

**DESARROLLO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO, PARA LOS
TRANSFORMADORES ET-217-TX-B-01A Y ET-217-TX-B-01B DE 15 MVA
SUMERGIDOS EN ACEITE DE LA PLANTA HDT DE LA REFINERÍA
BARRANCABERMEJA, UTILIZANDO LA METODOLOGÍA RCM.**

**SAÚL ANDRÉS GARCÍA CARRILLO.
CESAR AUGUSTO BENAVIDES ÁLVAREZ.**

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

2019

**DESARROLLO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO, PARA LOS
TRANSFORMADORES ET-217-TX-B-01A Y ET-217-TX-B-01B DE 15 MVA
SUMERGIDOS EN ACEITE DE LA PLANTA HDT DE LA REFINERÍA
BARRANCABERMEJA, UTILIZANDO LA METODOLOGÍA RCM.**

**SAÚL ANDRÉS GARCÍA CARRILLO.
CESAR AUGUSTO BENAVIDES ÁLVAREZ.**

**Monografía de grado presentada como requisito para optar el título de
ESPECIALISTA EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO.**

**Director
ING. FREDY EDGARDO MALDONADO FLÓREZ
MSc Gerencia en Mantenimiento**

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

2019

DEDICATORIA.

A Dios por darme la salud y capacidad para afrontar los retos que día a día se presentan en la vida, a mi familia por su apoyo incondicional durante este proceso de formación académico.

CESAR

A mi esposa pues ella con su amor incondicional siempre me motivo a continuar sin desfallecer, a mis amigos y docentes quienes aportaron durante toda mi formación como especialista en Gerencia de Mantenimiento.

ANDRÉS.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo de grado expresan sus más sinceros agradecimientos a Dios, Docentes y compañeros de trabajo quienes aportaron tiempo y experiencias para lograr consolidar la información que dio como resultado la elaboración del plan de mantenimiento para los transformadores ET-217-TX-B-01A Y ET-217-TX-B-01B de la planta HDT.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
2. JUSTIFICACIÓN	24
3. OBJETIVOS	25
3.1 OBJETIVO GENERAL	25
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
4. ANÁLISIS DE LA LITERATURA.	26
4.1 HISTORIA DE LA UNIDAD.	26
4.2 INICIOS Y EVOLUCIÓN DEL RCM	27
4.3 LAS SIETE PREGUNTAS BÁSICAS DE LA METODOLOGÍA RCM	29
4.4 AMEF – ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA.	30
4.5 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR ELÉCTRICO	32
4.6 CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES SEGÚN EL TIPO DE ENFRIAMIENTO	34
4.7 NFPA 70E	36
4.8 MARCO CONCEPTUAL	37
5. SUBSISTEMAS DE LA SUBESTACIÓN ET-217	38
5.1 GUÍA PARA DETERMINAR FUNCIÓN Y CRITICIDAD DE SUBSISTEMAS ET-217	38
5.1.1 Glosario para guía según Norsok Z-013.	38
5.1.2 Caracterización y función de subsistemas de la subestación ET-217.	40
5.1.3 Pasos para evaluar la criticidad de los subsistemas de la ET-217.	42
5.2 PROPUESTA DE INSPECCIÓN DE SUBSISTEMAS BASADA EN TERMOGRAFÍA INFRARROJA.	47
5.2.1 Glosario para la guía de inspección con termografía infrarroja.	47
5.2.2 Certificación de termógrafo para realizar inspección	50

5.2.3 Reconocimiento de la cámara termográfica para realizar la rutina de inspección	50
5.2.4 Inspección previa a la medición	53
5.2.5 Factores que influyen durante la medición	54
5.2.6 Pasos para realizar un registro exitoso	54
6. FALLAS FUNCIONALES DE LOS TRANSFORMADORES ET-217-TX-B-01A Y ET-217-TX-B-01B.	56
6.1 GLOSARIO PARA MANTENIMIENTO DE TRANSFORMADORES ET-217.	56
6.2 RIESGOS INHERENTES AL DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD DE MANTENIMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES	58
6.3 ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL Y HERRAMIENTAS QUE SE DEBEN USAR EN EL DESARROLLO DEL MANTENIMIENTO	59
6.4 FALLAS FUNCIONALES SEGÚN AMEF EN ET-217-TX-B-01A Y ET-217-TX-B-01B	61
6.5 ESTÁNDAR DE MANTENIMIENTO PARA LOS TRANSFORMADORES	61
7. GUÍA DE INSPECCIÓN E LA SUBESTACIÓN ET-217 BASADA EN LA NFPA 70E	69
7.1 PERSONAS AUTORIZADAS PARA REALIZAR LA INSPECCIÓN	69
7.2 COMO ESTABLECER UNA CONDICIÓN DE TRABAJO SEGURA SEGÚN RETIE Y NFPA 70E	70
7.3 SEÑALIZACIÓN DE LA SUBESTACIÓN ET-217 SEGÚN NFPA 70E	72
8. CONCLUSIONES	75
BIBLIOGRAFÍA	76

ÍNDICE DE TABLAS.

Pág.

Tabla 1 Principales plantas de la refinería Barrancabermeja.....	26
Tabla 2 Cargas a la Unidad de Hidrotratamiento de Gasolina, Corrida Normal.....	27
Tabla 3. Preguntas Fundamentales de la Metodología RCM	29
Tabla 4 Subsistemas que afectan la operación de los transformadores ET-217-TX-B-01A y ET-217-TX-B-01B.	41
Tabla 5 Frecuencia de fallos por interruptor.	43
Tabla 6 Puntuación según frecuencia de fallos.....	43
Tabla 7 Pérdida de transferencia de potencia.	43
Tabla 8 Intervalos para evaluar el impacto en la transmisión de energía.	44
Tabla 9 Intervalos para tiempo promedio para reparar.	44
Tabla 10 Intervalos para evaluar el costo de mantenimiento.	45
Tabla 11 Intervalos para evaluar el impacto en la seguridad del personal.	45
Tabla 12 Intervalos para evaluar el impacto ambiental.....	46
Tabla 13 Intervalos de evaluación de criticidad en interruptores.	46
Tabla 14 Niveles de certificación para termógrafos.	50
Tabla 15 Inspección inicial del tablero de baja tensión.....	53
Tabla 16 Riesgos de la actividad	59
Tabla 17 Estándares de los equipos de protección.	60
Tabla 18 Estándares de herramientas, según NFPA 70E	60
Tabla 19 AMEF de transformadores ET-217-TX-B-01A Y ET-217-TX-B-01B	61
Tabla 20 Características de las instalaciones de los transformadores.	62
Tabla 21 Competencias de ejecutores y cumplimiento normativo.	62
Tabla 22 Registro de análisis físico químico.	66
Tabla 23 Análisis cromatógrafo ASTM D-3612.....	66
Tabla 24 Verificación de los transformadores.....	67
Tabla 25 Resistencia aislamiento	67
Tabla 26 Relación de transformación.	67

Tabla 27 Resistencia devanados.....	68
Tabla 28 Resistencia del SPAT	68

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Subestación ET-217	22
Figura 2 ET-217-TX-B-01A y ET-217-TX-B-01B.....	23
Figura 3 Diagrama unifilar simplificado de planta HDT.	24
Figura 4. Rol del AMEF en un Sistema de Calidad.....	31
Figura 5 Fallas en subsistemas de la subestación ET-217.....	40
Figura 6 Identificación de subsistemas subestación ET-217.	41
Figura 7 Subsistemas de la subestación ET-217.....	42
Figura 9 Lente cámara termográfica FLIR T440.	51
Figura 10 Pantalla cámara termográfica FLIR T440.	51
Figura 11 Controles cámara termográfica FLIR T440.....	52
Figura 12 FOV e IFOV	52
Figura 13 IFOV Calculadora FLUKE.....	53
Figura 14 Dimensiones de la celda para realizar inspección termográfica.	55
Figura 15 Puesta a tierra y cortocircuito de transformadores.	64
Figura 16 Aspectos para asegurar una buena inspección según NFPA 70E.	69
Figura 17 Diagramas unifilares subestación ET-217.	70
Figura 18 Candados y etiquetas de la subestación ET-217.....	71
Figura 19 Elementos de protección personal subestación ET-217.....	71
Figura 20 Herramientas de subestación ET-217.....	72
Figura 21 Señalización de celdas en subestación ET-217.	73

GLOSARIO

ACTIVIDAD INTRUSIVA: Son acciones realizadas en las fases de instalación, operación y/o mantenimiento, que para ejecutarlas requieren intervenir la integridad del diseño de las instalaciones, planta y/o equipos, con la posibilidad de liberar la energía presente, que pueda materializar los riesgos asociados al activo y exige la aplicación del sistema de seguro de plantas y equipos antes de proceder con su ejecución. La misma acción de instalación y retiro del aislamiento se considera actividad intrusiva.

CAUSA INMEDIATA: Circunstancia que se presenta justamente antes del contacto, por lo general son observables o se hacen sentir. Se clasifican en condiciones inseguras o actos sub-estándar.

CAUSA BÁSICA: Hecho real que se manifiesta detrás de los síntomas y razón por la cual ocurren los actos o condiciones inseguras.

CONSECUENCIAS: Evento o cadena de eventos con efectos reales o hipotéticos, inmediatos o no, sobre las personas, la economía, el ambiente y la imagen, que puede producirse a raíz de la liberación de un peligro y dentro de una situación hipotética creíble.

CONTROLES: Son los controles pro-activos que se deben implementar para evitar que se den las causas de liberación de los peligros, como por ejemplo: emplear personal competente, usar las herramientas adecuadas, etc.

ESPECIFICACIÓN TÉCNICA: Documento que establece características técnicas de un producto o servicio.

HAZOP: Es una técnica de identificación de riesgos inductiva basada en la premisa de que los riesgos, los accidentes o los problemas de operabilidad¹.

INCIDENTE: Accidente sin consecuencias reales o con consecuencias potenciales.

IMPERICIA: Falta de habilidad para desarrollar una tarea.

IMAC: Integridad mecánica y aseguramiento de calidad. El aseguramiento y el cumplimiento de los elementos de la integridad mecánica (IMAC) provienen de la ocurrencia de pérdidas de contención, de fluidos peligrosos o energía mediante la aplicación sistemática con calidad de normas, estándares, procedimientos y guías en todas las etapas del ciclo de vida de un activo (diseño, construcción, suministro, instalación, operación, mantenimiento y disposición final).

MANTENIMIENTO: Conjunto de acciones o procedimientos tendientes a preservar o restablecer un bien, a un estado tal que le permita operar en forma confiable y segura.

SPRING HANGER: Soporte de resorte que se instala en líneas calientes normalmente de hornos y calderas.

SEÑALIZACIÓN: Conjunto de actuaciones y medios dispuestos para reflejar las advertencias de seguridad en una instalación.

PELIGRO: Es una fuente, elemento, condición o situación que tiene el potencial de causar daño a las personas (lesión o enfermedad), la economía, equipos, el medio ambiente o la imagen.

¹ HAZOP, [en línea]. [Citado 10 Mayo 2019]. Disponible en internet https://www.unizar.es/guiar/1/Accident/An_riesgo/HAZOP.htm

RESPONSABLES: Es la persona responsable de ejecutar el control establecido.

RIESGO: Producto de combinar la probabilidad de que un evento específico indeseado ocurra con la gravedad de las consecuencias del mismo.

RBI: La Inspección basada en Riesgos (**RBI**) es un proceso que identifica, evalúa y realiza un mapeo de los riesgos industriales (debido a corrosión y grietas por esfuerzo), los cuales pueden comprometer la integridad del equipo, tanto en equipo presurizado como en elementos estructurales²

RCA: El análisis de causa raíz (ACR) se utiliza para investigar cuáles son las causas que han originado un determinado problema o incidencia (ej: no conformidades). Determinar bien las causas raíz de una incidencia es imprescindible para poder definir acciones correctivas apropiadas que la solventen y que eviten la repetición del problema en el futuro³.

RCM: Reliability Centred Maintenance, (Mantenimiento Centrado en Fiabilidad/Confiabilidad) es una técnica más dentro de las posibles para elaborar un plan de mantenimiento en una planta industrial y que presenta algunas ventajas importantes sobre otras técnicas⁴.

² RBI [en línea]. [Citado 10 Mayo 2019]. Disponible en internet http://www.bureauveritas.com.mx/services+sheet/service_sheet_10514

³ RCA [en línea]. [Citado 10 Mayo 2019]. Disponible en internet <http://www.pdcahome.com/7642/analisis-de-causa-raiz-metodologia-para-investigar-y-resolver-incidencias/>

⁴ RCM [en línea]. [Citado 10 Mayo 2019]. Disponible en internet <http://www.mantenimientopetroquimica.com/rcm.html>

RESUMEN

TÍTULO: Desarrollo de un plan de mantenimiento preventivo, para los transformadores ET-217-TX-B-01A y ET-217-TX-B-01B de 15 MVA sumergidos en aceite de la planta HDT de la refinería Barrancabermeja, utilizando la metodología RCM*.

AUTOR(ES): Saúl Andrés García Carrillo, Cesar Augusto Benavidez Álvarez **

PALABRAS CLAVES: Transformador, RCM, Aislamiento, Termografía, Arco eléctrico.

DESCRIPCIÓN

Este proyecto de grado presenta un plan de mantenimiento para los transformadores ET-217-TX-B-01A y ET-217-TX-B-01B de la planta HDT de la refinería Barrancabermeja, inicialmente presentando la caracterización y función de los subsistemas que componen la subestación ET-217 dejando una guía para determinar la criticidad de los interruptores y un procedimiento para realizar inspecciones termográficas; después de esto se elabora un estándar de mantenimiento que involucra una serie de actividades orientadas a mantener la operación realizando acciones preventivas en los elementos que fueron identificados en el AMEF, finalmente se presenta un plan de inspección utilizando como línea guía los parámetros establecidos en la NFPA 70E, RETIE y NTC 2050.

* Monografía.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento, Director: *.

SUMMARY

TITLE: Development of a preventive maintenance plan for transformers ET-217-TX-B-01A and ET-217-TX-B-01B of 15 MVA submerged in oil from the HDT plant of the Barrancabermeja refinery, using the RCM methodology.*

AUTHORS: Saúl Andrés García Carrillo, Cesar Augusto Benavidez Álvarez**

KEYWORDS: Transformer, RCM, Isolation, Thermography, Electric arc.

DESCRIPTION: This degree project presents a maintenance plan for transformers ET-217-TX-B-01A and ET-217-TX-B-01B of the HDT plant of the Barrancabermeja refinery, initially presenting the characterization and function of the subsystems that they compose the substation ET-217 leaving a guide to determine the criticality of the switches and a procedure to perform thermographic inspections; after this a maintenance standard is elaborated that involves a series of activities oriented to maintain the operation performing preventive actions in the elements that were identified in the AMEF, finally an inspection plan is presented using as guideline the parameters established in the NFPA 70E, RETIE and NTC 2050.

* Monograph

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Specialization in Maintenance Management, Director:

INTRODUCCIÓN

Colombia como país en vía de desarrollo no se ha quedado atrás del desarrollo y progreso Industrial. En el plano de la electricidad se tiene que se generó en sus inicios por combustibles fósiles, siendo el kerosene y la gasolina, los más relevantes dentro de la población. En 1889, se constituye en Bogotá la primera empresa eléctrica del país: Bogotá Electric Light Co, a ésta le siguieron en Bucaramanga, la Compañía Eléctrica de Bucaramanga en 1981, que construyó la Planta Chitotá sobre el río Surata, la primera hidroeléctrica del país, posteriormente en Medellín, en 1895, la Compañía Antioqueña de Instalaciones Eléctricas, antecesora de EPM, con capital aportado en partes iguales por el Departamento, el municipio y empresarios privados, en Cali, en 1910, la Cali Electric Light & Power Co., de la familia Eder, que construyó una planta hidroeléctrica sobre el río de Cali, nuevamente en Bogotá, en 1920, la compañía Nacional de Electricidad, remonta antecesora de la Empresa de Energía de Bogotá, en 1909, la compañía Colombiana de Electricidad, filial de la estadounidense American and Foreign Power Company, que prestaría el servicio en varios municipios de la costa Atlántica y se nacionalizaría en 1962 ³. No demoró el estado en hacer intervención, a través de la creación del Ministerio de Minas y Energía creado a raíz de la Segunda Guerra Mundial (1939-1945), momentos en los cuales surgieron problemas de orden económico que repercutieron directamente en el progreso de Colombia. Ante esta situación el Gobierno Nacional diseñó un plan para la defensa y el fomento de las empresas e industrias existentes; el aprovechamiento de los recursos naturales y el desarrollo de otras fuentes de producción. Fue así como mediante Decreto 968 del 18 de mayo de 1940 se crea el Ministerio de Minas y Petróleos y se modifica la organización del Ministerio de la Economía Nacional⁵.

⁵ República de Colombia. Ministerio de Minas y Energía.

Por otra parte, en 1985 fue aprobado El Código Eléctrico Colombiano o Norma Técnica Colombiana 2050. El cual es una normatividad traducida, resumida y basada en National Electrical Code, NEC expedida en 1996, el cual es el código preeminente en materia eléctrica de los Estados Unidos. Sin lugar a dudas, el Código Eléctrico Colombiano representa una herramienta fundamental para el sector eléctrico nacional en general y para los profesionales que se desempeñan en esta área, ya que establece los requisitos que unos deben solicitar y otros deben aplicar, brindando transparencia en los procesos de contratación y calidad en la ejecución de los trabajos, todo enfocado al beneficio de los clientes, y usuarios en todos los niveles⁶.

La National Fire Protection Association (NFPA) en alianza con la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) como han descrito estipulaciones que se de protección específica a los trabajadores contra los riesgos y peligros eléctricos en el lugar de trabajo. Cabe resaltar principalmente la norma que la NFPA 70E la cual es una regulación de seguridad de consenso nacional publicada por la NFPA principalmente para ayudar a la OSHA a elaborar normas de seguridad eléctrica. La OSHA federal no la ha incorporado en el Código de Regulaciones Federales, sin embargo, la NFPA 70 E abarca el abordaje de problemas de seguridad eléctrica incluyendo las prácticas laborales, el mantenimiento, los requisitos de equipos especiales y la instalación. La NFPA publicó la edición 2012 de la norma NFPA 70E. Esta es la novena edición de la norma de seguridad eléctrica⁷. Teniendo en cuenta lo esbozado anteriormente, no queda duda del avance teórico, y productivo de normas y reglamentos que contribuyen al progreso de estandarización industrial. No obstante, la producción científica no se ha quedado estancada sino que día a día crece favoreciendo el cambio y la evolución de paradigmas existentes. Es así como haciendo referencia, específicamente al campo de la industria eléctrica, aparecen, diferentes metodologías reguladas por las estipulaciones anteriormente

⁶ República de Colombia. Ministerio de Minas y Energía. Norma Técnica Colombiana 2050.

⁷National Fire Protection Association. www.nfpa.org

mencionadas, las cuales, contribuyen al mejoramiento, potenciación y estandarización en la línea mundial, principalmente de los procedimientos de mantenimiento en máquinas, equipos y plantas industriales; las cuales sitúan gran relevancia en la actualidad, pues son el eje central de la industria, por ende, el núcleo de los procesos de desarrollo y avance de una sociedad. Por tanto, se deben implementar recursos y procedimientos para mantener en funcionamiento las máquinas, equipos y plantas industriales garantizando de esta manera la vitalidad de la industria, la producción y así el crecimiento económico. Por último, se tiene que el avance científico y tecnológico sobre este procedimiento básico tiende a la optimización del proceso, por tanto, actualmente se propone no solo el mantenimiento preventivo de máquinas plantas y equipos, sino el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, más conocido por sus siglas como RCM.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La planta de hidrotratamiento de la refinería Barrancabermeja fue concebida en pro de cumplir con la resolución 1180 del gobierno Colombiano, aportando significativamente a la reducción en los niveles de azufre en diésel y gasolina a 50ppm y 300ppm respectivamente. La operación de esta planta es de suma importancia ya que elevados niveles de azufre generan impactos ambientales porque al combinarse con el oxígeno generara óxidos y cuando estos son liberados al aire reaccionan químicamente con el vapor de agua de la atmosfera, formando ácido sulfúrico, nítrico y carbónico que son conocidos como lluvia acida lo que puede perjudicar la calidad biológica de bosques, suelos, lagos y arroyos (Rivas, 2006), por esta razón el suministro de energía eléctrica a través de la subestación ET-27 (ver figura 1) que alimenta todos los componentes que hacen parte del proceso de HDT, mediante los transformadores ET-217-TX-B-01A y ET-217-TX-B-01B (ver figura 2) cobra fuerza.

Figura 1 Subestación ET-217



Fuente: Subestación ET-217, Refinería Barrancabermeja.

Figura 2 ET-217-TX-B-01A y ET-217-TX-B-01B



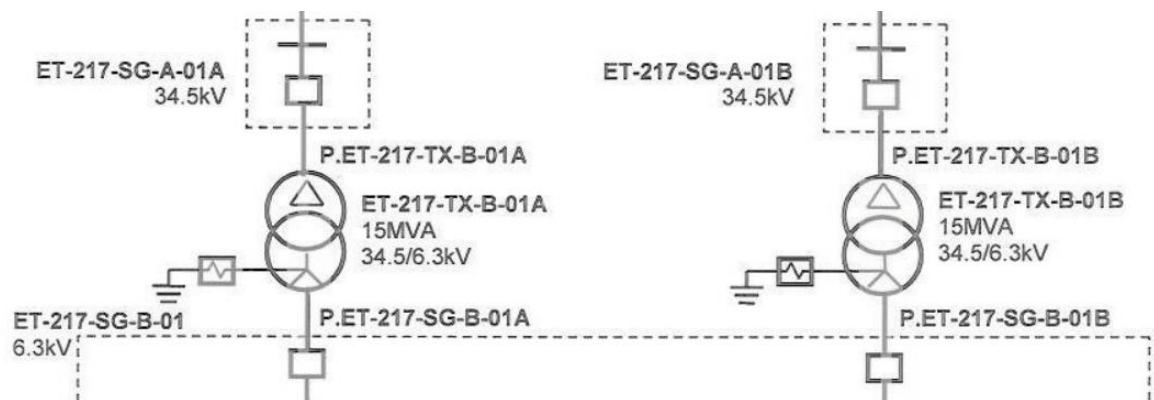
Fuente: Transformadores subestación ET-217, Refinería Barrancabermeja.

Sin embargo, es necesario aclarar cuáles son los criterios precisos y fáciles de entender que permitan deducir tareas técnicamente fiables para definir quién debería hacerlas y con qué frecuencia, esto para garantizar que ellos cumplen la función de reducir el nivel de tensión de 34.5kV a 6.3kV y de esta forma evitar paradas de planta inesperadas. Pensando en esto se plantea la siguiente pregunta de investigación ¿Cómo sería posible identificar los criterios que permitan que los transformadores ET-217-TX-B-01A y ET-217-TX-B-01B de la subestación ET-27 cumplan la función para la cual fueron implementados de una manera segura y confiable? El desarrollo de esta monografía dará respuesta a esta pregunta ya que su desarrollo dará como resultado la creación de un plan de mantenimiento para estos transformadores basado en la metodología RCM y a su vez se elaborara una guía de inspección basada la NFPA 70E llamada “STANDARD for Electrical safety in the Workplace”

2. JUSTIFICACIÓN

De acuerdo a lo indicado en la figura 3 es claro que ante una falla funcional en los transformadores ET-217-TX-B-01A y ET-217-TX-B-01B se pondría en riesgo la operación de la planta HDT lo que podría traer como consecuencia aumento en los niveles de azufre en gasolina y diésel; como consecuencia de ello graves problemas medio ambientales, esta razón contribuye a la justificación de realizar un proyecto que permita desarrollar un plan de mantenimiento preventivo, para los transformadores ET-217-TX-B-01A y ET-217-TX-B-01B de 15 MVA sumergidos en aceite de la planta HDT de la refinería Barrancabermeja, utilizando la metodología RCM.

Figura 3 Diagrama unifilar simplificado de planta HDT.



Fuente: Anexo I, proyecto HDT-GCB Ecopetrol S.A.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un plan de mantenimiento preventivo, para los transformadores ET-217-TX-B-01A y ET-217-TX-B-01B de 15 MVA sumergidos en aceite de la planta HDT de la refinería Barrancabermeja, utilizando la metodología RCM.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Elaborar un listado de los subsistemas que componen la subestación ET-217, para identificar las funciones de cada uno de ellos, a través de diagramas o planos de la planta HDT de la refinería Barrancabermeja.

Identificar las fallas funcionales de los transformadores ET-217-TX-B-01A y ET-217-TX-B-01B, para elaborar un STANDARD JOB, mediante el desarrollo de un análisis de modo y efecto de falla o AMEF.

Elaborar una guía de inspección de la subestación ET-217, para asegurar áreas de trabajo seguras utilizando la NFPA 70E.

4. ANÁLISIS DE LA LITERATURA.

Según lo indica el manual de descripción de proceso de la unidad de hidrotratamiento de gasolina U-4750 de la refinería Barrancabermeja, las principales plantas que componen el complejo industrial se presentan en la tabla 1.

Tabla 1 Principales plantas de la refinería Barrancabermeja.

Cantidad de plantas	Plantas
5	Destilación atmosférica de crudo.
4	Destilación al vacío de crudo
4	Ruptura catalítica
2	Viscorreductora
1	Demex
3	Hidrotratamiento.

Fuente: Manual de descripción de proceso de la unidad de hidrotratamiento de gasolina U-4750 de la refinería Barrancabermeja, p. 50.

4.1 HISTORIA DE LA UNIDAD.

A inicios del año 2000 se arranca el estudio para la construcción de las unidades de Hidrotratamiento para Diesel y Naftas, en el 2007 inicia la adecuación de terrenos, en el 2008 se realiza la parte civil y adecuación de estructuras metálicas y en concreto. A principios del 2009 se realiza el montaje de los primeros equipos y ya a finales (diciembre) se colocan en marcha exitosamente todas las unidades. La Tabla 2 Cargas a la Unidad de Hidrotratamiento de Gasolina, Corrida Normal, presenta las materias primas que ingresan a esta unidad dentro de la operación normal de hidrotratamiento de la nafta, con sus respectivos orígenes.

Tabla 2 Cargas a la Unidad de Hidrotratamiento de Gasolina, Corrida Normal

Cargas	Origen
(Nafta Cracking ORTHOFLOW)	Proviene de la T-554 de la Unidad de Cracking Orthoflow
(Nafta Cracking MODELO IV)	Proviene de la T-305 de la Unidad de Cracking Modelo IV
(Nafta Cracking UOP 1)	Tanque de Almacenamiento K-6A/K-6B
(Nafta Cracking UOP 2)	Hidrógeno Unidad de Generación de Hidrógeno U-4650

Fuente: Manual de descripción de proceso de la unidad de hidrotratamiento de gasolina U-4750 de la refinería Barrancabermeja, p. 60.

4.2 INICIOS Y EVOLUCIÓN DEL RCM

En los últimos años, se ha experimentado un crecimiento explosivo de nuevos conceptos y técnicas de mantenimiento. Cientos de ellos han sido desarrollados en los últimos 20 años, emergiendo aún más a medida que avanza el tiempo. Ya se ha mencionado las tres generaciones por las cuales ha pasado el mantenimiento, así como los retos y el progreso que en cada una se ha mencionado (Moubray, 2000.). No obstante, es importante mencionar los nuevos desarrollos, los cuales incluyen:

- Herramientas de soporte para la toma de decisiones, tales como el estudio de riesgo, análisis de modos de falla y sus efectos y sistemas expertos.
- Nuevos métodos de mantenimiento, tal como el monitoreo de condición.
- Diseño de equipos, con un mayor énfasis en la confiabilidad y facilidad para el mantenimiento.
- Un drástico cambio en el modo de pensar la organización hacia la participación, trabajo en grupo y flexibilidad.

En ese orden de ideas, el personal de mantenimiento enfrenta el desafío de aprender estas nuevas técnicas y discernir cuales valen la pena y cuáles no para sus propias organizaciones. Ahora bien, como ya se ha dicho, la primera industria

que enfrentó estos desafíos fue la industria de la aviación comercial. El elemento crucial que provocó esta reacción, fue el darse cuenta que se debe dedicar tanto esfuerzo en asegurarse que se están realizando las tareas correctamente como en asegurarse que se están haciendo las tareas correctas. El darse cuenta de esto dio lugar al desarrollo de procesos de tomas de decisión comprensivos que se conocieron dentro de la industria aeronáutica con el nombre de MSNG3 y fuera de esta como Mantenimiento Centrado en Confiabilidad o RCM. En casi todos los campos de esfuerzos humanos organizados y sin lugar a dudas en el campo industrial mundial, se está volviendo fundamental para la custodia responsable de los activos físicos. Y aunque no existe ninguna otra técnica comparable para determinar la cantidad mínima segura de tareas que deben ser hechas para preservar las funciones de los activos físicos, especialmente en situaciones críticas o peligrosas, el creciente reconocimiento mundial del papel fundamental que juega el RCM en la formulación de las estrategias de administración de activos físico en el campo industrial y la importancia de aplicar RCM correctamente, condujo a la American Society of Automotive Engineers a publicar la norma SAEJA1011, titulada: Criterio de Evaluación del Proceso de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, RCM, la cual es indispensable al aplicar esta metodología de última generación. Por otra parte, desde el punto de vista de la ingeniería hay dos elementos que se hacen indispensables al manejar cualquier activo físico, sea este equipo, sistema, máquina o planta. En primera medida el mantenimiento, el cual hace referencia a la preservación, por tanto, se espera que con este proceso el asegurar que los activos físicos de la industria continúen haciendo lo que sus usuarios quieren que hagan. No obstante, los requerimientos de los usuarios van a depender de dónde y cómo se utilice el activo, es decir del contexto operacional. Esto lleva a la siguiente definición formal, no de mantenimiento únicamente sino de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad: “Proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual”.

4.3 LAS SIETE PREGUNTAS BÁSICAS DE LA METODOLOGÍA RCM

El o mantenimiento Centrado en confiabilidad o RCM (Reliability Centred Maintenance) como procedimiento utilizado para decidir lo que se debe hacer para asegurar que un sistema, máquina, o proceso continúe funcionando dentro de su contexto cotidiano operacional, reconoce que es necesario emplear tareas proactivas para eliminar los eventos que causan fallas. Los efectos de fallas y sus consecuencias en las operaciones, seguridad y medio ambiente son evaluados para priorizar las tareas de mantenimiento proactivo. La seguridad del ser humano es vital para la metodología RCM, y por ello representa y presenta un esfuerzo por predecir lo que podría suceder (Lyda, 2010), es por ello, que desarrolla, siete preguntas esenciales sobre el sistema, activo, equipo o planto de estudio, se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Preguntas Fundamentales de la Metodología RCM

	Pregunta Básica	Eje Evaluativo
1	¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional?	Funciones Parámetros de funcionamiento Contexto operacional
2	¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?	Falla
3	¿Cuál es la Causa de cada falla funcional?	Causa
4	¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?	Efectos
5	¿En qué sentido es importante cada falla?	Consecuencias
6	¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?	Proactivo
7	¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?	Correctivos

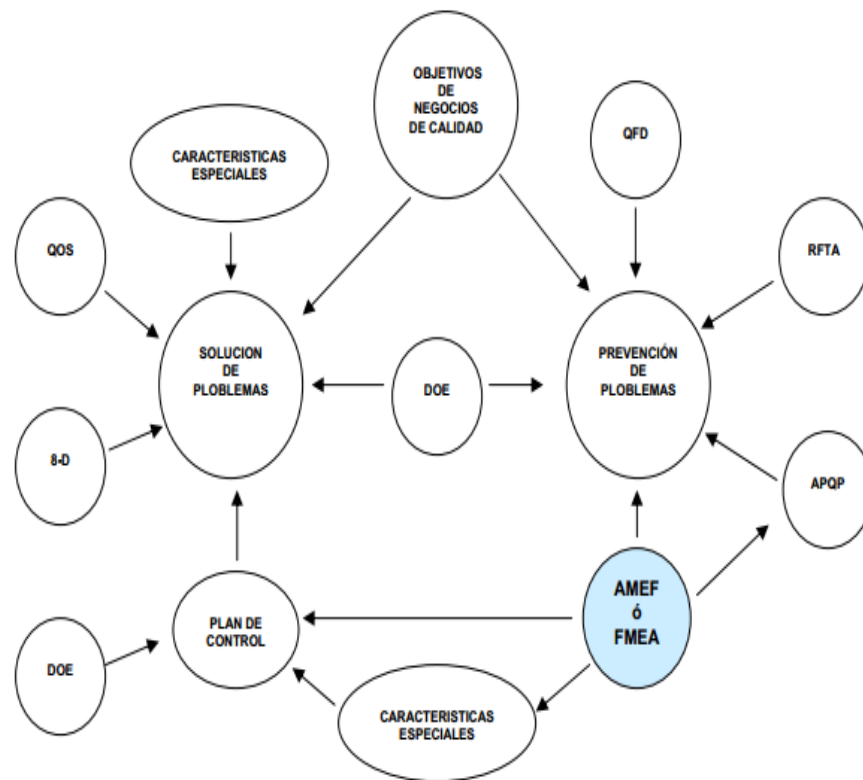
Fuente: (Lyda, 2010)

4.4 AMEF – ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA.

La disciplina del AMEF fue desarrollada en el ejercito de los Estados Unidos de Norteamérica por los ingenieros de la National Aeronautics and Space Administration. Con base en un procedimiento militar (MIL-P-1629) denominado "Procedimiento para la Ejecución de un Modo de Falla, Efectos y Análisis de criticidad". empleado como una técnica para evaluar la confiabilidad y determinar los efectos de las fallas de los equipos y sistemas, en el éxito de la misión y la seguridad del personal o de los equipos. Este procedimiento fue elaborado el 9 de noviembre de 1949. El AMEF es un método utilizado ampliamente utilizado dentro de los sistemas de calidad, que hoy por hoy, se imponen contundentemente en el mundo moderno. Y como todos métodos de mejora y calidad el AMEF busca la mejora continua de diversas formas. Es por eso que las acciones que se realizan en muchas ocasiones son implícitas, ya que se introducen con éxito diariamente como fruto de la perseverancia por hacer cada vez mejor las cosas. También, de manera explícita se expresa en forma organizada con una planeación y metodología ajustada a las necesidades de cada organización (American Supplier Institute, 1993). En 1988 la Organización Internacional para la Estandarización (ISO), publicó la serie de normas ISO 9000 para la gestión y el aseguramiento de la calidad (ver figura 4); los requerimientos de esta serie llevaron a muchas organizaciones a desarrollar sistemas de gestión de calidad enfocados hacia las necesidades, requerimientos y expectativas del cliente, entre estos surgió el área automotriz QS 9000. Por lo tanto, Chrysler Corporation, Ford Motor Company y General Motors Corporation enriquecieron esta metodología en un esfuerzo para estandarizar los sistemas de calidad de los proveedores; teniendo que emplear Planeación de la Calidad del Producto Avanzada (APQP), que necesariamente debe incluir al AMEF de diseño y de proceso, así como también un plan de control. En diciembre de 1992, el grupo acción automotriz industrial (AIAG) termina el manual de referencia y en febrero de 1993 junto con la Sociedad Americana para el Control de Calidad (ASQC) registraron las normas de AMEF para su implementación en la industria. Estas

normas son el equivalente al procedimiento técnico de la Sociedad de Ingenieros Automotrices SAE J - 1739. Los estándares son presentados en el manual de AMEF aprobado y sustentado por la Chrysler, Ford y General Motors; este manual proporciona lineamientos generales para la preparación y ejecución del AMEF. Actualmente, el AMEF se ha popularizado en todas las empresas automotrices americanas y ha empezado a ser utilizado en diversas áreas de una gran variedad de empresas a nivel mundial (Hernández, 2005).

Figura 4. Rol del AMEF en un Sistema de Calidad



Fuente: American Supplier Institute, Inc. Dearborn Michigan. "ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA (AMEF), MANUAL

Así, el análisis del modo y efectos de las fallas potenciales, AMEF, es un proceso sistemático para la identificación de las fallas potenciales del diseño de un producto o de un proceso antes de que éstas ocurran, con el propósito de eliminarlas o de

minimizar el riesgo asociado a las mismas. Por lo tanto, el AMEF puede ser considerado como un método analítico estandarizado para detectar y eliminar problemas de forma sistemática y total, cuyos objetivos principales son:

- Identificar, definir, priorizar y eliminar fallas conocidas y/o potenciales de un sistema, diseño o proceso de manufactura, antes de que lleguen al cliente.
- Reconocer y evaluar los modos de fallas potenciales y las causas asociadas con el diseño y manufactura de un producto.
- Determinar los efectos de las fallas potenciales en el desempeño del sistema
- Identificar las acciones que podrán eliminar o reducir la oportunidad de que ocurra la falla potencial
- Analizar la confiabilidad del sistema
- Documentar el proceso.
- AMEF puede estar enfocado a tres tipos de aplicaciones específicamente, como son:
 - El AMEF de Concepto tiene como alcance plasmar la percepción del sistema, subsistema o componente.
 - El AMEF de Diseño se usa para analizar un producto al nivel de sistema o subsistema, antes de que se libere para la producción.
 - El AMEF de Proceso es utilizado para analizar las etapas en la fabricación, montaje y los planes de control resultantes.

4.5 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR ELÉCTRICO

El principio de funcionamiento del transformador está basado La ley de Lenz, la cual hace referencia a las corrientes inducidas, lo cual significa que se aplica sólo circuitos conductores cerrados, por ende, aparece el principio físico de la inducción electromagnética (Resnik, 1982). En su forma más simple, un transformador consiste en dos devanados conductores que se ejercen inducción mutua. El primario

es el devanado que recibe la potencia eléctrica y el secundario es el que puede entregarla a una red exterior. Los devanados suelen estarlo sobre un núcleo laminado de material magnético, o constituido por una elación pulverizada y comprimida y entonces se habla de un transformador con núcleo de hierro. A veces, como ocurre en muchos transformadores de radiofrecuencia, no hay núcleo alguno y se dice que se trata de un transformador con núcleo de aire. En otros tipos, como ocurre en la bobina de inducción el núcleo puede estar constituido por un haz compacto de alambres fino de hierro, constituyendo el aire el camino de retorno para el flujo magnético. Otros ejemplos de esta construcción abierta se encuentran en los transformadores utilizados en teléfonos y algunos tipos de transformadores de radiofrecuencia (MIT, 1965). Sobre la teoría elemental del transformador puede decirse que cuando se desprecian las corrientes de desplazamiento debidas a las capacidades de los devanados, los principios fundamentales a partir de los cuales se desarrolla la teoría de los transformadores vienen expresados por las siguientes ecuaciones 1 y 2.

Ecuación 1. Voltaje del primario.

$$v_1 = R_1 * i_1 + \frac{d\lambda_1}{dt} = R_1 * i_1 + e_1$$

Ecuación 2. Voltaje del secundario.

$$v_2 = R_2 * i_2 + \frac{d\lambda_2}{dt} = R_2 * i_2 + e_2$$

Fuente: Massachusetts Institute of Technolo.1965.Circuitos Magnéticos y Transformadores.Reverté Ediciones

Donde los subíndices 1 y 2 se refieren a los devanados primario y secundario:

- v_1 y v_2 son las tensiones instantáneas terminales

- i_1 e i_2 son las intensidades instantáneas de las corrientes
- R_1 y R_2 son las resistencias efectivas
- λ_1 y λ_2 son los flujos instantáneos que atraviesan todas las espiras de primario y secundaria
- e_1 y e_2 Son las tensiones instantáneas inducidas en primario y secundario por los flujos variables con el tiempo

4.6 CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES SEGÚN EL TIPO DE ENFRIAMIENTO

Existen los sumergidos en aceite y el tipo seco. Entre los sumergidos en aceite se tienen:

- **Tipo OA:** Tiene enfriamiento natural, en estos transformadores el aceite aislante circula por convección natural dentro de un tanque que tiene paredes lisas o corrugadas o bien con tubos radiadores. Esta solución se adopta para transformadores de más de 50 kVA con voltajes superiores a 15 kV.
- **Tipo OA/ FA:** Transformador sumergido en líquido aislante con Enfriamiento propio y con enfriamiento por aire forzado Este tipo de transformadores es básicamente una unidad OA a la cual se le han agregado ventiladores para aumentar la disipación del calor en las superficies de enfriamiento y por lo tanto, aumentar los kVA de salida.
- **Tipo OA/ FA / FOA:** Transformador sumergido en líquido aislante con enfriamiento propio/con aceite forzado - aire forzado/con aceite forzado/aire forzado. Con este tipo de enfriamiento se trata de incrementar el régimen de operación (carga) de transformador tipo OA por medio del empleo combinado de bombas y ventiladores. Se fabrican en capacidades de 10000 kVA monofásicos 15000 kVA trifásicos.

- **Tipo FOA:** Tiene enfriamiento por aceite forzado con enfriadores de aire forzado. El aceite de estos transformadores es enfriado al hacerlo pasar por cambiadores de calor o radiadores de aire y aceite colocados fuera del tanque. Su diseño está destinado a usarse únicamente con los ventiladores y las bombas de aceite trabajando continuamente.
- **Tipo OW:** Tiene enfriamiento por agua. Este tipo de transformador está equipado con un cambiador de calor tubular colocado fuera del tanque, el agua de enfriamiento circula en el interior de los tubos y se drena por gravedad o por medio de una bomba independiente. El aceite fluye, estando en contacto con la superficie exterior de los tubos.
- **Tipo FOW:** Tiene enfriamiento de aceite forzado con enfriadores de agua forzada. El transformador es prácticamente igual que el FOA, excepto que el cambiador de calor es del modelo agua-aceite y por lo tanto el enfriamiento del aceite se hace por medio de agua sin tener ventiladores.

Entre los tipos secos se tienen:

- **Tipo AA:** Transformadores tipo seco con enfriamiento propio, estos transformadores no contienen aceite ni otros líquidos para enfriamiento, el aire es el único medio aislante que rodea el núcleo y las bobinas, por lo general se fabrican con capacidades inferiores a 2000 kVA y voltajes menores de 15 kV.
- **Tipo AFA:** Tipo seco, con enfriamiento por aire forzado. Para aumentar la potencia del transformador AA, se usa el enfriamiento con aire forzado. El diseño comprende un ventilador que empuja el aire en un ducto colocado en la parte inferior del transformador.
- **Tipo AA/FA:** Transformadores tipo seco con enfriamiento natural y con enfriamiento por aire forzado, es básicamente un transformador tipo AA al que se le adicionan ventiladores para aumentar su capacidad de disipación de calor (Pérez, 2001).

4.7 NFPA 70E

La NFPA 70E, por sus siglas Norma Sobre los Requisitos de Seguridad Eléctrica en los Lugares de Trabajo de los Empleados, fue preparada por el Comité Técnico de Requisitos de Seguridad eléctrica en los Lugares de Trabajo, fue aprobada por National Fire Protection Association, Inc., en su Reunión de Noviembre celebrada en Noviembre 14-17, 1999, en New Orleans, LA. Fue publicada por el Consejo de Normas el 14 de Enero de 2000, con fecha oficial efectiva Febrero 11, 2000, y reemplaza todas las ediciones anteriores. Esta edición de NFPA 70E fue aprobada como una Norma Nacional de los Estados Unidos el 11 de Febrero de 2000, así mismo adoptada por Colombia. El propósito de esta norma es proveer de forma práctica un área de trabajo segura a los trabajadores en lo relacionado a peligros que puedan sucitarse del uso de electricidad. Esta norma comprende los requisitos de seguridad eléctrica para los lugares de trabajo de los empleados que son necesarios para la seguridad práctica de ellos en su empleo. Esta norma cubre lo siguiente:

1. Los conductores y equipos eléctricos instalados dentro o en edificios u otras estructuras, incluyendo casas móviles y vehículos recreacionales y otras propiedades como patios, carnavales, lotes de estacionamiento y otros, y subestaciones industriales.
2. Los conductores que conectan la instalación a una fuente de suministro de electricidad.
3. Otros conductores externos a la propiedad.

Esta norma está dividida en las siguientes cuatro partes y dos apéndices:

- Parte I, Requisitos de seguridad de instalación
- Parte II, Prácticas de trabajo relacionadas con la seguridad
- Parte III, Requisitos de mantenimiento relacionados con la seguridad
- Parte IV, Requisitos de seguridad para equipos especiales

- Apéndice A, Tablas, notas y esquemas
- Apéndice B, Publicaciones a las que se hace referencia(NFPA 70E, 2009)

4.8 MARCO CONCEPTUAL

El objetivo del Mantenimiento es conservar todos los bienes que componen los eslabones del sistema directa e indirectamente afectados a los servicios, en las mejores condiciones de funcionamiento, con un muy buen nivel de confiabilidad, calidad y al menor costo posible. Tal como encontramos hoy a las industrias, bajo una creciente presión de la competencia, estas se encuentran obligadas a alcanzar altos valores de producción con exigentes niveles de calidad cumpliendo con los plazos de entrega. Radica justamente aquí la importancia del mantenimiento. La finalidad del mantenimiento entonces 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.

- **Mantenimiento Correctivo:** Mantenimiento realizado sin un plan de actividades, ni actividades de reparación. Es resultado de la falla o deficiencias.
- **Mantenimiento No Programado:** Mantenimiento de emergencia con actividad correctiva, para restaurar un sistema o elemento dejándolo en condiciones de operación.
- **Mantenimiento en Condiciones:** Inspecciones de las características que cuentan con un alto riesgo de falla, además de aplicación del mantenimiento preventivo después de la alerta de riesgo, pero antes de la falla total.
- **Mantenimiento Preventivo:** Realizar actividades con la finalidad de mantener un elemento en una condición específica de operación, por medio de una inspección sistemática, detección y prevención de la falla inminente.
- **Mantenimiento Programado:** Acciones previamente planeadas para mantener un elemento en una condición específica de operación.

5. SUBSISTEMAS DE LA SUBESTACIÓN ET-217

Autores como (Améndola, 2003), (Cabrera, 2005) y (Díaz, 2012) indican que a medida que ha evolucionado la tecnología de los interruptores de potencia para subestaciones, se han realizado análisis de su comportamiento y de su confiabilidad operacional. En las investigaciones realizadas por estos autores definiendo la confiabilidad operacional como la capacidad de una instalación o sistema, para cumplir su función dentro de los límites de diseño en el contexto operacional específico de sus procesos y de su tecnología; adicional a ello en la “International Conference on High Voltage Engineering and Application” el autor M. Al-Suhaily indica que para el caso de las subestaciones, si se realiza el análisis en su totalidad se utilizan los conjuntos de corte, mientras que si es por elementos se usan análisis de criticidad y modelos de estimación estadística que dependen del tipo de datos disponibles. Entre los modelos de estimación estadística se encuentran los denominados Proceso Ordinario de Restauración (POR) y Proceso Generalizado de Restauración (PGR), mientras que para el análisis de criticidad se pueden usar las normas 1629A y Norsok Z-013.

5.1 GUÍA PARA DETERMINAR FUNCIÓN Y CRITICIDAD DE SUBSISTEMAS ET-217

5.1.1 Glosario para guía según Norsok Z-013.

Alta Criticidad: Fallas que pueden causar lesiones severas al personal, daños mayores propiamente dichos, o que induzcan daños al sistema que signifiquen la pérdida de la misión.

Mediana Criticidad: Fallas que pueden causar lesiones menores, daños menores propiamente dichos, o que induzcan daños menores al sistema que provoquen retrasos, pérdida de disponibilidad o degradación de la misión.

Baja Criticidad: Fallas que no causan lesiones al personal, ni daños al sistema. Aunque puedan generar actividades de mantenimiento no programado o reparaciones.

Frecuencia de fallos: La frecuencia de fallos de un interruptor es la cantidad de fallos del mismo en un período de un año.

Transferencia de potencia por el interruptor: Es el impacto que puede ocasionar un fallo del interruptor en la transmisión de energía.

Impacto de la transmisión de energía: Se tiene en cuenta la transferencia de flujo de carga mediante los interruptores de acuerdo con su ubicación en la subestación, y está en función de la redistribución necesaria al desconectar una línea determinada, por lo que diferentes cargas pueden quedar sin servicio, provocando pérdidas económicas por desconexiones no planificadas

Tiempo promedio para reparar: El tiempo promedio para reparar es la medida de la distribución del tiempo de reparación de un equipo o sistema.

Costo del mantenimiento: Los costos del mantenimiento parcial de los interruptores de potencia varían principalmente con el tiempo en que se realice el mantenimiento en la subestación y por el uso de materiales específicos de acuerdo con el tipo de subestación y su ubicación.

Impacto en la seguridad personal: El impacto en la seguridad personal considera la posibilidad de la ocurrencia de eventos no deseados que ocasionen daños al personal al ocurrir un fallo, por ejemplo, en el caso de la explosión de un interruptor que afecte al personal de operación o de mantenimiento.

Impacto ambiental: El impacto ambiental considera la posibilidad de ocurrencia de eventos no deseados con daños al medio ambiente como consecuencia de la ocurrencia de un fallo.

5.1.2 Caracterización y función de subsistemas de la subestación ET-217. Los elementos que afectan la función de los transformadores ET-217-TX-B-01A y ET-217-TX-B-01B serán los subsistemas analizados durante este trabajo de investigación, esta decisión se basa en lo indicado en el manual “Eliminación de malos actores GCB – Fase III” durante la elaboración de un Análisis de Causa Raíz o RCA es necesario identificar todas las posibles causas que los subsistemas pueden presentar y que traen como resultado que los transformadores no cumplan su función, por esta razón se realizó el diagrama de la figura 5. La función de estos elementos se presenta en la tabla 4 basado en la ubicación de cada uno de ellos en el diagrama unifilar presentado en la figura 6.

Figura 5 Fallas en subsistemas de la subestación ET-217.

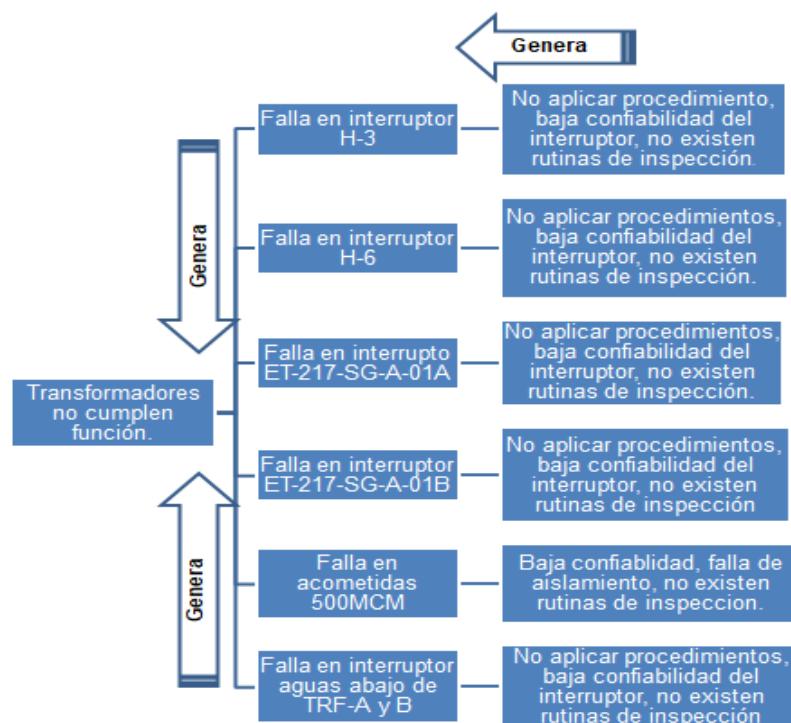
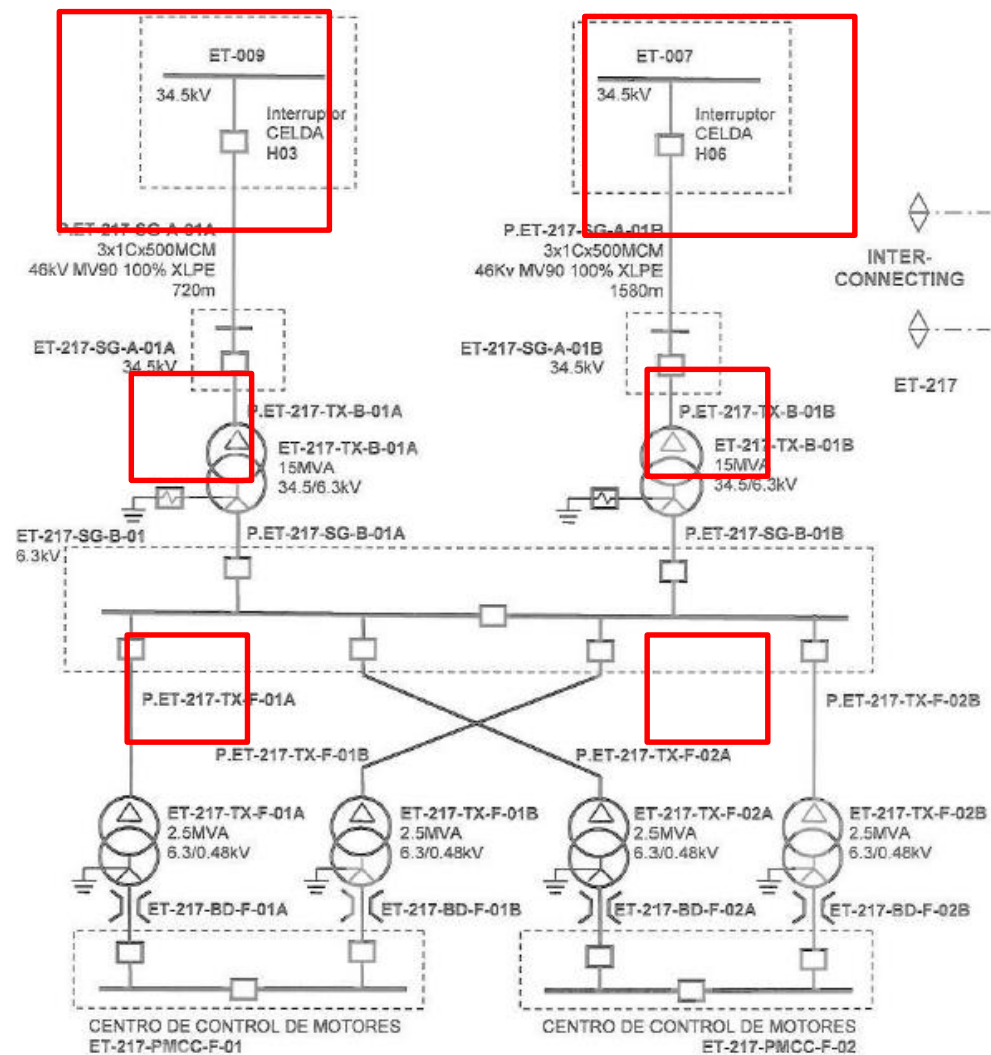


Tabla 4 Subsistemas que afectan la operación de los transformadores ET-217-TX-B-01A y ET-217-TX-B-01B.

Elemento	Función.
Interruptor celda H3	Derivar acometida desde ET-009
Interruptor celda H6	Derivar acometida desde ET-007
Interruptor ET-217-SG-A-01A	Proteger entrada de TRF
Interruptor ET-217-SG-A-01B	Proteger entrada de TRF
Interruptor aguas abajo de ET-217-TX-B-01A	Proteger salida de TRF
Interruptor agua abajo de ET-217-TX-B-01B	Proteger salida de TRF

Figura 6 Identificación de subsistemas subestación ET-217.



Fuente: Diagrama unifilar simplificado – Subestación ET-217.

En la figura 7 se presentan de forma general los subsistemas que hacen parte de la subestación ET-217.

Figura 7 Subsistemas de la subestación ET-217.



Fuente: Subestación ET-217, Refinería Barrancabermeja.

5.1.3 Pasos para evaluar la criticidad de los subsistemas de la ET-217.

La lista de chequeo desarrollada a continuación permite identificar cuáles son los aspectos y pasos a tener en cuenta para evaluar la criticidad de los subsistemas de la ET-217.

- ✓ Calcule las frecuencias de falla de cada uno de los interruptores con ayuda de la ecuación 3, y diligencie la tabla 5, ____ (OK).

Ecuación 3 Frecuencia de fallos.

$$\text{Frecuencia de fallos} = \frac{\text{Numero de fallos del interruptor en el periodo de estudio}}{\text{Periodo de estudio en años.}}$$

Tabla 5 Frecuencia de fallos por interruptor.

Interruptor	Frecuencia de fallos.
Interruptor celda H3	-----
Interruptor celda H6	-----
Interruptor ET-217-SG-A-01A	-----
Interruptor ET-217-SG-A-01B	-----
Interruptor aguas abajo de ET-217-TX-B-01A	-----
Interruptor agua abajo de ET-217-TX-B-01B	-----

✓ De acuerdo al valor encontrado asigne la puntuación teniendo en cuenta la frecuencia de fallos indicados en la tabla 6, ____ (OK).

Tabla 6 Puntuación según frecuencia de fallos.

Frecuencia de fallos	Puntuación.
Entre 0 y 2,9 por año	1
Entre 2,9 y 5,81 por año	3
Entre 5,81 y 8 por año	4
Mayor a 8 por año	6

Fuente: Evaluación de la confiabilidad en interruptores de potencia mediante la norma Norsok Z-013

✓ Determine la perdida de transferencia de potencia por medio del interruptor y tenga en cuenta los valores indicados en la tabla 7, ____ (OK).

Tabla 7 Perdida de transferencia de potencia.

Perdida de transferencia de potencia.	Puntuación.
Entre 0 y 136MVA por año	1
Entre 136 y 272 MVA por año	3

Perdida de transferencia de potencia.	Puntuación.
Entre 272 y 409MVA por año	4
Mayor a 409 por año	6

Fuente: Evaluación de la confiabilidad en interruptores de potencia mediante la norma Norsok Z-013

✓ El impacto en la transmisión de energía se muestra en la Tabla 8 y se desglosa de la siguiente forma: 25% cuando hay reducción de la confiabilidad en menos del 50% sin pérdida de la calidad de energía entregada; 50% cuando hay reducción de la confiabilidad en más del 50% o modificaciones en la calidad de la energía entregada; 75% cuando hay reducción de la confiabilidad en más del 50% y modificaciones en la calidad de la energía entregada, ____ (OK).

Tabla 8 Intervalos para evaluar el impacto en la transmisión de energía.

Impacto de la transmisión de energía.	Puntuación.
No afecta la confiabilidad	0,05
25% de impacto	0,30
50% de impacto	0,5
75% de impacto	0,80
Impacto completo	1,00

Fuente: Evaluación de la confiabilidad en interruptores de potencia mediante la norma Norsok Z-013

✓ De acuerdo al valor estimado de tiempo para reparar se compara con los valores indicados en la tabla 9, ____ (OK).

Tabla 9 Intervalos para tiempo promedio para reparar.

Tiempo promedio para reparar.	Puntuación.
Entre 0 y 5,57 horas/año	1
Entre 5,57 y 14,14 horas/año	2
Entre 14,14 y 38,57 horas/año	4
Mayor que 38,57 horas/año	6

Fuente: Evaluación de la confiabilidad en interruptores de potencia mediante la norma Norsok Z-

✓ Costos del mantenimiento se realiza a partir de la selección de materiales que se utilizan y el personal que realiza el mantenimiento parcial del interruptor de potencia, al determinar este valor se debe comparar con los resultados indicados en la tabla 10, ____ (OK).

Tabla 10 Intervalos para evaluar el costo de mantenimiento.

Costos de mantenimiento	Puntuación.
Menos de US \$300	1
Entre US \$300 y US \$500	5
Entre US \$500 y US \$800	10
Más de US \$800	25

Fuente: Evaluación de la confiabilidad en interruptores de potencia mediante la norma Norsok Z-013

✓ De acuerdo a la investigación desarrollada por (Rojas, 203) llamada “Metodología para el análisis de criticidad en la subestación Tres Picos” donde se incluyen 16 aspectos de seguridad y salud en el trabajo para el área de interruptores de potencia que se ponderaron en tres grupos los cuales se indican en la tabla 11, ____ (OK).

Tabla 11 Intervalos para evaluar el impacto en la seguridad del personal.

Impacto de la seguridad del personal	Puntuación.
Seguridad en instalaciones	16
Seguridad en maquinarias y equipos	12
Organización para la seguridad y salud laborales	4
Total	32

Fuente: Evaluación de la confiabilidad en interruptores de potencia mediante la norma Norsok Z-013

✓ Finalmente el impacto ambiental se puede establecer tal como lo indica la investigación titulada “Estudio de impacto ambiental definitivo por la construcción y operación de la nueva subestación el Fortín de la Flor y su TAP de 69 kV” según la escala indicada en la tabla 12, ____ (OK).

Tabla 12 Intervalos para evaluar el impacto ambiental.

Impacto ambiental.	Puntuación.
SI	30
NO	0

Fuente: Evaluación de la confiabilidad en interruptores de potencia mediante la norma Norsok Z-013

Ahora bien con la sumatoria de todas las tablas anteriores aplicadas a cada interruptor se llevan a una matriz con un código de colores que denotan la menor o mayor intensidad del riesgo relacionado con los equipos o dispositivos analizados. Se establecen los intervalos de Baja, Media y Alta Criticidad recomendados en la norma Norsok Z-013, que se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13 Intervalos de evaluación de criticidad en interruptores.

Consecuencias.	Mayor que 90	Media	Alta	Alta	Alta
	72 a 90	Baja	Media	Alta	Alta
	67 a 71	Baja	Baja	Media	Alta
	0 a 66	Baja	Baja	Baja	Media
		0 – 2,9	2,9 – 5,81	5,81 -8	Mayor a 8
Frecuencia de fallos.					

Fuente: Evaluación de la confiabilidad en interruptores de potencia mediante la norma Norsok Z-013

5.2 PROPUESTA DE INSPECCIÓN DE SUBSISTEMAS BASADA EN TERMOGRAFÍA INFRARROJA.

5.2.1 Glosario para la guía de inspección con termografía infrarroja.

Aislado: Separado de otras superficies conductoras por medio de un dieléctrico (incluyendo el espacio de aire) que ofrece alta resistencia al paso de corriente.

Actividad Intrusiva: Son acciones realizadas en las fases de instalación, operación y/o mantenimiento, que para ejecutarlas requieren intervenir la integridad del diseño de las instalaciones, planta y/o equipos, con la posibilidad de liberar la energía presente, que pueda materializar los riesgos asociados al activo y exige la aplicación del sistema de seguro de plantas y equipos antes de proceder con su ejecución. La misma acción de instalación y retiro del aislamiento se considera actividad intrusiva.

Ampacidad: Corriente, en amperios, que un conductor puede transportar continuamente en condiciones de uso sin superar su temperatura nominal.

Arco nominal: El valor atribuido a materiales que describe su desempeño al exponerse a la descarga de un arco eléctrico.

Consecuencias: Evento o cadena de eventos con efectos reales o hipotéticos, inmediatos o no, sobre las personas, la economía, el ambiente y la imagen, que puede producirse a raíz de la liberación de un peligro y dentro de una situación hipotética creíble.

Controles: Son los controles pro-activos que se deben implementar para evitar que se den las causas de liberación de los peligros, como por ejemplo: emplear personal competente, usar las herramientas adecuadas, etc.

Especificación Técnica: Documento que establece características técnicas de un producto o servicio.

Electrocución: Paso de corriente eléctrica a través de un cuerpo vivo.

Energía incidente: La cantidad de energía impuesta sobre una superficie a una cierta distancia de la fuente generada durante el evento de arco eléctrico. Una de las unidades mas utilizadas para medir la energía incidente es calorías por centímetro cuadrado.

Energizado: Conectado eléctricamente a, o es, una fuente de tensión.

Espectro electromagnético: es el rango de todos los tipos de radiación electromagnética clasificados por longitud de onda. La relación entre la longitud de onda, la velocidad de la luz y la frecuencia, se expresa en la ecuación 4.

Ecuación 4 Longitud de onda.

$$C = f * \lambda$$

Emisividad: Cantidad de radiación procedente de un objeto con respecto a la de un cuerpo negro. Se expresa mediante un valor entre 0 y 1.

Impericia: Falta de habilidad para desarrollar una tarea.

Luz visible, la forma más familiar de ondas electromagnéticas, es aquella parte del espectro electromagnético que el ojo humano puede detectar.

Mantenimiento: Conjunto de acciones o procedimientos tendientes a preservar o restablecer un bien, a un estado tal que le permita operar en forma confiable y segura.

Microondas: tienen longitudes de ondas que varían entre aproximadamente 1 mm y 30 cm y son generadas también por dispositivos electrónicos.

Señalización: Conjunto de actuaciones y medios dispuestos para reflejar las advertencias de seguridad en una instalación.

Ondas infrarrojas: (llamadas algunas veces **ondas de calor**) tienen longitudes de onda que varían de aproximadamente de 1 mm hasta la longitud de onda más larga de luz visible.

Persona Calificada: Persona natural que demuestre su formación profesional en el conocimiento de la electrotecnia y los riesgos asociados con la electricidad, y que además cuente con matrícula profesional, certificado de inscripción profesional, o certificado de matrícula profesional, que según la normatividad legal vigente, lo autorice o acredite para el ejercicio de la profesión, de acuerdo con el artículo 3 del RETIE.

Peligro: Es una fuente, elemento, condición o situación que tiene el potencial de causar daño a las personas (lesión o enfermedad), la economía, equipos, el medio ambiente o la imagen.

Peligro eléctrico: Una condición peligrosa tal que el contacto o la falla de equipos puede resultar en: un choque eléctrico, quemaduras de relámpago de arco, quemaduras térmicas.

Riesgo: Es un concepto que surge de la exposición a un peligro. Sin exposición al peligro no hay riesgo.

Responsables: Es la persona responsable de ejecutar el control establecido.

Termografía: La termografía, es una técnica que permite medir temperaturas a distancia y sin necesidad de contacto físico con el objeto a estudiar mediante la captación de la radiación infrarroja del espectro electromagnético.

5.2.2 Certificación de termógrafo para realizar inspección. La tabla 14, indica los niveles de certificación de termógrafos, esto con el fin de indicar que esta rutina de inspección esta diseñada para ser ejecutada por un termógrafo NIVEL 1.

Tabla 14 Niveles de certificación para termógrafos.

NIVEL I	Cualificado para recabar datos de alta calidad y clasificarlos por escrito con criterios de pasa/no pasa.
NIVEL II	Cualificado para configurar y calibrar el equipo, interpretar datos, crear informes y supervisar al personal del nivel 1.
NIVEL III	Cualificado para desarrollar procedimientos de inspección, interpretar códigos relacionados con este ámbito y gestionar un programa que incluya supervisión o formación y realización de comprobaciones.

5.2.3 Reconocimiento de la cámara termográfica para realizar la rutina de inspección. Este apartado no busca hacer énfasis en ninguna marca o modelo de cámara termográfica en especial pero si brinda aspectos técnicos básicos que son una guía para elaborar una buena práctica durante la recolección de datos. Los principales elementos de una cámara termográfica son:

- **Lente (ver figura 8):** Recoge la radiación infrarroja y la enfoca en el detector de infrarrojos. El detector produce una respuesta y crea una imagen electrónica (térmica).

Figura 8 Lente cámara termográfica FLIR T440.



- **Pantalla (ver figura 9):** La pantalla debe ser lo suficientemente grande y brillante para poder verse con facilidad en las distintas condiciones de iluminación.

Figura 9 Pantalla cámara termográfica FLIR T440.



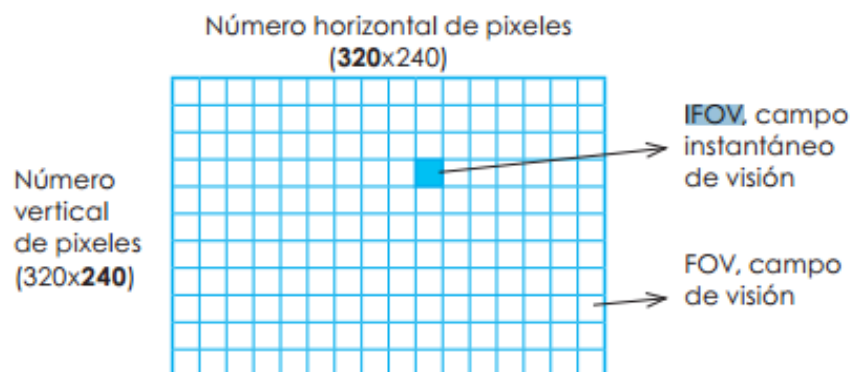
- **Controles (ver figura 10):** se pueden realizar distintos ajustes electrónicos con los controles para mejorar la imagen térmica visualizada en la pantalla.

Figura 10 Controles cámara termográfica FLIR T440.



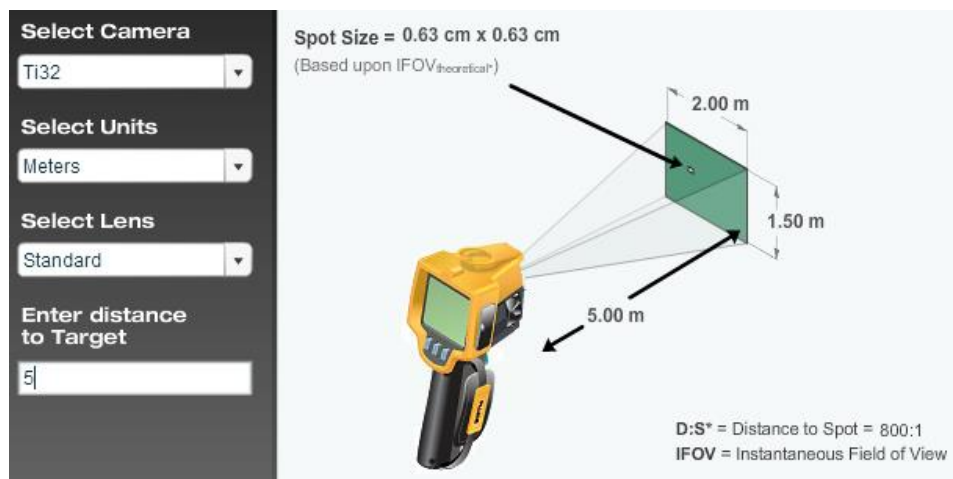
- **Campo de visión instantáneo** (IFOV: *Instantaneous Field of View*) es la característica utilizada para describir la capacidad de una cámara termográfica para resolver detalles espaciales (ver figura 11). Fluke cuenta con una calculadora en línea que permite determinar el IFOV que relaciona la distancia a tamaño del blanco, como lo indica la figura 12.

Figura 11 FOV e IFOV



Fuente: Guía de termografía infrarroja. Recuperado de <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-de-la-Termografia-Infrarroja-fenercom-2011.pdf>

Figura 12 IFOV Calculadora FLUKE



Fuente: Calculadora IFOV, recuperado de http://download.fluke.com/OnlineTools/FOV_calc.htm

Nota: Por esta razón el primer paso que se debe tener en cuenta antes de realizar una inspección termográfica es determinar el IFOV que determinan el campo de visión y el tamaño mínimo del objeto que el detector podrá convertir en una imagen que pueda ser interpretada.

5.2.4 Inspección previa a la medición. Tras tener claro cuáles son los elementos que componen la cámara termográfica FLIR T440, se debe diligenciar la siguiente lista de chequeo con el fin de determinar las características del sistema que se desea evaluar.

- ✓ La celda cuenta con la señalización que indica la NFPA 70 E, ____ (OK).
- ✓ Diligencie la tabla 15, con el fin de dar seguimiento durante toda la inspección a realizar, ____ (OK).

Tabla 15 Inspección inicial del tablero de baja tensión.

Verifique.	Descripción.
Ubicación (subestación) del tablero de baja tensión:	Nombre:

Verifique.	Descripción.
TAG del tablero a realizar la inspección:	Nombre:
Circuitos derivados del tablero a inspeccionar:	Nombres:

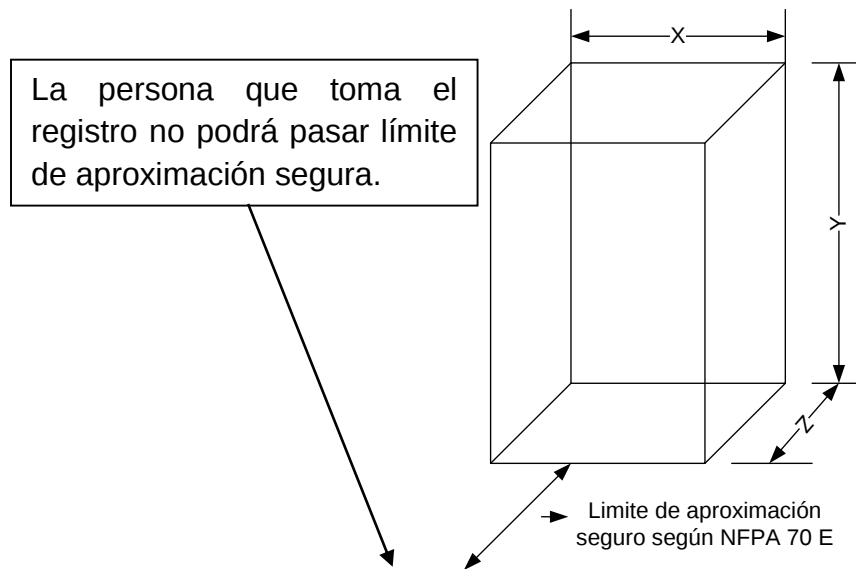
- ✓ Todos los breaker o interruptores se encuentran maquillados según lo establece el diagrama unifilar, ____ (OK).
- ✓ Si el tablero cuenta con señalización que cumpla con NFPA 70E, asegúrese de no sobrepasar el límite de aproximación técnico, ____ (OK).

5.2.5 Factores que influyen durante la medición. Diligencie la siguiente lista de chequeo con el fin de obtener una lectura correcta antes de realizar la medición.

- ✓ Verifiqué cual es el valor de la temperatura ambiente, ____ (OK).
- ✓ Asegúrese que frente a los barrajes o totalizadores no cuenten con un acrílico frente a ellos, dado que estos reflejaran la energía radiante emitida por el elemento sobre el cual se quiere tomar el registro, ____ (OK).
- ✓ Inspeccione el tipo de material utilizado en la tornillería de los barrajes y totalizadores, verifique la tabla de emisividad del manual de la cámara termográfica e introduzca este valor, ____ (OK).

5.2.6 Pasos para realizar un registro exitoso. Determine las dimensiones de la celda, tablero o transformador donde se realizara la inspección termográfica, en la figura 13 se da un ejemplo de ello.

Figura 13 Dimensiones de la celda para realizar inspección termográfica.



- ✓ Verifique el IFOV y el FOV según el lente que utilizara y determine si estos son suficientes para determinar la temperatura del elemento que va a registrar, ____ (OK).
- ✓ Enfoque la imagen utilizando la paleta de escala de grises, ____ (OK).
- ✓ Realice la captura de la imagen, tenga en cuenta que los valores de emisividad y diferentes factores para realizar la medición ya fueron ajustados, ____ (OK).

6. FALLAS FUNCIONALES DE LOS TRANSFORMADORES ET-217-TX-B-01A Y ET-217-TX-B-01B.

Después de realizar la identificación de las fallas funcionales de los transformadores de media tensión sumergidos en aceite ET-217-TX-B-01A y ET-217-TX-B-01B es posible desarrollar un estándar de trabajo, sin embargo se inicia con un glosario de términos que deben estar claros para mayor comprensión del trabajo desarrollado.

6.1 GLOSARIO PARA MANTENIMIENTO DE TRANSFORMADORES ET-217.

Aislado: Separado de otras superficies conductoras por medio de un dieléctrico (incluyendo el espacio de aire) que ofrece alta resistencia al paso de corriente.

Actividad Intrusiva: Son acciones realizadas en las fases de instalación, operación y/o mantenimiento, que para ejecutarlas requieren intervenir la integridad del diseño de las instalaciones, planta y/o equipos, con la posibilidad de liberar la energía presente, que pueda materializar los riesgos asociados al activo y exige la aplicación del sistema de seguro de plantas y equipos antes de proceder con su ejecución. La misma acción de instalación y retiro del aislamiento se considera actividad intrusiva.

Ampacidad: Corriente, en amperios, que un conductor puede transportar continuamente en condiciones de uso sin superar su temperatura nominal.

Arco nominal: El valor atribuido a materiales que describe su desempeño al exponerse a la descarga de un arco eléctrico.

Consecuencias: Evento o cadena de eventos con efectos reales o hipotéticos, inmediatos o no, sobre las personas, la economía, el ambiente y la imagen, que

puede producirse a raíz de la liberación de un peligro y dentro de una situación hipotética creíble.

Controles: Son los controles pro-activos que se deben implementar para evitar que se den las causas de liberación de los peligros, como por ejemplo: emplear personal competente, usar las herramientas adecuadas, etc.

Especificación Técnica: Documento que establece características técnicas de un producto o servicio.

Electrocución: Paso de corriente eléctrica a través de un cuerpo vivo.

Energía incidente: La cantidad de energía impuesta sobre una superficie a una cierta distancia de la fuente generada durante el evento de arco eléctrico. Una de las unidades mas utilizadas para medir la energía incidente es calorías por centímetro cuadrado.

Energizado: Conectado eléctricamente a, o es, una fuente de tensión.

Impericia: Falta de habilidad para desarrollar una tarea.

Mantenimiento: Conjunto de acciones o procedimientos tendientes a preservar o restablecer un bien, a un estado tal que le permita operar en forma confiable y segura.

Señalización: Conjunto de actuaciones y medios dispuestos para reflejar las advertencias de seguridad en una instalación.

Persona Calificada: Persona natural que demuestre su formación profesional en el conocimiento de la electrotecnia y los riesgos asociados con la electricidad, y que

además cuente con matrícula profesional, certificado de inscripción profesional, o certificado de matrícula profesional, que según la normatividad legal vigente, lo autorice o acredite para el ejercicio de la profesión, de acuerdo con el artículo 3 del RETIE.

Peligro: Es una fuente, elemento, condición o situación que tiene el potencial de causar daño a las personas (lesión o enfermedad), la economía, equipos, el medio ambiente o la imagen.

Peligro eléctrico: Una condición peligrosa tal que el contacto o la falla de equipos puede resultar en: un choque eléctrico, quemaduras de relámpago de arco, quemaduras térmicas.

Riesgo: Es un concepto que surge de la exposición a un peligro. Sin exposición al peligro no hay riesgo.

Responsables: Es la persona responsable de ejecutar el control establecido.

Termografía: La termografía, es una técnica que permite medir temperaturas a distancia y sin necesidad de contacto físico con el objeto a estudiar mediante la captación de la radiación infrarroja del espectro electromagnético.

6.2 RIESGOS INHERENTES AL DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD DE MANTENIMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES

En la tabla 16 se presenta el análisis de riesgo de las actividades inherentes que surgen del AMEF.

Tabla 16 Riesgos de la actividad

Peligro	Riesgo	Control
Energía eléctrica	Electrocución	La ejecución de la labor deberá realizarse como mínimo entre dos personas, y estas deberán ser calificadas y certificadas.
		Inspeccionar con detector de tensión equipos, estructuras adyacentes del área de trabajo para asegurarse de que no estén energizadas. Utilizar herramienta aislada y que se encuentre sin fisuras o partiduras.
Atrapamiento	Partes con movimientos o rotatorias	Siempre debe trabajar con las mangas de la camisa abotonadas para evitar atrapamientos. Verificar que el equipo este apagado y aislado Verificar que el equipo tenga la guarda de seguridad.

6.3 ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL Y HERRAMIENTAS QUE SE DEBEN USAR EN EL DESARROLLO DEL MANTENIMIENTO

Según lo indica la tabla 130.7(C) (8) de la NFPA 70E los empleados que trabajan en áreas donde hay riesgos eléctricos, se les debe proveer y deben usar, equipo de protección que este diseñado y construido para la parte específica del cuerpo que se va a proteger y para el trabajo que se va a realizar. Por ende los equipos de protección personal deberán cumplir con las normas indicadas en la tabla 17.

Tabla 17 Estándares de los equipos de protección.

Objeto	Número y título.
Protección de la cabeza.	ANSI Z89.1, Requirements Protective Headwear for Industrial Workers.
Protección de ojos y de la cara.	ANSI Z87.1, Practice for occupational and Educational Eye and Face Protection.
Guantes	ASTM D 120, Standard specification for Rubber Insulating Sleeves.
Calzado	ASTM 11, Standard specification for dielectric. ASTM 2412, Standard Test Methods for foots protection. ASTM 2413, Standard Specification for performance requeriments for foot.
Ropa *	ASTM 1506

Fuente: Tabla 130.7(C) (8) NFPA 70E

Si durante el desarrollo del mantenimiento preventivo se requiere el uso de algún tipo de herramienta, estas deberán cumplir con las siguientes normas indicas en la tabla 18 indicadas por la NFPA 70E.

Tabla 18 Estándares de herramientas, según NFPA 70E

Objeto	Número y título.
Escaleras	ANSI A14.1, Safety requirements for portable Wood ladders, 2000. ANSI A14.3, Safety requirements for fixed ladders, 2002. ANSI A14.4, Safety requirements for job-Made ladders, 2002. ANSI A14.5, Safety requirements for portable reinforced plastic ladders, 2000.
Señales y etiquetas de seguridad	ANSI Z 535, Series of standards for safety sign and tags.
Herramienta de mano aislada	ASTM 1505, Standard specification for insulated and insulating hand tools.

Fuente: Tabla 130.7 (F) NFPA 70E

6.4 FALLAS FUNCIONALES SEGÚN AMEF EN ET-217-TX-B-01A Y ET-217-TX-B-01B

La metodología RCM busca atacar los componentes que puedan afectar en algún momento la operación normal de los transformadores ET-217-TX-B-01A Y ET-217-TX-B-01B; en la tabla 19 se presenta el AMEF.

Tabla 19 AMEF de transformadores ET-217-TX-B-01A Y ET-217-TX-B-01B

ET-217-TX-B-01A Y ET-217-TX-B-01B			
Función	Falla funcional	Causa	Acciones
Convertir nivel de tension de 34,kV a 6,3kV para alimentar la barra que deriva la alimentacion para los CCM 1 y 2	No convertir nivel de tension de 34,kV a 6,3kV para alimentar la barra que deriva la alimentacion para los CCM 1 y 2	Conexiones sueltas en las borneras del transformador	Realizar inspeccion periodica identificando puntos calientes, tal como lo indica la guia de inspeccion termografica desarrollada en esta monografia
		Disparo de protecciones electricas, como temperatura y presion	Revision de aceite dielectrico
			Medicion de aislamiento de bobinas, relacion de transformacion

6.5 ESTÁNDAR DE MANTENIMIENTO PARA LOS TRANSFORMADORES

A continuación se citan cada una de las actividades que se deberán ejecutar como parte del mantenimiento preventivo de los transformadores.

Tarea 1. Documente la actividad antes de iniciar.

Se debe diligenciar la tabla 20 donde se indican aspectos técnicos relevantes antes de iniciar el mantenimiento preventivo de los transformadores.

Tabla 20 Características de las instalaciones de los transformadores.

Características	SI	NO	Observaciones
Potencia (MVA):			
La celda o patio de los transformadores cuentan con señalización que indique nivel de tensión.			
La celda del transformador cuenta con líneas de delimitación amarillas sobre el piso.			
Los niveles de iluminación en la subestación cumplen son lo establecido en el RETIE, 300 luxes.			
La subestación cuenta con un sistema de iluminación de emergencia.			

Al diligenciar la tabla 21 se busca determinar las competencias de los ejecutores, el cumplimiento de la normatividad de las herramientas y EPPS, acorde a la norma NFPA 70E.

Tabla 21 Competencias de ejecutores y cumplimiento normativo.

Características	SI	NO	Observaciones
El ejecutor de mantenimiento es una persona calificada tal			

Características	SI	NO	Observaciones
como lo establece el reglamento técnico de instalaciones eléctricas RETIE ⁸ .			
Los elementos de protección personal cumplen con las normas establecidas por la NFPA 70E tal como lo indica la tabla 17.			
Las herramientas cumplen con las normas establecidas por la NFPA 70E tal como lo indica la tabla 18.			
La subestación cuenta con un diagrama unifilar que permita la fácil ubicación de todos los interruptores y seccionadores.			

Tarea 2. Desenergizar y transferir carga de los transformadores

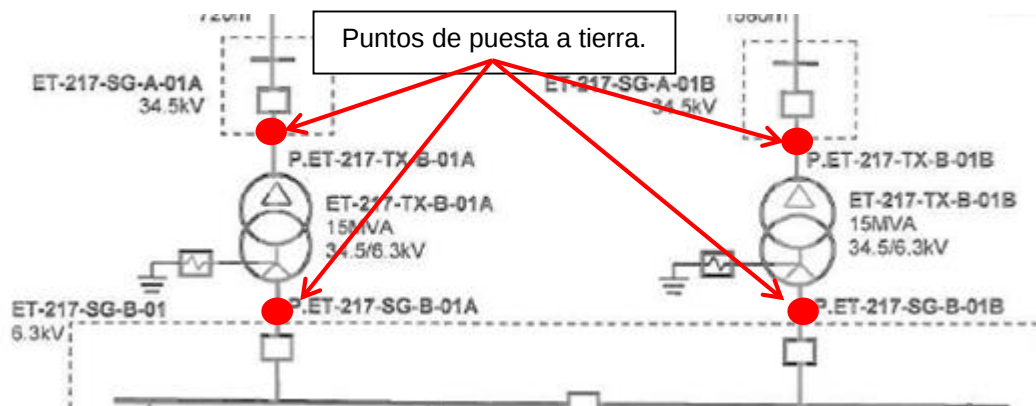
Las actividades listadas a continuación indican aspectos que se deben cumplir al momento de desenergizar los transformadores ET-217-TX-B-01A Y ET-217-TX-B-01B y transferir la carga de uno al otro.

✓ Diligencie los permisos de trabajo y certificados de apoyo respectivos para la ejecución de esta actividad, _____ (OK).

⁸ Toda persona calificada, debe estar capacitada sobre los procedimientos que se deben seguir en caso de que ocurra alguna emergencia de tipo eléctrico, así como las reglas de primeros auxilios, incluyendo los métodos probados de reanimación.

- ✓ Ejecute los procedimientos y prácticas recomendados para transferir la carga del transformador al cual se le realizara el mantenimiento, _____ (OK).
- ✓ Aplique las 5 reglas del electricista y asegúrese de bloquear y tarjetear los interruptores aguas arriba y abajo del transformador al cual se le realizara mantenimiento, _____ (OK).
- ✓ Realice puesta a tierra y cortocircuito en los puntos indicados en la figura 14, tenga en cuenta que según lo indica el RETIE, “*toda instalación debe contar con un sistema de puesta a tierra o SPAT, esto con el fin de evitar que personas sufran tensiones de paso, de contacto a transferidas*”, por tal motivo si las instalaciones no cuentan con SPAT donde se pueda realizar la instalación de la puesta a tierra temporal NO continúe con las actividades, reporte esta eventualidad al personal a cargo de la subestación, _____ (OK).

Figura 14 Puesta a tierra y cortocircuito de transformadores.



Tarea 3. Mantenimiento preventivo.

Actividad 1. Mantenimiento en planta física.

- ✓ Realizar limpieza y desmalezado del área aledaña al transformador, _____ (OK).
- ✓ Realizar limpieza de drenajes y desagües, _____ (OK).

- ✓ Instalar letreros faltantes en cuanto a señalización según RETIE y NFPA 70E, _____ (OK).

Actividad 2. Revisión de SPAT

- ✓ No se permite el uso de aluminio como electrodo de puesta a tierra, _____ (OK).
- ✓ El electrodo o varilla tiene mínimo 2.4m de longitud, _____ (OK).
- ✓ Las dimensiones del electrodo cumplen con lo establecido en la tabla 15.2 del RETIE, _____ (OK).
- ✓ Todos los electrodos que conforman la malla se encuentran enterrados en su totalidad, _____ (OK).
- ✓ La unión entre el electrodo y el conductor de tierra, se realizó con soldadura exotérmica o con un conductor certificado, _____ (OK).
- ✓ El calibre del conductor cumple con lo establecido en la tabla 250-94 de la NTC 2050, *tenga en cuenta que este calibre aplica para sistemas de baja tensión*, _____ (OK).
- ✓ Para el lado media tensión el calibre del conductor cumple con lo establecido en el RETIE, según lo indica la IEEE 80, tal como lo indica la ecuación 5, _____ (OK).

Ecuación 5 Calibre de SPAT para media tensión

$$A_{mm^2} = \frac{IK_f \sqrt{t_c}}{1,9737}$$

Fuente: Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, p. 67.

Actividad 3. Análisis Dieléctrico y fisicoquímico según ASTM D-117

- ✓ Ubique el punto de drenaje de aceite dieléctrico y tome una muestra de 250ml. Diligencie la tabla 22 y 23 para dar conformidad a los resultados.

Tabla 22 Registro de análisis físico químico.

Prueba	Unidad	Equipo de prueba	Valor medido	Rangos aceptables, criterio MYERS
Rigidez dieléctrica	kV	Chispometro	_____	Aceptable ≥ 30 Inaceptable < 25
Contenido de agua	PPM	Coulometro	_____	Aceptable < 30 Inaceptable ≥ 35
Gravedad específica	Adimensional	Aerometro	_____	Aceptable 0,84-0,91 Inaceptable $> 0,91$
Tension Interfasial	DIN/cm	Tensimetro		Aceptable ≥ 32 Inaceptable $< 27,9$

Tabla 23 Análisis cromatógrafo ASTM D-3612

Gases	Concentración PPM
Oxígeno(O ₂)	_____
Nitrógeno(N ₂)	_____
Hidrógeno(H ₂)	_____
Monóxido de carbono(CO)	_____
Metano(CH ₄)	_____
Etileno(C ₂ H ₄)	_____
Dióxido de carbono(CO ₂)	_____

Nota: si alguno de estos valores se encuentra fuera de estos rangos repórtelo inmediatamente a la persona encargada del área.

Actividad 4. Realice pruebas eléctricas de campo.

✓ Realice pruebas de aislamiento entre devanados, resistencia óhmica entre devanados, relación de transformación a cada posición del transformador, resistencia del SPAT y documente los resultados en la tabla 24, 25, 26, 27 y 28.

Tabla 24 Verificación de los transformadores.

Verificación.																
Aisladores y herrajes.	Fases AT			Fases BT				Accesorios	Tiene		Estado		C	Equipos asociados	Tiene	
	U	V	W	X	Y	Z	N		S	N	B	D			S	N
Aislador roto								Relé Bucholz						Pararrayos		
Aislador flojo								Válvula sobrepresión						TRF corriente.		
Falta aislador								Nivel de aceite						TRF Tensión.		
Herraje incompleto								Vaso de silica						TRF Potencial.		
Herraje dañado								Termómetro						Seccionador		

Tabla 25 Resistencia aislamiento

Resistencia de aislamiento			
Tensión de prueba	AT Contra BT	BT contra AT y tierra	AT contra BT y tierra

Tabla 26 Relación de transformación.

Relación de transformación.							
Posición.	Tensión de derivación.	Fase U		Fase V		Fase W	
		Relación	Excitación.	Relación	Excitación.	Relación	Excitación.
1							
2							
3							
4							
5							

Tabla 27 Resistencia devanados.

Resistencia devanados AT						
Posición	Fase U	Resistencia	Fase V	Resistencia	Fase W	Resistencia.
	U-V		V-W		W-U	
Resistencia devanados BT fase – neutro.						
TAP	Fase N-X	Resistencia	Fase N-Y	Resistencia	Fase N-Z	Resistencia

Tabla 28 Resistencia del SPAT

Resistencia del sistema de puesta a tierra.	
Conexión al transformador	Conexión a la malla del encerramiento.

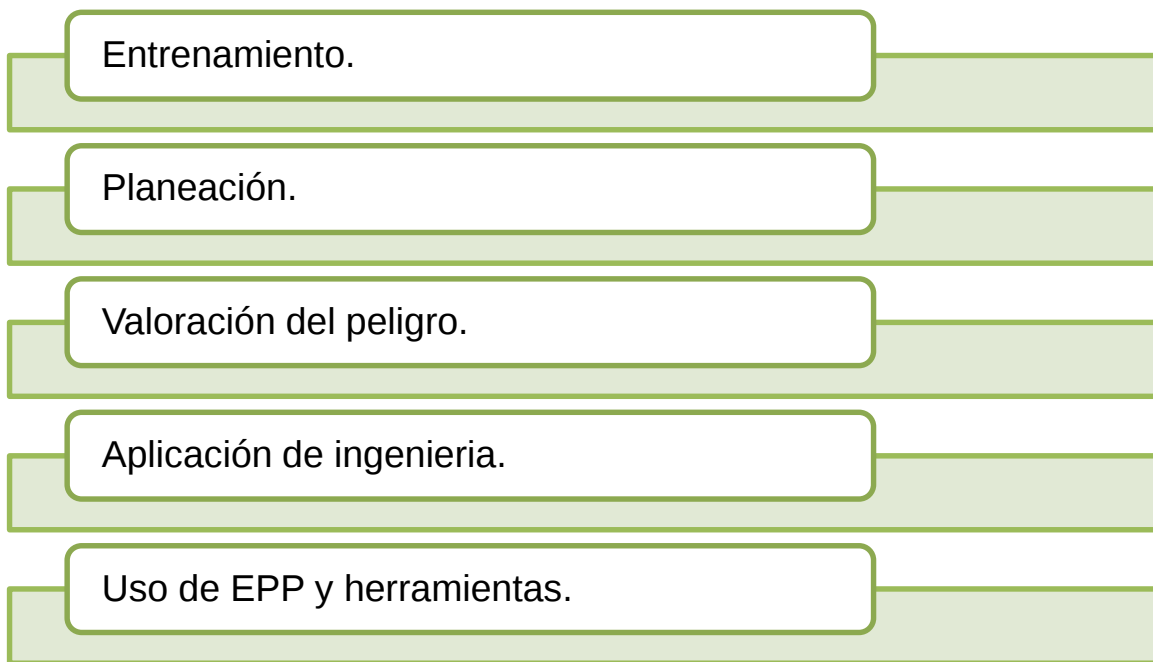
7. GUÍA DE INSPECCIÓN E LA SUBESTACIÓN ET-217 BASADA EN LA NFPA 70E

El objetivo de este capítulo es redactar una guía para inspeccionar la subestación ET-217 para asegurar áreas de trabajo seguras según la NFPA 70E.

7.1 PERSONAS AUTORIZADAS PARA REALIZAR LA INSPECCIÓN

Para lograr asegurar que las actividades de inspección se realicen de manera exitosa según la NFPA 70E se deben involucrar los aspectos mencionados en la figura 15.

Figura 15 Aspectos para asegurar una buena inspección según NFPA 70E.



Fuente: NFPA 70E.

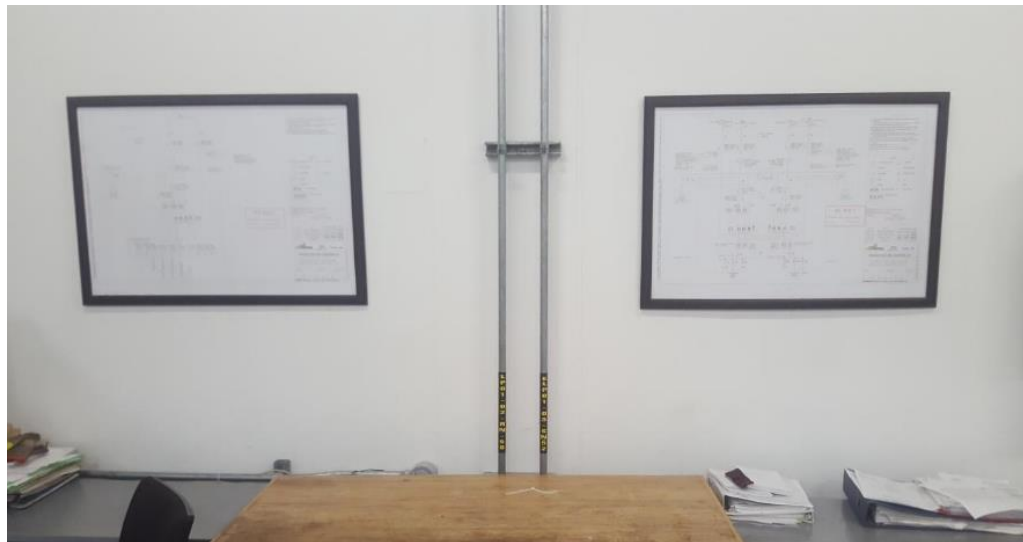
Adicional la persona encargada debe ser calificada según lo establece el RETIE.

7.2 COMO ESTABLECER UNA CONDICIÓN DE TRABAJO SEGURA SEGÚN RETIE Y NFPA 70E

Con el ánimo de garantizar un área de trabajo segura en la subestación ET-217 se establece la lista de chequeo indicada a continuación teniendo en cuenta los lineamientos de la NFPA 70E y el RETIE

- ✓ La subestación eléctrica cuenta con los diagramas unifilares de los circuitos de media y baja tensión actualizados (ver figura 16), _____ (OK).

Figura 16 Diagramas unifilares subestación ET-217.



- ✓ Las personas que puedan realizar actividades de candado/etiqueta, están entrenadas para el desarrollo de tal actividad, _____ (OK).
- ✓ En la subestación se cuenta con un procedimiento de aplicación de candado/etiqueta (ver figura 17) _____ (OK).

Figura 17 Candados y etiquetas de la subestación ET-217.



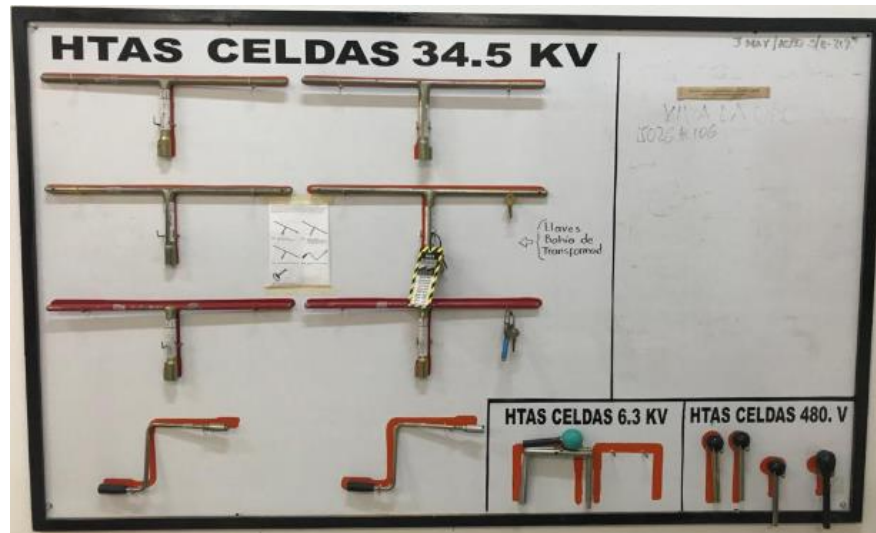
✓ Los elementos de protección personal dentro de la subestación ET-217 (ver figura 18), cumplen con las normas establecidas en la tabla 130.7(C) (8) de la NFPA 70E, _____ (OK).

Figura 18 Elementos de protección personal subestación ET-217.



✓ Las herramientas dentro de la subestación ET-217 (ver figura 19) cumplen con las normas establecidas en la tabla 130.7 (F) de la NFPA 70E, _____ (OK).

Figura 19 Herramientas de subestación ET-217.



- ✓ La entrada de la subestación cuenta con señalización que indique, RIESGO ELECTRICO, NIVEL DE TENSION, _____ (OK).
- ✓ Las mallas metálicas dentro de la subestación se encuentran sólidamente conectadas a tierra, _____ (OK).
- ✓ Las cubiertas, puertas o distancias de aislamiento, no permiten el ingreso a personal no calificado, _____ (OK).

7.3 SEÑALIZACIÓN DE LA SUBESTACIÓN ET-217 SEGÚN NFPA 70E

En esta etapa se busca que los tableros o celdas de transformadores cuenten con la señalización adecuada tal como lo indica la norma NFPA 70E (ver figura 20) en la siguiente lista de chequeo.

Figura 20 Señalización de celdas en subestación ET-217.

ADVERTENCIA			
Peligro de Arco Eléctrico (Obligatorio usar EPP apropiado)			
	Energía Incidente:	31,43	[cal/cm²]
	Frontera de Protección de Arco:	26092	[mm]
	Categoría de Riesgo Según NFPA 70E:	4	
	Distancia de Trabajo:	910	[mm]
Protección de Cuerpo y Rostro: - Chaqueta Resist. Arco - 75 cal/cm² - Overall / Pechera Resist. Arco - - Capucha Resist. Arco - - Guantes Resist. Arco -			
Protección de Ojos y Oídos: - Monogafas de Seguridad - Protector Auditivo (Tipo Canal)		Protección Cabeza y Pies: - Casco Dieléctrico - Botas Dieléctricas	
Peligro de Choque Eléctrico (Obligatorio usar EPP apropiado)			
	Tensión Peligro Contacto Directo:	6,30	[kVac]
	Frontera Límite de Aproximación:	1530	[mm]
	Frontera de Aproximación Restringida:	660	[mm]
	Frontera de Aproximación Prohibida:	177	[mm]
		Uso Guantes Dieléctricos:	Clase 1
		Uso Herramienta Aislada:	35 [kVac]
ECOPETROL S.A. Subestación eléctrica ET217-HDT-TRIANGULO		Equipo: Interruptores SWG4750A 6.3KV Fecha: 13-06-12	Falta en este equipo/casilla serán despejadas por el interruptor: Incomer A Switchgear 6,3KV

- ✓ Los tableros o celdas indican claramente el traje de arco categoría, _____ (OK).
- ✓ Los tableros o celdas indican claramente la clase de los guantes dieléctricos _____ (OK).
- ✓ Los tableros o celdas indican claramente la clase del casco dieléctrico, _____ (OK).
- ✓ El tablero o celda indica claramente que se debe utilizar calzado dieléctrico, _____ (OK).
- ✓ El tablero o celda indica claramente que se debe utilizar pantalla facial o gafas de seguridad y protección auditiva, _____ (OK).
- ✓ Los tableros o celdas de transformadores indican claramente que es necesario el uso de una escafandra, _____ (OK).

- ✓ Todos los tableros o celdas de transformadores se encuentran señalizados indicando el nivel de tensión y el TAG del tablero o celda, _____ (OK).
- ✓ Los tableros o celdas indican los límites de aproximación:
 1. Límite de aproximación seguro, _____ (OK).
 2. Límite de aproximación restringido, _____ (OK).
 3. Límite de aproximación técnico, _____ (OK).
 4. Límite de aproximación por arco eléctrico, _____ (OK).
 5. Energía incidente, _____ (OK).

8. CONCLUSIONES

En cuanto a los sub sistemas que componen la subestación ET-217 y afectan la función de los transformadores ET-217-TX-B-01A y ET-217-TX-B-01B se encuentran los interruptores H3, H6, ET-217-SG-A-01A, ET-217-SG-A-01B, ET-217-TX-B-01A, ET-217-TX-B-01B cuya función es proteger y derivar acometidas desde las subestaciones ET-007 y 009.

Para identificar las fallas funcionales de los transformadores ET-217-TX-B-01A y ET-217-TX-B-01B se realiza un AMEF en el cual se indica que Convertir nivel de tensión de 34,kV a 6,3kV para alimentar la barra que deriva la alimentación para los CCM 1 y 2 es la función principal de cada uno de ellos; ya con esta información se elaboró el estándar de mantenimiento donde se establecen actividades y tareas que buscan atacar las causas que impiden que los transformadores operen en condiciones normales.

En cuanto a la guía de inspección basada en la norma NFPA 70E para la subestación ET-217, se observa que los elementos de protección, herramientas, señalización y estudios de arco eléctrico cumplen lo establecido en el RETIE y NFPA 70E y el documento deja las bases sólidas para realizar rondas de verificación para garantizar un área de trabajo seguro.

BIBLIOGRAFÍA

A. Díaz, F. Pérez, A. del Castillo y M.L. Brito. "Propuesta de un modelo para el análisis de criticidad en plantas de productos biológicos". Ingeniería Mecánica. Vol. 15 N° 1, pp. 34-43. Enero-Abril 2012. ISSN: 1815-5944.

American Supplier Institute, Inc. Dearborn Michigan. "ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA (AMEF), MANUAL" Copyright, 1993.

CEMA. "Estudio de impacto ambiental definitivo por la construcción y operación de la nueva subestación el Fortín de la Flor y su tap de 69 kV". Guayaquil, Ecuador. 2012.

D. Cabrera. "Análisis de criticidad de equipos de subestaciones y componentes del sistema de transmisión de la TDE". Tesis para optar al título de Ingeniero de Mantenimiento. Centro de Estudios de Innovación y Mantenimiento. La Habana, Cuba. 2005.

Hernández, David. 2005. Análisis del modo y efecto de las fallas potenciales aplicado a un caso de estudio. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de México. México: DF. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/521/A5.pdf?sequence=1>.

John, Moubray. 2000. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Aladon Editores. Carolina del Norte: USA

National Fire Protection Association. Norma para la Seguridad Eléctrica en Lugares de Trabajo. Edición 2009. United States of América.

Massachusetts Institute of Technology. 1965. Circuitos Magnéticos y Transformadores. Reverté Ediciones.

M. Al-Suhaily, S. Meijer, J.J. Smit, P. Sibbald and J. Kanter. "Criticality assessment of GIS components". International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), pp. 626-629. New York, USA. 2010.

Mil-Std-1629A. "Procedures for performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis". Department of Defense. USA. 1980.

L. Améndola. "Modelos mixtos de confiabilidad". 2003.

Pérez, Pedro. 2001. Transformadores de distribución: teoría, cálculo, construcción y pruebas. Reverté Ediciones S.A. México.

Rivas, V. (2006). Evaluación técnica sobre la incorporación de nuevos compuestos oxigenados en la preparación de gasolina comercial. Instituto Politécnico Nacional, México.

Resnick, R. y Halliday, D. Física para estudiantes de Ciencias e Ingeniería, Vol II, edición, (Compañía Editorial Continental, México, 1982)

Torres, Lyda. 2010. Metodología RCM aplicada a transformadores de potencia. Tesis de Grado. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.

L. Rojas. "Metodología para el análisis de criticidad en la subestación Tres Picos". Tesis para optar al título de Master en Ingeniería Eléctrica. Universidad de Camagüey "Ignacio Agramonte Loynaz". Departamento de Ingeniería Eléctrica. Cuba. 2013.