-1174	51%	X		Se cambia el Arreslar en DC. Rectificador Operativo.
2	19/02/2014	603	122,0	0,5	61560	B-4	14,73	2,9	11,6	2,7	39%	23%	-1440	-1118	51%	X		Se realiza el cambio de la resistencia Shunt que estaba dañada y el medidor de corriente no funcionaba adecuadamente. Rectificador Operativo.
3	27/03/2014	701	121,5	0,5	62415	B-4	14,65	2,4	11,6	2,1	39%	18%	-1332	-1038	40%	X		Rectificador Operativo
4	30/04/2014	796	121,5	0,5	63223	B-5	16,31	2,8	13,0	2,5	43%	21%	-1278	-989	54%	X		Se sube un tap fino para mejorar polarización de la tubería. Rectificador Operativo.
5	18/07/2014	1064	120,8	0,6	64960	B-5	16,2	3,8	12,5	3,3	42%	28%	-1564	-1217	57%	X		Se evidenció falla por corte eléctrico por lo que no hubo continuidad operativa de URPC. Rectificador Operativo.
6	12/08/2014	1143	121,6	0,6	65559	B-5	16,27	3,3	12,7	2,9	42%	24%	-1372	-1049	50%	X		Rectificador Operativo.
7	15/10/2014	1340	121,7	1	67055	B-5	16,10	6,38	12,0	6,5	40%	54%	-1744	-1322	64%	X		Rectificador Operativo
8	07/11/2014	1340	0,0	0	67715	B-5	0	0	0,0	0,0	0%	0%	-1017		-		X	Se encuentra el transformador del Rectificador, fusible en AC y un diodo quemados, posiblemente debido a una descarga eléctrica porque el circuito eléctrico de media tensión está fuera de servicio también.
9	03/12/2014	1340	0,0	0	67715	B-5	0	0	0,0	0,0	0%	0%	-1034		-		X	Cambio del transformador, diodo y fusible en AC dañados. Persisten los daños en el circuito de media tensión. Transformador de 45KVA dañado.

Tabla 3. Histórico de parámetros operacionales URPC Bucaramanga - año 2014.

ITEM	FECHA	Contador de Energía		Suministro de Energía AC		HOROMETRO		Tap's (Regulación AC)			Circuito DC (+/-)			CARGABILIDAD		Potencial p/s		EFICIENCIA $\eta$	TIPO MANTENIMIENTO		OBSERVACIONES
		kw/h	kWh	VAC (V)	IAC (A)	Horas	Grueso-Fino	VAC (V)	IAC (A)	VDC (V)	IDC (A)	ON (mVcSE)	OFF (mVcSE)	% VDC	% IDC	Preventivo	Correctivo				
1	27/01/2014	4838	120	0,5	7305	B-1	14	3,7	9,73	3,8	32%	38%	-1835	-1084	X		62%	Preventivo	X	Rectificador Operativo	
2	16/02/2014	4865	120	0,5	7790	B-1	13,9	3,6	10,3	4	34%	40%	-1797	-1236	X		69%	Preventivo	X	Rectificador Operativo	
3	16/03/2014	4908	117	0,4	8478	B-1	13,5	3,7	10,2	3,7	34%	37%	-1758	-924	X		81%	Preventivo	X	Rectificador Operativo	
4	20/04/2014	4959	118	0,5	9324	B-1	13,8	3,6	10,5	4	35%	40%	-1878	-1097	X		71%	Preventivo	X	Rectificador Operativo	
5	01/05/2014	4989	117	0,5	9806	B-1	13,7	3,6	9,9	3,7	33%	37%	-1865	-1104	X		62%	Preventivo	X	Se cambia el Horómetro porque se encuentra quemado. Rectificador Operativo	
6	01/06/2014	5040	118	0,5	728	B-1	13,9	3,7	10	3,7	33%	37%	-1874	-1110	X		63%	Preventivo	X	Rectificador Operativo	
7	01/07/2014	5057	118	0,5	1127	B-1	13,7	3,5	9,6	3,3	32%	33%	-1884	-1114	X		54%	Preventivo	X	Rectificador Operativo	
8	01/08/2014	5118	115	0,6	2178	B-1	13,3	3,6	9,7	3,6	32%	36%	-1854	-1121	X		51%	Preventivo	X	Rectificador Operativo	
9	01/09/2014	5141	115	0,4	2614	B-1	13,3	3,2	9,3	3,1	31%	31%	-1690	-1010	X		69%	Preventivo	X	Rectificador Operativo	

Tabla 4. Histórico de parámetros operacionales URPC Girón - año 2014.

ITEM	FECHA	Contador de Energía		Suministro de Energía AC		HOROMETRO	TAP's (Regulación AC)			Circuito DC (+/-)		CARGABILIDAD		Potencial P/S		EFICIENCIA $\eta$	TIPO MANTENIMIENTO		OBSERVACIONES
		kw/h	Contador de Energía	VAC (V)	IAC (A)		Grueso-Fino	VAC (V)	IAC (A)	VDC (V)	IDC (A)	% VDC	% IDC	ON (mV/SE)	OFF (mV/SE)		Preventivo	Correctivo	
1	25/01/2014	10709		120,2	0,5	9429	C-3	22,3	1,2	19,5	0,1	77%	1%	-860	-720	3%	X		Se reporta que la URPC no está drenando corriente de acuerdo al TAP seleccionado. Rectificador operativo.
2	21/02/2014	18712		115,6	0,5	10118	C-3	21,7	1,1	18,4	0,2	77%	1%	-910	-785	6%	X		Se reporta que la URPC no está drenando corriente de acuerdo al TAP seleccionado. Rectificador operativo.
3	23/03/2014	18748		121	0,3	10767	C-3	22,5	0,8	18,7	0,8	78%	5%	-897	-812	41%		X	Se detecta el cable del negativo que va conectado a la estructura abierto en un punto. Se repara el cable y el sistema de protección catódica queda operando con normalidad. Rectificador Operativo
4	10/04/2014	18750		120	0,6	11230	C-3	21,3	0,9	18,5	0,9	77%	6%	-1100	-850	23%	X		Se encuentra el medidor de voltaje dañado. Rectificador Operativo
5	01/05/2014	18772		120	0,3	11247	C-2	13,6	1	10,8	0,7	45%	4%	-1970	-940	21%		X	Se encuentra fuera de operación el rectificador, se cambian dos diodos que estaban abiertos. Además, se cambia el medidor de voltaje. Contador de energía dañado. Se pone en operación el Rectificador Operativo
6	01/06/2014	18772		104	0,4	11457	C-2	11,8	1	9,7	0,5	40%	3%	-1875	-1046	12%	X		Contador de energía dañado. Rectificador Operativo
7	01/07/2014	18772		117	0,2	12284	C-2	11,5	1,3	10	0,5	42%	3%	-1870	-1003	21%	X		Contador de energía dañado. Rectificador Operativo
8	01/08/2014	18772		116	0,2	12692	C-2	11,5	1,3	10	0,5	42%	3%	-1637	-1028	22%	X		Contador de energía dañado. Rectificador Operativo
9	01/09/2014	18772		121	0,7	13910	C-2	14,5	0,7	11,5	0,7	48%	4%	-1810	-988	10%	X		Contador de energía dañado. Rectificador Operativo

Tabla 5. Histórico de parámetros operacionales URPC Barrancabermeja - año 2014.

ITEM	FECHA	Contador de Energía		Suministro de Energía AC		HOROMETRO horas	TAP's (Regulación AC)			Circuito DC (+/-)		CARGABILIDAD		Potencial P/S		EFICIENCIA $\eta$	TIPO MANTENIMIENTO		OBSERVACIONES
		kWh	kw/h	VAC (V)	IAC (A)		VAC (V)	IAC (A)	Grueso-Fino	VDC (V)	IDC (A)	% VDC	% IDC	ON (mV.C.S.E)	OFF (mV.C.S.E)		Preventivo	Correctivo	
1	21/01/2014	1098	1098	119	0,50	11636	A-2	3,9	0,3	2,8	0,7	0,08	4%	-1847	-1136	3%	X		Rectificador Operativo
2	12/02/2014	1133	1133	118	0,50	12159	A-2	3,9	0,3	2,8	0,6	0,08	3%	-1787	-1202	3%	X		Rectificador Operativo
3	18/03/2014	1187	1187	121	0,40	12977	A-2	4,0	0,3	2,8	1,0	0,08	5%	-1870	-1181	6%	X		Rectificador Operativo
4	22/04/2014	1213	1213	137	0,20	13477	A-2	4,5	1,0	2,6	1,0	0,07	5%	-1810	-1236	9%		X	El rectificador se encontró apagado porque no había suministro de energía eléctrica. Las cañuelas de las cajas contactos de 13,5KV se habían disparado. Además, se cambió el fusible en AC de entrada que estaba dañado. Rectificador Operativo
5	07/07/2014	1224	1224	121	0,60	15727	A-2	4,1	0,3	2,6	1,0	0,07	5%	-1945	-1123	4%		X	Se encontró el rectificador dañado, se cambian dos diodos que estaban en cortocircuito. Rectificador Operativo
6	16/09/2014	1243	1243	120	0,20	16227	A-2	2,6	0,2	1,7	0,8	0,05	4%	-1096	-857	6%		X	Se encontró el rectificador trabajando con una tensión de entrada de 52Vac, debido a una fase caída del circuito de media tensión. La electrificadora soluciona el problema. Rectificador Operativo.
7	21/10/2014	1246	1246	122	0,20	16527	A-2	3,5	0,2	2,4	0,5	0,07	3%	-1512	-1097	5%		X	Se encontró el rectificador trabajando con una tensión de entrada de 52Vac, debido a una fase caída del circuito de media tensión. La electrificadora soluciona el problema. Rectificador Operativo.
8	28/12/2014	1293	1293	119	0,40	17281	A-2	3,9	0,2	2,7	1,1	0,08	6%	-1882	-1118	6%		X	Se cambian los fusibles en DC y el de AC que se encontraron quemados. Rectificador Operativo.

Tabla 6. Histórico de parámetros operacionales URPC Berlín - año 2014.

ITEM	FECHA	Contador de Energía		Suministro de Energía AC		HORÓMETRO		Tap.s (Regulación AC)			Circuito DC (+/-)			CARGABILIDAD		Potencial P/S		EFICIENCIA $\eta$	TIPO MANTENIMIENTO		OBSERVACIONES
		kw/h	VAC (V)	IAC (A)	Horas	Grueso-Fino	VAC (V)	IAC (A)	VDC (V)	IDC (A)	% VDC	% IDC	ON (mV.C.S.E)	OFF (mV.C.S.E)	Preventivo	Correctivo					
1	23/01/2014	10167	121,0	1,6	56792	A-4	10,63	8,9	7,73	7,7	15%	26%	-1893	-960	X		31%			Rectificador Operativo	
2	28/02/2014	10167	121,6	1,3	57654	A-4	13,3	8	7,8	7,2	16%	24%	-2226	-1184	X		36%			Rectificador Operativo. Amperímetro del rectificador dañado y voltímetro desajustado.	
3	28/03/2014	10258	120,6	1,53	58325	A-4	10,57	7,78	7,8	7,1	16%	24%	-2165	-1160	X		30%			Rectificador Operativo. Amperímetro del rectificador dañado y voltímetro desajustado.	
4	06/06/2014	-	118,8	1,5	59448	A-4	10,48	8,1	7,48	7,50	15%	25%	-2370	-774	X		31%			Rectificador se encontraba fuera de servicio porque el Bussbar estaba disparado. Amperímetro del rectificador dañado y voltímetro desajustado.	
5	03/07/2014	-	119,2	1,4	60099	A-4	10,55	7,9	7,54	7,40	15%	25%	-2352	-1050	X		33%			Rectificador Operativo. Amperímetro del rectificador dañado y voltímetro desajustado.	
6	10/09/2014	-	120,3	1,4	61572	A-4	10,56	7,4	7,77	6,40	16%	21%	-2056	-1086	X		30%			Rectificador Operativo. Amperímetro del rectificador dañado y voltímetro desajustado.	
7	07/10/2014	11225	121,3	1,6	62020	A-4	10,65	8,9	7,70	9,00	15%	30%	-2529	-496		X	36%			Se cambia fusible en DC y medidores de voltaje y corriente análogos. Se restablece estado operativo y se coloca en servicio.	
8	14/11/2014	-	0,0	0	62926	A-4	0	0	0,00	0,00	-	-	-1072			X	-			Sistema eléctrico caído no se puede registrar variables y verificar estado operativo del equipo.	
9	02/12/2014	11477	120,7	1,5	62952	A-4	10,53	9	7,3	8,6	15%	29%	-2528	-864		X	35%			Se corrigió problema eléctrico por falso contacto en acometida; variables eléctricas normales. Se pone en servicio el Rectificador.	

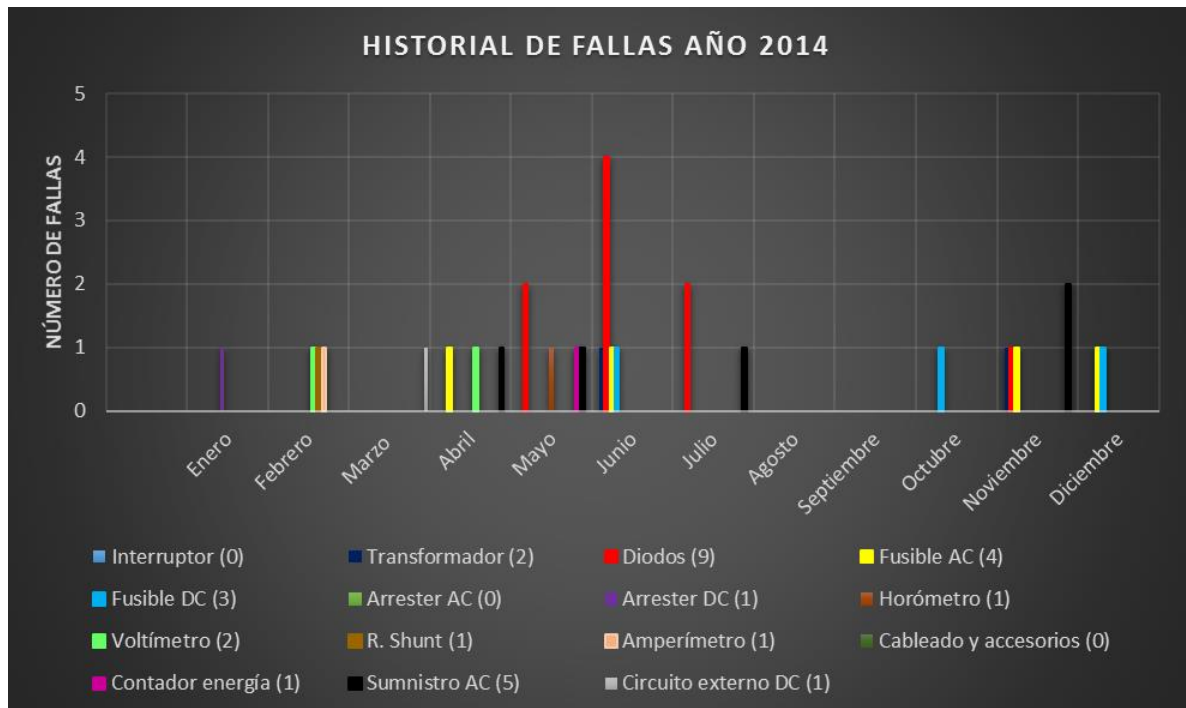
Tabla 7. Histórico de parámetros operacionales URPC Lebrija - año 2014.

ITEM	FECHA	Contador de Energía		Suministro de Energía AC		HOROMETRO		TAP's (Regulación AC)			Circuito DC (+/-)			CARGABILIDAD		Potencial P/S		EFICIENCIA $\eta$	TIPO MANTENIMIENTO		OBSERVACIONES
		kw/h	kw/h	VAC (V)	IAC (A)	horas	Grueso-Fino	VAC (V)	IAC (A)	VDC (V)	IDC (A)	% VDC	% IDC	ON (mV.C.S.E)	OFF (mV.C.S.E)	Preventivo	Correctivo				
1	25/01/2014	26412	26412	124	2,8	9396	A-3	9,8	20	6,03	21	10%	42%	-1720	-710	X		36%	X		Rectificador operativo.
2	21/02/2014	26551	26551	125,2	2,7	10043	A-3	9,9	20	5,9	20,4	10%	41%	-1739	-681	X		36%	X		Rectificador operativo.
3	13/03/2014	26650	26650	128,6	2,3	10508	A-3	10	20,3	6,1	20,3	10%	41%	-1728	-663	X		42%	X		Rectificador operativo.
4	25/04/2014	26866	26866	128	3	11512	A-3	10	23	6	20,2	10%	40%	-1756	-690	X		32%	X		Rectificador operativo.
5	01/05/2014	26940	26940	0	0	11860	A-3	0	0	0	0	0%	0%		-714			-		X	Se encontraron fallas en el suministro de energía eléctrica. Una cañuela de la caja cortacircuitos de 13.5kV, al intentar restaurar el servicio disparó la del recibo, posible pararrayos en corto.
6	01/06/2014	26940	26940	0	0	11860	A-3	0	0	0	0	0%	0%		-623			-		X	Se realizaron pruebas al transformador del rectificador, se encontró dañado, además el puente de diodos, fusibles en AC y DC. Rectificador fuera de servicio.
7	01/09/2014	26940	26940	0	0	11860	A-3	0	0	0	0	0%	0%		-623			-		X	Rectificador sin suministro eléctrico de AC. Se cambian los componentes internos del rectificador dañados. Pendiente realizar pruebas.

## 6.4 HISTORIAL DE FALLAS Y TIEMPOS DE MANTENIMIENTO

En la figura 13, se puede observar un histórico de componentes averiados de los Rectificadores que hacen parte del gasoducto Santanderes, donde podemos concluir que los componentes que fallan con más frecuencia son el diodo (9 fallas), los fusibles (4+3=7 fallas) y componentes del suministro de AC (5 fallas); componentes claves en la operación del Rectificador ya que con la avería de alguno de ellos el equipo pierde su funcionalidad principal que es suministrar un nivel de corriente adecuado a la tubería del circuito externo para protegerla contra la corrosión, a dichos componentes críticos se buscarán una serie de soluciones puntuales para mitigar esta frecuencia de averías.

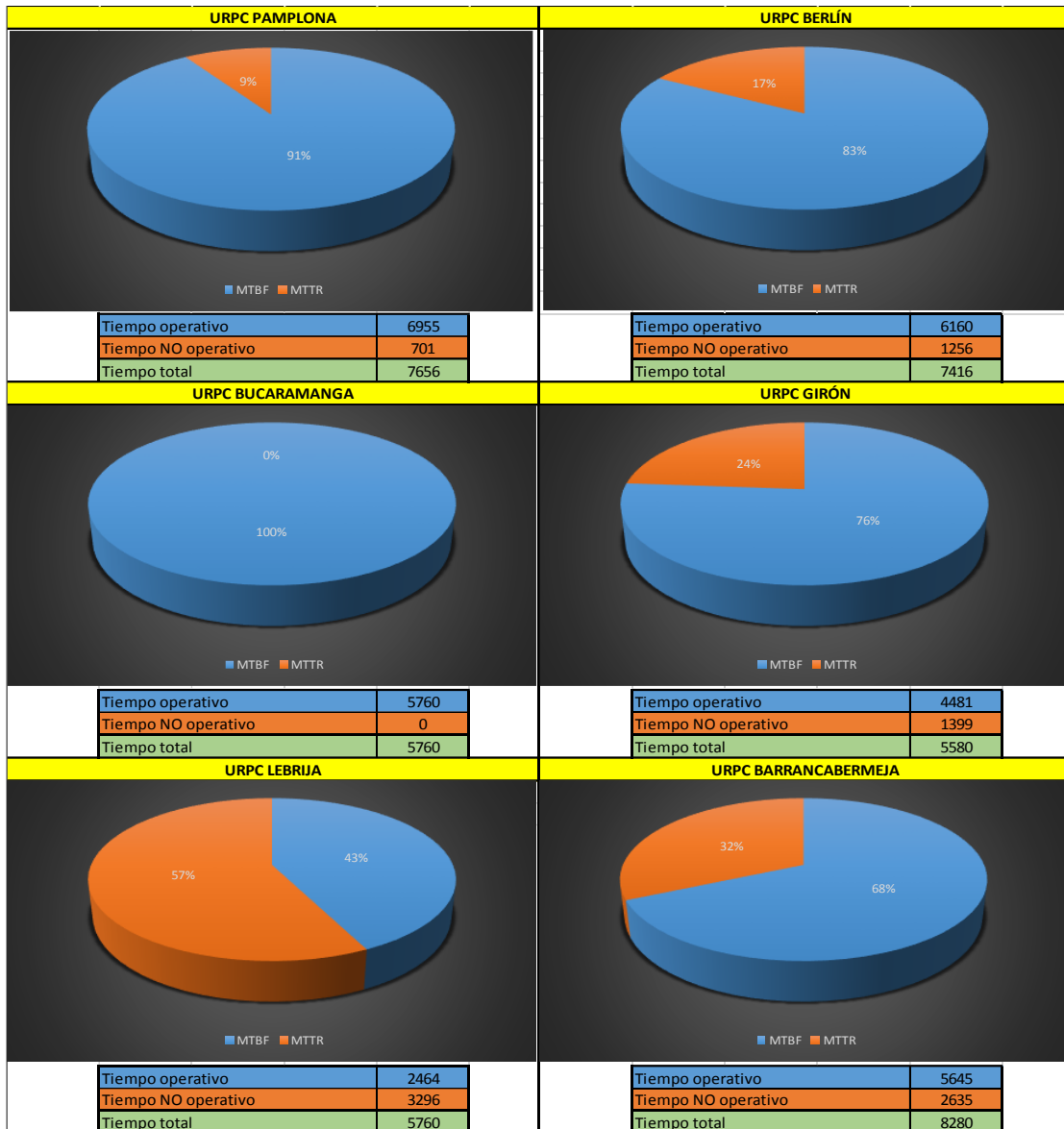
Figura 13. Historial de fallas de las URPC año 2014 del Gasoducto Santanderes.



Por consiguiente, es importante visualizar en la figura 14, los tiempos en horas del funcionamiento de cada Rectificador y los tiempos de NO operación o en Mantenimiento, ya sea por fallas del sistema principal o alguno de sus subsistemas. Los tiempos ideales de operación se pueden observar en la URPC Bucaramanga, la cual funcionó el 100% del tiempo sin ninguna falla.

Estos tiempos son calculados según los datos registrados en los históricos de operación, de las lecturas del horómetro de cada rectificador; si se hubiesen tomados dichas lecturas en todos los meses del año se podría haber dado con exactitud un porcentaje real de cuánto tiempo duró en operación cada equipo, datos necesarios para determinar la frecuencia de los mantenimientos y el monitoreo remoto. Estos son los procedimientos que se pretenden mejorar más adelante en el plan de mantenimiento de la monografía.

Figura 14. Relación Fiabilidad vs Mantenimiento de las URPC en el año 2014.



## 6.5 LISTADO Y CODIFICACIÓN DE CADA SISTEMA, EQUIPO Y COMPONENTES DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA

Se establece una codificación de acuerdo a la taxonomía y fronteras de las unidades funcionales pertenecientes al sistema de protección catódica.

Tabla 8. Codificación del sistema de protección catódica.

TIPO DE FRONTERAS DEL SISTEMA		TIPO DE SISTEMA/SUBSISTEMA		ITEM MANTENIBLE/SISTEMA	
DESCRIPCION	CODIGO	DESCRIPCION	CODIGO	DESCRIPCION	CODIGO
CORRIENTE ELÉCTRICA DE ENTRADA	E	CIRCUITO ELÉCTRICO AC	CAC	TRANSFORMADOR MT/BT	<u>Tmb</u>
				PARARRAYOS	<u>Pr</u>
				CORTACIRCUITOS	<u>Cc</u>
				AISLADORES	<u>Ai</u>
				CONTADOR DE ENERGIA	<u>Ce</u>
				ACOMETIDA ELECTRICA	<u>Ae</u>
				FUSIBLE TIPO HILO PARA CANUELA	<u>Fh</u>
SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	<u>Spt</u>				
CORRIENTE ELÉCTRICA DE SALIDA	S	UNIDAD DE MONITOREO REMOTO	UMR	UNIDAD CENTRAL DE PROCESAMIENTO "CPU" (Board principal)	<u>Cou</u>
				MÓDULOS ANALOGOS/DIGITALES	<u>Ma/d</u>
				BATERIAS	<u>Bat</u>
				RELEVO DE MERCURIO	<u>Rm</u>
				FUENTE DC	<u>Fdc</u>
		FUSIBLE	<u>Fy</u>		
		ANTENA GPS	<u>Agps</u>		
		CABLE HMWPE	<u>Ch</u>		
		CIRCUITO DC	CDC	ÁNODOS DE CORRIENTE IMPRESA	<u>Aci</u>
		TUBERIA		<u>Tu</u>	
UNIDAD CENTRAL	C	RECTIFICADOR	REC	INTERRUPTOR AUTOMÁTICO	<u>Ia</u>
				TRANSFORMADOR MONOFÁSICO	<u>Tm</u>
				DIODOS TIPO BRIDA	<u>Db</u>
				FILTRO	<u>C</u>
				LIGHTNING ARRESTER AC	<u>Aac</u>
				LIGHTNING ARRESTER DC	<u>Adc</u>
				RESISTENCIA SHUNT	<u>Rs</u>
				HORÓMETRO	<u>Hr</u>
				VOLTÍMETRO	<u>V</u>
				AMPERÍMETRO	<u>A</u>
				FUSIBLE	<u>F</u>
				BOBINA	<u>L</u>
				BREAKER MONOFÁSICO	<u>Im</u>
				CABLES Y ACCESORIOS	<u>Ca</u>
				PAMPLONA	<u>Pam</u>
				LEBRIJA	<u>Leb</u>
BUCARAMANGA	<u>Buc</u>				
GIRÓN	<u>Gir</u>				
BARRANCABERMEJA	<u>Bar</u>				
BERLÍN	<u>Ber</u>				

## **7. DESARROLLO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN LA METODOLOGÍA RCM EN UNIDADES RECTIFICADORAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA**

La aplicación de este plan de mantenimiento centrado en confiabilidad se realiza para un gasoducto de transporte de combustible, orientado a las URPC's críticas y subsistemas directamente relacionados (Sistema de energía eléctrica, camas anódicas, unidades de monitoreo remoto, etc.).

Se busca aumentar el grado de confiabilidad operacional, evitando el deterioro de los componentes, los modos de falla, extender el tiempo medio entre fallas (MTBF), y establecer frecuencias optimas de operación, con el fin de prevenir posibles fallas a largo o mediano plazo por corrosión, que afecten la integridad de los ductos asociados a la inoperatividad de cada sistema, optimización de costos generado por el mantenimiento planificado de los activos, control adecuado de materiales de repuesto, equipos en stand by y adecuadas condiciones de higiene y seguridad; sin dejar de lado la participación del personal que está inmerso en cada etapa; ya que solo de esta manera se podrá cumplir con los requerimientos y demandas operativas que la empresa requiere, lo que se traduciría en beneficios para cualquier organización.

### **7.1 CONDICIONES DE LA METODOLOGÍA RCM**

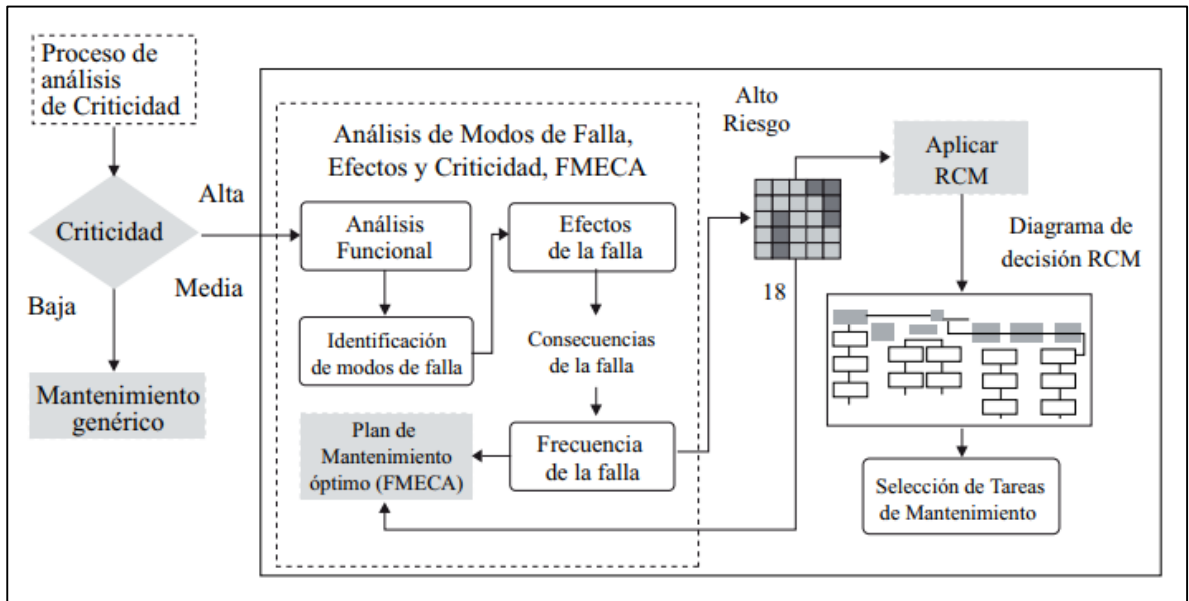
Para la adquisición de los repuestos que no están en stock se debe realizar la solicitud de la orden de compra. Esta metodología tiene como filosofía disponibilidad muy baja de repuestos en bodega, solo se mantendrán en stock para cada Rectificador un fusible de acción rápida para AC, uno para DC, un diodo de brida negativa y un diodo de brida positiva.

En la metodología no se analizan los modos de falla múltiples, tampoco se tienen en cuenta modos de falla por errores en el diseño, montaje y en procedimientos de operación.

Dentro de los gastos por mantenimiento solo se tiene en cuenta el precio de cada repuesto, no se tienen en cuenta: horas hombre, transporte, viáticos, costo herramental, costo de mantener los inventarios, fletes, importaciones, etc.

El escenario principal es realizar la menor cantidad de mantenimientos a un bajo costo sin afectar la fiabilidad y confiabilidad de los sistemas.

Figura 15. Proceso de Gestión del Mantenimiento aplicando el análisis de modos de falla y sus efectos y criticidad, AMFEC.



Fuente: AGUILAR, José; TORRES, Rocío y MAGAÑA, Diana. Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. *Tecnología, Ciencia, Educación*. [En línea]. 2010, vol. 25, nro. 1, pp. 15 – 26. [Consultado el: 10 de marzo de 2017]. ISSN 0186-6036. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48215094003>

Se realizará un estudio detallado del funcionamiento de la unidad principal (rectificador) de un sistema de protección catódica basado en la metodología FMECA y para los subsistemas (unidad de monitoreo remoto, circuito eléctrico AC y circuito eléctrico DC) un análisis de criticidad para garantizar los niveles de confiabilidad y disponibilidad de equipos y sistemas requeridos.

## 7.2 TAXONOMÍA Y FRONTERAS DE UNA UNIDAD RECTIFICADORA DE PROTECCIÓN CATÓDICA

La norma ISO 14224 la define como una clasificación sistemática de ítems dentro de un grupo genérico basado en factores posiblemente comunes a todos los ítems; por ello, debemos empezar desde lo macro de la planta y llegar hasta lo más bajo posible que podamos, identificando los elementos que entregan “al menos una función principal”.

La clasificación de la planta se ha realizado de acuerdo a la importancia de cada unidad funcional en el sistema, como se muestra en la tabla 9.

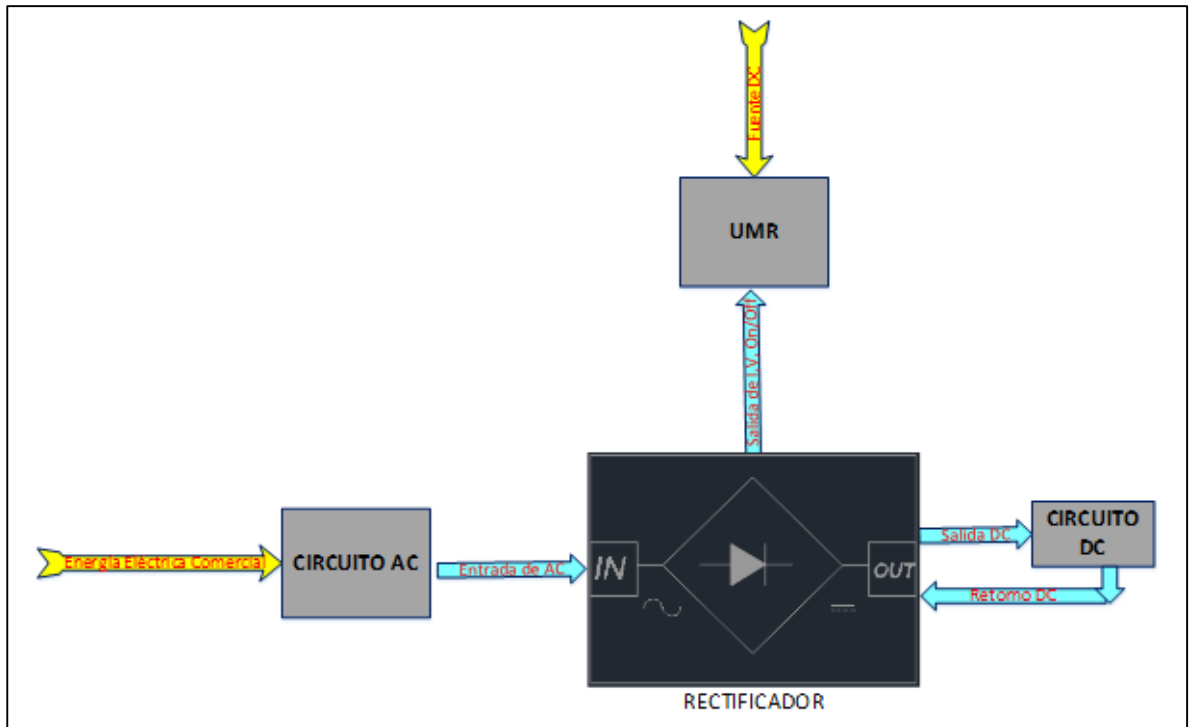
Tabla 9. Clasificación de la planta.

Unidad Principal	Subsistemas	Componentes mantenibles	Partes
Rectificador	<ul style="list-style-type: none"> <li>Circuito eléctrico en AC</li> <li>Circuito eléctrico en DC</li> <li>Unidad de Monitoreo Remoto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Interruptor Automático AC</li> <li>Transformador</li> <li>Diodos o puente rectificador compacto</li> <li>Condensador</li> <li>Bobina</li> <li>Lightning Arrester</li> <li>Fusible</li> <li>Breaker monofásico</li> <li>Voltímetro</li> <li>Shunt</li> <li>Amperímetro</li> <li>Horómetro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tap's</li> <li>Gabinete</li> <li>Cableado y accesorios</li> <li>Puesta a tierra</li> <li>Baquelita</li> <li>Disipador de calor</li> </ul>

Dado que el objeto de estudio de este plan es aplicar el RCM a una Unidad Rectificadora de Protección Catódica o rectificador se asumió este como la unidad principal del sistema, los sistemas de entrada y de salida al rectificador como son sistema de suministro de energía eléctrica comercial, el circuito eléctrico en DC y la Unidad de monitoreo remoto como tienen funciones secundarias se denominaron subsistemas y a estos se les realizará un análisis de criticidad; como se muestra en las figuras 16 y 17.



Figura 17. Diagrama de flujo simplificado de una Unidad Rectificadora de Protección Catódica.



### 7.3 IDENTIFICACIÓN DE ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA, EFECTOS Y CRITICIDAD “FMECA” ASOCIADOS AL RECTIFICADOR

Con la aplicación del FMECA se identificaron los modos de falla que representan un mayor riesgo para el sistema, considerando los riesgos a la producción, instalación, mantenimiento y al personal. Los modos de falla de mayor riesgo, son enviados a un proceso de selección de tareas de mantenimiento detallado, mientras que los modos de falla de medio y bajo riesgo, son tratados con un proceso genérico. Esto permite identificar las áreas donde el mantenimiento tendrá una mejor oportunidad para impactar la seguridad y confiabilidad de la instalación. Esto permite también, optimizar los recursos ya que la planeación del mantenimiento cambia al ser ahora

enfocada en los modos de falla derivados de un análisis funcional y no enfocada en los equipos, es decir, el plan es por modo de falla y no por equipo.<sup>22</sup>

**7.3.1 Proceso de análisis de modos y efectos de falla de un rectificador (FMEA).** El FMEA aplicado a las Unidades Rectificadoras de Protección Catódica (URPC) consiste en las siguientes etapas: análisis funcional, identificación de modos de falla, efectos de la falla, cada uno con su respectivo código; además, descripción de efectos de los modos de falla y las fallas ocultas que se encuentran en los equipos.

Tabla 10. Análisis de modos y efectos de falla del Rectificador.

Código Función	Función	Cód. FF	Descripción Falla Funcional (FF)	Código MF	Modo de Falla (MF)	Descripción Efectos	Falla Oculta
F1	Suministrar una corriente eléctrica de 0-30ADC y una tensión de 0-50VDC con una tensión de rizado menor al 5%	FF1	Cero salida de corriente y tensión	MF1	El interruptor automático quemado por sobrecarga	Visualmente se aprecia quemado y con olor, la tubería queda sin protección catódica, conexiones y dispositivo quemados, se debe cambiar el elemento (\$300.000)	NO
F1	Suministrar una corriente eléctrica de 0-30ADC y una tensión de 0-50VDC con una tensión de rizado menor al 5%	FF1	Cero salida de corriente y tensión	MF2	El interruptor automático disparado por sobrecarga o cortocircuito	Visualmente se observa que el interruptor está disparado, la estructura queda sin protección catódica, se debe activar el interruptor (Ningún costo)	NO
F1	Suministrar una corriente eléctrica de 0-30ADC y una tensión de 0-50VDC con una tensión de rizado menor al 5%	FF1	Cero salida de corriente y tensión	MF3	Contactos sulfatados del interruptor automático	Se observan los terminales o contactos con una capa de óxido, la estructura queda sin protección catódica, se deben limpiar los contactos. (Ningún costo)	NO
F1	Suministrar una corriente eléctrica de 0-30ADC y una tensión de 0-50VDC con una tensión de rizado menor al 5%	FF1	Cero salida de corriente y tensión	MF4	Cable abierto por sobrecarga de corriente	Se observa y se percibe olor a quemado, la tubería queda sin protección catódica, se convierte en un riesgo eléctrico SST, puede generar un conato de incendio que impacta el medio ambiente, cambiar cables (<\$10.000)	SI

<sup>22</sup> AGUILAR, José; TORRES, Rocío y MAGAÑA, Diana. Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. Tecnología, Ciencia, Educación. [En línea]. 2010, vol. 25, nro. 1, p. 15. [Consultado el: 10 de marzo de 2017]. ISSN 0186-6036. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48215094003>

F1	Suministrar una corriente eléctrica de 0-30ADC y una tensión de 0-50VDC con una tensión de rizado menor al 5%	FF1	Cero salida de corriente y tensión	MF5	Cables en cortocircuito	Se observa y se percibe olor a quemado, la tubería queda sin protección catódica, se convierte en un riesgo eléctrico SST, puede generar un conato de incendio que impacta el medio ambiente, cambiar cables y algún elemento de protección dañado (\$200.000)	NO
F1	Suministrar una corriente eléctrica de 0-30ADC y una tensión de 0-50VDC con una tensión de rizado menor al 5%	FF1	Cero salida de corriente y tensión	MF6	Transformador reductor de tensión quemado por sobrecarga de corriente	Se dispara el interruptor, se observa y se percibe olor a quemado, puede ocasionar un conato de incendio y/o explosión, y afectar otros elementos del equipo. Cambiar el transformador. (\$700.000)	NO
F1	Suministrar una corriente eléctrica de 0-30ADC y una tensión de 0-50VDC con una tensión de rizado menor al 5%	FF1	Cero salida de corriente sin cambios en el nivel de tensión de salida.	MF7	Bobina quemada por sobrecarga de corriente	Se observa y se percibe olor a quemado, se debe medir la continuidad o la inductancia de la bobina, la tubería queda sin protección catódica, se debe cambiar la bobina (\$300.000)	NO
F1	Suministrar una corriente eléctrica de 0-30ADC y una tensión de 0-50VDC con una tensión de rizado menor al 5%	FF2	Cero salida de corriente sin cambios en el nivel de tensión de salida.	MF8	Conexiones o contactos defectuosos	Puede ocasionar puntos calientes, la operatividad se vuelve intermitente, puede ocasionar el daño de elementos de medición y protecciones por picos de corriente, se convierte en un riesgo eléctrico SST. Se deben ajustar los terminales y conectores. (Ningún costo)	SI
F1	Suministrar una corriente eléctrica de 0-30ADC y una tensión de 0-50VDC con una tensión de rizado menor al 5%	FF2	Cero salida de corriente sin cambios en el nivel de tensión de salida.	MF9	Fusible en DC quemado (abierto)	El elemento, portafusible o panel se observan y se percibe con olor a quemado, la tubería queda sin protección catódica. Se debe cambiar fusible y/o portafusible (\$100.000)	NO
F1	Suministrar una corriente eléctrica de 0-30ADC y una tensión de 0-50VDC con una tensión de rizado menor al 5%	FF3	Disminución del nivel de corriente y tensión en DC >30% del valor normal (Igual posición de tap's y resistencia de carga)	MF10	Bobinados del transformador abiertos o en cortocircuito	Niveles de corriente y voltaje en DC inadecuados o en cero, se percibe un ruido anormal, y energía térmica mayor al 30% de su operación normal. riesgo eléctrico al personal de operación, Rebobinar el transformador (\$200.000)	SI
F1	Suministrar una corriente eléctrica de 0-30ADC y una tensión de 0-50VDC con una tensión de rizado menor al 5%	FF3	Disminución del nivel de corriente y tensión en DC >30% del valor normal (Igual posición de tap's y resistencia de carga)	MF11	Cables del positivo o negativo aterrizados	Se observan cables quemados y/o elementos soldados a la estructura, riesgo eléctrico al personal de operación, cambiar el cable y las conexiones. (<\$10.000)	NO
F1	Suministrar una corriente eléctrica de 0-30ADC y una tensión de 0-50VDC con una tensión de rizado menor al 5%	FF3	Disminución del nivel de corriente y tensión en DC >30% del valor normal (Igual posición de tap's y resistencia de carga)	MF12	Fusible(s) en AC quemado(s)	El elemento, portafusible o panel se observan y se percibe olor a quemado, la tubería queda sin protección catódica, cambiar fusible y/o portafusible (\$100.000)	NO
F1	Suministrar una corriente eléctrica de 0-30ADC y una tensión de 0-50VDC con una tensión de rizado menor al 5%	FF3	Disminución del nivel de corriente y tensión en DC >30% del valor normal (Igual posición de tap's y resistencia de carga)	MF13	Diodo(s) del puente rectificador en cortocircuito o abiertos	Se evidencia el daño en la lectura de los parámetros de salida, se deben medir los diodos. Se afecta parcialmente o totalmente el nivel de protección catódica de la tubería. Cambiar el o los diodos. (\$200.000)	NO

F1	Suministrar una corriente eléctrica de 0-30ADC y una tensión de 0-50VDC con una tensión de rizado menor al 5%	FF4	Tensión de rizado > 5%	MF14	Condensador (es) electrolítico(s) quemado(s) por sobretensiones	Se observa y se percibe olor a quemado. No supone una amenaza a la seguridad y el medio ambiente. No afecta la operación del sistema. Cambiar el Condensador. (\$50.000)	NO
F2	Disipar el 90% de la energía térmica generada por el funcionamiento de los elementos	FF5	Nivel de energía térmica >90% de su temperatura normal de operación	MF15	Falso contacto del disipador con los diodos o puente rectificador o falta de pasta térmica	Sensación de temperatura soportable al tacto. Puede afectar la operación de los diodos y directamente la operación del sistema de protección catódica. No supone una amenaza a la seguridad y el medio ambiente. Ajustar terminales y aplicar pasta térmica. (\$150.000)	SI
F3	Permitir el ajuste de los niveles de corriente continua a valores requeridos por el usuario	FF6	Incapacidad de regulación del nivel de corriente DC	MF16	Bobinados del transformador abierto o en corto circuito	Niveles de corriente y tensión en AC inadecuados o en cero, se deben medir sus puntos de conexión para verificar su estado, se percibe un ruido anormal, y energía térmica mayor al 30% de su operación normal. riesgo eléctrico al personal de operación. Rebobinar el transformador (\$200.000)	SI
F4	Indicar las medidas de corriente y tensión con una exactitud de +/-0,3%.	FF7	No existen lecturas de corriente y tensión	MF17	Cables abiertos por sobrecargas o corriente eléctrica elevada	No enciende el dispositivo, falta de registro numérico en los medidores. No supone una amenaza a la seguridad y el medio ambiente. No afecta la operación del sistema. Ajuste de terminales y/o conexiones. (\$250.000)	NO
F4	Indicar las medidas de corriente eléctrica y tensión con una exactitud de +/-0,3%.	FF7	No existen lecturas de corriente y tensión	MF18	Resistencia Shunt quemada	Se observa quemada la resistencia. No supone una amenaza a la seguridad y el medio ambiente. No afecta la operación del sistema. Cambiar la resistencia. (\$150.000)	SI
F4	Indicar las medidas de corriente eléctrica y tensión con una exactitud de +/-0,3%.	FF7	No existen lecturas de corriente y tensión	MF19	Medidores quemados por sobrecargas o corrientes elevadas	No se evidencia dañado el medidor. Se observa que no enciende el dispositivo. No supone una amenaza a la seguridad y el medio ambiente. No afecta la operación del sistema. Cambio del medidor. (\$250.000)	SI
F4	Indicar las medidas de corriente eléctrica y tensión con una exactitud de +/-0,3%.	FF8	Lectura inadecuada de parámetros corriente y tensión	MF20	Medidores desajustados	Se observan variaciones en las mediciones. No supone una amenaza a la seguridad y el medio ambiente. No afecta la operación del sistema. Se reprograma el medidor. Ajuste manual. (Ningún Costo)	NO
F4	Indicar las medidas de corriente eléctrica y tensión con una exactitud de +/-0,3%.	FF8	Lectura inadecuada de parámetros corriente y tensión	MF21	Contactos de terminales flojos por falta de ajuste	Se observan variaciones en las mediciones. No supone una amenaza a la seguridad y el medio ambiente. No afecta la operación del sistema. Ajuste manual. (Ningún Costo)	SI
F5	Indicar la medida de horas uso con un error de +/- 0,01%	FF9	No hay lectura de horas uso	MF22	Horómetro quemado	No se evidencia dañado el dispositivo. Se observa que no enciende el dispositivo. No supone una amenaza a la seguridad y el medio ambiente. No afecta la operación del sistema. Cambio del medidor. (\$150.000)	SI
F5	Indicar la medida de horas uso con un error de +/- 0,01%	FF9	No hay lectura de horas uso	MF23	Contactos de terminales flojos por falta de ajuste	Se observan variaciones en las mediciones. No supone una amenaza a la seguridad y el medio ambiente. No afecta la operación del sistema. Ajuste manual. (Ningún Costo)	SI

F6	Proteger el ingreso de polvo, agua, sol, animales y resistir contra la corrosión.	FF10	Pintura o material de la estructura del Gabinete deteriorado	MF24	Material y elementos en proceso de oxidación, sellos dañados y cortocircuitos producidos por el ingreso de animales u objetos	Se observan cortocircuitos causados por animales, y deterioro en la estructura y los elementos. Produce un riesgo eléctrico. Afecta la operación parcial o total del sistema. (\$500.000)	NO
F7	Descargar las corrientes parasitas	FF11	No descarga las corrientes parásitas	MF25	Elementos quemados	Se observan elementos quemados, la puesta a tierra desconectada o defectuosa. Produce riesgo eléctrico. Afecta el medio ambiente por un posible conato de incendio. Cambiar más del 50% de los elementos. Para la totalidad del sistema. (\$5.000.000)	SI

**7.3.2 Proceso de análisis de criticidad (AC) del Rectificador.** Se encuentra el nivel de criticidad de cada una de las fallas y su impacto en la operación de los SPC.

Basado en la información disponible en los históricos de operación, mantenimiento y manuales de servicio de los rectificadores, más la experiencia del autor en la operación, monitoreo y mantenimiento de equipos de este tipo, se procedió a elaborar el análisis de criticidad de cada una de las unidades funcionales que hacen parte del sistema de protección catódica, como lo son: el rectificador como sistema principal, los subsistemas energía eléctrica AC, unidad de monitoreo remoto y circuito en DC. Siguiendo los siguientes parámetros y condiciones.

A continuación, se listan los criterios elegidos por el autor y la ponderación de cada uno para desarrollar el análisis de criticidad:

- Parámetros y valoración de Probabilidad de fallas para el análisis de criticidad (Probabilidad para órdenes de trabajo de mantenimiento):
  - Imposible: (1). Equipo fallaría después de 20 años.
  - Improbable: (2). Equipo fallaría entre 5 a 20 años.
  - Remoto: (3). Equipo fallaría entre 1 a 5 años.

- Ocasional: (4). Equipo fallaría entre 1 a 6 meses.
- Habitual: (5). Equipo fallaría entre 1 a 4 semanas.
- Frecuente: (6). Equipo fallaría antes de 1 semana.

Se considera una probabilidad imposible cuando el equipo y sus componentes llevan más de 20 años sin fallar y por el otro extremo se considera una falla frecuente cuando en menos de una semana ya se ha presentado alguna falla funcional.

- Parámetros y valoración de Consecuencia para el análisis de criticidad (Factores de Criticidad):
  - Humanas: Una o más fatalidades (5), incapacidad permanente, parcial o total (4), incapacidad temporal >1 día (3), lesión menor no incapacidad (2), ninguna lesión (1).
  - Ambientales: Efectos irreversibles – masivo (5), efectos irreversibles en menos de 2 años (4), efectos reversibles en menos de 6 meses (3), efectos pueden ser controlados (2), no afecta el medio ambiente (1).
  - Costos de mantenimiento: La reparación es superior a \$100.000.000, entre \$1.000.000 y \$100.000.000 (4), Entre \$100.000 y \$1.000.000 (3), entre \$10.000 y \$1.000.000 (2), menos de \$10.000 (1)
  - Disponibilidad de repuestos: El aprovisionamiento de repuestos demora más de 1 mes (5), entre 3 y 4 semanas (4), entre 1 y 2 semanas (3), entre 1 y 7 días (2), menos de 1 día (1).
  - Imagen: Afectación en la reputación internacional (5), Nacional y rechazo de grupos de interés (4), Regional y sin rechazo de grupos de interés (3), Local y baja importancia (2), Interna-Ninguno (1).

- Ponderación de Consecuencia para análisis de criticidad:

- Catastrófico: (5)
- Crítico: (4)
- Marginal: (3)
- Insignificante:(2)
- Ninguno: (1)

Tabla 11. Matriz de evaluación de Criticidad – RAM.

MATRIZ DE EVALUACIÓN DE CRITICIDAD													
CONSECUENCIAS POTENCIALES					CONSECUENCIA	No.	PROBABILIDAD DE FALLA						
HUMANAS	AMBIENTALES	COSTOS POR MANTENIMIENTO (PESOS)	DISPONIBILIDAD DE REPUESTOS	IMAGEN			IMPOSIBLE > 20 Años	IMPROBABLE 5<Años<20	REMOTO 1<Años<5	OCASIONAL 1<Meses<6	HABITUAL 1<Semana<4	FRECUENTE < 1 Semana	
Una o más fatalidades	Efectos irreversibles - Masivo	> 100M	> 1Mes	Internacional	Catastrófico	5	B	M	M	A	A	MA	
Incapacidad permanente, parcial o total	Efectos irreversibles en menos de 2 años	Entre 1M - 100M	Entre 3-4 Semanas	Nacional	Crítico	4	B	M	M	A	A	A	
Incapacidad temporal > 1 día	Efectos reversibles en menos de 6 meses	Entre 100K - 1M	Entre 1-2 Semanas	Regional	Marginal	3	B	B	M	M	M	A	
Lesión menor no incapacidad	Efectos pueden ser controlados	Entre 10K - 100K	Entre 1-7 Días	Local	Insignificante	2	MB	B	B	M	M	M	
Ninguna lesión	No afecta el medio ambiente	< 10K	1Día	Interna Ninguno	Ninguno	1	MB	MB	B	B	B	B	
							No.	A(1)	B(2)	C(3)	D(4)	E(5)	F(6)
							PROBABILIDAD PARA ORDENES DE TRABAJO DE MANTENIMIENTO						
							Equipo fallaría después de 20 años	Equipo fallaría entre 5 a 20 años	Equipo fallaría entre 1 a 5 años	Equipo fallaría entre 1 a 6 meses	Equipo fallaría entre 1 a 4 semanas	Equipo fallaría antes de 1 semana	

Es importante destacar, que la ponderación más alta de las variables de consecuencia en cada modo de falla del sistema será la que se tenga en cuenta para el análisis de criticidad.

Con estos datos es que se puede hacer la valoración de criticidad la cual tiene su expresión en la siguiente ecuación:

$$Criticidad = Consecuencia \times Probabilidad \ de \ falla$$

Tabla 12. Valoración de Criticidad.

CRITICIDAD	RANGO
Muy Alta	30
Alta	16-29
Media	7-15
Baja	3-6
Muy Baja	1-2

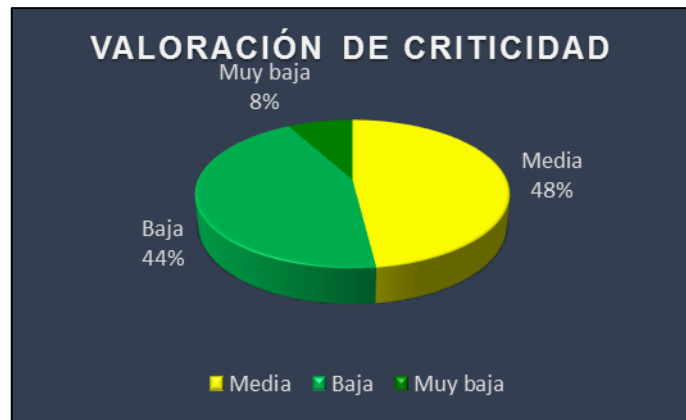
Presentados los criterios para determinar la criticidad, FMEA y los históricos operacionales de los rectificadores de protección catódica, se realiza el análisis, del cual se obtienen los modos de falla más críticos. En la tabla 13 se muestran los resultados del análisis de criticidad.

Tabla 13. Resultados del análisis de criticidad del Rectificador.

Código MF	CONSECUENCIA					PROBABILIDAD	CRITICIDAD
	Humano	Ambiental	Costos por Mantenimiento	Disponibilidad Repuestos	Imagen		
MF1	1	1	3	3	1	2	6
MF2	1	1	1	1	1	4	4
MF3	2	1	1	1	1	3	6
MF4	2	1	1	1	1	4	8
MF5	3	1	3	3	1	4	12
MF6	2	2	3	3	1	2	6
MF7	1	1	3	4	1	3	12
MF8	1	1	1	1	1	4	4
MF9	1	1	2	3	1	5	15
MF10	1	1	3	3	1	2	6
MF11	3	3	2	4	3	3	12
MF12	1	1	2	3	1	5	15
MF13	1	1	3	1	1	4	12
MF14	1	1	2	3	1	2	6
MF15	1	1	3	1	1	2	6
MF16	3	1	3	4	1	2	8
MF17	2	1	3	1	1	3	9
MF18	1	1	3	4	1	1	4
MF19	1	1	3	4	1	3	12
MF20	1	1	1	1	1	4	4
MF21	1	1	1	1	1	2	2
MF22	1	1	3	4	1	3	12
MF23	1	1	1	1	1	2	2
MF24	3	2	3	3	3	2	6
MF25	4	3	4	5	3	2	10

Como resultado del análisis de criticidad se identificó que los componentes más críticos del sistema son los fusibles de acción rápida que se instalan en la entrada de AC y en la salida en DC (-). Además, según los datos del análisis de criticidad de la tabla anterior el 48% de los modos de falla son de criticidad media, el 44% de criticidad baja y el 8% de criticidad muy baja, ver figura 18; lo cual nos permite concluir que más de la mitad de los modos de falla no se tendrán en cuenta ya que no afectan considerablemente la funcionalidad del sistema y a partir de allí se plantea el árbol lógico de decisión para los modos de falla de criticidad media.

Figura 18. Porcentaje de valoración de criticidad del sistema.



También se puede observar que ningún modo de falla del Rectificador es de valoración crítica o muy crítica, que pueda ocasionar daños al medio ambiente y a la seguridad del personal que los asiste y mantiene.

## 7.4 DETERMINACIÓN DE TAREAS DE MANTENIMIENTO

Definir la tarea de mantenimiento con la cual se bajará el riesgo (impacto al ambiente, a la seguridad, a la economía y/o a la imagen de la empresa) a niveles aceptables es el penúltimo gran paso del proceso.

Para la toma de decisiones de las tareas a desarrollar se utilizó el diagrama o árbol de decisiones de la figura 12; basado en los análisis anteriores la idea era seleccionar el tipo de mantenimiento adecuado que permitiera lograr lo siguiente:

- Optimizar la disponibilidad del gasoducto.
- Disminuir los costos de mantenimiento.
- Optimizar los recursos humanos y stock de repuestos.
- Maximizar la vida del Rectificador.
- Evitar, reducir y reparar las fallas sobre los activos.
- Disminuir la gravedad de las fallas que ocurriesen.
- Evitar accidentes y aumentar la seguridad del personal operativo.
- Conservar los activos en condiciones seguras y preestablecidas de operación.

Tabla 14. Tabla de toma de decisiones para los Modo de Falla de criticidad media.

Código MF	TIPO DE DECISIÓN				DESCRIPCIÓN TAREA	FRECUENCIA (Meses)	RECURSOS	CÓDIGO TAREA
	PM	RTF	CBM	RED				
MF4			X		Inspección visual del estado de los cables, medición de continuidad, cambiar los cables dañados. Realizar pruebas de funcionamiento del Rectificador.		Técnico de mantenimiento o de integridad, Multímetro digital, herramientas menores, material de etiquetado de prevención y seguridad industrial	CBM-C-REC-Ca
MF5			X		Inspección visual del estado de los cables, medición de continuidad, cambiar los cables dañados. Realizar pruebas de funcionamiento del Rectificador.		Técnico de mantenimiento o de integridad, Multímetro digital, herramientas menores, material de etiquetado de prevención y seguridad industrial	CBM-C-REC-Ca
MF7			X		Realizar prueba del estado de la bobina, midiendo continuidad		Técnico de mantenimiento o de	CBM-C-REC-L

					eléctrica. Desinstalar el elemento dañado e instalar un puente eléctrico. Pruebas de funcionamiento. Se debe hacer la gestión para la adquisición del insumo para cambio programado.		integridad, Multímetro digital, herramientas menores, material de etiquetado de prevención y seguridad industrial	
MF9			X	X	Medir continuidad entre sus extremos, para verificar si está abierto o no. Desinstalar el elemento dañado y cambiarlo por uno nuevo en stock. Realizar pruebas de funcionamiento. Si la falla es continua realizar un rediseño y cambiar por un interruptor automático		Técnico de mantenimiento, Ing. de integridad, Multímetro digital, herramientas menores, material de etiquetado de prevención y seguridad industrial	CMB-C-REC-F
MF11			X		Inspección visual del estado de los cables, medición de continuidad, cambiar los cables dañados. Realizar pruebas de funcionamiento del Rectificador.		Técnico de mantenimiento o de integridad, Multímetro digital, herramientas menores, material de etiquetado de prevención y seguridad industrial	CBM-C-REC-Ca
MF12			X		Medir continuidad entre sus extremos, para verificar si está abierto o no. Desinstalar el elemento dañado y cambiarlo por uno nuevo en stock. Realizar pruebas de funcionamiento.		Técnico de mantenimiento o de integridad, Multímetro digital, herramientas menores, material de etiquetado de prevención y seguridad industrial	CBM-C-REC-F
MF13			X		Retirar cada diodo, verificar en cada dirección su estado con un probador de diodos. Desinstalar el elemento dañado y cambiarlo por uno nuevo en stock. Realizar pruebas de funcionamiento.		Técnico de mantenimiento o de integridad, Multímetro digital, herramientas menores, material de etiquetado de prevención y seguridad industrial	CBM-C-REC-Db
MF16			X		Verificar si hay un zumbido audible que viene del transformador. Verificar la resistencia DC de los bobinados con un óhmetro. Por lo general, el bobinado secundario debería tener menos de un (1) ohmio de resistencia. El primario debería tener 1-10 ohmios de resistencia. Si está dañado gestionar la compra del transformador y programar de urgencia el cambio.		Técnico de mantenimiento o de integridad, Multímetro digital, herramientas menores, material de etiquetado de prevención y seguridad industrial	CBM-C-REC-Tm
MF17	X				Inspección visual del estado de los cables, medición de continuidad, cambiar los cables dañados. Realizar pruebas de funcionamiento y calibración de los instrumentos de medición.	12 meses	Técnico de mantenimiento o de integridad, Multímetro digital, herramientas menores, material de etiquetado de prevención y seguridad industrial	PM-C-REC-Ca
MF19	X				Desinstalar el instrumento dañado. Gestionar la adquisición del insumo, para la restauración programada.	12 meses	Técnico de mantenimiento o de integridad, Multímetro digital, herramientas menores, material de etiquetado de prevención y seguridad industrial	PM-C-REC-V PM-C-REC-A
MF22	X				Desinstalar el instrumento dañado. Gestionar la adquisición del insumo, para la restauración programada.	12 meses	Técnico de mantenimiento o de integridad, Multímetro digital, herramientas menores, material de etiquetado de prevención y seguridad industrial	PM-C-REC-Hr

MF25	X				Realizar una inspección visual y medir la resistencia del Sistema de Puesta a Tierra, normalmente el Telurómetro debe registrar una resistencia menor a 10Ω. Realizar cambio del cableado y arreglar conexiones.	12 meses	Técnico de mantenimiento o de integridad, Multímetro digital, Telurómetro, herramientas menores, material de etiquetado de prevención y seguridad industrial	MP-E-EAC-Spt
12	4	0	8	0				
TOTAL	Mantenimiento Preventivo	Mantenimiento Correctivo	Mantenimiento basado en condición	Rediseño	Metodología propuesta a realizar para solucionar el problema	Periodo de Mantenimiento	Personal, equipo y materiales requeridos en la ejecución de la estrategia de Mantenimiento.	Código Tarea

## 7.5 ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE LOS SUBSISTEMAS

Se determinaron como subsistemas el circuito eléctrico en AC, la Unidad de Monitoreo Remoto y el circuito eléctrico en DC, debido a la influencia directa que tienen en la operación y funcionalidad del objeto de estudio principal en esta Monografía que es el Rectificador.

Se desarrolla un FMECA porque es un proceso estructurado, consciente y analítico que permite identificar las causas responsables de las fallas repetitivas y los efectos para reducir costos de mantenimiento y mejorar la calidad de los productos o componentes, con el fin de optimizar la funcionalidad del Rectificador.

Tabla 15. Análisis de modos y efectos de falla de subsistemas.

SUBSISTEMA	Código Función	Función	Cód. FF	Descripción Falla Funcional	Código MF	Modo de Falla	Descripción Efectos	FALLA OCULTA
CIRCUITO ELÉCTRICO AC	F1	Suministrar una tensión de 240/120VAC y una corriente de 0-10A AC	FF1	Indisponibilidad de suministrar corriente AC	MF1	No hay suministro de energía eléctrica comercial	Se observa el Rectificador de corriente y la UMR apagados, por la ausencia de energía eléctrica. La tubería queda sin protección catódica. Se debe verificar la ausencia de media tensión en cada línea o con un voltímetro en la entrada del totalizador. Se debe llamar a la	NO

							empresa de energía para reestablecer el servicio.(Ningún costo)	
F1	Suministrar una tensión de 240/120VAC y una corriente de 0-10A AC	FF1	Indisponibilidad de suministrar corriente AC	MF2	La caja cortacircuitos de 15kV o el fusible tipo cañuela de 10A están dañados	Visualmente se observa la cañuela disparada, el fusible abierto o la caja cortacircuitos quemada. Visualmente se observa que el interruptor está disparado, la estructura queda sin protección catódica, se debe cambiar el componente averiado (\$5.000-\$200.000)	NO	
F1	Suministrar una tensión de 240/120VAC y una corriente de 0-10A AC	FF1	Indisponibilidad de suministrar corriente AC	MF3	Pararrayo (s) polimérico de 15kV en cortocircuito o aterrizado	Se observa quemado y con daños físicos, adicionalmente causa el disparo de la cañuela. La estructura queda sin protección catódica, se debe cambiar el componente averiado. (\$100.000)	NO	
F1	Suministrar una tensión de 240/120VAC y una corriente de 0-10A AC	FF1	Indisponibilidad de suministrar corriente AC	MF4	Aislador (es) polimérico en cortocircuito	No se observa ningún daño. Se debe utilizar una cámara termográfica para localizar puntos calientes y fallas en el dispositivo. La tubería queda sin protección catódica, se debe cambiar el componente averiado (\$35.000)	NO	
F1	Suministrar una tensión de 240/120VAC y una corriente de 0-10A AC	FF1	Indisponibilidad de suministrar corriente AC	MF5	Transformador monofásico de 15kVA dañado	Se debe utilizar un Megóhmetro para medir la resistencia de los devanados y hacer pruebas de tensión del transformador para detectar fallas. La tubería queda sin protección catódica, cambiar el transformador o enviarlo a reparación. (\$2.200.000)	NO	
F1	Suministrar una tensión de 240/120VAC y una corriente de 0-10A AC	FF1	Indisponibilidad de suministrar corriente AC	MF6	Acometida eléctrica interna defectuosa o abierta	Se observan cables abiertos, aterrizados, terminales sulfatados, en cortocircuito, presencia de olor a quemado y cables carbonizados (color negro). La tubería queda sin protección catódica, se deben meggear los cables para determinar los daños, y cambiar la acometida. Afecta el medio ambiente por un posible conato de incendio, riesgo SST para las personas por un posible corto. (\$ 100.000)	NO	
F1	Suministrar una tensión de 240/120VAC y una corriente de 0-10A AC	FF1	Indisponibilidad de suministrar corriente AC	MF7	Totalizador monofásico (Caja de tacos) disparado	Se encuentra disparado o observa y se percibe olor a quemado dependiente del nivel de sobrecarga de corriente que haya recibido. La tubería queda sin protección catódica, se debe reestablecer la posición de On o cambiar si se encuentra dañado. (\$120.000)	NO	
F2	Proteger el circuito eléctrico AC contra sobre tensiones y descargas de corriente mayores a 5kA	FF2	Circuito eléctrico AC sin protecciones o defectuosas	MF8	Pararrayo (s) polimérico de 15kV abierto	Se observa quemado y con daños físicos, adicionalmente causa el disparo de la cañuela. La estructura queda sin protección catódica, se debe cambiar el componente averiado. (\$100.000)	NO	

	F2	Proteger el circuito eléctrico AC contra sobretensiones y descargas de corriente mayores a 5kA	FF2	Circuito eléctrico AC sin protecciones o defectuosas	MF9	Caja cortacircuito de 15kV sin fusible tipo cañuela, con un puente eléctrico	Visualmente se observa la cañuela disparada, el fusible abierto o la caja cortacircuitos quemada. Visualmente se observa que el interruptor está disparado, la estructura queda sin protección catódica, se debe cambiar el componente averiado (\$5.000-\$200.000)	NO
	F2	Proteger el circuito eléctrico AC contra sobretensiones y descargas de corriente mayores a 5kA	FF2	Circuito eléctrico AC sin protecciones o defectuosas	MF10	Sistema de puesta a tierra deteriorada, con alta resistencia	Se debe medir la resistencia de puesta a tierra con un Telurómetro, debe ser valores de resistencia inferiores a 10ohm. Quedan los sistemas sin descargas de corriente a tierra, riesgo eléctrico al personal de operación y los sistemas, cambiar el cable y las conexiones. (\$100.000)	SI
	F3	Medir el consumo de energía eléctrica del sistema en kWh	FF3	Sistema eléctrico sin medición de energía eléctrica	MF11	Contador de energía quemado	No se observan variaciones en las lecturas del contador, se percibe olor a quemado y se observan quemaduras en los terminales y conexiones. No se puede medir el registro de consumo de energía eléctrica del sistema de protección catódica. Se debe cambiar el contador. (\$250.000)	NO
UNIDAD DE MONITOREO REMOTO (UMR)	F4	Monitorizar los parámetros operacionales de Voltaje y Corriente (0-30ADC y de 0-50VDC)	FF4	No se visualizan cambios de voltaje y corriente en pantalla	MF12	Antena GPS dañada	Se debe medir la resistencia de entrada de la antena, si marca una resistencia muy elevada significa que está abierta y dañada. Además, es imposible transmitir datos de un punto a otro, no enlace entre los sistemas, es decir se pierde el monitoreo remoto. Cambiar la antena y configurar su comunicación. (\$2.000.000)	SI
	F4	Monitorizar los parámetros operacionales de Voltaje y Corriente (0-30ADC y de 0-50VDC)	FF4	No se visualizan cambios de voltaje y corriente en pantalla	MF13	CPU averiada	Se observa y se percibe olor a quemado. No supone una amenaza a la seguridad y el medio ambiente. Afecta totalmente el monitoreo del sistema, se debe cambiar la board de la CPU. No afecta la operación del sistema. Cambiar la board. (\$5.000.000)	NO
	F4	Monitorizar los parámetros operacionales de Voltaje y Corriente (0-30ADC y de 0-50VDC)	FF4	No se visualizan cambios de voltaje y corriente en pantalla	MF14	No hay suministro de energía eléctrica comercial	Se encuentra la UMR apagada, fuera de funcionamiento y las baterías descargadas, se debe medir el nivel de tensión de entrada para verificar ausencia de tensión y medir la carga de las baterías. No hay monitoreo remoto del sistema. Llamar a la empresa de energía para reestablecer el servicio. (Ningún costo)	NO
	F4	Monitorizar los parámetros operacionales de Voltaje y Corriente (0-30ADC y de 0-50VDC)	FF4	No se visualizan cambios de voltaje y corriente en pantalla	MF15	Rectificador fuera de operación	No se observan variaciones en las lecturas de corriente y voltaje en pantalla, si hay dato de voltaje y no de corriente el circuito externo tiene falla, si no hay dato de tensión ni corriente puede ser daño en el rectificador o no hay suministro de energía eléctrica. Revisar y reparar daños en el rectificador. (\$100.000)	NO

	F4	Monitorizar los parámetros operacionales de Voltaje y Corriente (0-30ADC y de 0-50VDC)	FF4	No se visualizan cambios de voltaje y corriente en pantalla	MF16	Modulo (s) análogo (s) o digital (es) quemado (s)	Si la falla es un módulo análogo no se observan cambios en la lectura de corriente o voltaje al solicitar el envío de datos, si es el módulo digital no se tiene control del ciclado del rectificador. Se observan quemadas las tarjetas de los módulos. No hay monitoreo de las señales eléctricas. Cambiar la (s) tarjeta (s) dañada (s). (\$2.000.000)	NO
	F4	Monitorizar los parámetros operacionales de Voltaje y Corriente (0-30ADC y de 0-50VDC)	FF4	No se visualizan cambios de voltaje y corriente en pantalla	MF17	Baterías Xeno 3,6V tipo D descargadas	Se debe medir el nivel de carga de la batería para detectar la falla, estas baterías dan un respaldo de 48 horas observa quemada la resistencia. No supone una amenaza a la seguridad y el medio ambiente. No afecta la operación del sistema. Cambiar la resistencia. (\$320.000)	NO
	F4	Monitorizar los parámetros operacionales de Voltaje y Corriente (0-30ADC y de 0-50VDC)	FF4	No se visualizan cambios de voltaje y corriente en pantalla	MF18	Fuente de alimentación regulada de 12VDC dañada	Se encuentra apagada la UMR, la fuente en cortocircuito, se percibe olor a quemado y se observan componentes quemados. No hay monitoreo remoto de las variables eléctricas del Rectificador. Se debe cambiar la fuente de DC. (\$100.000)	NO
	F5	Controlar remotamente el ciclado del rectificador durante 10 horas con un ciclo de 0.5-5 segundos On y 0.5-5 segundos Off	FF5	No hay ciclado On/Off del rectificador	MF19	Módulo digital averiado	No hay control del ciclado del rectificador. Se observa quemada la tarjeta del módulo digital. No hay monitoreo del potencial On/Off del Rectificador. Cambiar la tarjeta dañada. (\$2.000.000)	NO
	F5	Controlar remotamente el ciclado del rectificador durante 10 horas con un ciclo de 0.5-5 segundos On y 0.5-5 segundos Off	FF5	No hay ciclado On/Off del rectificador	MF20	Relevo de mercurio 100NC-12D quemado	Se observa quemado el relevo de mercurio. No hay ciclado On/Off del Rectificador. No supone una amenaza a la seguridad y el medio ambiente. Cambiar el relevo de mercurio. (\$600.000)	NO
CIRCUITO ELÉCTRICO DC	F6	Suministrar una corriente eléctrica de 0-30ADC y una tensión de 0-50VDC con una tensión de rizado menor al 5%	FF6	Cero llegada de corriente DC a la caja de positivos de los ánodos	MF21	Rectificador fuera de operación	Se evidencia algún componente del Rectificador quemado, no hay lecturas en los instrumentos de medición. No supone una amenaza a la seguridad y el medio ambiente. No hay protección catódica en la tubería. Cambio del componente que se encuentre averiado. (\$150.000)	NO
	F6	Suministrar una corriente eléctrica de 0-30ADC y una tensión de 0-50VDC con una tensión de rizado menor al 5%	FF6	Cero llegada de corriente DC a la caja de positivos de los ánodos	MF22	Cable HMWPE del circuito negativo o positivo abierto	Se debe localizar el punto donde el cable está abierto con un localizador de tubería, luego reparar con un empalme y splice kit. Afecta directamente la tubería porque queda sin protección catódica. (\$100.000)	SI

	F6	Suministrar una corriente eléctrica de 0-30ADC y una tensión de 0-50VDC con una tensión de rizado menor al 5%	FF6	Cero llegada de corriente DC a la caja de positivos de los ánodos	MF23	Consumo total de los ánodos	No se puede observar el consumo de los ánodos a menos que se realice una excavación, se encuentra el circuito eléctrico abierto y no hay drenaje de corriente. Cambio e instalación de los ánodos de corriente impresa consumidos y su acometida eléctrica. (\$5.000.000)	SI
	F6	Suministrar una corriente eléctrica de 0-30ADC y una tensión de 0-50VDC con una tensión de rizado menor al 5%	FF6	Cero llegada de corriente DC a la caja de positivos de los ánodos	MF24	No hay suministro de energía eléctrica comercial	Se observa el Rectificador de corriente y la UMR apagados, por la ausencia de energía eléctrica. La tubería queda sin protección catódica. Se debe verificar la ausencia de media tensión en cada línea o con un voltímetro en la entrada del totalizador. Se debe llamar a la empresa de energía para reestablecer el servicio.(Ningún costo)	NO

En la tabla 16 podemos observar el análisis de criticidad de los modos de falla de cada subsistema, de acuerdo a la matriz RAM y la tabla 12 de evaluación de criticidad establecidas previamente.

Tabla 16. Resultados del análisis de Criticidad de los subsistemas.

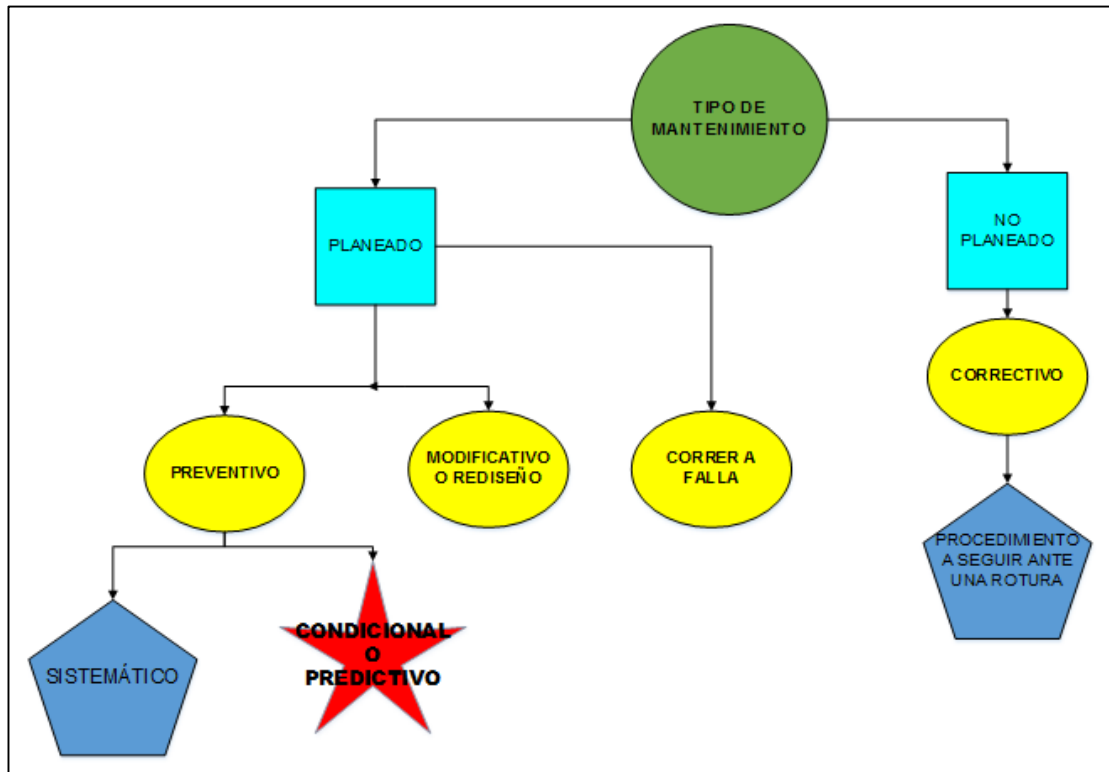
Subsistema	Código MF	CONSECUENCIA					PROBABILIDAD	CRITICIDAD
		Humano	Ambiental	Costos por Mantenimiento	Disponibilidad Repuestos	Imagen		
CIRCUITO ELÉCTRICO AC	MF1	1	1	1	1	1	4	4
	MF2	1	1	3	2	1	3	9
	MF3	1	1	2	2	1	3	6
	MF4	1	1	2	2	1	3	6
	MF5	1	1	4	5	1	2	10
	MF6	2	1	2	3	1	2	6
	MF7	1	1	3	2	1	2	6
	MF8	1	1	2	2	1	3	6
	MF9	1	1	3	2	1	3	9
	MF10	4	1	3	3	1	2	8
	MF11	1	1	3	3	1	2	6
UNIDAD DE MONITOREO REMOTO (UMR)	MF12	1	1	4	5	1	2	10
	MF13	1	1	4	5	1	3	15
	MF14	1	1	1	1	1	4	4
	MF15	1	1	2	1	1	4	8
	MF16	1	1	4	4	1	3	12
	MF17	1	1	2	2	1	3	6
	MF18	1	1	2	2	1	3	6
	MF19	1	1	4	4	1	3	12
	MF20	1	1	3	2	1	2	6
CIRCUITO ELÉCTRICO DC	MF21	1	1	2	2	1	4	8
	MF22	1	1	2	3	1	2	6
	MF23	1	1	4	5	1	2	10
	MF24	1	1	1	1	1	4	4

De acuerdo a la tabla anterior se puede concluir que el 46% de los modos de falla son de criticidad media y el 54% son de criticidad baja.

## 7.6 DISEÑO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO

Como opción de optimización del sistema de protección catódica del Gasoducto Santanderes se elaboró un plan maestro de mantenimiento basado en RCM, bajo parámetros de excelencia operacional, optimización de costos (stock de repuestos), calidad y seguridad en los procesos. De esta manera se pretende asegurar la fiabilidad y confiabilidad operacional de los activos o componentes de las URPC's.

Figura 19. Esquema de mantenimiento.



La estrategia de mantenimiento óptima para los subsistemas de acuerdo a los resultados del análisis del RCM y las tablas de los históricos de operación se basa en un mantenimiento no planeado, específicamente procedimiento a seguir ante una rotura, por las siguientes razones:

- Su mantenimiento depende de terceros, ya que la mayoría de las empresas no disponen de personal eléctrico para realizar estas actividades y personal capacitado en la especialidad del monitoreo remoto.
- Mantener un stock de inventario de repuestos eléctricos es muy costoso y con el tiempo se pueden deteriorar almacenados en una bodega.
- La probabilidad de ocurrencia de una falla es baja y aleatoria, y en su mayoría no causan daño a la seguridad del personal, el ambiente y no afecta la imagen del negocio.

El análisis del RCM a los Rectificadores fue de gran ayuda para armar un plan de mantenimiento confiable que permitiera garantizar la continuidad en el suministro de corriente impresa de los sistemas de protección catódica, se determinaron dos tipos de mantenimientos planeados a ejecutar, uno de tipo condicional o correctivo, y el otro de tipo sistemático.

**7.6.1 Mantenimiento condicional o predictivo.** Mediante la utilización de las unidades de monitoreo remoto se supervisarán y controlarán los parámetros de funcionamiento de voltaje, corriente DC y potencial On/Off de los rectificadores, variables eléctricas que se monitorizarán desde un lugar remoto y que permiten detectar un fallo antes de que este tenga consecuencias graves.

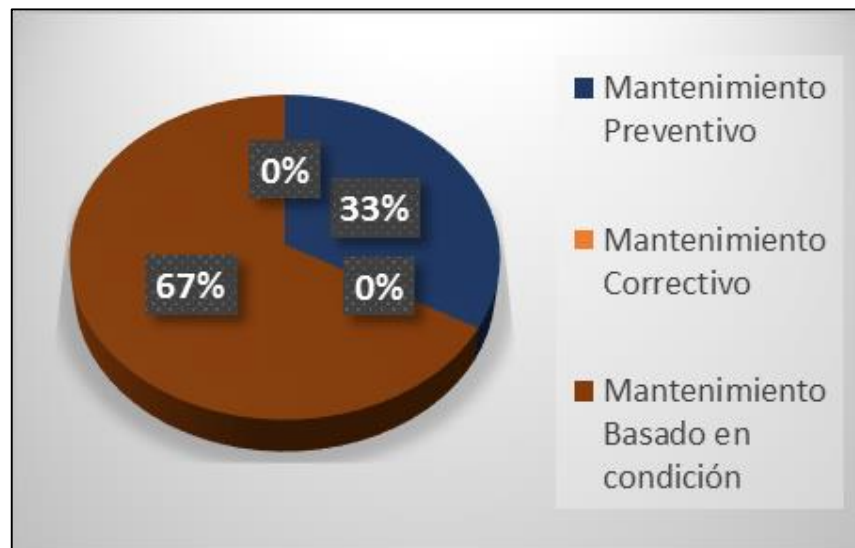
Solo se irá a inspeccionar el Rectificador cuando se sabe que existe un fallo, lo que reducirá tiempos muertos de horas hombre, gastos de traslado a cada instalación y stock de repuestos; durante el procedimiento de correr a falla se diligenciará el registro de la tabla del Anexo B. Para llevar una trazabilidad operativa de los equipos

se utilizará una plantilla mantenimiento predictivo que se encuentra en el anexo 3, la cual se diligenciará semanalmente.

**7.6.2 Mantenimiento sistemático.** Se planea con el objetivo de conservar los Rectificadores y las instalaciones, y de mitigar o evitar las consecuencias de sus fallas, mediante la revisión y reparación de sus componentes asegurando la correcta operación y fiabilidad.

Este mantenimiento programado se realizará anualmente a cada Rectificador en condiciones de funcionamiento, las tareas de mantenimiento incluyen: limpieza general, cambio de componentes desgastados o con una eficiencia operacional baja, inspección visual y pruebas de cada componente, ajuste de terminales y conexiones, medición, ajuste y calibración de parámetros operacionales, se diligenciará la plantilla del anexo B.

Figura 20. Tipo de decisión de tareas de mantenimiento de las URPC's según metodología RCM.



En el Anexo A se encuentra un Plan Maestro de mantenimiento preventivo anual, que se complementará con las tareas condicionales de monitoreo semanal de cada Rectificador. Para una mejora continua de este plan de mantenimiento se deben utilizar en cada tarea la(s) plantilla(s) correspondiente(s) que se encuentran en los anexos B, C, D y E.

## 8. CONCLUSIONES

Esta metodología RCM permitió llegar al corazón de los modos de falla más críticos que afectan significativamente la operación de los Sistemas de Protección Catódica del Gasoducto Santanderes, lo que llevó a proponer un plan de mantenimiento maestro que consiste en: un cronograma de actividades preventivas anuales, un registro e histórico operacional, una plantilla de mantenimiento preventivo, plantilla de stock de repuestos y una plantilla de control de costos de mantenimiento.

Se recolectó la información operacional de las URPC's del Gasoducto Santanderes durante el año 2014 en un porcentaje mayor al 80%, lo que permitió desarrollar las tablas de históricos operacionales las cuales fueron la base para el desarrollo de la monografía. Se logró establecer según los datos del análisis de criticidad que el 48% de los modos de falla son de criticidad media, el 44% baja y el 8% muy baja, de acuerdo a los factores de criticidad establecidos en este documento y los lineamientos de las normas SAE JA 1011-1012.

Se realizó un estudio completo para garantizar niveles de confiabilidad y disponibilidad mayores al 90% de los sistemas y subsistemas basado en la metodología FMECA, la cual constó de las siguientes etapas: análisis funcional, identificación de modos de falla, efectos de la falla, cada uno con su respectivo código; además, de la descripción de efectos de los modos de falla y las fallas ocultas que se encuentran en los equipos.

Con el análisis de la metodología RCM se propone utilizar los subsistemas de monitoreo remoto como parte del nuevo plan de mantenimiento, para medir y

monitorear el rendimiento del sistema de protección catódica con respecto a los standards y regulaciones de aplicación. Con el fin de aumentar el indicador de tiempo medio entre fallas “MTBF” a un 90% y disminuir el de tiempos medios de reparación “MTTR” a un 10%, en cada equipo.

Un logro importante de resaltar fue disminuir la frecuencia de mantenimiento preventivos gracias a la información de los modos de fallas e históricos operacionales recolectados; esta frecuencia pasó de ser ejecutada mensualmente a una frecuencia anual para cada Rectificador. Los modos de falla de criticidad media el 67% de las tareas se atenderán basadas en su condición y con un mantenimiento correctivo programado, el restante 33% son tareas preventivas que se ejecutarán dentro del cronograma anual.

Se proponen acciones de mejora continua en los procesos de mantenimiento por medio de un registro operacional y de tareas de mantenimiento en cada Rectificador, control de costos, stock de repuestos mínimo y un registro de tareas predictivas que se deben diligenciar según fechas estipuladas, de forma completa y detallada, de tal manera que permita realizar un análisis eficaz del proceso de mantenimiento y obtener la confiabilidad operacional esperada.

El RCM para las Unidades Rectificadoras de Protección Catódica busca eliminar radicalmente las causas de las pérdidas crónicas causadas por la ineficiencia de un sistema de control de corrosión, mejorar el conocimiento del proceso mediante el análisis y solución de problemas e involucrar a todo el personal técnico en las acciones de mejora propuestas.

## 9. RECOMENDACIONES

Capacitar al personal en el desarrollo y uso de la metodología RCM para mejorar continuamente con el proceso de mantenimiento de los sistemas de protección catódica, porque personas capacitadas son trabajadores con talento, que integran en su diario vivir propuestas de mejora, trazan metas e indicadores y contribuyen a una mejor gestión.

Usar la plantilla de control de costos de mantenimiento para calcular la tasa interna de retorno y verificar la tasa de rentabilidad del producto de la reinversión de los flujos netos de efectivo dentro de la operación propia del negocio, este análisis se efectuaría anualmente.

## BIBLIOGRAFÍA

AGUILAR, José; TORRES, Rocío y MAGAÑA, Diana. Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. *Tecnología, Ciencia, Educación*. [En línea]. 2010, vol. 25, nro. 1, pp. 15 – 26. [Consultado el: 10 de marzo de 2017]. ISSN 0186-6036. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48215094003>

MANTILLA, Enry y ORTÍZ, Henner. Diseño del plan de mantenimiento basado en RCM para equipos de tratamiento de crudo en campo moriche de la empresa Mansarovar Energy Colombia Ltd (mecl). [En línea]. Monografía Especialista en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento, 2015. p. 11. [Consultado el: 11 de mayo de 2017]. Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2015/158947.pdf>

MOUBRAY, John. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Edición en Español. Leicester: Aladon Ltd, 2004. p. 7. ISBN 09539603-2-3.

NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS (NACE). CP2 - Cathodic Protection Technician Manual Course. Houston: La Asociación, 2010. p.2.

\_\_\_\_\_. Curso de corrosión básica. Manual del Estudiante. Houston: La Asociación, 2014. pp. 3 – 6.

ORTÍZ PLATA, Daniel. Memorias de clase de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga, 2016.

OTERO HUERTA, Enrique. Corrosión y degradación de materiales. Madrid: Editorial Síntesis, 2001. pp. 210-216.

PEABODY, A. W. Peabody's control of pipeline corrosion. Second Edition. Houston: National Association of Corrosion Engineers (NACE), 2001. p. 6. ISBN 1-57590-092-0.

ROMERO, Claudia; ARIAS, Álvaro y SARMIENTO, Leonardo. Estrategia de mantenimiento basada en RCM para un gasoducto de transporte tramo Otero - Santana. [En línea]. Monografía Especialista en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento, 2012. 130 p. [Consultado el: 10 de mayo de 2017]. Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2012/146754.pdf>

SERNA, José Aníbal. Memorias de clase de Integridad y Confiabilidad Operacional de Equipos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga, 2016.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard SAE JA1012. Washington: La Sociedad, 2002. p. 48.

TORRES, Leandro Daniel. Mantenimiento su implementación y gestión. Segunda edición. Córdoba: Universitas Editores, 2005. p. 19.



Anexo B. Planilla de registro e histórico operacional de un Rectificador.

ESPECIFICACIONES NOMINALES DEL RECTIFICADOR																
Abscisa		Marca	Modelo	Serial												
# Inventario		Tensión AC	Corriente AC	Tensión DC												
Corriente DC		Fases	Frecuencia	Temperatura ambiente												
# Tap Gruesos		# Tap Finos	Sistema Enfriamiento	Tipo de gabinete												
Latitud		Longitud	Modo de operación	Referencia/Tipo Diodos												
Fusible AC		Fusible DC	Resistencia Shunt	Transformador												
REGISTRO DE MANTENIMIENTO																
ITEM	FECHA (dd/mm/aa)	HORA (hh:mm/aa)	Comador de Energía kWh		Suministro de Energía AC		TAP's (Regulación AC)		Circuito DC (+/-)		Efecto de la falla	Codigo de la Tarea	Repuesto	Tiempo de reparación	Operador que intervino el equipo	
			VAC (V)	IAC (A)	VAC (V)	IAC (A)	Grueso-Fino	VAC (V)	IAC (A)	VDC (V)						IDC (A)
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
OBSERVACIONES																



Anexo D. Plantilla de repuestos por Rectificador.

PLANTILLA DE REPUESTOS POR RECTIFICADOR							
EQUIPO	CÓDIGO EQUIPO						
ITEM	CÓDIGO COMPONENTE	COMPONENTE	REFERENCIA	CANTIDAD MÍNIMA STOCK	CANTIDAD STOCK	UBICACIÓN	PROVEEDOR
1	CRECF	FUSIBLE ACCIÓN RÁPIDA DC	L15S30 / 150V-30A	1	2	URPC	
2	CRECF	FUSIBLE ACCIÓN RÁPIDA AC	L15S10 / 150V-10A	1	2	URPC	
3	CRECDB	DIODO TIPO BRIDA(P)	S8BR51	1	2	URPC	
4	CRECDB	DIODO TIPO BRIDA(N)	S8BN51	1	2	URPC	
5	ECACFh	FUSIBLE CAÑUELA	5A / TIPO HILO	1	2	ALMACÉN	
6	SUMRBat	BATERÍA	XENO / 3,6V / TIPO D	1	2	ALMACÉN	
7	SUMRFV	FUSIBLE	2A / VIDRIO	2	3	URPC/ALMACÉN	
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							

Anexo E. Control de costos por Rectificador.

CONTROL DE COSTOS DE MANTENIMIENTO DE CADA RECTIFICADOR												
TIPO DE MANTENIMIENTO	AÑO											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
COSTO DE MATERIALES												
HORAS EMPLEADAS												
ORDENES DE TRABAJO												
SUELDOS DIRECTOS												
SUELDOS INDIRECTOS												
COSTOS FINANCIEROS												
COSTOS POR FALLA												
GASTOS PROPIOS												
GASTOS TERCEROS												
<b>TOTAL</b>												
<b>PRESUPUESTO</b>												
<b>DIFERENCIA</b>												