

**DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO
PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCION DE ENERGÍA ELÉCTRICA.**

**ELIO MONCADA CARRERO
DIEGO FERNANDO SIERRA PEÑALOZA
MANOLO TAMAYO RIVAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA**

2014

**DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO
PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCION DE ENERGÍA ELÉCTRICA.**

**ELIO MONCADA CARRERO
DIEGO FERNANDO SIERRA PEÑALOZA
MANOLO TAMAYO RIVAS**

**Monografía para optar al título de
Especialista en Gerencia de Mantenimiento**

**Director
HUGO HERNÁN BERNATE LOZADA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA**

2014

DEDICATORIA

Primero quiero agradecer a nuestro creador, el que me ha dado fortaleza y me ha permitido culminar una meta más en mi proyecto de vida.

A mi hija y a mi esposa por ser mi motivación para seguir adelante y no desfallecer en los momentos difíciles y que además han sido mi apoyo absoluto.

A mi familia en general, porque me han brindado su apoyo incondicional.

A mis compañeros y amigos que de una u otra forma influenciaron y aportaron a la culminación de esta etapa de formación académica y de vida.

DIEGO FERNANDO SIERRA PEÑALOZA

"A Dios Todopoderoso fuente inagotable de conocimiento, a mis Padres (Campitos y Miryam), a Servicios Asociados y la Escuela de Ingeniería Mecánica por el programa de la Especialización".

ELIO MONCADA CARRERO

CONTENIDO

| | Pág. |
|--|-------------|
| INTRODUCCION | 14 |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 15 |
| 2. OBJETIVOS | 16 |
| 2.1 OBJETIVO GENERAL | 16 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 16 |
| 3. JUSTIFICACIÓN DEL PLAN PROPUESTO: | 17 |
| 4. CONTEXTO DEL SECTOR ELECTRICO | 19 |
| 5. MARCO TEORICO | 26 |
| 5.1 EL CONCEPTO DE MANTENIMIENTO | 26 |
| 5.2 SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA | 32 |
| 5.3 SISTEMAS AISLADOS Y CENTRALIZADOS | 33 |
| 5.4 CONCEPTOS BÁSICOS DE ESTABILIDAD ELÉCTRICA | 34 |
| 5.4.1 Sistema dinámico en espacio de Estado | 35 |
| 5.5 MANTENIMIENTO PREDICTIVO A TRAVÉS DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA | 36 |
| 5.6 EL MANTENIMIENTO DEL ACEITE DIELECTRICO | 40 |
| 5.7 DESCRIPCION DE CONCEPTOS | 45 |
| 5.8 ANALISIS DE COSTO BENEFICIO | 58 |
| 6. METODOLOGÍA | 63 |
| 6.1 METODOLOGÍA DEL ENFOQUE SISTÉMICO | 63 |

| | |
|---|----|
| 6.2 ESTRUCTURA | 65 |
| 6.3 ENTRADAS | 66 |
| 6.4 PROCESO | 66 |
| 6.5 SALIDAS | 73 |
| 6.6 RETROALIMENTACION, CONTROL y MEJORAMIENTO | 77 |
| | |
| 7. CONCLUSIONES | 79 |
| | |
| BIBLIOGRAFÍA | 81 |
| | |
| ANEXO | 84 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Resoluciones CREG de la actividad de Distribución de Energía Eléctrica | 24 |
| Tabla 2. Ejemplo para un sector de la distribución de tiempos en rutinas predictivas. | 64 |
| Tabla 3. Componentes a estudiar. | 65 |
| Tabla 4. Distribución de cargas en subestaciones. | 67 |
| Tabla 5. Análisis de modos de falla. | 68 |
| Tabla 6. Tiempos de rutinas predictivas por sectores | 74 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Sistema de distribución modelo ciudad de Neiva. | 17 |
| Figura 2. Esquema representativo de un sistema eléctrico de potencia. | 42 |
| Figura 3. Distribución de un sistema eléctrico | 46 |
| Figura 4. Termografía infrarroja | 53 |
| Figura 5. Análisis de aceite Dieléctrico | 57 |
| Figura 6. Curva PF donde se describe la tendencia de falla en los equipos. | 58 |
| Figura 7. Unifilar general | 70 |
| Figura 8. Diagrama modelo subestación sector 1 - 6. | 71 |
| Figura 9. Transformador | 71 |
| Figura 10. Descargador de Sobretensión | 72 |
| Figura 11. Cortacircuitos | 72 |
| Figura 12. Aislador | 73 |
| Figura 13. Seccionador | 73 |
| Figura 14. Diagrama estructura del proceso. | 77 |
| Figura 15. Flujograma del proceso de mantenimiento. | 78 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|---------------------------------|-------------|
| Anexo A. Reporte De Termografía | 85 |
| Anexo B. Reporte de Ultrasonido | 87 |

RESUMEN

TITULO: DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCION DE ENERGÍA ELÉCTRICA.*

AUTORES: ELIO MONCADA CARRERO, DIEGO FERNANDO SIERRA PEÑALOZA, MANOLO TAMAYO RIVAS**

PALABRAS CLAVES: ELECTRICIDAD, PREVENTIVO, MANTENIMIENTO, DISTRIBUCIÓN, REDES

En el mundo moderno, la electricidad representa el factor más trascendente en materia energética, constituye la forma de energía más utilizada por el hombre, la cual hace posible contar con una serie de comodidades que la tecnología ofrece a modo de iluminación, calefacción, comunicaciones, procesos industriales, transporte, electrodomésticos y equipos biomédicos entre sus principales aplicaciones.

El proceso de distribución de energía eléctrica depende de una serie de elementos útiles para adecuar y entregar a los usuarios energía de óptima calidad, esta etapa de la cadena energética enfrenta grandes desafíos para combatir agentes externos que afectan el buen funcionamiento los componentes de las redes y los equipos involucrados en el sistema, tales como vegetación, animales, condiciones atmosféricas, suciedad del ambiente, vandalismo y mal uso de la electricidad.

El proyecto planteado se enfoca en el diseño de una estrategia enfatizada en el gerenciamiento del mantenimiento, a partir de la disciplina de mantenimiento predictivo para el sistema de distribución de energía.

El proyecto inicia con una recopilación de datos e información sobre redes, equipos y componentes del sistema eléctrico a fin de establecer un orden jerárquico, para posteriormente definir la estructura de las actividades de mantenimiento con base en la criticidad de los diferentes elementos en el proceso, con una causa determinada a mejorar la confiabilidad y disponibilidad del servicio.

* Monografía

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento.
Director: Hugo Hernán Bernate

ABSTRACT

TITLE: DESIGN STRATEGY PLAN OF PREDICTIVE MAINTENANCE SYSTEMS ELECTRIC POWER DISTRIBUTION.

AUTHORS: ELIÓ CARRERO MONCADA, DIEGO FERNANDO SIERRA PEÑALOZA, MANOLO TAMAYO RIVAS**

KEYWORDS: ELECTRICIDAD, PREVENTIVE MAINTENANCE, DISTRIBUTION NETWORKS

In the modern world, electricity is the most important factor in energy and is the energy form most used by man, which makes possible to have a loads of facilities that offers a lots of way to use like lighting, heating, communications, industrial processes, transportation, appliances and biomedical equipment among its main applications.

The process of distribution of electricity depends on a number of elements to bring users and deliver high quality of electricity, this stage of the energy chain faces big challenges to combat external agents that affect the proper functioning of the network components and equipment involved in the system, such as vegetation, animals, weather conditions, environmental dirt, vandalism and misuse of electricity.

The designed project focuses on designing a emphasized in the management of maintenance, from the discipline of predictive maintenance system for power distribution strategy.

The project starts with a collection of data and information about networks, equipment and electrical system components to establish a hierarchical order, to later define the structure of maintenance activities based on the criticality of the different elements in the process, with a particular case to improve the reliability and availability of service.

* Monograph

** Faculty of Mechanical Engineering Physical. Specialization in Management of Maintenance.
Director: Hugo Hernán Bernate

INTRODUCCION

En el mundo moderno, la electricidad representa el factor más trascendente en materia energética, constituye la forma de energía más utilizada por el hombre, la cual hace posible contar con una serie de comodidades que la tecnología ofrece a modo de iluminación, calefacción, comunicaciones, procesos industriales, transporte, electrodomésticos y equipos biomédicos entre sus principales aplicaciones.

El proceso de distribución de energía eléctrica depende de una serie de elementos útiles para adecuar y entregar a los usuarios energía de óptima calidad, esta etapa de la cadena energética enfrenta grandes desafíos para combatir agentes externos que afectan el buen funcionamiento los componentes de las redes y los equipos involucrados en el sistema, tales como vegetación, animales, condiciones atmosféricas, suciedad del ambiente, vandalismo y mal uso de la electricidad.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El servicio de suministro de energía eléctrica en las ciudades presenta múltiples interrupciones debido a la alta tasa de fallos en componentes de las redes y subestaciones eléctricas, afectando directamente a los usuarios y económicamente a la empresa. De paso, aquellos agentes de la naturaleza que intervienen negativamente en el sistema, también resultan afectados.

Una considerable cantidad de las fallas que se presentan en el sistema eléctrico presentan manifestaciones en sus fases iniciales en forma de alteraciones térmicas así como emisiones acústica en la banda de ultrasonido, muchas de las cuales están asociadas a oxidación, corrosión, sulfatado de los materiales conductores, mal ajuste de conexiones y defectos en el aislamiento.

Se realizan inspecciones termográficas orientadas a encontrar puntos calientes pero no existe una gestión efectiva de la información tomada en estas actividades, no se llevan tendencias de las condiciones defectuosas por temperatura en los componentes del sistema, no hay una priorización definida de los equipos a monitorear, ni está definida la frecuencia de las inspecciones, no existe una base de datos como herramienta para un efectiva gestión de mantenimiento basado en condición que conlleve a elevar la confiabilidad y disponibilidad del servicio.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Elaborar la estrategia de mantenimiento predictivo para sistemas de distribución de energía eléctrica.

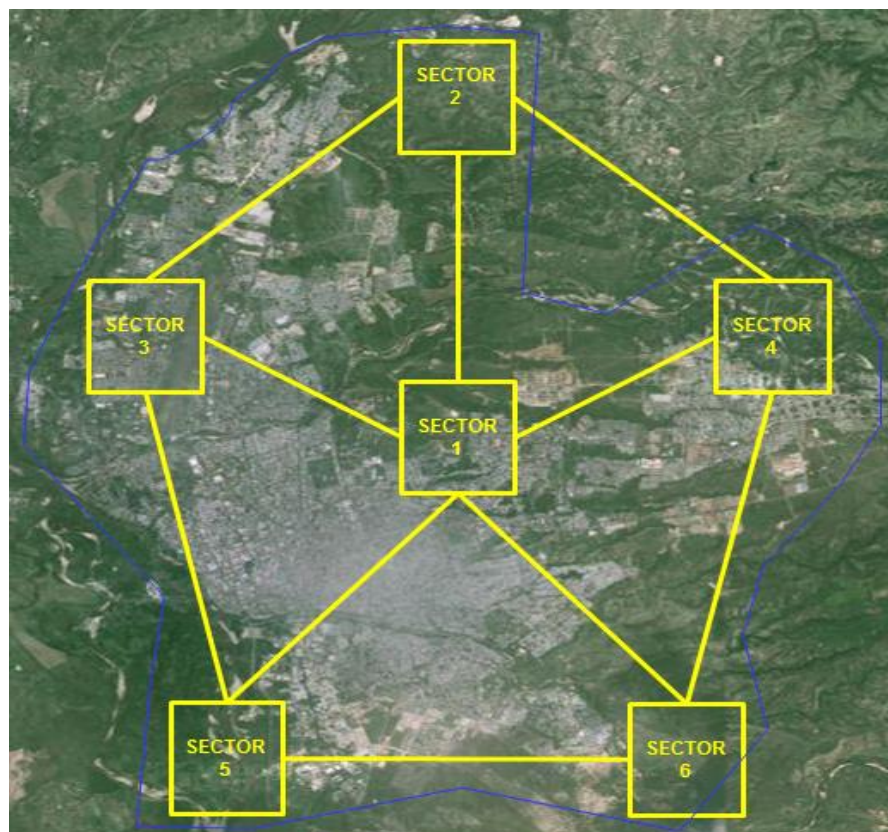
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Fomentar la filosofía de mantenimiento predictivo para las organizaciones de distribución de energía eléctrica, mediante el gerenciamiento de un plan de mantenimiento predictivo.
2. Presentar soluciones de mantenimiento que puedan consolidar la disponibilidad y confiabilidad del sistema eléctrico, a partir del análisis de la información recopilada en campo.
3. Establecer rutinas de mantenimiento predictivo con frecuencia y alcance, determinado de acuerdo al grado de criticidad de los componentes del sistema eléctrico.
4. Contribuir con la disminución de la tasa de fallas del sistema de distribución, con la detección temprana de condiciones anormales con alto potencial de afectación al servicio.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PLAN PROPUESTO:

Los sistemas de distribución eléctrica están implementados con diferentes componentes que cumplen funciones definidas, y cada una es esencial para la correcta operación del sistema, entre los más relevantes se encuentran las subestaciones eléctricas y las redes de distribución compuestas por múltiples subcomponentes expuestos a presentar fallas que pueden causar interrupciones en la continuidad del servicio.

Figura 1. Sistema de distribución modelo ciudad de Neiva.



El sistema de distribución de energía eléctrica de las diferentes ciudades de Colombia experimenta un estado de baja confiabilidad que está generando notable

inconformidad entre los usuarios, comprendidos sector industrial, residencial y comercial, asunto que ocasiona pérdidas económicas significativas a todos los relacionados en especial a las empresas de servicios públicos encargada de los sistemas de distribución.

El propósito fundamental de la presente propuesta se centra en el planteamiento de una estrategia para mejorar la confiabilidad del sistema de distribución eléctrica. En este sentido se orientan esfuerzos hacia la búsqueda de soluciones innovadoras que conduzcan a garantizar la mayor disponibilidad de los equipos asociados al proceso recepción de electricidad de la planta generadora, y entrega al usuario final del servicio de energía eléctrica.

La implementación de un programa de mantenimiento predictivo basado en el análisis de la condición operativa de los equipos representa un importante aporte a la estrategia, sin embargo en un contexto general se plantea un reto mayor; la disponibilidad, el tiempo en servicio, la confiabilidad y extender la vida útil de los activos requiere de un gerenciamiento práctico del área de mantenimiento que conduzca a la disminución de pérdidas y afectación a las comunidades, el medio ambiente y a la misma industria.

El modelo de gerenciamiento se estructura en forma integral asociando talento humano y tecnología, soportado en sistemas de información, se complementan con conceptos generados en experiencia y teoría, articulados como proceso dan como resultado el aseguramiento de la gestión eficiente de mantenimiento.

De tal manera se plantea una estrategia que integre una adecuada gestión de mantenimiento predictivo con soporte en una estructuración ajustada a las necesidades del sistema con técnicas y frecuencias de actividades definidas, con bases de datos integrales y procedimientos con unidad de criterios para las técnicas de termografía, ultrasonido y análisis de aceite dieléctrico.

4. CONTEXTO DEL SECTOR ELECTRICO

En el contexto nacional de la estructura del sector eléctrico en Colombia se describe en su estructura conceptual y operativa. La historia del sector eléctrico en Colombia, y su planeación, ha estado marcada por varios hitos, que constituyen cambios en los paradigmas sobre la organización del sector y la función del Estado frente a la prestación del servicio de energía eléctrica. Cada nuevo paradigma ha determinado la estructura orgánica y la dinámica del sector.¹

En la actualidad existe un interés creciente en medir la eficiencia del sector público en la provisión de bienes y servicios. Una mayor eficiencia en la prestación de dichos bienes y servicios permitiría, por una parte, alcanzar con la misma cantidad de recursos un mejor desempeño y un aumento en la calidad y/o, por otra parte, dados los estándares de servicios públicos que se ofrecen, generar ahorros en el gasto público. Dentro de este contexto, un estudio sobre el desempeño de las empresas del sector eléctrico resulta interesante no solo por los costos fiscales asociados a los problemas de ineficiencia, sino por el beneficio social, en términos de menores tarifas y mejor calidad en la prestación del servicio, que se podría obtener si las empresas operaran al nivel de la más eficiente.

Teniendo en cuenta que el servicio de energía eléctrica, y en particular la actividad de distribución, sobre la cual se concentra este estudio, tiene características de monopolio natural. Las empresas que suministran este servicio pueden explotar dicho poder y fijar precios por encima de los costos mínimos o apropiarse de las utilidades provenientes de prácticas restrictivas a la competencia¹.

¹ SANDOVAL Ana María. Monografía del sector de electricidad y gas colombiano. Departamento Nacional de Planeación. Colombia, 2004.

Para contrarrestar la explotación del poder monopólico, el suministro de este servicio tradicionalmente se ha hecho a través del sector público y más recientemente se ha permitido la participación del sector privado, con la regulación por parte del Estado, estableciendo incentivos para mejorar la eficiencia y la determinación de los precios (Carrington, Coelli y Groom, 2002).

En el caso particular de Colombia, las reformas introducidas en el sector en la primera mitad de la década de los noventa permitieron que en el negocio de la distribución de energía participaran empresas públicas, privadas y mixtas. La estimación y análisis de los niveles de eficiencia a los cuales están operando estas empresas permite establecer si las tarifas que se cobran a los usuarios finales son el resultado de una estructura de costos y producción eficiente o por el contrario involucran prácticas ineficientes. Si existen grandes diferencias en los niveles de eficiencia de las empresas.²

Para el año 2050, la demanda mundial de energía se va a duplicar. Colombia tiene que aprovechar las oportunidades que de allí se desprenden; en especial en el sector eléctrico. El Gobierno debe evitar errores que opaquen esta perspectiva.

¿Qué tiene la energía eléctrica? ¿Por qué se ha convertido en un imán que atrae a los inversionistas? Ellos han entendido el extraordinario potencial de crecimiento del sector. En una economía global, en la que los países emergentes se convierten en el motor del consumo y el crecimiento, la demanda proyectada de energía muestra una curva de rápido ascenso. Colombia aparece como uno de los países que tiene mayor potencial en el mundo para aprovechar las ventajas que se abren en este nuevo escenario.

² MELO B. LIGIA, ESPINOSA NÉSTOR. Ineficiencia en la distribución de energía eléctrica. Colombia 2004

La Agencia Internacional de Energía anticipa que la demanda global crecerá en 45% para el año 2030. De acuerdo con un estudio de Suez, Schneider Electric y Total, en el mundo hay más de 1.600 millones de personas que no tienen acceso a la electricidad. Así, el mundo hará una transición hacia nuevas fuentes de energía, pero ella será gradual.

En este contexto, Colombia aparece como uno de los países con mayor potencial en el mundo para aprovechar la nueva demanda y las oportunidades de negocios que se derivarán de ella. Es uno de los países mejor situados para las décadas de transición que vienen. Además de las reservas de petróleo, tiene abundancia de combustibles fósiles -carbón y gas-; y cuenta con grandes cantidades de fuentes renovables, con un gran potencial para la generación hidroeléctrica. Como lo afirma Juan Guillermo Londoño, presidente de Colinversiones, "el país tiene 90.000 megavatios de potencial desarrollo hidroeléctrico y hoy apenas ha desarrollado unos 9.000". Finalmente, Colombia presenta buenas condiciones para el desarrollo de nuevas fuentes de energía, como la eólica.

La demanda en Colombia crecerá a la par con las tendencias mundiales. Según McKinsey, el crecimiento del consumo per cápita de energía en Colombia pasará de 923 MWh en el año 2000, a 2.131 MWh en el año 2030. En un escenario de crecimiento medio, estimado por la Unidad de Planeación Minero Energética (Upme), en los próximos diez años el sector crecería a una tasa promedio anual de 3,7%.

Todo esto da respaldo a la designación del sector de energía eléctrica como uno de los sectores del programa de Transformación Productiva del Ministerio de Comercio, con el que se aspira a que este sector alcance un nivel de "talla mundial" para el año 2032. De acuerdo con el estudio en el que se consolida el plan de negocios del sector para lograr esta meta, realizado por McKinsey, Colombia podría pasar de generar US\$8.500 millones en ingresos en este sector

en la actualidad, a generar al menos US\$19.000 millones para el año 2032 y crear más de 15.000 empleos. McKinsey estima que el plan exigiría inversiones por cerca de US\$14.000 millones en los próximos 20 años.³

Se espera que en las bases de la metodología de remuneración de cargos de distribución para el próximo periodo tarifario se establezcan señales que contribuyan con el fortalecimiento y consolidación de la actividad de distribución, considerando entre otros lo siguiente: una remuneración estable y razonable en el largo plazo de las inversiones en activos instalados por los Operadores de Red (activos en operación) y/o por instalar en expansión (expansión, cobertura, reposición, pérdidas, calidad del servicio y confiabilidad, entre otros); un esquema que incentive el uso eficiente de la electricidad por parte de los diferentes usuarios; la actualización de los sistemas de distribución y que se promueva un rol más activo de la demanda.

La expansión en la infraestructura de distribución se ha venido ejecutando con base en el desarrollo y crecimiento propio del negocio y las inversiones requeridas para atender la nueva demanda, reforzar la confiabilidad y calidad del sistema, así como garantizar una atención eficiente y oportuna a los usuarios de energía eléctrica. Dado lo anterior, los Operadores de Red han invertido cuantiosos recursos en redes de alta, media y baja tensión, transformadores y subestaciones, entre otros activos.⁴

REGULACION

El desarrollo regulatorio y financiero de las actividades de Distribución y Comercialización, así como una visión de forma prospectiva de aspectos

³ DINERO [en línea] Disponible en: www.dinero.com. Colombia 2009. Citado 15 de diciembre de 2013

⁴ Informe Sectorial Sobre La Evolución de la Distribución y Comercialización de Energía Eléctrica en Colombia. Colombia 2011.

fundamentales para la toma de decisiones, en procura de la sostenibilidad a largo plazo de estas actividades y que implican retos como la suficiencia financiera, la expansión de la infraestructura, la reducción y mantenimiento de las pérdidas, la generación distribuida, la calidad del servicio, una comercialización simétrica en el mercado minorista, así como la continuidad y confiabilidad del servicio integralmente, entre otros.

Sobre expansión, durante el año 2011 se plantearon las dificultades exógenas y endógenas que están ocasionando atrasos en la entrada de los proyectos de expansión en el STR, por lo cual los diferentes actores han presentado públicamente propuestas que contribuyan con la solución a la confiabilidad y seguridad del SIN. En ese sentido, la CREG publicó la propuesta regulatoria contenida en la Resolución CREG 198 de 2011 con procedimientos a seguir para la realización de la expansión en el STR mediante mecanismos de libre competencia como mecanismo de excepción.

En relación a la nueva metodología sobre calidad del servicio, en la cual se plantea un esquema de incentivos y compensaciones al OR, la CREG estableció, en el 2010, para algunas empresas los índices de referencia de la discontinuidad, IRAD, para medir el desempeño de la calidad. En el primer semestre de 2011, se definieron los IRAD para las empresas restantes, dando inicio a la aplicación del esquema en todo el país, como se indica en el siguiente cuadro. Respecto a estas resoluciones, se interpusieron por parte de varias empresas recursos de reposición.

Tabla 1. Resoluciones CREG de la actividad de Distribución de Energía Eléctrica

| EMPRESA | INVERSIÓN 2010 |
|------------------------------|----------------|
| CODENSA | 235.264 |
| ELECTRICARIBE | 184.239 |
| EPM | 76.467 |
| EEP | 50.868 |
| ELECTROHUILA | 44.600 |
| EBSA | 39.500 |
| CENS | 37.839 |
| EMSA | 36.301 |
| EEC | 35.853 |
| CHEC | 32.759 |
| ELECTROCAQUETA | 24.946 |
| DISPAC | 24.438 |
| ENERTOLIMA | 21.115 |
| CEDENAR | 12.017 |
| EPSA | 9.957 |
| EDEQ | 9.064 |
| EMCALI | 8.795 |
| CÍA. ENERGETICA DE OCCIDENTE | 3.548 |
| CETSA | 2.814 |
| TOTAL | 887.384 |

Fuente: Empresas

Respecto al proyecto de Reglamento de Comercialización (Resolución CREG 143 de 2010), se proponen requisitos para ejercer la comercialización como el Índice de Patrimonio Técnico e Indicador de Solvencia, responsabilidad del comercializador respecto al correcto funcionamiento del equipo de medida, responsabilidad de las actividades de suspensión, corte, reconexión y reinstalación al distribuidor, prohibición a la agrupación de fronteras multi-usuario y acceso a los equipos de medida.

En el mismo sentido de las resoluciones anteriores, se expidieron las resoluciones CREG 039 y 040 de 2010, referentes a la limitación de suministro, por medio de las cuales se hizo más exigente los tiempos de interrupción a los cuales se encuentra abocado un comercializador en caso de limitación de suministro y se redujeron los plazos para la iniciación de dichas interrupciones, desde el momento

en que se presenta un incumplimiento de la actualización de las garantías por parte del comercializador.

Resoluciones CREG asociadas criterios de confiabilidad eléctrica.

CREG009. Por la cual se definen criterios de confiabilidad para el seguimiento del análisis energético previsto en la Resolución CREG-137 de 2009.

CREG010. Por la cual se dictan normas transitorias sobre funcionamiento del Mercado Mayorista de Energía para garantizar el sostenimiento de la confiabilidad de corto plazo.

CREG049. Por la cual se dictan normas transitorias sobre funcionamiento del Mercado Mayorista de Energía para garantizar el sostenimiento de la confiabilidad de corto plazo.

CREG068. Por la cual se dictan normas transitorias sobre funcionamiento del Mercado Mayorista de Energía para garantizar el sostenimiento de la confiabilidad de corto plazo.⁵

⁵ Ministerio de Minas y Energía, upme, ASOCODIS. Informe sectorial sobre la evolución de la distribución y comercialización de energía eléctrica en Colombia República de Colombia. Colombia 211.
CREG: Comisión de Regulación de Energía y Gas

5. MARCO TEORICO

5.1 EL CONCEPTO DE MANTENIMIENTO

Algunos teóricos han definido el concepto de mantenimiento como el conjunto de acciones que permiten mantener un equipo o restablecerlo ya sea de tipo maquinaria, equipos, edificación, instalaciones, etc.; logrando mantenerlo en buen estado de funcionamiento, para de esta forma obtener una mayor disponibilidad de dichos equipos hasta un tiempo finito de vida útil a un costo mínimo⁶.

De esta forma se logra una acción eficaz, capaz de mejorar aspecto de orden operativo al momento de lograr el establecimiento de acciones de funcionalidad, seguridad, productividad, confort, imagen corporativa, e higiene. De esta forma se logra otorga una posibilidad de racionalizar costos de operación, logrando el mantenimiento tanto de orden preventivo, predictivo y correctivo.

Se debe tener en cuenta que el concepto de mantenimiento se enfoca en el análisis de la segunda rama de conservación y se refiere de esta forma a los trabajos que son necesarios hacer con el objeto de proporcionar un servicio de calidad estipulada, por tanto es importante notar que, basados en el servicio y su calidad deseada, se debe escoger los equipos que aseguren obtener un adecuado servicio.

El mantenimiento presenta unos objetivos específicos de acción dentro de los que se destacan los que tienen que ver con la organización e información; la cual debe estar encaminada a la permanencia y consecución de los enfoques de optimización de la disponibilidad del equipo productivo, disminución de los costos

de mantenimiento, la optimización de los recursos humanos y la maximización de la vida de la máquina⁷.

Algunos autores como Mosquera, han determinado los diferentes tipos de mantenimiento que pueden ser considerados también como políticas de mantenimiento, siempre que su aplicación se establezca como el resultado de una definición general o de una política global de las instalaciones.

En este orden de ideas, aparece el mantenimiento correctivo, que es el también denominado mantenimiento reactivo, que tiene lugar luego de que ocurre una falla o avería, es decir, solo actuará cuando se presente el error en el sistema, en este caso si no se produce ninguna falla, el mantenimiento se catalogará como nulo, por lo que se tendrá que esperar hasta que se presente el desperfecto para lograr tomar las medidas de corrección de errores, trayendo consecuencias como⁸:

- Paradas no preventivas en el proceso productivo, restando las hora operativas.
- Afectación de las cadenas productivas, es decir, que los ciclos de producción se verán parados o postergados a la espera de la corrección de la etapa anterior.
- Presenta un costo de reparación y repuestos no presupuestados, por lo que se dará el caso que por falta de recursos económicos que no podrán comprar los repuestos a partir del momento deseado.
- La planificación del tiempo estará bajo el sistema fuera de operación no es predecible.

⁶ SÁNCHEZ MARCOS. Programa de Mantenimiento de Máquinas Frapo. Universidad San Ignacio de Loyola. Lima- Perú, 2007.

⁷ GARRIDO, S. Organización y gestión integral de mantenimiento. España, Ed. Díaz de Santos, 2003.

⁸ ELOLA, L.N. PASTOS, A. MUGABURU J. Gestión integral de Mantenimiento, Priemra Edición, 1997.

Por otro lado, el mantenimiento preventivo, se denomina también planificado; teniendo lugar antes de que ocurra una falla o avería, se efectúa bajo las condiciones controladas sin la existencia de algún error del sistema, por otro lado, se realiza a razón de la experiencia y de la pericia del personal a cargo, los cuales son los encargados de determinar el momento necesario para llevar a cabo dicho procedimiento; en estos casos el fabricante el fabricante también puede estipular el momento a través del cual se establece en los manuales técnicos.

Dentro del compendio de características que presente el mantenimiento preventivo se tiene⁹:

- Se lleva a cabo en un momento en el que se está produciendo, por lo que se aprovecha las horas ociosas de la planta.
- Se lleva a cabo bajo los programas previamente elaborados donde se detalla el procedimiento a seguir, y las actividades pertinentes, a fin de tener las herramientas y repuestos necesarios a la mano.
- Posee una fecha específica de programación, además de un tiempo de inicio y de terminación preestablecido ya aprobado por los directivos de la empresa.
- Se destina a un área específica y a ciertos equipos en particular, pero no se puede obviar que también se puede llevar a cabo en un mantenimiento generalizado de todos los componentes de la planta.
- Permite a la empresa el contar con un historial de los equipos, de tal forma que brinde la opción de actualización de la información técnica de los equipos.
- Se cuenta con un presupuesto aprobado específico por parte de las directivas.

Por otro lado, aparece el mantenimiento predictivo, el cual consiste en determinar la condición técnica ya sea de orden mecánico o eléctrico, en forma real de la máquina examinada, mientras esta se encuentre en pleno funcionamiento, haciendo uso de un programa sistemático de las mediciones de los parámetros más importantes del equipo.

En este aspecto el sustento tecnológico de este mantenimiento se fundamenta en la aplicabilidad de los algoritmos matemáticos agregados del diagnóstico que puede brindar la información pertinente a las condiciones del equipo.

Tiene como objetivo la disminución de las paradas por mantenimientos preventivos, y de esta manera la disminución de los costos por mantenimiento y por no producción, de esta forma la implementación de este tipo de métodos requiere de una inversión de equipos, en instrumentos y en contratación de personal calificado.

Dentro de los elementos más comunes que se utilizan el mantenimiento predictivo se pueden encontrar¹⁰:

- Analizadores de Fourier, que analiza vibraciones.
- Endoscopio, utilizado para llegar a lugares ocultos.
- Ensayos no destructivos a partir de líquidos penetrantes, ultrasonido, radiografías, partículas magnéticas, etc.
- Elementos de Termovisión a través de condiciones de calor desplegado

⁹ MASSON, F. M. Teoría y práctica del Mantenimiento Industrial. Barcelona, 1990.

- Medición de parámetros de operación, a través de la medición de la viscosidad, voltaje, corriente, potencia, presión, temperatura, entre otras.

En lo que respecta al plan específico que debe tener el plan de mantenimiento se puede establecer en primer lugar que dicho plan se define como un conjunto de actividades o trabajos de mantenimiento planeados y rutinarios, integrado por posiciones de mantenimiento, que es el elemento que liga a las diferentes estrategias de ruta de equipos.

Para desarrollar un adecuado programa de mantenimiento planeado es necesario tener en cuenta¹¹:

1. Administración del Plan: Se reconoce como la primer parte que se lleva a cabo en el desarrollo de un programa de mantenimiento reuniendo las fuerzas de trabajo que se inicia y se ejecuta desde el plan; a partir de la designación de una sola persona como jefe de la fuerza de trabajo, además que es esencial bajo el compromiso de la dirección para el cumplimiento exitoso del plan.
2. Inventario de Instalaciones: Se fundamenta bajo el inventario de las instalaciones reconocidas en una lista donde se encuentran consignadas todos los equipos y se elabora con fines de identificación, bajo una hoja de inventario de todo el equipo mostrando la identificación de la descripción, de la instalación, su ubicación, tipo y prioridad (importancia).
3. Registro de las instalaciones o equipos: el registro de las instalaciones o equipos se reconoce como un archivo donde se exponen los detalles técnicos acerca de los equipos incluidos en el plan de mantenimiento. Se reconocen como

¹⁰ BECERRA, FABIANA. Gestión de Mantenimiento, 2006. [en línea] Disponible en: www.mantenimientomundial.com. citado 15 de diciembre de 2013

¹¹ LEAL, S. Y ZAMBRANO, S. Fundamentos Básicos de Mantenimiento. 1ª Edición, Fondo Editorial UNET, Venezuela, 2005.

los primeros alimentados el sistema de información del mantenimiento. En este aspecto el registro de los equipos debe contener información como el número de identificación, ubicación, tipo de equipo, fabricante, tipo de equipo, fecha de fabricación, número de serie, especificaciones, tamaño, capacidad, velocidad, peso, energía de servicio, detalles de conexión, dimensiones generales, tolerancias, número de plano de referencia, número de referencia para los manuales de servicio, etc.

4. Programa específico de mantenimiento: Dicho programa posee una especificación dentro del programa general de mantenimiento, dicha lista se complementa con las tareas de mantenimiento general que se van a realizar en el equipo. En el mismo se incluye el número de identificación del equipo, su ubicación, número de referencia del programa, lista detallada de las tareas que se llevaran a cabo, frecuencias de cada tarea, tipo de técnicos requeridos para realizar la tarea, tiempo para cada tarea, tipo de técnicos requeridos para realizar la tarea, herramientas especiales que se necesitan materiales necesarios¹².

5. Especificación del trabajo: En este punto, las especificaciones se fundamentan bajo el documento que describe el procedimiento para cada tarea, el cual proporciona una tarea específica de mantenimiento, basado en la indicación de las necesidades del equipo, por tanto se debe indicar el número de identificación de la pieza (equipo), ubicación de la misma, referencia del programa de mantenimiento, frecuencia del trabajo, tipo de técnicos requeridos para el trabajo, detalles de la tarea, componentes que se van a reemplazar, herramientas y equipos especiales necesarios, planos de referencia, y manuales y procedimiento de seguridad a seguir.

¹²NEWBROUGH, E. MYERS. Administración del Mantenimiento Industrial. Editorial Diana, México, 1998.

6. Programa de mantenimiento: Se reconoce como la lista de asignaciones o tareas de mantenimiento en un lapso específico, ejecutado bajo el programa general y balanceado a cargo de la productividad y del cumplimiento de los requerimientos de producción y su ejecución.

5.2 SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Se conocen los sistemas eléctricos de potencia o SEP como aquellos que están compuestos de un conjunto de instalaciones que permiten generar, transportar y distribuir la energía eléctrica en condiciones adecuadas de tensión, frecuencia y disponibilidad.

Dentro del grupo de estos sistemas, se encuentran los de topologías del SEP, entre los que se encuentran: [1]

- a) **Sistemas Radiales**: son los que se ubican en una determinada subestación a través de alimentadores, cada uno de los cuales puede o no ramificarse, pero no poseen un punto en común.
- b) **Sistemas en Anillo (bucle)**: En estos se aumenta la seguridad del servicio alimentándose en paralelo desde 2 o tres fuentes a la vez mediante líneas continuas, sin interrupciones, por tanto se forman en espacios reducidos y cada uno puede contener derivaciones más o menos importantes.
- c) **Sistemas Enmallados**: En este sistema todas las estructuras forman anillos, de manera que se enfoca en una estructura semejante a una malla. Esta disposición exige que todos los tramos de línea acepten sobrecargas permanentes, y estén premunidos de equipos de desconexión en ambos extremos.

5.3 SISTEMAS AISLADOS Y CENTRALIZADOS

Estos sistemas responden a la concatenación de estrategias de electrificación que pueden llegar a clasificarse en función del esquema de distribución de electricidad, en sistemas aislados y centrales eléctricas autónomas también denominadas micro-redes¹³.

Dado que, los sistemas aislados de orden centralizado se unen para proveer de electricidad a una única estructura ya sea vivienda, centro público, empresa u organización. De esta forma se suministran servicios básicos, como iluminación, inclusión de equipos electrónicos de bajo consumo de energía, sanitarios de telecomunicación y zonas recreativas.

Es así, que todos aquellos sistemas centralizados que son destinados a suministrar electricidad a diversos usuarios, tanto privados como públicos, que se encuentren físicamente agrupados, pueden ser catalogados dentro de esta estructura clasificatoria. En este tipo de elementos, el rango de consumos puede ser variado; ya que posee capacidades de generación entre los vatios W y los kilovatios kW, como es el caso de las compañías de electricidad que optan por las micro-redes cuando la comunidad de usuarios está alejada de la red de distribución interconectada, por medio de generadores diesel en la mayoría de los casos¹⁴.

Habría que decir también, que un elemento importante en el diseño y análisis de los sistemas eléctricos de potencia estructura su estabilidad, posibilitando y evitando resonancias entre equipos de generación, alzas de voltaje y daños a equipos de consumo, para lo cual existen métodos que facilitan la determinación

¹³ PALMA , Rodrigo, BROKERING, Christie Walter y VARGAS, Luis. Ñom Lufke (El Rayo Domado) o Los Sistemas Eléctricos de Potencia. Santiago, Pearson, 2008. 471p.

¹⁴ STEVENSON, WILLIAM. ANÁLISIS DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA. 2° ED. MÉXICO, MCGRAW-HILL, 1975. 383P.

de condiciones de estabilidad asociada a un sistema dado, y también en la búsqueda de un mejoramiento. Es así, que se presentan publicaciones en que se propone, por ejemplo, la modificación del sistema a través de compensadores (FATCs, VARs) con el propósito de mejorar su desempeño y estabilidad¹⁵.

5.4 CONCEPTOS BÁSICOS DE ESTABILIDAD ELÉCTRICA

La estabilidad eléctrica se reconoce como una pequeña señal definida como la habilidad de un sistema dinámico que permanece estable en la presencia de pequeñas perturbaciones, las cuales se pueden presentar por variaciones menores en la carga o generación del sistema, ya que si se presenta una amortiguación de torque suficiente en una máquina generadora, esto puede tener como resultado oscilaciones en el ángulo de rotor de amplitud creciente¹⁶.

Dicha estabilidad, se fusiona en un sistema relacionado con la evolución en el tiempo a partir de una condición de equilibrio, que es estructurada por la interacción de fuerzas que lo sacan del equilibrio y de fuerzas restauradoras que tratan de volverlo al equilibrio inicial.

En los casos en que se presentan perturbaciones pequeñas, las ecuaciones dinámicas que describen la operación pueden ser linealizadas y estabilizadas a través del dominio de Laplace mediante con base en las raíces del polinomio característico del determinante del sistema de ecuaciones, lo que se conoce como el primer método de Lyapunov indirecto¹⁷.

¹⁵ RUSEJLA Sadikovic. Use of FACTS Devices for Power Flow Control and Damping of Oscillations in Power Systems. Tesis (Doctor of Technical Sciences). Zürich, Switzerland. SWISS Federal Institute Of Technology, 2006. 139 h.

¹⁶ DERUSSO, P.M., ROY, R.J. y CLOSE, C.M. State Variables for Engineers. New York . John Wiley and Sons, 1998.

¹⁷ DUARTE, Manuel. Apuntes del Curso Análisis y Modelación de Sistemas Dinámicos. Universidad de Chile, 2007.

Pero, si llegan a presentar perturbaciones de corte mayor, la linealización ya no es válida y en tal caso existen dos formas de analizar la estabilidad, la cual es el método de simulación, resolviendo en el tiempo el sistema de ecuaciones diferenciales que determina la dinámica del sistema; mientras que la segunda es conocida como segundo método de Lyapunov, se basa en la definición de ciertas funciones representativas del sistema, llamadas funciones de Lyapunov, cuyas características indican si el sistema es estable o no. Sin embargo, estas funciones son difíciles de encontrar, por lo que no siempre es posible aplicar este método en la práctica.

5.4.1 Sistema dinámico en espacio de Estado Se reconoce el espacio del estado como un espacio euclidiano de dimensiones a partir de unas variables, en el que se representa el estado del sistema. Por tanto, la trayectoria de un estado es el conjunto de puntos representativo de la evolución del estado del sistema en el espacio de estado, siendo el origen de la trayectoria el punto de partida de ella¹⁸.

A partir de un sistema dinámico se estructura el conjunto mínimo de variables, conocidas como variables de estado, que describen completamente al sistema y su respuesta a cualquier conjunto de entradas dadas¹⁹, puesto que sólo de esta forma, se describirán bajo el fundamento de un sistema que define un conjunto de variables linealmente independientes, llamadas variables de estado. En los sistemas de potencia las variables empleadas normalmente son la tensión y ángulo de las barras del sistema. En general, la forma de representar un estado no es única, de manera que el conjunto de variables de estado tampoco lo es.

¹⁸ BASLER, M. y SCHAEFER, R. Understanding Power System Stability. En: 58th Annual Conference for Protective Relay Engineers: 5 al 7 de abril de 2005. Texas A&M University.

¹⁹ ROWELL, Derek. Apuntes del curso Analysis and Design of Feedback Control Systems. Massachusetts Institute of Technology, 2002.

En este orden de ideas, los parámetros del sistema son los valores que determinan la estructuración del sistema, se potencializan bajo la consideración de los parámetros de admitancia de los equipos de la red, a través de los límites de operación de la estructura subtransitoria de los generadores; basados en la razón de transformación de los transformadores; las constantes de tiempo de los reguladores y los retardos de operación de los equipos de control.

5.5 MANTENIMIENTO PREDICTIVO A TRAVÉS DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA

A través de la técnica de termografía infrarroja, se permite medir una temperatura de superficie con precisión, identificada a través de componentes eléctricos y mecánicos más calientes de lo que deberían estar, o de la misma forma se puede predecir las pérdidas excesivas de calor; con base en indicios de aislaciones deficientes o inadecuadas²⁰.

De esta misma forma, se logra la reducción de tiempos de parada de un equipo; minimizando la probabilidad de detenciones imprevistas o no programadas; a partir de la base de una predicción del estado del equipo, de las instalaciones, etc., a partir de la realización del mantenimiento preventivo de manera programada.

Con la ayuda de esta técnica, se logra detectar, sin contacto físico con el elemento bajo análisis, cualquier falla que se manifieste en un cambio de la temperatura sobre la base de medir los niveles de radiación dentro del espectro infrarrojo.

²⁰ GENS, FRANK. IDC Predictions 2013: Competing on the 3rd Platform, IDC, November 2012, International Data Corporation #238044, Volume: 1

Dicha técnica se basa en la teoría de la termografía infrarroja la cual juega un rol cada vez más importante en el mantenimiento; ya que a través de ella se producen imágenes de radiación térmica que emiten los objetos, ayudando a los encargados de realizar las tareas de mantenimiento en dos aspectos²¹:

1. No se tiene contacto directo en la acción, permitiendo identificar componentes eléctricos y mecánicos más calientes de lo que deberían estar en general, una falla electromecánica antes de producirse se manifiesta generando e intercambiando calor. Calor por medio del cual se fundamenta una elevación de temperatura que puede ser súbita, pero, por lo general y, dependiendo del objeto, la temperatura comienza a manifestar pequeñas variaciones., e indica también pérdidas excesivas de calor que usualmente son síntomas de aislamiento defectuosa o inadecuada.
2. La utilización constante de esta estrategia proporciona una reducción en los tiempos de detección al minimizar la probabilidad de detenciones imprevistas o no programadas, gracias al aporte que brinda en cuanto a la planificación de las reparaciones programadas y el mantenimiento. Por tanto la reducción de costos, maneja el empleo de esta tecnología consiguiendo ahorros en energía eléctrica, una protección adecuada de equipos valiosos, velocidad de inspección y diagnóstico, y lo más importante: evita las pérdidas de producción ocasionadas por paradas imprevistas.

Los fundamentos físicos de esta teoría se encuentran soportados en la ley de Stefan – Boltzmann, en la cual se determina que todos los cuerpos están a una temperatura por encima del cero absoluto (-273°C) emiten energía radiante, la cual está sujeta a la temperatura del cuerpo y a un factor que depende del material, de

²¹ FLIR SYSTEMS. Manual del Curso de Termografía Infrarroja Nivel 1.

la rugosidad y color de la superficie llamado emisividad. Para calcular la energía radiante emitida E se emplea la siguiente ecuación²²:

$$E = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_e^4$$

De esta forma se representa la emisividad; sigma, a la constante de Stefan Boltzmann y t, a la temperatura del objeto en grados Kelvin; por medio de una cámaras termográficas que se encargan de medir la energía radiante emitida por los cuerpos y conociendo la emisividad del mismo pueden calcular la temperatura.

A partir de dicha estrategia todo equipo y/o elemento emite energía desde su superficie, la cual se forma en ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz a través del aire o por cualquier otro medio de conducción, de tal forma que la cantidad de energía está en relación directa con su temperatura. Entre más caliente está el objeto, más energía tiende a radiar.

Es decir que se puede llegar a afirmar, que la diferencia entre un cuerpo caliente y uno frío es el grado en el cual ambos cuerpos emiten y absorben energía, ya que si el objeto absorbe más energía que la que radia se le considera frío. Si el objeto emite más energía que la que absorbe se considera que está caliente. Es así, como la temperatura de los cuerpos determina el tipo de luz que emite, entre más frío sea el objeto mayor es la longitud de onda en la que brilla²³.

Esta es la energía infrarroja, la cual es invisible al ojo humano, pero a través de equipos apropiados, cámaras de termografía, se logra ver esta energía y transformarla en imágenes visibles.

²² KERN DONALD Q., , Editorial Continental, S.A. DE C.V., México, 1997.

Para lograr determinar la emisividad de dicho material es necesario tener en cuenta, que dicha evaluación se puede hacer a través de²⁴:

- Tablas de emisividad: en las cuales se puede ver la emisividad para los materiales más utilizados en la industria, principalmente en las instalaciones eléctricas.

- Medición de temperatura por contacto: se determina la emisividad de un material midiendo la temperatura a través de un elemento de contacto, como por ejemplo: una termocupla o un termómetro; ya que conociendo en realidad la temperatura real se le puede enfocar con la cámara y se le ajusta la emisividad hasta que la cámara marca la temperatura media anteriormente.

- Comparación con una emisividad conocida: Es el método más práctico, pues solo es necesario colocarle al objeto una cinta de un material cuya emisividad sea conocida, para posteriormente medir con la cámara la temperatura sobre la cinta, ajustando la emisividad en 0.95; después se mide la temperatura sobre el objeto y se ajusta la emisividad hasta que marque la temperatura medida sobre la cinta.

- Especificaciones de fabricantes: En este caso existen fabricantes que en sus catálogos indican la emisividad de los materiales o elementos que fabrican.

En lo que tiene que ver con lo sistemas eléctricos, se logra efectuar una a inspección termográfica con el objetivo detectar componentes defectuosos basándose en la elevación de la temperatura como consecuencia de un aumento

²³ JAMES R. WELTY., Fundamentos de transferencia de momento calor y masa. Capítulo 24 Editorial Limusa, 1998.

²⁴ PUYANS L. GARCELL. Transferencia de cantidad de movimiento calor y masa. Capítulo 5 Editorial Pueblo y Educación. Habana Cuba, 1988.

anormal de su resistencia óhmica, ya que las causas que originan estos defectos, entre otras, pueden mencionarse²⁵:

- Conexiones flojas
- Conexiones afectadas por corrosión
- Suciedad en conexiones y/o en contactos
- Degradación de los materiales aislantes

Se clarifica esta idea soportándola, a través del enunciado de que el calor generado en el punto de aumento de resistencia es evacuado por el conductor adyacente y por el aire, ya que cuando esto ocurre la termografía mostrará un área caliente en la conexión y una disminución gradual en la temperatura a medida que aumenta la distancia desde la conexión.

Pero debe tenerse en cuenta, que no todos los sobrecalentamientos eléctricos son producidos por un aumento de la resistencia, ya que en los casos de los sistemas trifásicos, por ejemplo, un pequeño cambio en el flujo de corriente puede producir una diferencia considerable en la cantidad de calor generado, y el sobrecalentamiento, en este caso, aparecerá como una temperatura constante a lo largo de todo el conductor.

5.6 EL MANTENIMIENTO DEL ACEITE DIELECTRICO

Una de las necesidades importantes en la industria eléctrica actual, es la cantidad de emisión de fluido eléctrico desde las fuentes de generación hasta los centros de consumo por lo que es fundamental el desarrollo de ciertos equipos eléctricos como es el caso de los transformadores.

²⁵ ÓP. Cit. JAMES R. WELTY, 1998.

Dicha necesidad se fundamenta en la demanda eléctrica que va en aumento, por lo que la dificultad de trasladar este tipo de energía de un lugar a otro fue haciéndose más evidente, pues en sus principios se generaba corriente directa a baja tensión para alimentar los circuitos de alumbrado y de fuerza motriz, esto permite que se presente ineficiente frente a la transmisión de grandes bloques de energía.

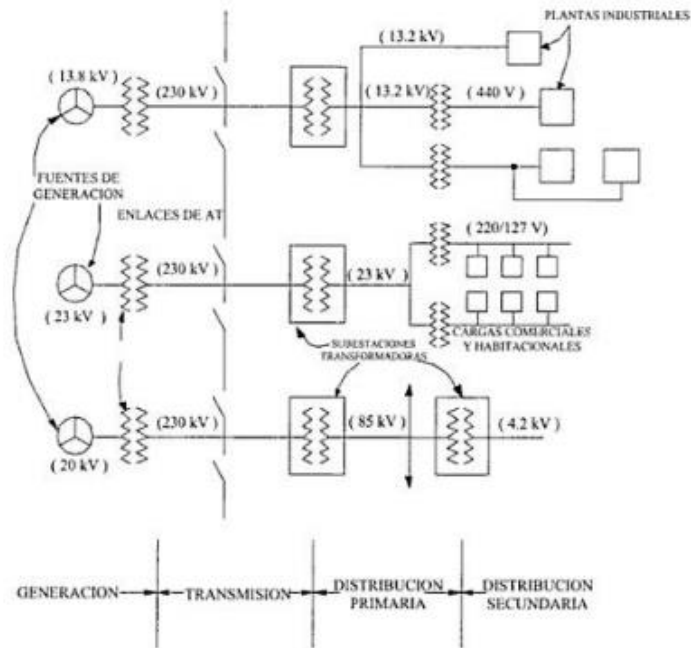
En este orden de ideas, se ve la necesidad de elevar la tensión en los centros de generación para llevar a cabo la transmisión de energía y reducirlo al llegar a los centros de carga o consumo²⁶. Por tanto dichos dispositivos llevan a cabo este proceso de transformación cambiando con ello, el uso de la corriente directa a corriente alterna, dado que el transformador funciona solo con corriente alterna.

A través de un diagrama unifilar se representa desde la generación hasta la utilización de la potencia eléctrica²⁷. Las grandes plantas de generación o estaciones centrales, generan energía en forma masiva, la cual es luego transmitida a subestaciones en puntos cercanos a los sitios donde será utilizada, y posteriormente la energía será distribuida desde dichas subestaciones hasta los usuarios (Ver Figura 2).

²⁶ SANZ FEITO. J. Máquinas Eléctricas. Departamento de Ingeniería eléctrica. Universidad Carlos III de Madrid. Madrid, 2002

²⁷ J. G. TRASANCOS Instalaciones Eléctricas en Media y Baja Tensión. ITP An Internacional Company. Madrid, 1999.

Figura 2. Esquema representativo de un sistema eléctrico de potencia.



Fuente: J. G. Trasancos Instalaciones Eléctricas en Media y Baja Tensión. ITP An Internacional Company. Madrid, 1999.

Se establece la dinámica que al llevar la energía a los centros de consumo desde las fuentes de generación, es necesario del uso de cuanto menos cuatro transformadores, los cuales tienen una función determinada. Definiéndose como regla general que por cada kVA generados se requieren al menos cuatro kVA de transformación²⁸.

Dichas unidades se encuentran, normalmente, formando subestaciones eléctricas y según el empleo que se les dé, reciben el nombre de transformadores de potencia o de distribución, y pueden ser elevadores, reductores o de enlace, existiendo de la misma forma los transformadores especiales y los transformadores para instrumento que son empleados como auxiliares para

²⁸ H. CARL MANGER, J. R. Reynolds; Insulating Mineral Insulating Oil (Transformer Oil). Doble Engineering Company. 2005.

conectar los aparatos para la medición, la protección y el control de los circuitos eléctricos de potencia.

En este orden de ideas, es necesario que el transformador disponga de un sistema de aislamiento, compuesto por una serie de materiales, los cuales, juntos forman una total protección para el trafo, siendo capaz de aislar las partes activas del equipo que se encuentran a potenciales diferentes (conductores entre sí, con respecto a la carcasa, a las chapas metálicas).²⁹

En este mismo orden de ideas, los aceites minerales se convierten en este caso en un elemento esencial en el funcionamiento del transformador, porque poseen unas excelentes características físicas, químicas y eléctricas para ser utilizado con fines aislantes y refrigerantes.

De la misma forma, se puede mencionar que dichos aceites se forman como un medio ideal para detectar defectos del transformador y del resto de componentes del sistema de aislamiento, ya que su naturaleza y su comportamiento facilitan, gracias a los análisis pertinentes, la obtención de una información muy completa.

Dichos fluidos, establecen una facilidad regenerativa, comparado con otros productos equivalentes como el aceite de silicona y los esterres orgánicos, se observa que el aceite mineral tiene una mayor disponibilidad y un menor coste, de ahí su popularidad en la fabricación de transformadores.

En este orden de ideas, el propósito principal de usar el aceite mineral, es impregnar el papel aislante y así evitar que exista un contacto directo entre el papel y la humedad. El aceite además, es el encargado de disipar el calor producido del transformador.

²⁹ R. BARTNIKAS; Engineering Dielectrics. Vo. III:Electrical Insulating Liquids Institut de Recherche d'Hydro – Québec. September, 1991.

Por otro lado, el aceite mineral se obtiene de la refinación de los hidrocarburos recogidos durante la destilación del petróleo, los cuales son sometidos a diversos procesos químicos para obtener las propiedades eléctricas deseadas y conferirle un alto grado de estabilidad química³⁰.

Es por ende se puede determinar que los aceites aislantes se pueden clasificar o dividir en dos categorías, que son las orgánicas y las inorgánicas.

Dentro de los inorgánicos, son los aceites minerales los que se usan con más frecuencia para equipamientos eléctricos de potencia. Además de estos, existen en el mercado una gran variedad de aislantes líquidos sintéticos, el más común es el aceite de silicona.

Recientemente se han introducido nuevos aceites sintéticos orgánicos como los hidrocarburos de alto peso molecular y el tetracloroetileno, los cuales poseen unas excelentes características dieléctricas y térmicas pero son caros³¹.

Los hidrocarburos clorados, son dos; los hidrocarburos, el benceno y el difenilo son clorados para producir compuestos aromáticos clorados llamados askarels o simplemente policloruro de bifenilo (PCB), ya que estos compuestos poseen un alto punto de ignición y unas excelentes propiedades eléctricas.

Actualmente el uso de estos aislantes está prohibido debido a que tienen una alta resistencia a la degradación, se acumulan en los organismos biológicos y finalmente a través de la cadena alimentaria en el cuerpo humano, lo que plantea un gran peligro para la salud.

³⁰ NYNAS; Aceites de Transformador: Impacto del aceite aislante en la vida útil del transformador. Conferencia Nynas Naphthenic. 2003.

³¹ A. DE PABLO; Envejecimiento y tratamiento de aceites minerales aislantes en servicio. Conferencias ASINEL, 1984.

Por otro lado, los aceites derivados del petróleo, están constituidos elementalmente por carbono e hidrogeno con trazas de sulfuro oxígeno y algunos metales. Estos compuestos son tratados para conseguir las propiedades físicas, químicas y eléctricas de los aceites aislantes. A veces estos aceites son tratados con aditivos para mejorar alguna de estas propiedades³².

Lo que corresponde a los aceites de silicona representan una alternativa a los PCB's pero tienen el inconveniente de que son costosos y su estructura molecular principal consiste en silicona y oxígeno y grupos orgánicos constituyen la cadena lateral.

Mientras que los éteres orgánicos tienen un alto punto de ebullición en relación con su viscosidad y además tienen un alto punto de deflagración. Tienen una buena relación entre la viscosidad y la temperatura. La permitividad de los esterres es mayor que la de los aceites minerales y de la de los aceites de silicona, pero es menos que la de los askareles. Estos materiales son muy usados en condensadores.

5.7 DESCRIPCION DE CONCEPTOS

Energía Eléctrica

Es la forma de energía que resulta de una diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos en el espacio, los cuales al ponerse en contacto por medio de un material conductor eléctrico da lugar a una corriente eléctrica entre ambos, y puede ser transformada en muchas otras formas de energía como luz, movimiento o calor.

³² Óp. Cit. A. DE PABLO, 1984.

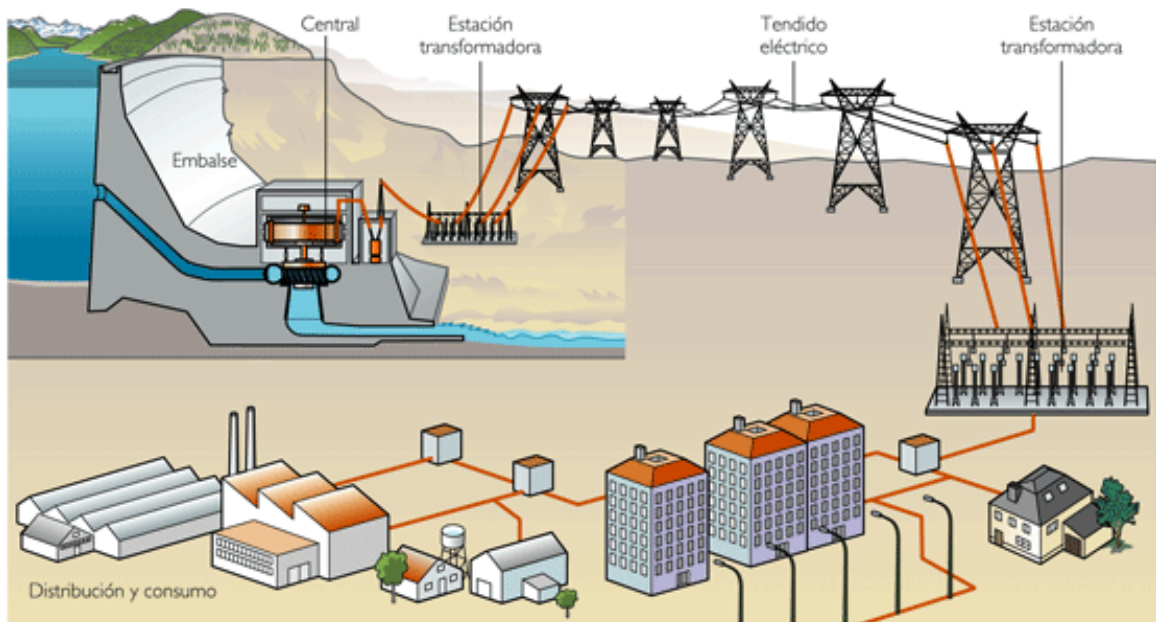
Generación

La energía eléctrica resulta de la transformación de otras formas de energía de la naturaleza, hidráulica, mecánica, luminosa, térmica, eólica, química entre las más conocidas en plantas denominadas centrales u otras instalaciones a baja escala industrial o domiciliaria.

Distribución

Distribución de energía eléctrica, es la etapa del sistema que se encarga del suministro de la energía producida en las centrales a las ciudades, centros de consumo y usuarios finales.

Figura 3. Distribución de un sistema eléctrico



Fuente: www.kalipedia.com/tecnologia.com

Red eléctrica

La red eléctrica une todos los centros generadores de energía eléctrica con los puntos de consumo, de este modo se consigue un equilibrio entre la cantidad de energía consumida y la producida por las centrales eléctricas.

La red de transporte de energía eléctrica está formada por los elementos que llevan la electricidad desde los centros de generación hasta puntos cercanos donde se consume.

Para poder transportar la electricidad con las menores pérdidas de energía posibles se tiene que elevar su nivel de tensión.

Las líneas de transporte o líneas de alta tensión están constituidas por un elemento conductor (cobre o aluminio) y por los elementos de soporte (torres de alta tensión). Estas conducen la corriente eléctrica, una vez reducida su tensión hasta la red de distribución.

La energía eléctrica no se puede almacenar, por lo que debe existir un equilibrio constante entre la producción y el consumo.

El transporte de electricidad se realiza a través de líneas de transporte a tensiones elevadas que, conjuntamente con las subestaciones, forman la red de transporte.

La red de distribución está formada por el conjunto de cables subterráneos y los centros de transformación que permiten hacer llegar la energía hasta el cliente final. La red de distribución es la parte del sistema de suministro eléctrico responsable de las compañías distribuidoras de electricidad hasta los consumidores finales.

Subestación Eléctrica

Las subestaciones eléctricas son las instalaciones encargadas de realizar transformaciones de la tensión, de la frecuencia, del número de fases o la conexión de dos o más circuitos.

Pueden encontrarse junto a las centrales generadoras y en la periferia de las zonas de consumo, en el exterior o interior de los edificios. Actualmente en las ciudades las subestaciones están en el interior de los edificios para ahorrar espacio y contaminación. En cambio, las instalaciones al aire libre están situadas en las afueras de la ciudad.

Las subestaciones pueden ser de dos tipos:

Subestaciones de transformación:

Son las encargadas de transformar la energía eléctrica mediante uno o más transformadores. Estas subestaciones pueden ser elevadoras o reductoras de tensión.

Subestaciones de maniobra:

Son las encargadas de conectar dos o más circuitos y realizar sus maniobras. Por lo tanto, en este tipo de subestaciones no se transforma la tensión.

Subestaciones transformadoras elevadoras:

Elevan la tensión generada de media a alta o muy alta para poderla transportar. Se encuentran al aire libre y están situadas al lado de las centrales generadoras de electricidad.

La tensión primaria de los transformadores suele estar entre 3 y 36kV. Mientras que la tensión secundaria de los transformadores está condicionada por la tensión de la línea de transporte o de interconexión (66, 110, 220 ó 380 kV).

Subestaciones transformadoras reductoras:

Son subestaciones con la función de reducir la tensión de alta o muy alta a tensión media para su posterior distribución.

La tensión primaria de los transformadores depende de la tensión de la línea de transporte (115, 34.5 ó 13.8)kV. Mientras que la tensión secundaria de los transformadores está condicionada por la tensión de las líneas de distribución.

Transformador

Equipo eléctrico considerado el elemento central de una subestación. Tiene como función principal la transferencia de energía eléctrica, transformando niveles de tensión alterna con respecto a la entrada como elevador o como reductor, transfiere idealmente a la salida la misma frecuencia y potencia de entrada.

DPS

Dispositivo de Protección contra Sobretensiones Transitorias, permite limitar las sobretensiones transitorias de la red, a valores tolerados por los equipos conectados, desvía la sobrecarga de corriente hacia tierra para disipar la energía.

Aislador

Los aisladores son materiales que presentan cierta dificultad al paso de la electricidad y al movimiento de cargas. Tienen mayor dificultad para ceder o aceptar electrones. En una u otra medida todo material conduce la electricidad, pero los aisladores lo hacen con mucha mayor dificultad que los elementos conductores. Se utiliza como soporte de un conductor eléctrico en estructuras y otros componentes de la red eléctrica.

Típicamente son aisladores de disco cuyas características están normalizadas según el peso o fuerza soportable, nivel de contaminación admisible y diámetro. En alta tensión suelen emplearse aisladores de 10 pulgadas y en media tensión de 6 pulgadas

Interruotor

Un interruptor es un dispositivo de corte bajo carga que tiene la capacidad de interrumpir el paso de una corriente eléctrica con fines de operación o protección.

Seccionador

Es un dispositivo mecánico de conexión y desconexión libre de carga, que permite cambiar las conexiones del circuito para aislar un elemento de la red eléctrica o una parte de la misma del resto de la red.

Cortacircuitos fusible

Son dispositivos destinados a cortar automáticamente el circuito eléctrico cuando la corriente eléctrica que los atraviesa es muy alta. El fusible es la parte de un circuito que se funde si pasa de una intensidad superior para la que se construyó. El fusible es solo la lámina o hilo conductor destinado a fundirse y, por lo tanto, a cortar el circuito, mientras que el cortacircuitos fusible comprende, además, la carcasa, los materiales de soportes, etc.

Conductor electrico

Un conductor eléctrico es un material por el que puede haber un flujo de cargas eléctricas, su función principal es la conducción de energía electica, en forma de cables, barrajes y elementos conductores de los elementos y dispositivos de la red.

Mantenimiento

En concepto general, mantenimiento se refiere a todas las actividades orientadas a mantener un objeto en estado operativo o a repararlo con el objetivo de que pueda realizar la función para cual fue concebido. Teniendo en cuenta que el mantenimiento hoy en día debe formar parte de la estrategia general de la empresa y en particular de la gestión tecnológica.

Mantenimiento Predictivo

El mantenimiento predictivo es el conjunto de actividades de seguimiento y diagnóstico continuo, o monitoreo de un sistema, que permite una intervención correctora inmediata como consecuencia de la detección de algún síntoma de falla.

Estos síntomas de falla son avisos previos a la ocurrencia de una falla, se pueden percibir mediante el empleo de técnicas de mantenimiento predictivo o ensayos no destructivos, como análisis de vibraciones, termografía, ultrasonido, análisis de aceite entre otras.

Técnicas de Mantenimiento Predictivo

Las técnicas de mantenimiento predictivo aplicadas a sistemas eléctricos más conocidas son, termografía, ultrasonido, análisis de aceite dieléctrico

Termografía Infrarroja

Esta técnica detecta las ondas electromagnéticas del espectro infrarrojo emitidas por la superficie de los materiales, lo cual revela el comportamiento de la temperatura de los equipos con el fin de descubrir zonas o puntos que se encuentran funcionando en condición no deseada.

Termografía en sistemas eléctricos

La termografía en instalaciones eléctricas es fundamental para la localización de puntos calientes en cualquier parte de la instalación; ya sea en armarios eléctricos, cables, conexiones, bandejas portacables, etc.; como en los equipos, tales como disyuntores, contactores, motores, etc.

Para aquellas empresas que son mantenedoras de la instalación eléctrica, la termografía es una herramienta indispensable, donde, con los informes realizados podrán localizar correctamente los posibles defectos en la instalación y además

dispondrán de los históricos de su instalación y los equipos imprescindibles para un correcto mantenimiento.

Con las inspecciones termográficas podemos localizar:

- Sobrecalentamientos por conexiones defectuosas (flojas, oxidadas, etc.)
- Sobrecalentamientos en los conductores
- Desequilibrios de las fases
- Puntos "calientes" en líneas de alta tensión y transformadores
- Alta temperatura por sobrecarga
- Sobrecalentamiento por pérdida de aislamiento
- Puntos fríos o elementos que no están realizando su trabajo

Las inspecciones deben ser realizadas por personal calificado, con la debida certificación y experiencia, y que disponga de los equipos adecuados para la ejecución de las inspecciones.

Las mediciones incorrectas, mala interpretación de los termogramas, o inspecciones realizadas en condiciones de carga no aceptables (según las indicaciones de las normas o estándares) se convertirán en un problema en lugar de una solución.

Figura 4. Termografía infrarroja



Fuente: www.fluke.com

Ultrasonido

Permite percibir ondas de sonido emitidas por elementos de la red o equipos eléctricos en condiciones de funcionamiento defectuoso, a frecuencias superiores a las percibidas en la banda audible.

ULTRASONIDO

Los equipos eléctricos como interruptores, transformadores, aisladores, conexiones o empalmes, ante la presencia de determinadas fallas, emiten señales detectables en un rango de frecuencias superior a la banda audible, denominada la banda de ultrasonido entre 20 KHz y 100 KHz.

Los principales defectos localizables mediante los ultrasonidos son:

- Efecto corona
- Tracking

- Descargas parciales en transformadores
- Arco eléctrico

Efecto corona

El efecto corona se produce por la ionización del aire, que en contacto con la humedad produce ácido nítrico, destructivo para la mayoría de los materiales aislantes.

El efecto corona no causa un incremento de la temperatura por lo que no es detectable con termografía infrarroja.

Tracking

Es un fenómeno eléctrico que se produce en los conductores a cualquier voltaje, con la consecuente degradación de los materiales dieléctricos.

Una vez se produce el Tracking o seguimiento es relativamente rápido que pueda producir la falla en el sistema.

Descargas parciales en transformadores

Durante el proceso de fabricación de un aislante, puede producirse que queden pequeñas cantidades de gas aprisionadas en el seno del material aislante, formando cavidades de formas y dimensiones muy diferentes, también al usar aislantes plásticos los que se moldean directamente en los equipos eléctricos, durante el proceso de fraguado, pueden quedar burbujas gaseosas en su interior u otras imperfecciones, que pueden producir durante la vida del transformador pequeñas descargas que se irán incrementando con el tiempo tanto en su frecuencia como en su intensidad.

La utilización de inspecciones mediante ultrasonidos nos permitirá la localización de estas descargas parciales, y un correcto seguimiento periódico de las

inspecciones pueden evitar el deterioro total del equipo, así como posibles daños personales.

Arco eléctrico

Cuando se produce el arco eléctrico la falla ya es evidente y ya no hay nada que hacer.

Análisis de Aceite Dieléctrico

Por medio del análisis de las propiedades físicas y químicas del aceite dieléctrico, se determina el estado de operación de los equipos a fin de controlar condiciones anormales y protegerlos de potenciales fallas.

Toma de Muestras

Esta práctica se efectúa siguiendo las especificaciones técnicas normalizadas para el manejo de líquidos aislantes y disposición de residuos establecidas por la legislación nacional, garantizando la seguridad de las personas, de la vida animal y vegetal, y la preservación del medio ambiente, previniendo, minimizando o eliminando los riesgos de tipo eléctrico.

Bifenilos Policlorados (PCB's)

Esta sustancia a pesar de que se puede decir que es el mejor fluido aislante conocido por sus excelentes características dieléctricas, térmicas y de estabilidad química, resultó ser cancerígena y por tanto nociva para la salud humana y el medio ambiente, razón por la cual hoy en día su uso está prohibido por las autoridades ambientales internacionales.

Servicio para la caracterización cualitativa y cuantitativa de los aceites aislantes de transformadores con el fin de determinar el contenido de PCB's, y a su vez dar las recomendaciones pertinentes de descontaminación o disposición, para dar la solución definitiva al problema.

Cromatografía de Gases Disueltos en Aceite (CROM)

El objetivo de la Cromatografía de Gases es predecir o descartar la presencia de fallas mediante el análisis de gases disueltos en el aceite aislante, monitoreando la unidad en operación que presente la posible falla para determinar la naturaleza de la misma y así tomar la decisión de sacar de servicio la unidad en forma inmediata o programada. También permite verificar el funcionamiento de una unidad nueva, monitoreándola mientras se encuentra en su periodo de garantía.

PRUEBAS ESPECIALES

Son pruebas complementarias que sirven para conocer el contenido de aditivos y/o propiedades complementarias a las de degradación del aceite.

CONTENIDO DE INHIBIDOR

El ensayo consiste en una cromatografía de gases en el cual se determina el contenido de 2,6-Ditert Butil Fenol y 2, 6-Ditert- Butil Para-Cresol, que son los inhibidores contra la oxidación del aceite aislante permitidos por la Norma ASTM D-3487, que aumentan su estabilidad a la oxidación.

FACTOR DE POTENCIA

Mide la posible existencia de compuestos polares o posibles caminos a corrientes de fuga en el aceite.

AZUFRE CORROSIVO

Los compuestos de azufre presentes en el aceite pueden generar compuestos corrosivos que pueden llevar un equipo a condiciones de falla. Este ensayo pretende detectar la presencia de este tipo de sustancias en el aceite. El tema se torna más crítico en transformadores de tensiones superiores a 34.5 kV.

GRADO DE POLIMERIZACIÓN

Determinar la cantidad de moléculas de glucosa que hay por cada molécula de celulosa (relación conocida como grado de polimerización), permite conocer la vida útil remanente del papel aislante, y por ende, la vida útil estimada del transformador.

Figura 5. Análisis de aceite Dieléctrico



Fuente: www.fyringenieros.com

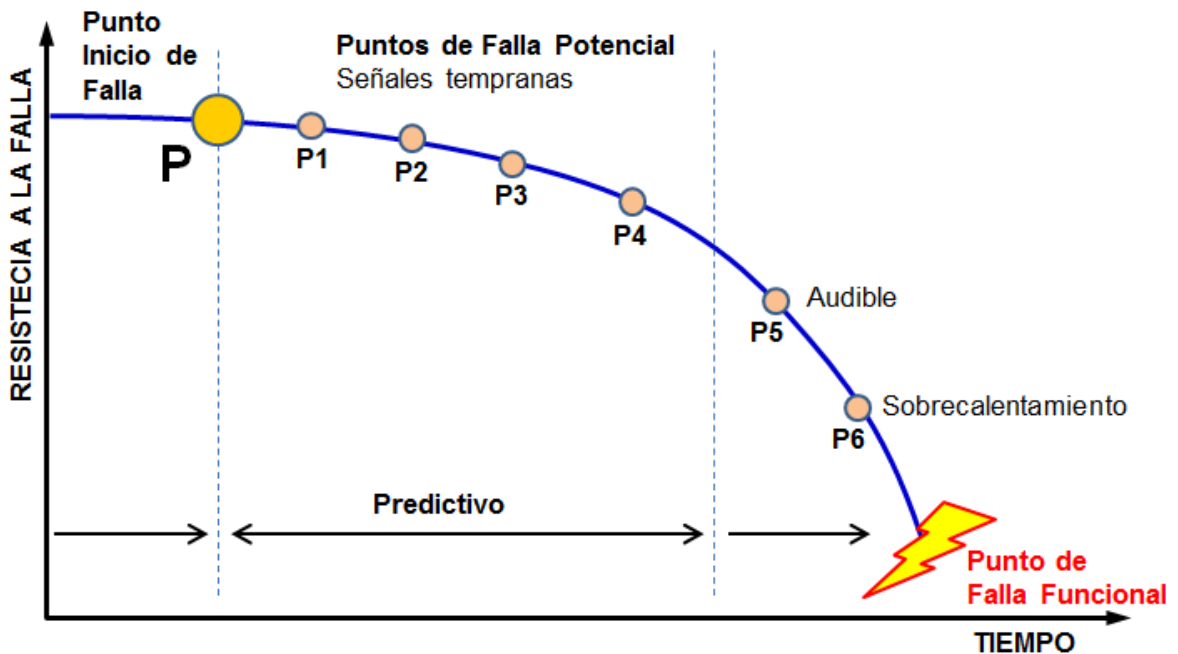
Datos

Los datos recolectados en las actividades de monitoreo son el producto primario del mantenimiento predictivo, deben ser traducidos por personal calificado que tenga la capacidad de interpretarlos y emitir un diagnóstico lo más acertado posible. Entonces tomar las acciones para el desarrollo de estrategias de mantenimiento y planear actividades orientadas a regresar los equipos a su funcionamiento normal

Filosofía de Mantenimiento

El mantenimiento predictivo es una filosofía o actitud, que usa la condición real de operación de un equipo o sistema para optimizar la operación total de la planta.

Figura 6. Curva PF donde se describe la tendencia de falla en los equipos.



5.8 ANALISIS DE COSTO BENEFICIO

Las áreas de mantenimiento de las organizaciones dedicadas a la distribución de energía eléctrica en Colombia, disponen de métodos tradicionales que recurren a mantenimientos preventivos basados en horas de operación, y frecuentemente a intervenciones correctivas que resultan altamente costosas. Aunque se reconoce un mejoramiento en los últimos años, no es suficientemente ágil para responder a las exigencias de la demanda en estos tiempos de industrialización, de globalización y a la normatividad estatal.

La implementación de un plan de mantenimiento predictivo se perfila como la opción más favorable para el mejoramiento de la confiabilidad y la agilidad en los procesos, demanda la disposición de una determinada cantidad de recursos humanos y tecnológicos, si bien es importante la adquisición de la mejor tecnología del mercado, es elemental ubicar personal con capacidad para dar respuesta en conocimiento técnico, en operación de los equipos y análisis de datos, o bien suministrarle la capacitación necesaria para tales competencias, lo cual representa demanda de recursos financieros importante.

El proyecto es considerado de alto beneficio para la organización, no obstante el costo elevado debe plantearse como justificable y demostrar resultados favorables por la inversión.

A continuación se relaciona el listado de los costos:

- Cámara de termografía infrarroja de alta precisión con resolución de 660, capacidad de memoria de 2 GB y teleobjetivo de largo alcance.
\$100.000.000
- Receptor de ultrasonido con sensores de contacto y ultrasonido aerotransportado.
\$30.000.000
- Binoculares de largo alcance para inspección visual detallada a distancia.
\$1.000.000
- Cámara de fotografía digital.
\$500.000
- Traje arc flash de protección contra arco eléctrico.
\$2.000.000
- Herramienta manual básica.
\$1.000.000
- Multímetro digital.

| | |
|--|----------------------|
| | \$1.000.000 |
| • Punza voltiamperimetrica. | |
| | \$500.000 |
| • Vehiculo para transporte de equipo y personal técnico. | |
| | \$70.000.000 |
| • Computador portátil para registro de información y generación de reportes. | |
| | \$2.000.000 |
| • Computador base para almacenamiento de datas de equipos, información y organización del proceso. | |
| | \$2.000.000 |
| • Capacitación para personal en técnicas de mantenimiento predictivo. | |
| | \$20.000.000 |
| TOTAL | \$230.000.000 |

Por estudios y por experiencia se ha demostrado que al realizar actividades de mantenimiento oportunas pasadas por un adecuado proceso de planeación y programación, se disminuyen los costos hasta en un 50% relacionados a recursos de personal, financieros y tiempos de producción. Para un presupuesto anual asignado a mantenimiento de \$100.000.000, representa una recuperación de \$50.000.000, por tanto, dará una 0.25 por año para una recuperación total en 5 años.

BENEFICIOS ESPERADOS

Implementar el plan de mantenimiento predictivo se propone maximizar la confiabilidad de los equipos, optimizar las actividades de mantenimiento, mejorar los procesos operativos, por ende mejorar la continuidad operacional del servicio de energía eléctrica.

En un escenario en el que la implementación del proyecto en el sistema eléctrico, le lleve su ejecución, sería posible ver reflejada la inversión requerida en una serie de beneficios de naturaleza tangible e intangible, pero de alta trascendencia en términos de seguridad, mantenimiento, confiabilidad y disponibilidad.

Beneficios tangibles

- Disminución de fallas por ausencia de tensión en sectores del sistema o apagón general.
- Ahorro de costos en mantenimiento
- Reducción de fallas críticas que causan ausencia del servicio por tiempos prolongados con afectación a equipos de alto costo
- Aumento de constancia y permanencia del servicio de energía eléctrica para los usuarios.
- Apoyo técnico para el área de mantenimiento desde la estructura del plan de mantenimiento predictivo
- Reduce cantidad de repuestos de alta demanda en el área de mantenimiento
- Reduce stock de repuestos e insumos en bodega, así los costos tributarios y de almacenamiento que se requiere.

Beneficios intangibles

- Incremento de la seguridad instalaciones del sistema eléctrico y en las calles por donde se despliegan las redes eléctricas de distribución
- Prevenir daño ecológico por potenciales fallas que afecten el medio ambiente
- Optimización de las operaciones
- Programación adecuada de mantenimiento predictivo y preventivo
- Optimización de actividades y tiempo de recursos de personal
- Información oportuna y precisa para toma de decisiones apropiadas
- Escalar un nivel un nivel más elevado de competitividad y excelencia
- Mejoramiento de la imagen de la organización ante los usuarios y los socios comerciales

COSTOS DE OPORTUNIDAD

Desde una perspectiva donde la implementación del proyecto no sea realizada, se puede prever la prolongación de efectos desfavorables para la marcha de la empresa sobre obstáculos como los siguientes:

- Probables daños al medio ambiente y a las personas
- Mayor costo de la energía
- Perdidas de energía, disipada por fallas en sus etapas iniciales
- Mayores riesgos por fallas ocultas

En general se puede afirmar que la inversión puede generar más beneficios que los costos que representa, el plan puede ofrecer beneficios que impactan positivamente la seguridad, la productividad y la confiabilidad en términos de conciencia social, conciencia del servicio, conciencia comercial que se traducen en factores trascendentales para elevar el prestigio de la compañía y posicionarlo como líder de la industria.

6. METODOLOGÍA

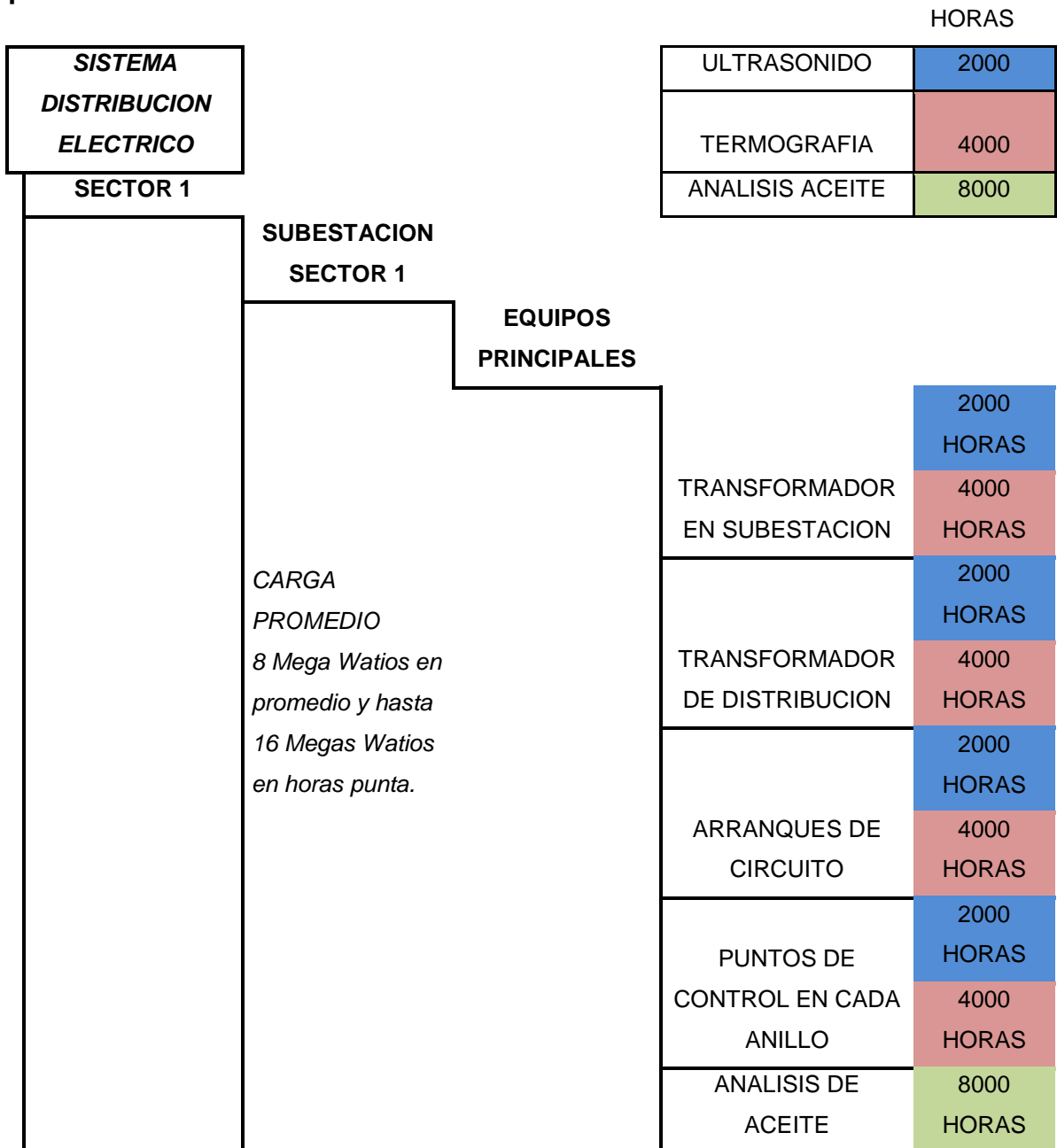
6.1 METODOLOGÍA DEL ENFOQUE SISTÉMICO

Los aspectos metodológicos que se van a seguir en el estudio planteado, se enmarcan dentro la metodología del enfoque sistémico, para realizar el estudio de mantenimiento basado en confiabilidad aplicado al sistema de distribución eléctrica, conducida a definir la estrategia de mantenimiento predictivo.

Siguiendo con la metodología descrita se implementaran rutinas de inspección y análisis de información recopilada mediante las técnicas utilizadas (Termografía, ultrasonido y análisis de aceite) para cada una de las 6 subestaciones que cubren el perímetro urbano de la ciudad, a cada rutina en cada subestación se implementarán rutinas en los componentes asociados en la distribución de cada sector residencial e industrial como lo vemos en la primera gráfica.

Los tiempos entre rutinas se describen a continuación:

Tabla 2. Ejemplo para un sector de la distribución de tiempos en rutinas predictivas.



La metodología aplicada se estructura en cuatro fases como se describe a continuación:

6.2 ESTRUCTURA

Identificación y jerarquización de componentes críticos y selección de la metodología de mantenimiento

Tabla 3. Componentes a estudiar.

| COMPONENTE | PUNTOS DE INSPECCION |
|--|--|
| TRANSFORMADOR | Bujes Bornes I/O Radiador refrigerador Cuba de aceite Tanque de expansion Marshalig |
| DPS Descargadores de Sobretension | Conexión Estructura Desligador |
| CT Transformador de Corriente | Conexiones Nucleo Devanados Aislador Contenedor de aceite |
| PT Transformador de Potencial | Conexiones Nucleo Devanados Aislador Contenedor de aceite |
| INTERRUPTOR | Conexiones Camaras de Interrupcion y extincion Contactos aisladores |
| SECCIONADOR | Conexiones Contactos Aisladores Barras |
| AFLORAMIENTO | Conos DPS Cable de Potencia Aisladores |
| CORTACIRCUITOS | Conexiones Aislador Contactos Portafusibles |

6.3 ENTRADAS

Recopilación de información en campo y emisión del diagnóstico

6.4 PROCESO

- Seleccionar equipos para aplicación de RCM
- Identificación de funciones y esquema de trabajo
- Identificación de modos de falla
- Identificación de mecanismos de falla
- Efectos de la ocurrencia del modo de falla
- Consecuencias de la ocurrencia del modo de falla

ANÁLISIS DE CRITICIDAD

- *El análisis de criticidad es una metodología que permite organizar por orden de importancia decreciente, sistemas y equipos de plantas industriales en relación a las consecuencias que estos tienen cuando presentan fallas. Así mismo se puede definir como un procedimiento mediante el cual cada falla potencial es jerarquizada de acuerdo a una combinación de influencias de severidad y probabilidad de ocurrencia.*
- *El análisis de criticidad se realizó con el propósito de seleccionar el equipo crítico de la línea, sobre el cual se centrara el plan de mantenimiento por condición.*
- *Esta metodología permite jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global, por esto para realizar el análisis de criticidad se estableció el alcance y el propósito para el análisis, así como los criterios de evaluación.*
- *La línea de producción Decapado 2 cuenta con 88 equipos funcionando actualmente, de los cuales se escogieron los más importantes para el análisis*

de criticidad bajo la supervisión de los ingenieros de producción y mantenimiento.

Tabla 4. Distribución de cargas en subestaciones.

| SUBESTACION | CIRCUITOS | CARGA (MW) |
|--------------------|------------------|-------------------|
| SECTOR 1 | CIRCITO 1 | 1,4 |
| | CIRCITO 2 | 2 |
| | CIRCITO 3 | 1,7 |
| | CIRCITO 4 | 1 |
| SECTOR 2 | CIRCITO 1 | 0,48 |
| | CIRCITO 2 | 0,98 |
| | CIRCITO 3 | 1,1 |
| | CIRCITO 4 | 0,95 |
| SECTOR 3 | CIRCITO 1 | 1,2 |
| | CIRCITO 2 | 1,3 |
| | CIRCITO 3 | 1,6 |
| | CIRCITO 4 | 0,1 |
| SECTOR 4 | CIRCITO 1 | 5,4 |
| | CIRCITO 2 | 5 |
| | CIRCITO 3 | 2,5 |
| | CIRCITO 4 | 0,1 |
| SECTOR 5 | CIRCITO 1 | 1,2 |
| | CIRCITO 2 | 1,3 |
| | CIRCITO 3 | 2,1 |
| | CIRCITO 4 | 1,8 |
| SECTOR 6 | CIRCITO 1 | 0,8 |
| | CIRCITO 2 | 2 |
| | CIRCITO 3 | 1 |
| | CIRCITO 4 | 1 |

Tabla 5. Análisis de modos de falla.

| ANALISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA | | | | |
|---|-------------------------------|---|--|--|
| EQUIPO | FUNCION | MODO DE FALLA | EFECTOS DEL MODO DE FALLA | CAUSAS DEL MODO DE FALLA |
| TRAFO | Aislamiento | Perdida de aislamiento Aceite dielectrico en mal estado | Aumento de temperatura Descargas parciales Perdida de capacidad de refrigeracion | Deterioro de materiales dielectricos Corrosion metalica Fugas de aceite dielectrico Desajuste de conexiones |
| | Transferencia de Energia | Sobrecarga | Caida de Tension Sobretemperatura | Mal uso del equipo Fugas de energia no controladas |
| DPS | Proteccion por Sobretension | Perdida de aislamiento | Sobretemperatura Descargas parciales | Fusion parcial de elementos resistivos Fusion parcial dispositivo de desligado |
| AISLADOR | Aislamiento | Perdida de aislamiento | Sobretemperatura Descargas parciales Perdida de resistencia mecanica | Deterioro de elementos dielectricos Corrosion metalicac fractura de componentes ceramicos |
| INTERRUPTOR | Control Apertura Cierre | Perdida de capacidad de control, apertura o cierre bajo carga | Sobretemperatura Descargas parciales Resistencia | Ruptura camara de conexión Deterioro de contactos Deterioro de conexiones |

| ANALISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA | | | | |
|---|---------------------------------|---|---|---|
| EQUIPO | FUNCION | MODO DE FALLA | EFECTOS DEL MODO DE FALLA | CAUSAS DEL MODO DE FALLA |
| | | | | Deterioro de material aislante Desajuste de conexiones |
| SECCIONADOR | Seccionamiento | Perdida de capacidad de control, apertura o cierre sin carga | Sobrettemperatura Descargas parciales Resistencia | Deterioro de contactos Deterioro de conexiones Deterioro de material aislante Desajuste de conexiones |
| CORTACIRCUITOS | Control Apertura Cierre | Perdida de capacidad de control, apertura o cierre bajo carga | Sobrettemperatura Descargas parciales Resistencia | Deterioro de contactos Deterioro de conexiones Desajuste de conexiones Deterioro de material aislante Ruptura de portafusible |
| CONDUCTORES | Conduccion de energia electrica | Fractura Desgaste Abrasion Corrosion Fusion | Sobrettemperatura Descargas parciales Resistencia | Empalmes defectuosos Vibracion de la linea Sobrepresion en aisladores o cuerpos extaños Fatiga del metal Fusion por |

| ANALISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA | | | | |
|------------------------------------|---------|---------------|----------------------------|----------------------------|
| EQUIPO | FUNCION | MODO DE FALLA | EFFECTOS DEL MODO DE FALLA | CAUSAS DEL MODO DE FALLA |
| | | | | sobrecarga o cortocircuito |

Diagramas unifilares.

Figura 7. Unifilar general

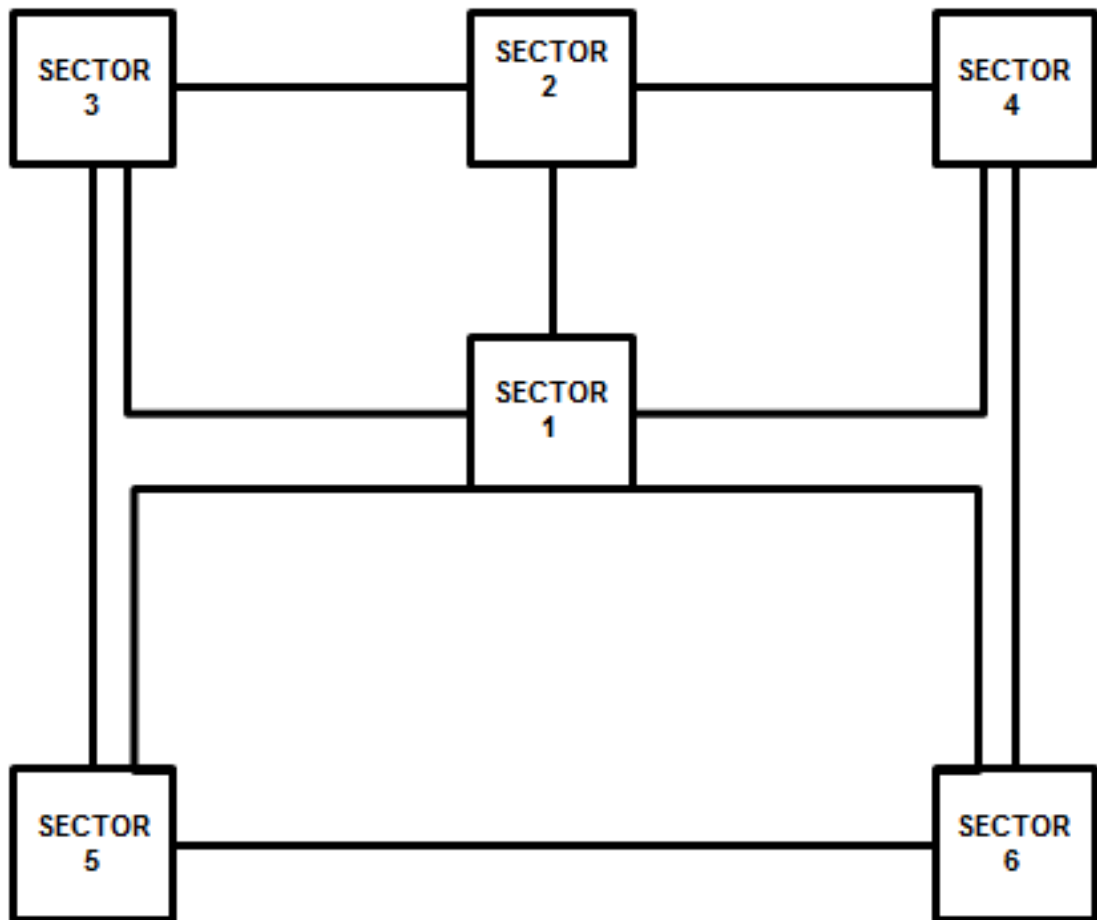
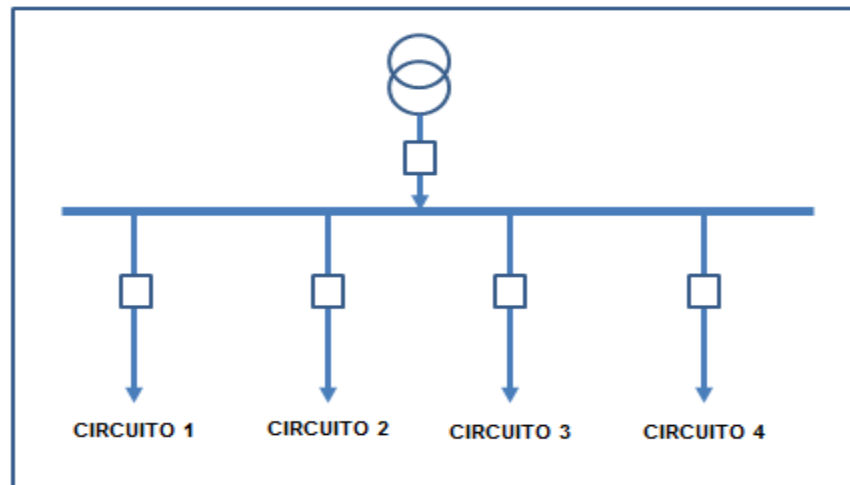
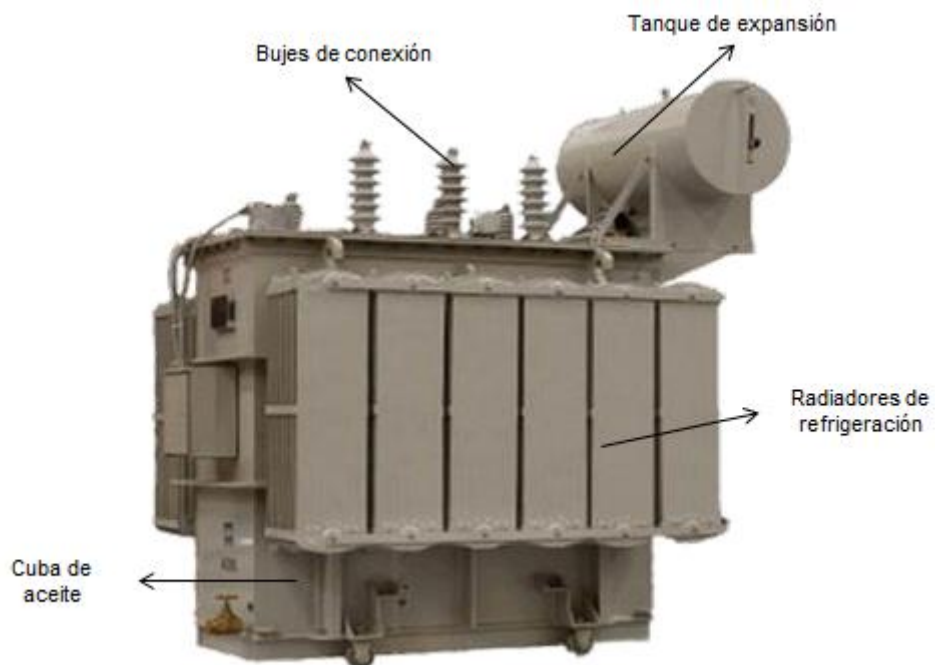


Figura 8. Diagrama modelo subestación sector 1 - 6.



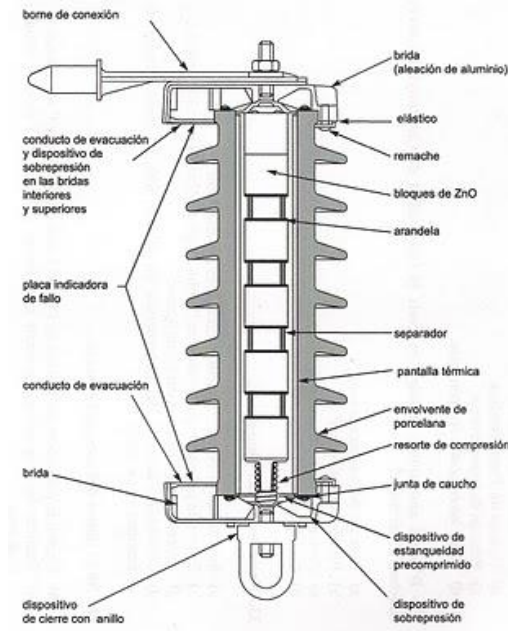
DIAGRAMAS DE COMPONENTES CON PUNTOS DE INSPECCION

Figura 9. Transformador



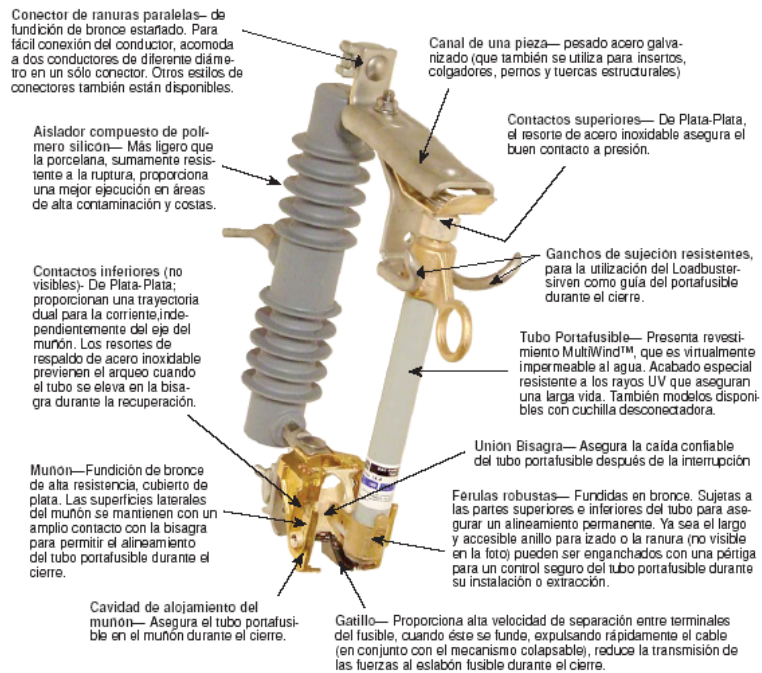
Fuente: Imagen tomada del Cuaderno Técnico 151 de Schneider Electric.

Figura 10. Descargador de Sobretenión



Fuente: Imagen tomada del Cuaderno Técnico 151 de Schneider Electric.

Figura 11. Cortacircuitos



Fuente: Imagen tomada de electricosaficionados.blogspot.com

Figura 12. Aislador

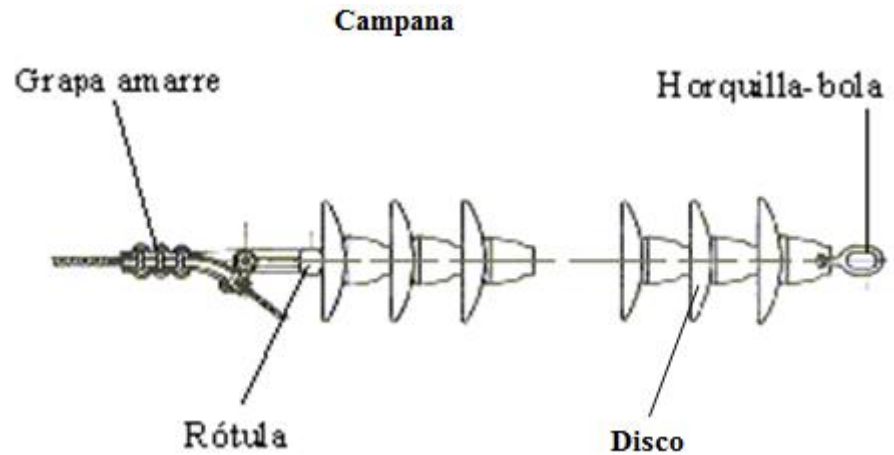
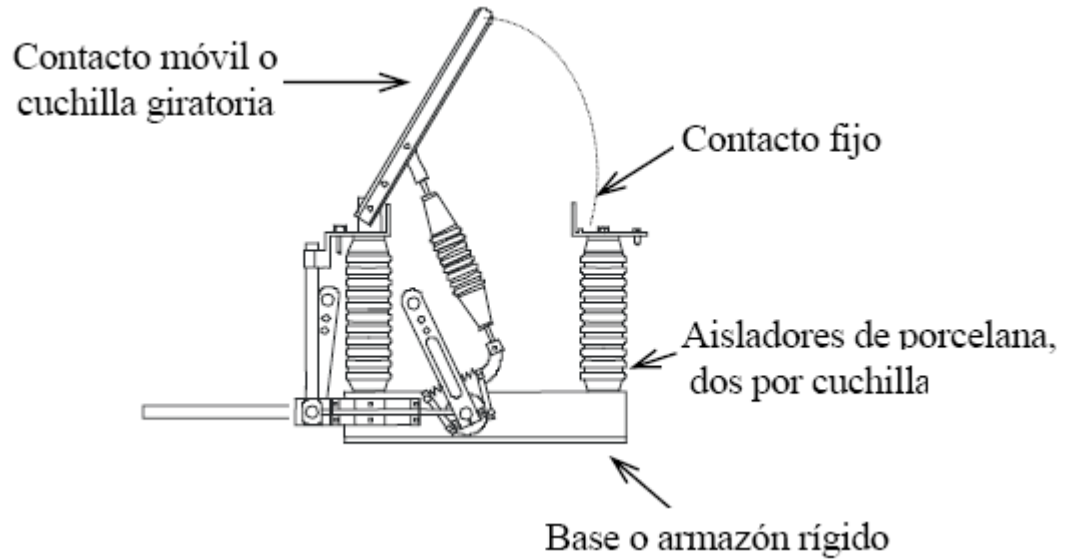


Figura 13. Seccionador



Fuente: Imagen tomada de **Instalaciones de distribución General - Educatur Blog.es**

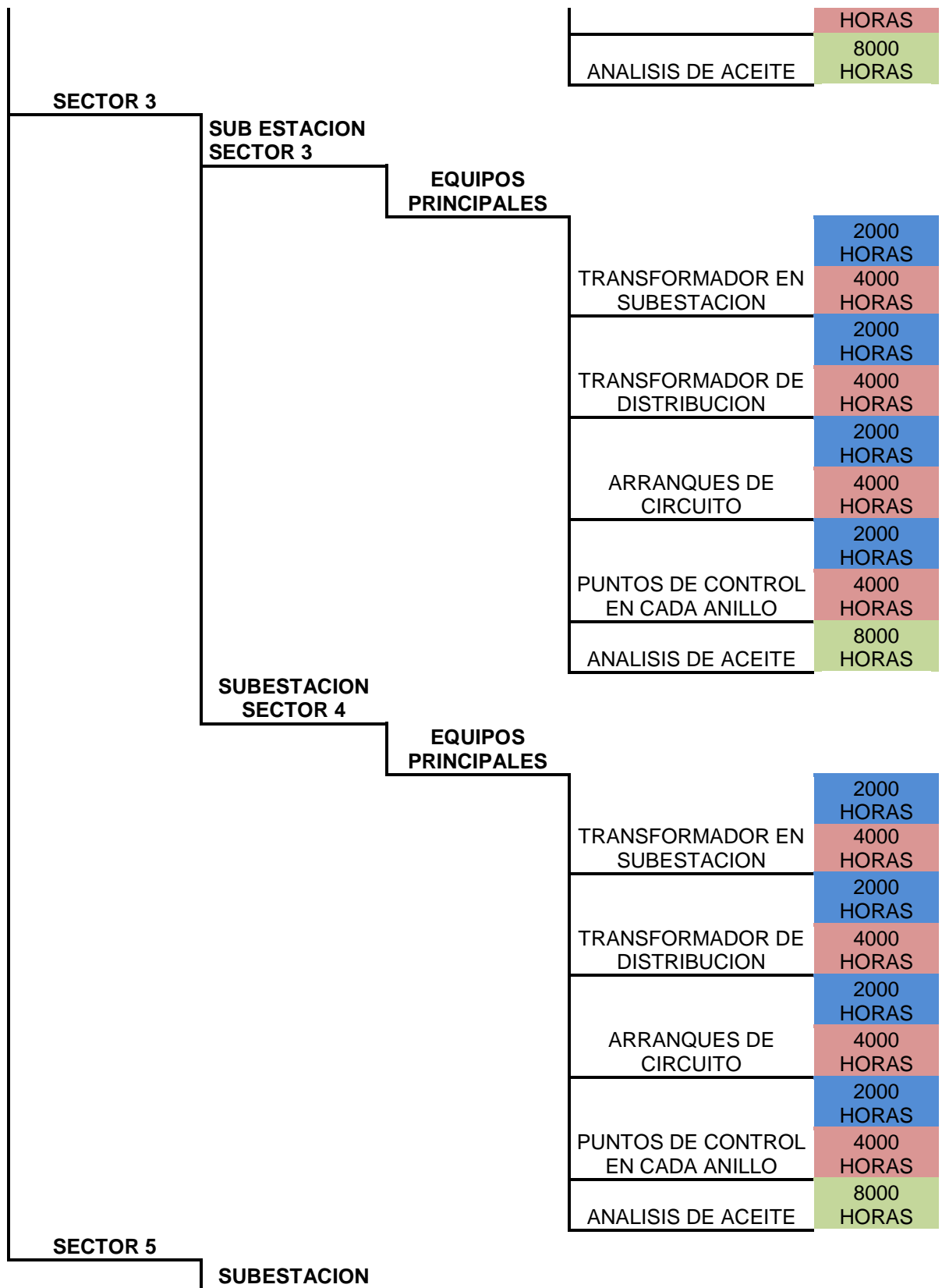
6.5 SALIDAS

- Estrategia de mantenimiento
- Plan de mantenimiento
- Rutinas de mantenimiento predictivo
- Mantenimiento basado en condición

Tabla 6. Tiempos de rutinas predictivas por sectores

| | | HORAS | | | | | |
|---------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------|
| SISTEMA DISTRIBUCION ELECTRICO | | ULTRASONIDO | 2000 | | | | |
| | | TERMOGRAFIA | 4000 | | | | |
| | | ANALISIS ACEITE | 8000 | | | | |
| SECTOR 1 | SUBESTACION SECTOR 1 | EQUIPOS PRINCIPALES | 2000 HORAS | | | | |
| | | | TRANSFORMADOR EN SUBESTACION | 4000 HORAS | | | |
| | | | 2000 HORAS | | | | |
| | | | TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION | 4000 HORAS | | | |
| | | | 2000 HORAS | | | | |
| | | | ARRANQUES DE CIRCUITO | 4000 HORAS | | | |
| | | | 2000 HORAS | | | | |
| | | | PUNTOS DE CONTROL EN CADA ANILLO | 4000 HORAS | | | |
| | | | 8000 HORAS | | | | |
| | | | ANALISIS DE ACEITE | 8000 HORAS | | | |
| | | | SECTOR 2 | SUBESTACION SECTOR 2 | EQUIPOS PRINCIPALES | 2000 HORAS | |
| | | | | | | TRANSFORMADOR EN SUBESTACION | 4000 HORAS |
| | | | | | | 2000 HORAS | |
| | | | | | | TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION | 4000 HORAS |
| 2000 HORAS | | | | | | | |
| ARRANQUES DE CIRCUITO | 4000 HORAS | | | | | | |
| 2000 HORAS | | | | | | | |
| PUNTOS DE CONTROL EN CADA ANILLO | 4000 HORAS | | | | | | |
| 4000 | | | | | | | |

*CARGA PROMEDIO
8 Mega Watios en promedio y hasta 16 Megas Watios en horas punta.*



| SECTOR 5 | | EQUIPOS PRINCIPALES | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|---------------|--|
| SUBESTACION SECTOR 6 | TRANSFORMADOR EN SUBESTACION | 2000 HORAS | 4000 HORAS | |
| | TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION | 2000 HORAS | 4000 HORAS | |
| | ARRANQUES DE CIRCUITO | 2000 HORAS | 4000 HORAS | |
| | PUNTOS DE CONTROL EN CADA ANILLO | 2000 HORAS | 4000 HORAS | |
| | ANALISIS DE ACEITE | 8000 HORAS | | |
| | EQUIPOS PRINCIPALES | | | |
| | TRANSFORMADOR EN SUBESTACION | 2000 HORAS | 4000 HORAS | |
| TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION | 2000 HORAS | 4000 HORAS | | |
| ARRANQUES DE CIRCUITO | 2000 HORAS | 4000 HORAS | | |
| PUNTOS DE CONTROL EN CADA ANILLO | 2000 HORAS | 4000 HORAS | | |
| ANALISIS DE ACEITE | 8000 HORAS | | | |

6.6 RETROALIMENTACION, CONTROL y MEJORAMIENTO

Adquisición de datos para indicadores de desempeño cambios al proceso y retroalimentación

Figura 14. Diagrama estructura del proceso.

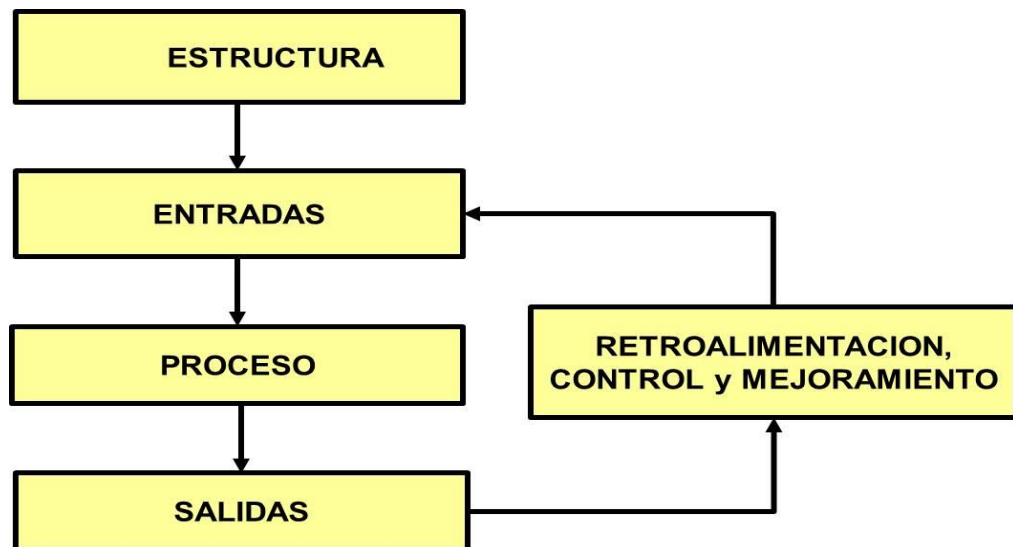
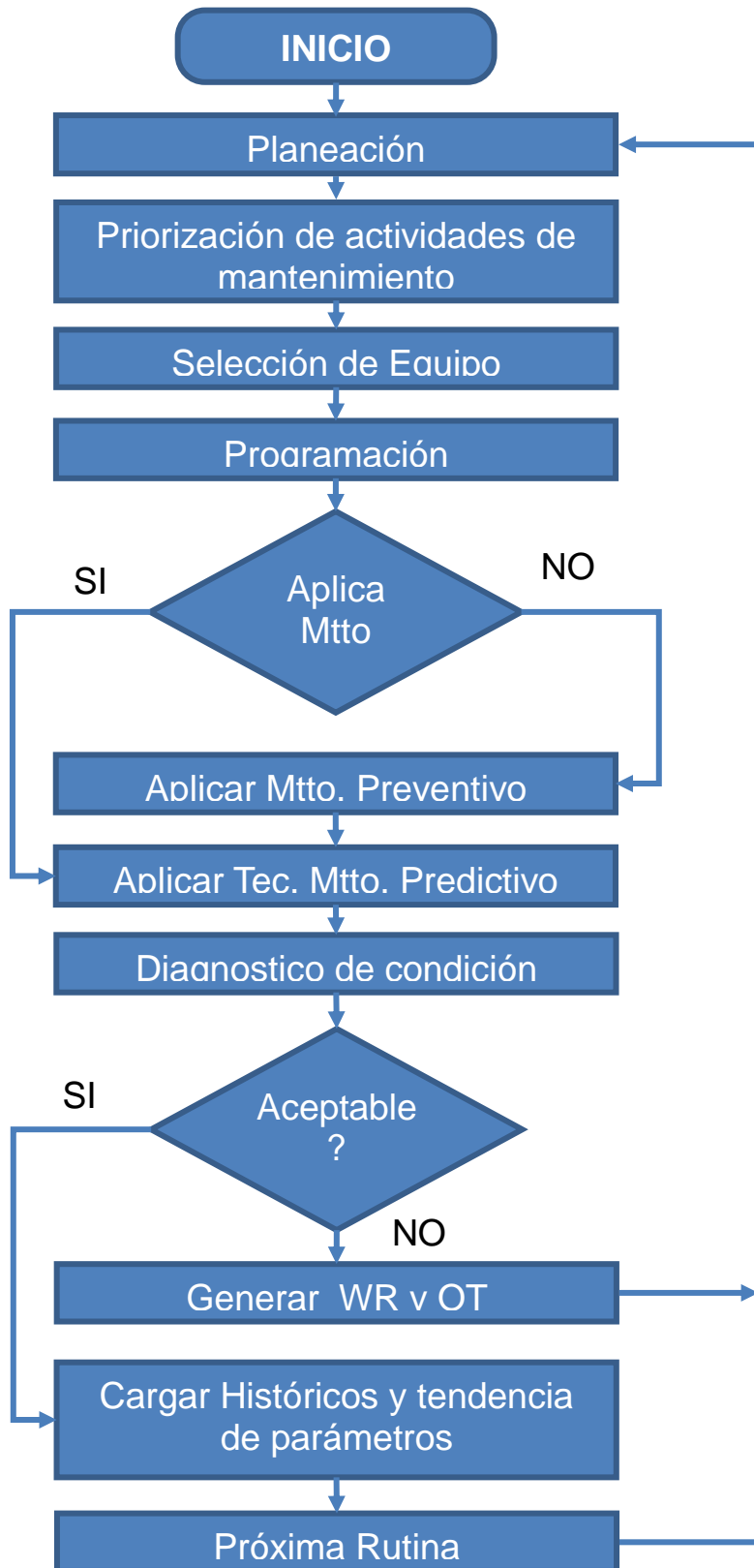


Figura 15. Flujoograma del proceso de mantenimiento.



7. CONCLUSIONES

Es preciso contar con una estrategia de mantenimiento predictivo como la planteada, para mejorar la productividad, aumentar la constancia del servicio, mejorar la confiabilidad de los activos, y reducción de los recursos necesarios para mantenimientos preventivos y correctivos.

La filosofía de Mantenimiento predictivo se orienta a detectar alteraciones en la condición de operación de los equipos en estado activo o de uso permanente, tales como temperatura, ruidos en la banda de ultrasonido y cambio de estado del aceite dieléctrico. El planteamiento propone un monitoreo constante de estas condiciones en los equipos eléctricos a fin de detectar tempranamente estas condiciones anormales y poder tomar acciones antes de que se produzca una falla catastrófica.

El punto trascendental del planteamiento, más allá de la aplicación de técnicas modernas de mantenimiento predictivo, se encuentra en el aseguramiento de la información obtenida en la ejecución de las actividades, y su uso para llevar a cabo un modelo de gerenciamiento, con procesos de retroalimentación y ajuste que garantice el mejoramiento continuo.

La definición de las rutinas de mantenimiento predictivo y su frecuencia se establecen en un proceso dinámico que depende de la retroalimentación con soporte en la información obtenida en campo, con un seguimiento continuo a la condición de los equipos y a los resultados del plan, de manera coordinada con área operativa, personal técnico y supervisores de área, orientados a preservar los equipos en condiciones óptimas de operación. Es de notar que la frecuencia depende de la jerarquización de los activos y de la cantidad de recursos

disponible, por tanto un aumento en la frecuencia requiere aumentar la inversión en equipos.

La disminución de la tasa de fallas en el sistema eléctrico, pasa por el mantenimiento predictivo, catalogado como una disciplina altamente especializada, soportado en la aplicación de tecnologías avanzadas para la detección de fallas en estado prematuro que a través del tiempo presentan un avance progresivo, que puede ser cuantificable y permite predecir el momento en el que puede llegar a presentarse una falla catastrófica. A partir de este concepto es factible obtener diagnósticos efectivos que otorgan la facultad de tomar acciones de anticipación a fallas que se traducen en un contexto de confiabilidad operacional para el servicio, con impacto positivo para las personas, el medio ambiente, los procesos, los equipos y la responsabilidad social y comercial.

BIBLIOGRAFÍA

BASLER, M. y SCHAEFER, R. Understanding Power System Stability. En: 58th Annual Conference for Protective Relay Engineers: 5 al 7 de abril de 2005. Texas A&M University.

BECERRA, FABIANA. Gestión de Mantenimiento, 2006. Disponible en: www.mantenimientomundial.com.

DE PABLO;A. Envejecimiento y tratamiento de aceites minerales aislantes en servicio.Conferencias ASINEL, 1984.

DERUSSO, P.M., ROY, R.J. y CLOSE, C.M. State Variables for Engineers. New York . John Wiley and Sons, 1998.

DUARTE, Manuel. Apuntes del Curso Análisis y Modelación de Sistemas Dinámicos. Universidad de Chile, 2007.

ELOLA, L.N. PASTOS, A. MUGABURU J. Gestión integral de Mantenimiento, Priemra Edición, 1997.

FLIR Systems. Guía de Termografía para Mantenimiento Predictivo. Barcelona: Alava, 2013

FLIR SYSTEMS. Manual del Curso de Termografía Infrarroja Nivel 1.

GARRIDO, S. Organización y gestión integral de mantenimiento. España, Ed. Díaz de Santos, 2003.

GENS, FRANK. IDC Predictions 2013: Competing on the 3rd Platform, IDC, November 2012, International Data Corporation #238044, Volume: 1.

H. CARL MANGER, J. R. Reynolds; Insulating Mineral Insulating Oil (Transformer Oil). Doble Engineering Company. 2005.

J. G. Trasancos Instalaciones Eléctricas en Media y Baja Tensión. ITP An Internacional Company. Madrid, 1999.

JAMES R. WELTY., Fundamentos de transferencia de momento calor y masa. Capítulo 24 Editorial Limusa, 1998.

JARAMILLO, Julián. Mantenimiento Predictivo. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2013

KERN DONALD Q., Editorial Continental, S.A. DE C.V., México, 1997.

LEAL, S. Y ZAMBRANO, S. Fundamentos Básicos de Mantenimiento. 1ª Edición, Fondo Editorial UNET, Venezuela, 2005.

MASSON, F. M. Teoría y práctica del Mantenimiento Industrial. Barcelona, 1990.

NEWBROUGH, E. MYERS. Administración del Mantenimiento Industrial. Editorial Diana, México, 1998.

NYNAS; Aceites de Transformador: Impacto del aceite aislante en la vida útil del transformador. Conferencie Nynas Naphthenic. 2003.

PALMA , Rodrigo, BROKERING, Christie Walter y VARGAS, Luis. Ñom Lufke (El Rayo Domado) o Los Sistemas Eléctricos de Potencia. Santiago, Pearson, 2008. 471p.

PUYANS L. GARCELL. Transferencia de cantidad de movimiento calor y masa. Capítulo 5 Editorial Pueblo y Educación. Habana Cuba, 1988.

R. BARTNIKAS; Engineering Dielectrics. Vo. III:Electrical Insulating Liquids Institut de Recherche d'Hydro – Québec. September, 1991.

ROWELL, Derek. Apuntes del curso Analysis and Design of Feedback Control Systems. Massachusetts Institute of Technology, 2002.

RUSEJLA Sadikovic. Use of FACTS Devices for Power Flow Control and Damping of Oscillations in Power Systems. Tesis (Doctor of Technical Sciences). Zürich, Switzerland. SWISS Federal Institute Of Technology, 2006.

SÁNCHEZ MARCOS. Programa de Mantenimiento de Máquinas Frapo. Universidad San Ignacio de Loyola. Lima- Perú, 2007.

SANDOVAL, Salvador., VELASCO, Rocío., RODRIGUEZ, Roberto. y SOTO Rogelio. Metodología Para Realizar Análisis de Mantenimiento Basado en Confiabilidad en Centrales Hidroeléctricas. México: 2011.

SANZ FEITO. J. Máquinas Eléctricas. Departamento de Ingeniería eléctrica. Universidad Carlos III de Madrid. Madrid, 2002

STEVENSON, WILLIAM. Análisis de sistemas eléctricos de potencia. 2° ed. México, McGraw-Hill, 1975. 383p.

ANEXO

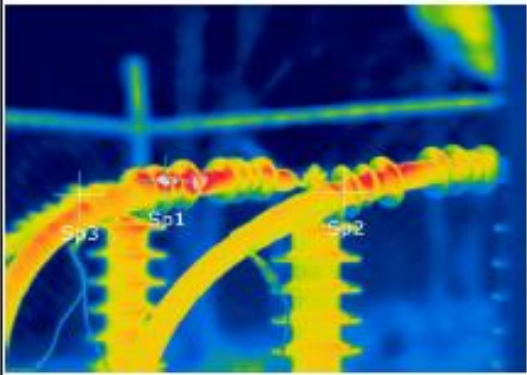

Anexo A. Reporte De Termografía

Reporte de Termografía

| REPORTE DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA | | | |
|-----------------------------------|---------------------|----------------------|---|
| Circuito / Campo: | Equipo de medición: | FLIR P660 | Analista CBM: Manolo Tamayo |
| Ubicación: | N/S del equipo: | | Estándar-Código-Norma: * ISO 18434-1, 2008. |
| Equipo: | TRANSFORMADOR | Fecha de inspección: | * Non Destructive Testing Vol. III, Infrared and Thermal Testing, ASNT Third Edition Chapter IX Part I. |
| Código Ellipse: | Fecha del reporte: | | * NFPA 70 (National Fire Protection Association). |
| Componente: | | | * NETA (National Electric Testing Association). |
| Punto de Falla: | CONOS PREMOLD | N° OT / WR Hallazgo: | |

| MATRIZ DE CONDICIÓN CBM | | | | | |
|-------------------------|----------------|----------------|-------------------|-------------|---------------|
| A. Bueno | B. Seguimiento | C. Programable | X D. No Tolerable | E. Urgencia | F. Emergencia |

TERMOGRAMA / FOTO

TABLAS DE DATOS

| Punto | Emisividad | Max. °C | Delta °C |
|--------|------------|---------|----------|
| Sp - 1 | 0.96 | 62 | 22 |
| Sp - 2 | 0.96 | 42 | 2 |
| Sp - 3 | 0.96 | 40 | Ref |

ESTÁNDAR - NORMA - CÓDIGO INTERNACIONAL

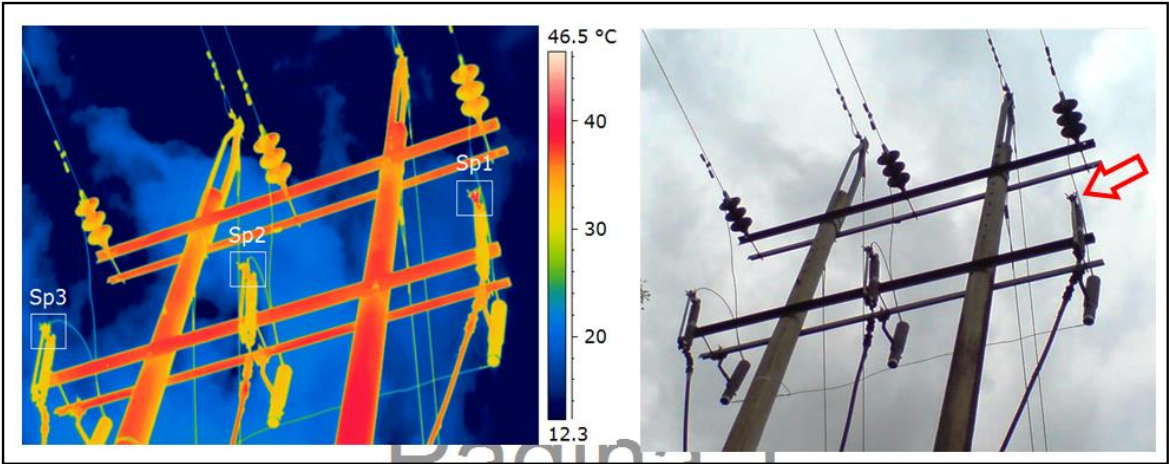
| NIVEL | DIFERENCIA DE TEMPERATURA | CLASIFICACIÓN | ACCIÓN |
|-------|-----------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| A | 15°C - 30°C D/A, ó 1°C a 3°C D/S | Posible deficiencia | Se requiere más información |
| B | 15°C - 20°F D/A, ó 2°C a 10°C D/S | Probable deficiencia | Reparar en la próxima parada |
| C | 20°C - 40°C D/A, ó >10°C D/S | Deficiencia | Reparar tan pronto sea posible |
| D | > 40°C D/A, ó >15°C D/S | Deficiencia grave | Reparar inmediatamente |

| Cuerpos | RANGOS RECOMENDADOS °C | |
|-----------------------------|------------------------|--------|
| | OPTIMO | MAXIMO |
| Transformadores de potencia | 30-43 | 75 |
| Transformadores de potencia | 30-43 | 80 |
| Conectores eléctricos | 20-28 | 80 |
| Bombas de condensadores | 20-43 | 75 |
| Circuitos impresos | 20-25 | 30 |
| Fusibles de potencia | 30-43 | 80 |
| Conectores eléctricos | 20-43 | 75 |
| Secundarios de potencia | 30-43 | 75 |
| Dispositivos | 30-43 | 75 |

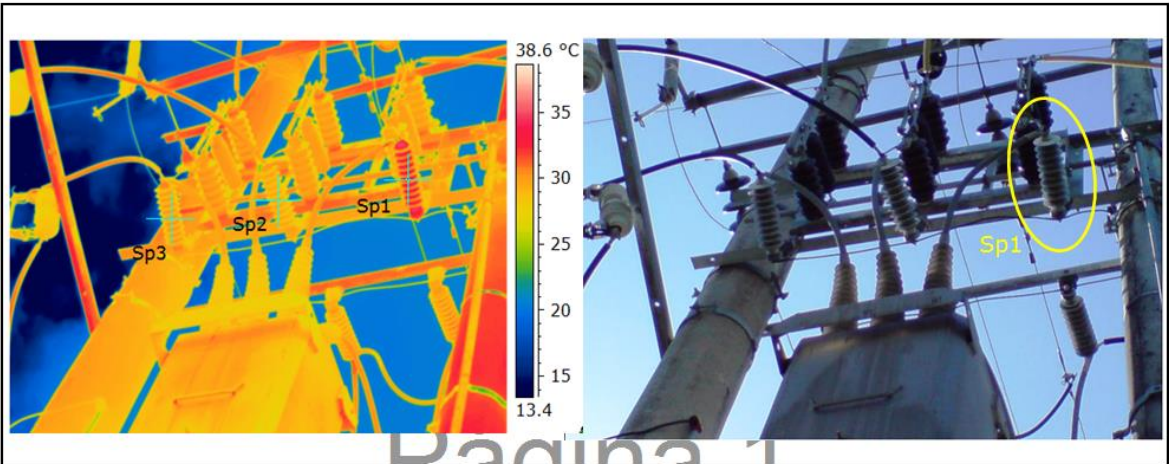
DIAGNOSTICO

RECOMENDACIONES


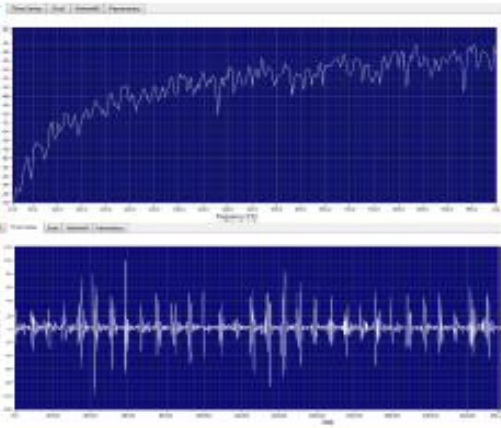
TERMOGRAMA / FOTO



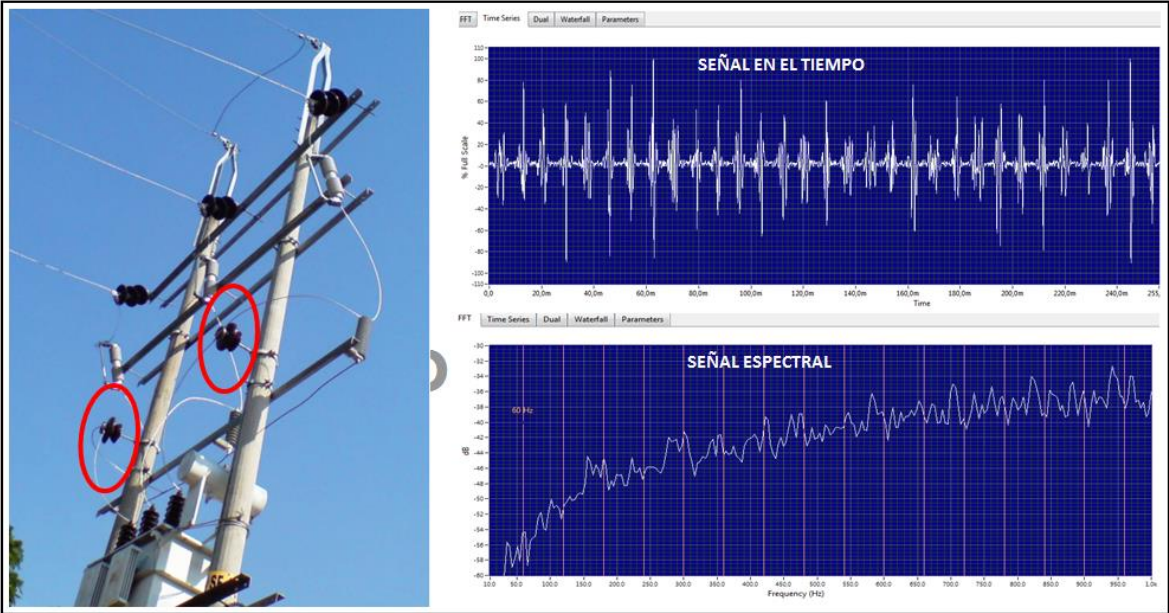
TERMOGRAMA / FOTO



Anexo B. Reporte de Ultrasonido

| REPORTE DE ULTRASONIDO ELÉCTRICO | | | | | |
|--|------------------------|---|---|-------------|---------------|
| Circuito / Campo: | Equipo de medición: | ULTRAPROBE 10000 | Analista CBM: Manolo Tamayo | | |
| Ubicación: | Nº del equipo: | Estándar-Código-Norma: | | | |
| Equipo: | SUBESTACION ELE | Fecha de Inspección: | La norma ASTM E 1002 - 05, la cual rige la inspección por ultrasonido propagado en el aire, no indica ninguna tabla de criticidad, por lo que la evaluación se hace de acuerdo al tipo de falla encontrado: Efecto Corona, Arco y Seguimiento o Tracking. | | |
| Código Elipse: | Fecha del reporte: | | | | |
| Componente: | ECP: | | | | |
| Punto de Falla: | DPS FASE R | Nº OT / Evento Hallazgo: | | | |
| MATRIZ DE CONDICIÓN CBM | | | | | |
| A. Bueno | B. Seguimiento | C. Programable | X D. No Tolerable | E. Urgencia | F. Emergencia |
| FOTOGRAFÍA DEL PUNTO DE FALLA Y ESPECTRO ULTRASÓNICO | | | | | |
|  | |  | | | |
| TABLAS DE DATOS Y VALORES | | | | | |
| INTENSIDAD (dB) | FRECUENCIA (Hz) | SENSIBILIDAD | | | |
| 22 | 40 | 60 | | | |
| DIAGNÓSTICO | | | | | |
| <p>Se realiza inspección por termografía y ultrasonido a la Subestación Eléctrica, se detecta por ultrasonido una señal característica de efecto tracking emitida por el DPS de la fase R ubicado en la estructura. El fenómeno se relaciona probablemente con degradación del material dieléctrico.</p> | | | | | |
| RECOMENDACIONES | | | | | |
| <p>Se recomienda realizar reposición de los aisladores de pin de la subestación por aisladores tipo line post, dar ajuste correcto con el conductor, y realizar seguimiento por parte de CBM.</p> | | | | | |

FOTOGRAFÍA DEL PUNTO DE FALLA Y ESPECTRO ULTRASÓNICO



FOTOGRAFÍA DEL PUNTO DE FALLA Y ESPECTRO ULTRASÓNICO

