

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA



Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

INCOMPATIBILIDAD DIELECTRICA DE CABLES SEMIAISLADOS EN REDES GENERALES DE DISTRIBUCIÓN

TESIS

Que para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería
Con opción terminal en
Sistemas Eléctricos de Potencia

Presenta:

Ing. Mario Andrés Vázquez Juárez

Asesores externos:

Director: Dr. Rodrigo Nuricumbo Guillén
Co Director: Dr. Fermín Pascual Espino Cortés

Puebla, Pue.

septiembre 2020

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi amada esposa Miriam, por su apoyo y ánimo que me brinda día con día para alcanzar nuevas metas, tanto profesionales como personales.

A mis hijos recién nacidos, Andrés y Miranda, quienes en sus primeros meses de vida no he podido ofrecer todo mi tiempo; los amo y siempre cuidaré para verlos hechos personas de bien, capaces y que puedan valerse por si mismos.

Agradecimientos

A mi familia, quienes siempre han soportado mi ausencia por largos periodos de tiempo y aun así están incondicionalmente para ayudarme.

A mis amigos y compañeros de aula, por todos esos fines de semana compartiendo experiencias.

A los Dr. Fermín Pascual Espino Cortés y Dr. Rodrigo Nuricumbo Guillén, por todo el apoyo, atención, tiempo y paciencia brindados a mi trabajo.

A los profesores de la BUAP e IPN, quienes me dejan amplios conocimientos con las cátedras impartidas en temas que son aplicables a mi trabajo.

Resumen

El uso de cables cubiertos en líneas aéreas de distribución a incrementado en los últimos años debido a que representa mayores ventajas operativas en comparación con los conductores desnudos.

Con el incremento de la instalación de cables cubiertos se tiene la necesidad de realizar estudios sobre su comportamiento; al ser instalados sobre la infraestructura existente en donde se presentan problemas de incompatibilidad dieléctrica.

Los primeros problemas se encontraron en los puntos de unión y derivación que son muy frecuentes en redes de distribución, problemas presentados por los materiales y tipos de conectores utilizados. Posteriormente se presentaron problemas con los aislamientos y los amarres que sujetan los cables a las estructuras de la red y recientemente se han observado perforaciones en zonas donde no se tiene ningún punto de conexión o sujeción; este tipo de anomalías no son detectadas con facilidad con los métodos de inspección y mantenimiento existentes en la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Las anomalías de este tipo se detectan hasta que surge la caída del conductor energizado, y en pocos casos durante los trabajos de mantenimiento. Con el incremento de estas fallas, aunque aún no representan la causa principal de afectaciones al suministro, se debe tener especial cuidado pues representan un grave problema de seguridad para cualquier persona, así como a los propios trabajadores.

En este trabajo se propone la mejora a la especificación de CFE E0000-29 "*Cables cubiertos para líneas aéreas de 15 a 38 kV*". Con el fin de mejorar la calidad en la cubierta de los conductores de las marcas que adquiere CFE, ya que en esta zona es donde se inicia la anomalía por la poca resistencia a la erosión y el tracking que se presentan durante la operación de este tipo de cables.

Con segmentos de cables cubiertos fallados, mismo que fueron proporcionados a estudiantes de ingeniería de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco, se realizaron pruebas de plano inclinado en base a la norma EN 50397-1:2006; con los resultados obtenidos se puede determinar que ninguna de

las muestras cumple con los valores de referencia de calidad para ser instalados en las redes de distribución.

Abstract

The use of covered cables in overhead distribution lines has increased in recent years because it represents greater operating advantages compared to bare conductors.

With the increase in the installation of covered cables, there is a need to carry out studies on their behavior; when installed on the existing infrastructure where dielectric incompatibility problems arise.

The first problems were found in the junction and derivation points that are very frequent in distribution networks, problems presented by the materials and types of connectors used. Later, there were problems with the insulation and the ties that hold the cables to the network structures and recently perforations have been observed in areas where there is no connection or attachment point; these types of anomalies are not easily detected with the inspection and maintenance methods existing in the Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Anomalies of this type are detected until the energized conductor falls, and in a few cases during maintenance work. With the increase in these failures, although they still do not represent the main cause of damage to the supply, special care must be taken as they represent a serious safety problem for anyone, as well as the workers. This work proposes the improvement to the specification of CFE E0000-29 "*Cables cubiertos para líneas aéreas de 15 a 38 kV*". In order to improve the quality of the cover of the conductors of the brands that CFE acquires, since it is in this area where the anomaly begins due to the low resistance to erosion and crawling that occur during the operation of this type of cables.

With failed covered cable segments, which were provided to engineering students of the Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Campus Zacatenco inclined plane tests were performed based on the standard EN 50397-1:2006; With the results obtained it can be determined that none of the samples meets the quality reference values to be installed in the distribution networks.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES.....	10
1.1 INTRODUCCIÓN	10
1.2 ANTECEDENTES	12
1.3 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA	13
1.4 JUSTIFICACIÓN	16
1.5 OBJETIVO GENERAL	17
1.6 OBJETIVOS ESPECIFICO	18
1.7 ESTADO DEL ARTE.....	18
CAPÍTULO 2 MANTENIMIENTO Y FALLAS EN REDES.....	20
2.1 ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO.....	20
2.2 TIPOS DE MANTENIMIENTO	20
2.2.1 <i>Inspección mayor</i>	25
2.2.2 <i>Inspección menor</i>	25
2.2.3 <i>Patrullaje</i>	25
2.2.4 <i>Detección de puntos calientes</i>	27
2.3 INDICADORES DE CONFIABILIDAD ESTABLECIDOS POR LA COMISIÓN REGULADORA DE ENERGÍA (CRE).....	29
2.3.1.- <i>Índice de la Duración Promedio de Interrupciones de Distribución (SAIDI)</i>	29
2.3.2.- <i>Índice de la Frecuencia Promedio de Interrupciones de Distribución (SAIFI)</i>	30
2.3.3.- <i>Índice de Duración Promedio de las Interrupciones por Usuario en Distribución (CAIDI)</i>	31
2.4 INTERRUPCIONES DEL SERVICIO.....	31
2.4.1 <i>Tipos de Interrupciones</i>	31
2.4.2 <i>Fallas por cables cubiertos caídos en la Zona Universidad de la Comisión Federal de Electricidad</i>	33
CAPÍTULO 3 ESPECIFICACIONES Y NORMAS.....	35
3.1. ESPECIFICACIÓN CFE E0000-29, CABLES CUBIERTOS PARA LÍNEAS AÉREAS DE 15 A 38 KV.....	35
3.1.1. <i>Pantalla semiconductor</i>	36
3.1.2. <i>Aislamiento-cubierta</i>	36
3.1.3. <i>Características eléctricas</i>	37
3.2 DESCRIPCIÓN DE NORMA ASTM-D2303 1997	39
3.2.1 <i>Alcance</i>	39
3.2.2 <i>Resumen del método de prueba</i>	39
3.2.3 <i>Importancia y uso</i>	40
3.3 DESCRIPCIÓN DE NORMA EN 50397-1:2006	41
3.3.1 <i>Muestras de ensayo</i>	41
3.3.2 <i>Equipo eléctrico</i>	42
3.3.3 <i>Electrodos</i>	43
3.3.4 <i>Contaminante</i>	44
3.3.5 <i>Papel aplicador</i>	44
3.3.6 <i>Flujo de contaminantes</i>	44
3.3.7 <i>Montaje</i>	45
3.3.8 <i>Ajuste del flujo de contaminantes</i>	45
3.3.9 <i>Aplicación de la tensión</i>	45
3.3.10 <i>Evaluación de la prueba</i>	45
3.4 TRACKING Y RESISTENCIA A LA EROSIÓN.....	46
CAPÍTULO 4 PRUEBAS DE LABORATORIO.....	48
4.1 PRUEBAS EXPERIMENTALES	48
4.2 DESARROLLO DE LA PRUEBA DE PLANO INCLINADO CON MUESTRAS DE CABLE	49
4.2.1 <i>Resultados</i>	50
4.3 ANÁLISIS DE MICROESTRUCTURAL DE LAS MUESTRAS DE CABLE.....	52

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.	54
5.1 CONCLUSIONES.....	54
5.2 TRABAJOS FUTUROS.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.- PRINCIPALES CAUSAS DE INTERRUPCIÓN EN LA DIVISIÓN VALLE DE MÉXICO SUR DE LA COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD EN UN AÑO MÓVIL AL MES DE JULIO 2020	11
FIGURA 2.- EROSIÓN EN LA CUBIERTA DE UN CONDUCTOR DE MEDIA TENSIÓN.....	13
FIGURA 3.- FUSIÓN EVENTUAL CAUSADA POR LA PERFORACIÓN.....	14
FIGURA 4.- EROSIÓN EN EL CONDUCTOR POR CONTACTO CON RAMAS DE ÁRBOL.....	15
FIGURA 5.- EROSIÓN EN LA ZONA DE CONTACTO CABLE CUBIERTO CON AMARRE DE ALUMINIO.....	16
FIGURA 6.- MANTENIMIENTO PREVENTIVO, CAMBIO DE AISLAMIENTO EN LÍNEAS ENERGIZADAS CON CONDUCTORES CUBIERTOS. .	22
FIGURA 7.- PERFORACIÓN EN CUBIERTA Y CONDUCTOR.....	23
FIGURA 8.- ESTRUCTURA DE MEDIA TENSIÓN DE PASO CON CONDUCTOR CAÍDO.....	24
FIGURA 9.- CONDUCTOR CUBIERTO FALLADO.....	24
FIGURA 10.- TERMÓGRAFA EN ESTRUCTURA DE REDES DE MEDIA TENSIÓN.....	28
FIGURA 11.- FALLA DE CABLE CUBIERTO, QUEDA ENERGIZADO DESPUÉS DE LIBERAR EL ARCO POR MEDIO DE SECCIONAMIENTO AUTOMÁTICO.....	33
FIGURA 12.- FALLA POR RUPTURA DE CABLE CUBIERTO.....	34
FIGURA 13.- FALLA DE CABLE CUBIERTO, QUEDA SOBRE POSTE DE MADERA A UNA ALTURA DE 1.7M CON RESPECTO AL NIVEL DE PISO.....	34
FIGURA 14.-ESQUEMA DE ELECTRODOS DE PRUEBA PARA MUESTRAS SENCILLAS.....	40
FIGURA 15.-DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL CIRCUITO.....	42
FIGURA 16.- ESQUEMA DEL CONJUNTO DE PRUEBA.....	43
FIGURA 17.- ELECTRODO SUPERIOR, ACERO INOXIDABLE, 0,5 MM DE ESPESOR.....	43
FIGURA 18.- PAPEL APLICADOR.....	44
FIGURA 19.-FORMACIÓN DE DESCARGA ELÉCTRICA POR FENÓMENO DE BANDA SECA.....	47
FIGURA 20.- ARREGLO PARA PRUEBA DE PLANO INCLINADO CON MUESTRAS DE CABLE [24].....	49
FIGURA 21.- MUESTRAS DE CABLE DURANTE PRUEBA DE PLANO INCLINADO [24].....	50
FIGURA 22.- EVIDENCIA DE LAS MUESTRAS DESPUÉS DE SER EXPUESTAS A LA PRUEBA CON UN VALOR INFERIOR DE TENSIÓN 2.5 kV [24].....	50
FIGURA 23.-.- PARTÍCULA DE CARBONATO DE CALCIO (CaCO ₃) IDENTIFICADA EN UNA MUESTRA DE CABLE [24].....	52
FIGURA 24.- REGIÓN DE MUESTRA DE CABLE EVALUADA MEDIANTE PRUEBA DE RAMAN [24].....	53

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.-CLASIFICACIÓN DE CABLES SEMIAISLADOS DE 15 A 38 kV.....	35
TABLA 2.- ESPESOR MÍNIMO DE LA PANTALLA SEMICONDUCTORA.....	36
TABLA 3.- ESPESOR PROMEDIO DEL AISLAMIENTO CUBIERTA Y TENSIÓN DE PRUEBA.....	36
TABLA 4.-RESISTENCIAS SERIE Y FLUJO CONTAMINANTE.....	42
TABLA 5.- RESULTADOS EN MUESTRAS DE CABLE [24].....	51

CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES.

1.1 INTRODUCCIÓN

La humanidad tiene una fuerte dependencia de la energía eléctrica. Es inimaginable lo que sucedería si esta materia prima, esencial para mover el desarrollo de los países, llegase a faltar. Está fuera de cualquier discusión la enorme importancia que el suministro de electricidad tiene en la actualidad para el hombre, que hace confortable la vida cotidiana en los hogares, que mueve efectivamente el comercio y que hace posible el funcionamiento de la industria de la producción. El desarrollo de un país depende de su grado de industrialización y este a su vez necesita de las fuentes de energía, especialmente de la energía eléctrica.

Un sistema eléctrico de potencia (SEP) tiene como finalidad la producción de energía eléctrica en los centros de generación y transportarla hasta los centros de consumo (ciudades, poblados, centros industriales, turísticos, etc.). Para ello, es necesario disponer de la capacidad de generación suficiente y entregarla con eficiencia y de una manera segura al consumidor final.

El logro de este objetivo requiere la realización de grandes inversiones de capital, de complicados estudios y diseños, de la aplicación de normas nacionales e internacionales muy concretas, de un riguroso planeamiento, de la investigación sobre materiales más económicos y eficientes, de un buen procedimiento de construcción y, por último, de la operación adecuada con mantenimiento riguroso que garantice el suministro del servicio de energía con muy buena calidad [1].

Sin embargo, ese tipo de inversión, tiempo y esfuerzo solamente estaba reservado para los sistemas de generación y transmisión del SEP, restándole importancia al sistema de distribución. No ha sido sino hasta en las últimas décadas que se ha comprendido que el sistema de distribución merece el mismo nivel de importancia que la generación o transmisión [1], ya que es aquí donde la calidad del servicio se deteriora, donde se presenta el mayor nivel de pérdidas técnicas (por efecto Joule y por Histéresis) y pérdidas no técnicas (como robos y fraudes).

La actualización de los sistemas en el país ha sido un gran reto para la Comisión Federal de Electricidad (CFE), especialmente en la Ciudad de México y su zona conurbada; esto debido a que fue apenas en 2009 cuando asumió la operación del sistema eléctrico en dicha región, tras la extinción de Luz y Fuerza del Centro el mismo año [2].

Tras asumir operaciones en la Ciudad de México, el primer reto para la CFE fue la modernización de las Redes Generales de Distribución, esto principalmente porque la infraestructura se encontraba en condiciones muy deterioradas e incluso obsoletas, con altos niveles de sobrecarga y topologías inadecuadas sin ninguna planeación.

Una de las principales actividades fue la reconfiguración y recalibración de líneas de distribución de 23 kV, reemplazando los conductores a cables cubiertos; esta actividad fue de gran ayuda para mejorar el desempeño de las redes de distribución, sin embargo, en la actualidad se han presentado nuevos problemas por el uso de este tipo de conductores debido a que se ha tenido casos en donde se parten, afectado el suministro de energía eléctrica y poniendo en riesgo a la población.

La figura 1 muestra las causas más comunes por las cuales se interrumpe el suministro de energía eléctrica, cuantificado por número de interrupciones (NI), en donde se puede observar un total de 40 interrupciones provocadas por falla en conductores en un periodo de un año.

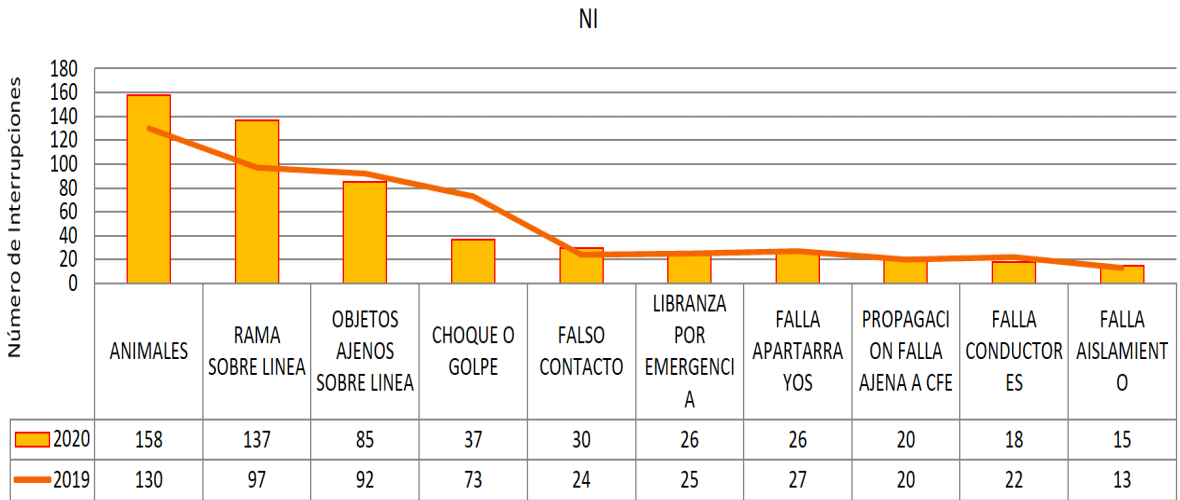


Figura 1.- Principales causas de interrupción en la División Valle de México Sur de la Comisión Federal de Electricidad en un año móvil al mes de julio 2020

1.2 ANTECEDENTES

Las líneas de media tensión cumplen un papel primordial en la distribución de energía eléctrica, la construcción de las redes de distribución en su mayoría se realiza con conductores desnudos, sin embargo, cuando este tipo de instalaciones se encuentran en zonas urbanas se debe utilizar otro tipo de infraestructura, esto debido a que en estas zonas las interrupciones del servicio son muy frecuentes debido al alto índice de incidentes registrados debido a la flora, fauna y fuertes corrientes de viento.

Por esta razón se ha optado por sustituir el conductor desnudo por cable cubierto en un gran número de alimentadores de las líneas de distribución, los cuales están conformados por un conductor de configuración básica en aluminio (ABAC, ACSR o AAAC), con una serie de capas de cubrimiento (estrictamente y desde el punto de vista eléctrico, no se consideran como aislamientos; por lo cual son conocidos como “semiaislados”, “cubiertos”, “protegidos” o “ecológicos”).

Las bondades del cable cubierto consisten en que se disminuye sustancialmente la distancia requerida entre las fases, para que la red sea más compacta y permita la instalación de uno o varios circuitos en el mismo poste. Este tipo de cable, al contar con una cubierta de Polietileno De Alta Densidad (HDPE), ha disminuido de manera considerable los incidentes mencionados anteriormente.

Para efectos de seguridad, el cable cubierto debe tratarse como un cable desnudo, en cuanto a las distancias de seguridad que se deben aplicar con respecto a los seres vivos. La experiencia ha demostrado que los cables cubiertos son una buena solución técnica para el caso de zonas medianamente arborizadas [3].

A pesar de todas las bondades que brindan los cables cubiertos, se han presentado algunos inconvenientes durante su operación, tales como radio interferencia, ruido audible, erosión y perforación de la cubierta. En casos extremos, la erosión y perforación puede evolucionar en la ruptura del cable.

Cuando el cable se rompe, al caer al suelo se presenta como una falla de alta impedancia que puede provocar que las protecciones no operen dejando al cable energizado. Esta condición representa un alto riesgo que no debe de ocurrir en

líneas de distribución por lo que el poder determinar la resistencia de la cubierta resulta muy importante en la selección de los cables disponibles en el mercado.

1.3 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

Fenómenos naturales, como tormentas, ráfagas de viento, descargas atmosféricas, la caída o el crecimiento de las ramas de los árboles, entre otros, son los factores más importantes para la interrupción del suministro en sistemas de distribución.

El uso de cables cubiertos en las redes de distribución ha permitido disminuir el número de fallas causadas por estos fenómenos; sin embargo, se han presentado otros problemas.

Se ha observado que las descargas atmosféricas tienden a producir pequeñas perforaciones en la cubierta y las corrientes que circulan a lo largo de los conductores cubiertos, ya sean de valores nominales y también en niveles de falla, producen sobrecalentamiento en los puntos de perforación y finalmente, la fusión y la caída del conductor. Este sobrecalentamiento aparentemente es causado por un arco que se origina en la perforación [4].

La figura 2 muestra un cable cubierto con una perforación fuera de un punto de contacto con algún aislamiento o amarre. La figura 3 muestra la fusión eventual causada por la perforación, antes de la ruptura.



Figura 2.- Erosión en la cubierta de un conductor de media tensión.



Figura 3.- Fusión eventual causada por la perforación.

Otro inconveniente es la erosión del conductor, la cual se da con la caída de árboles los cuales entran en contacto con los conductores cubiertos y generan descargas parciales (DP), las cuales pueden provocar que la cubierta de los conductores se deteriore por mecanismos químicos, térmicos y eléctricos, con el paso del tiempo. Las ramas de árboles que caen también pueden producir rastros de daños en la superficie del conductor debido a la diferencia de potencial, lo que puede agravar la situación e iniciar DP, resultando en la ruptura del aislamiento del conductor. En resumen, las DP tienen efecto distintivo en los procesos de envejecimiento y la vida útil del aislamiento que cubre los conductores de media tensión.

Las fallas por erosión en cables no solo son a consecuencia de los árboles, el cable cubierto ha sufrido erosión en la cubierta debido a la presencia de descargas eléctricas superficiales que se han presentado en la región donde el cable hace contacto con el espaciador para el caso de las líneas compactas o con el amarre y el aislador para el caso de las líneas híbridas [5].

Los primeros estudios realizados para investigar este problema indicaron que estas descargas se presentaban debido a la geometría del espaciador. En la región donde el cable hace contacto con el espaciador, quedan espacios donde el campo eléctrico

se intensifica, lo que hace que el aire alrededor de esa región se ionice y dé origen a las descargas eléctricas [5] .

La figura 4, muestra la erosión en la cubierta de un cable de Media Tensión por contacto con ramas de árboles a los cuales no se les dio mantenimiento adecuado.

La figura 5, muestra la erosión en un conductor cubierto en el punto de contacto sobre un aislador de porcelana con el amarre de aluminio suave calibre 4.

Los conductores que llegan a la ruptura generalmente terminan produciendo una falla de alta impedancia que no es detectado por los relés convencionales; esto representa un peligro grave, ya que esto puede derivar en un problema mayor como un incendio e incluso ser causa de un accidente a terceras personas.



Figura 4.- Erosión en el conductor por contacto con ramas de árbol.



Figura 5.- Erosión en la zona de contacto cable cubierto con amarre de aluminio.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Al sustituir en los sistemas de distribución aérea en media tensión los conductores por cables cubiertos, se presenta fallas que en lo general son más complejas. Es por esto, que se hace necesario encontrar otro tipo de solución integral. Se han identificado problemas de erosión en la cubierta del cable por descargas superficiales que pueden dar lugar a fallas que pueden producir la caída de cables energizados al suelo. Por lo anterior, existe una gran preocupación por identificar las causas que dan lugar a la erosión en las cubiertas y encontrar una solución a este problema.

Estudios previos indican que el área de contacto entre conductor y aislador es una zona donde el campo eléctrico se puede intensificar de manera importante, así como las perforaciones encontradas en puntos donde no se tiene contacto con un aislamiento sólido, solo con el aire [6].

Esta condición se presenta tanto en líneas híbridas como en compactas, y usualmente se refiere como un problema de compatibilidad dieléctrica entre los materiales con que se fabrican los elementos que conforman estas líneas.

Para controlar este problema existen dos posibilidades, una es buscar la manera de evitar que el campo eléctrico en la zona de contacto entre cable y aislador mediante técnicas de control de esfuerzos y la otra es incrementar la resistencia a la erosión de los materiales utilizados en las cubiertas. Esta última opción requiere del uso de pruebas que permitan evaluar la resistencia de los materiales a la erosión por descargas superficiales.

La prueba del plano inclinado permite evaluar la resistencia a la erosión por descargas eléctricas superficiales en materiales aislantes sólidos, estos pueden ser muestras planas o incluso muestras de cables. Cabe mencionar que esta no es la única prueba en la que se puede evaluar esta propiedad de los materiales ya que también existe la prueba del sistema completo.

La prueba del plano inclinado funciona con base al fenómeno de arqueo en banda seca, este fenómeno se presenta cuando en la superficie de un material con cierto campo eléctrico existen regiones húmedas dispersas, si sumado a esto existe contaminación en dicha superficie esto dará pie a que se presente una descarga eléctrica entre dos regiones húmedas.

Es importante mencionar que la prueba de plano inclinado no es una prueba donde se simule de manera real el fenómeno observado en los cables instalados, ya que este tipo de prueba es solo de aceptación, es decir únicamente permite valorar la resistencia a la erosión por descargas superficiales.

1.5 OBJETIVO GENERAL

Analizar la problemática presentada en cables cubiertos en la División Valle de México Sur de la Comisión Federal de Electricidad, con el fin de encontrar una propuesta de mejora que pueda mitigar las interrupciones temporales y permanentes al suministro de energía eléctrica.

1.6 OBJETIVOS ESPECIFICO

Para cumplir con el objetivo general se desarrollan los siguientes objetivos específicos.

- 1) Realizar la propuesta de mejora a la especificación interna de CFE E0000-29.
- 2) Sugerir la mejora de las propiedades físicas y químicas del polímero de los cables cubiertos utilizados en las redes generales de distribución (RGD).
- 3) Proponer cambios en el diseño de los sistemas con cables cubiertos que permitan reducir la erosión por descargas superficiales y la perforación por descargas atmosféricas.

1.7 ESTADO DEL ARTE

En 1961 Mathes y Gowan proponen la prueba del plano inclinado como una manera de medir la resistencia a la erosión por descargas superficiales en materiales aislantes sólidos [7].

Uno de los primeros trabajos en el cual se analizan las descargas eléctricas en aire fue realizado en el año de 1963 por Essam Nasser et al. [8], en sus experimentos utiliza un arreglo punta plano y con la ayuda de una emulsión fotográfica logra registrar imágenes de la trayectoria de los streamer debido a tensiones de impulso positivo, encontrando que el crecimiento de los streamer va acompañado de ramificaciones y que el número de ramificaciones decrece conforme los streamers se alejan del electrodo punta.

R. J. Xavier et al [9] hace un estudio detallado en el año de 1990 de la distancia de fuga requerida para aisladores de CD y CA, utilizan la norma IEC 587 para hacer las pruebas de tracking, pero varían el ángulo de 5° a 45°; además, utilizan la norma IEC 507 para establecer los niveles de contaminación. Dice también que para el caso de CD en las pruebas de contaminación artificial no es adecuado su uso ya que el equipo no tiene la capacidad de soportar la ruptura eléctrica.

En 1992, A. S. G. Alghamid et al [10] realizan pruebas para determinar el tracking y la erosión, dan los resultados en los que se forma el tracking y de cómo varía respecto a las variaciones del material (plastificación). Así mismo, la prueba de erosión muestra como avanza en la relación de mm³/h. todas las pruebas se apegan a las especificaciones de las normas BS 5604-1986, IEC 587-1984, ASTM D2303-79. Así concluyen que la resistencia a la erosión y el tracking dependen de las propiedades mecánicas del material.

En el año de 1998 C. H. Lee et al [11] utiliza Etileno Propileno Dieno Monómero (EPDM) para realizar las pruebas de tracking de acuerdo a la norma IEC 587 con un voltaje de 4.5 kV con un tiempo de prueba de 6 horas, el grado de erosión es calculado por su peso antes y después de la prueba de tracking. La falla en esta prueba se define por la corriente de fuga que es sobre el valor de 60mA para 2 segundos. Sin embargo, el carbón negro tiene un efecto negativo en las propiedades eléctricas de los poliméricos aislantes.

Posteriormente en el año de 1999, M. Ugur et al [12] se basa en la norma ASTM D2303 para realizar pruebas de tracking estas pruebas son a consecuencia de los factores ambientales los cuales son mecánicos, radiación de rayos UV y efectos del viento. Dichos factores afectan los tiempos de tracking debido a los esfuerzos, pérdida de hidrofobicidad y envejecimiento. Los tiempos de ruptura se disminuyen a más del 50%.

En 2010 M. Lehtonen presenta un artículo publicado en la IEEE de cómo el suministro eléctrico en Finlandia se ve afectado por fauna, las acciones de la población, fenómenos naturales y razones técnicas. También habla de cómo sustituir el conductor desnudo por cable semiaislado en las líneas de distribución ayuda a que se reduzcan las fallas [13].

En 2013 Daniel Olvera presenta un estudio donde demuestra como la compatibilidad dieléctrica de dos materiales que están en contacto influye en la intensidad del campo eléctrico que se presentará en ese espacio. Esto enfocado específicamente al contacto entre aislador o seccionador y el cable semiaislado [14].

CAPÍTULO 2 MANTENIMIENTO Y FALLAS EN REDES.

En este capítulo, se presenta la forma en que actualmente se lleva a cabo las actividades de inspección y mantenimiento en las redes generales de distribución (RGD) en la CFE división valle de México sur, se describe los conceptos básicos de los indicadores de confiabilidad, para posteriormente mostrar la problemática real de las áreas de distribución, problema que afecta directamente la confiabilidad de sistemas de distribución y de la cual no se tiene una propuesta de solución.

2.1 ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO.

Con el fin de garantizar la continuidad en el suministro de energía eléctrica, y la conservación en forma oportuna de los elementos o componentes que conforman las RGD, se hace necesaria la elaboración de un programa de mantenimiento. En el caso de la Comisión Federal de Electricidad, se utiliza el Sistema Integral de Administración de Distribución (SIAD). Las condiciones básicas de aplicación del mantenimiento en las RGD están determinadas por el número de anomalías que se detecta al realizar las inspecciones. De esta forma, es posible realizar la programación de las actividades de mantenimiento. Para ello es necesario desarrollar las técnicas de trabajo con línea energizada o desenergizada.

2.2 TIPOS DE MANTENIMIENTO

Las actividades de inspección y mantenimiento son asignados a grupos de trabajo denominadas parejas de línea viva, conformadas con los elementos necesarios para la ejecución de dichas actividades. Para la ejecución de los trabajos de mantenimiento a las RGD, es importante describir al personal de campo en forma sencilla y precisa la o las actividades a desarrollar en un trabajo, los grupos de trabajos pueden estar conformadas por dos o más parejas de línea viva, dentro de ese grupo siempre se deberá tener un responsable que es quien dirigirá el trabajo asignado.

Para realizar los trabajos de inspección de las RGD, es importante describir al personal que tipo de inspección se realizará, así como las características de la red, esto con el fin de ser más precisos en la detección de posibles anomalías en las instalaciones, las inspecciones siempre se realizan con una sola pareja de linieros.

a) Mantenimiento predictivo.

Tiene la finalidad de combinar las ventajas y analizar los resultados de los de dos tipos de mantenimiento preventivo y correctivo para lograr el máximo tiempo de operación y eliminar el trabajo innecesario. Lo cual exige mejores técnicas de inspección y medición para determinar las condiciones de las RGD, con un control más riguroso que permite la planeación correcta y efectuar las inspecciones y pruebas verdaderamente necesarias.

Para este tipo de mantenimiento, actualmente no se ha implementado ninguna técnica de predicción de anomalías en cables cubiertos.

b) Mantenimiento preventivo.

Tiene como objetivo evitar las interrupciones de las líneas, mejorando la calidad y continuidad en su operación, y es consecuencia de las inspecciones programadas. Es poco común pero durante la ejecución de actividades de mantenimiento preventivo, dependiendo de la experiencia y capacidad de la pareja de linieros de línea viva, se pueden localizar anomalías en cables sobre su cubierta; esta condición representa un peligro exponencial ya que al no detectarse se puede provocar la ruptura del cable por el movimiento mecánico al cual se someten los cables al realizar mantenimiento, en el mejor de los casos se detecta la anomalía en la cubierta del cable y se replantea el tipo de mantenimiento. Esta condición se considera de emergencia y en ocasiones es necesario la interrupción del suministro de energía eléctrica, lo que afecta al usuario final y por consiguiente los indicadores de confiabilidad.

La figura 6 muestra los trabajos de mantenimiento de cambio de aislador en líneas de media tensión energizadas, se puede apreciar la cantidad de equipo utilizado el

cual ejerce presión sobre las líneas de distribución, en un conductor dañado esto puede ser causa de su ruptura por tensión mecánica y un accidente del cual no se puede estimar su valor económico.

La figura 7 muestra una sección de cable cubierto en el cual se observó una perforación mínima, anomalía que no es posible detectar a nivel de piso de manera visual ni con el uso de cámaras termográficas. Esta anomalía se encontró a dos metros de distancia de la referencia a tierra más cercana, en el área de distribución Contreras de la zona Universidad de la División Valle de México Sur (DVMS), de la comisión federal de electricidad (CFE).



Figura 6.- Mantenimiento preventivo, cambio de aislamiento en líneas energizadas con conductores cubiertos.



Figura 7.- Perforación en cubierta y conductor.

c) Mantenimiento correctivo.

Es el que se realiza en condiciones de emergencia o de contingencia, de aquellas actividades que quedaran fuera del control del mantenimiento preventivo, buscando tener recursos a fin de lograr el menor tiempo de interrupción. Este tipo de mantenimiento no es deseable, ya que afecta la disponibilidad de la red.

Una de las fallas que menos se espera en las RGD, es la provocada por un cable caído; cuando un conductor cae al suelo, puede que no establezca un contacto sólido con él. Por lo tanto, se produce una falla de alta impedancia, lo que resulta en un nivel de corriente de falla bajo que las protecciones de sobrecorriente de los restauradores convencionales no detectan. Este fenómeno implica la formación de arcos y un comportamiento no lineal de la impedancia de falla. Por esto, las formas de onda de voltaje y corriente se distorsionan. Las fallas de alta impedancia pueden pasar desapercibidos durante largos períodos de tiempo; sin embargo, representan peligros importantes [4], incluida la posibilidad de contacto directo o tensiones de paso.

La figura 8 muestra una falla en un conductor cubierto, el cual cayó provocando una falla transitoria, al estar en el suelo las protecciones no operaron.



Figura 8.- Estructura de media tensión de paso con conductor caído.

La figura 9 muestra un conductor caído el cual permaneció energizado hasta que personal de mantenimiento de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), llegó al lugar por los reportes realizados de usuarios de la zona.

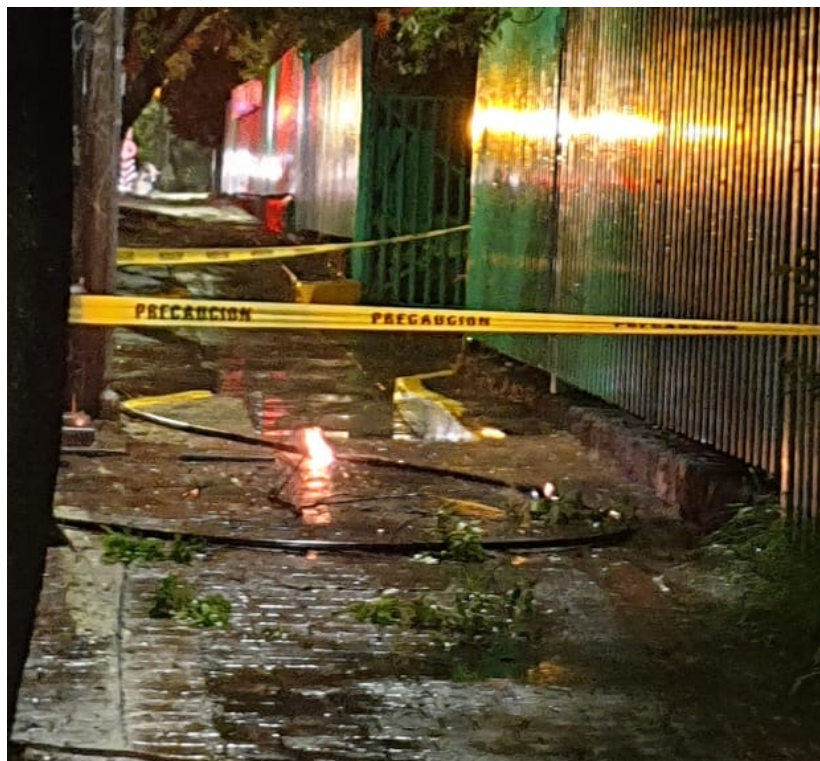


Figura 9.- Conductor cubierto fallado.

2.2.1 Inspección mayor.

Deberá realizarse cuando menos con una frecuencia de una vez por año a lo largo de toda las RGD. Esta revisión deberá hacerse a detalle en cada elemento componente de la estructura, cables conductores y factores externos a la línea que pudieran ocasionar fallas en la misma como sistema de tierra, poda, libramientos, vandalismo.

Para la inspección en redes compactas, solo se realiza la actividad a nivel de piso con binoculares, estructura por estructura, esto debido a que este tipo de configuraciones de red se instalan en lugares de difícil acceso a los vehículos hidráulicos. En configuraciones de red híbridas se debe tratar de la misma manera que las instalaciones con conductores desnudos.

Se debe tener cuidado especial en observar alguna erosión en la cubierta, en muy pocas ocasiones se puede observar algún daño a nivel de piso ya que las anomalías encontradas por lo regular son en la parte superior del cable.

2.2.2 Inspección menor.

Podrán realizarse mínimo 2 inspecciones menores por año en un circuito de media tensión, en el entendido de que esta actividad no se requiere estrictamente subir a las estructuras por parte del líniero, la inspección menor se utiliza para detectar anomalías en un circuito que ha presentado estadísticamente interrupciones.

Para esta actividad es indiferente el tipo de configuración del circuito, se deberá concluir el total de los kilómetros de red desnuda, compacta o híbrida.

2.2.3 Patrullaje.

Esta actividad puede ser realizada con vehículo o a pie, cuando las condiciones operativas de la red lo permitan, los patrullajes se deben realizar constantemente, sobre todo en los casos que se generen condiciones atípicas, por ejemplo, después de una fuerte tormenta o por otras condicionantes y/o riesgos del entorno que

pongan en peligro la operación, como los globos metálicos enredados en las líneas después de un 6 de enero.

Cuando se realizan los patrullajes, los elementos de red que normalmente se revisan son los siguientes:

a) Estructura general

En este caso debido a la velocidad con la que se realiza, solo se pueden apreciar postes fuera de verticalidad o ladeados, crucetas dobladas, oxidadas y/o elementos faltantes y elementos operados.

b) Aislamiento

De los aisladores se pueden apreciar bien aisladores rotos y manchados; sin embargo cuando se encuentra una cadena con una mancha, es necesario tomar nota de la estructura y fase correspondiente, para que posteriormente se efectúe una revisión más minuciosa, pues ocurre que muchas veces las manchas ocasionadas por los excrementos de los pájaros se confunden con las manchas por flameo, en caso de que se detecte en un tramo de la red el hábitat de aves se deberá de considerar una inspección inmediata.

c) Conductor

Del conductor se puede apreciar en este tipo de revisión el libramiento vertical, la apreciación de algún cable dañado solo es posible cuando el daño es realmente grande, o bien tratándose de hilo rotos solamente que las puntas de estos estén demasiado extendidas hacia la parte exterior del conductor, en cable cubierto no se puede observar el daño. Como se mencionó anteriormente los cables cubiertos se deben tratar de la misma manera que un conductor desnudo.

d) Poda

Con la constante realización de patrullajes es cómo se logra una rápida inspección del estado de la poda, pues en este caso las anomalías presentadas por poda se pueden salir de control en breve tiempo.

Por lo tanto, cuando se efectuó la revisión de la poda, se debe inspeccionar muy bien el estado de la distancia que guardó la misma, así como su ancho y elevación de copa, también aquí conviene vigilar aquellos puntos conflictivos, tales como parques y zonas arboladas de difícil acceso.

La ventaja de tener una buena poda ofrece la facilidad de poder visualizar a pie por toda la red, y cuando por alguna causa llega a tener problemas de conductor reventado, la reparación del cable se hace más rápido.

Cuando se revisa la poda, se debe tener especial cuidado en identificar los pinos, hules y eucaliptos, que los plantan como ornato, y son de muy rápido crecimiento.

2.2.4 Detección de puntos calientes.

La programación de la revisión de puntos calientes debe tomarse también muy en cuenta al elaborar el programa de revisión de las RGD, la localización de estos puntos debe efectuarse por medio de un equipo o cámara termografía que tenga la capacidad de censar la temperatura de los elementos de la red.

Se deberán de inspeccionarse todas aquellas estructuras de remate que cuentan con puentes unidos a través de conectores y principalmente aquellos puntos donde se tengan instalados conectores mecánicos de aluminio y cobre, también deberán revisarse los empalmes preformados y los puntos unidos a través de conectores de compresión, puntos de sujeción en conductores y grapas de suspensión o remate; en caso de detectarse algún punto caliente se recomienda su corrección inmediata.

La figura 10 muestra la imagen que se obtiene de la inspección con cámara termografía, se puede observar que el punto con temperatura mayor es en el herraje de la estructura, en segundo término, los aislamientos y conexiones mecánicas, y por último el punto más bajo es el conductor.

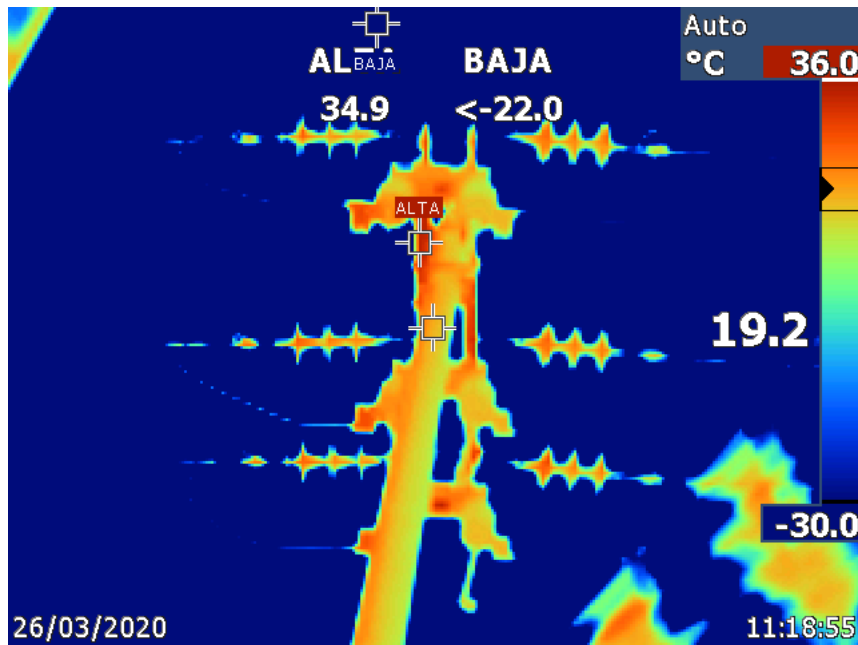


Figura 10.- Termografía en estructura de redes de media tensión.

Aun en la actualidad, la manera tradicional de llevar a cabo la inspección y el mantenimiento de las RGD en la CFE carece de procedimientos para la detección de los problemas que se han presentado en cables cubiertos como la erosión y el tracking (trayectoria carbonizada que se presenta en la superficie de un material aislante sólido cuando se somete a descargas superficiales) sobre la cubierta de los conductores, lo más cercano a la detección de una posible anomalía en cables cubiertos es el uso de cámaras termografías, sonoras y de efecto corona.

El uso de este tipo de equipos es limitado, son equipos de alto costo lo cual dificulta su adquisición, actualmente no se tiene disposición a estos equipos para cada área de distribución con los cuales se pueda realizar inspecciones.

Aun cuando se contara con equipos suficientes es importante señalar que no se podría asegurar la detección de erosión o daño en cables cubiertos ya que las mediciones realizadas por estos equipos no están enfocadas específicamente a la detección de este tipo de anomalías incrementando la probabilidad de falla por la ruptura de este tipo de conductores.

Al presentarse una falla por no haber detectado con anticipación las anomalías que dan origen a la interrupción del suministro eléctrico, se pone en riesgo el

cumplimiento de los indicadores internacionales que evalúan la confiabilidad de las redes generales de distribución (RGD).

Existen estudios que proponen métodos de medición de descargas parciales (DP) para el diagnóstico de aislamiento de conductores durante el funcionamiento normal, al monitorear las DP en línea se puede detectar de manera oportuna deterioro progresivo del aislamiento. La detección temprana de el desarrollo de fallas conduce a una mejor calidad de la energía y una mayor satisfacción del cliente [3]. Pero estos métodos aún no se ponen en práctica en el ámbito geográfico de la división Valle de México Sur de la Comisión Federal de Electricidad.

2.3 INDICADORES DE CONFIABILIDAD ESTABLECIDOS POR LA COMISIÓN REGULADORA DE ENERGÍA (CRE).

La evaluación de los criterios para los distribuidores se basará en los índices de calidad y continuidad, los cuales deberán considerar las interrupciones producto directamente de las actividades enfocadas en la operación y mantenimiento de las RGD. Por tanto, los índices para la evaluación de la continuidad en las RGD son el SAIDI, SAIFI y CAIDI, los cuales están directamente relacionados con el número de interrupciones, la duración y la cantidad de usuarios afectados en cada una de ellas.

2.3.1.- Índice de la Duración Promedio de Interrupciones de Distribución (SAIDI).

Es el tiempo que en promedio cada usuario no dispuso del servicio eléctrico debido a interrupciones en las subestaciones y redes de media tensión pertenecientes a las redes generales de distribución (RGD), contabilizado después del quinto minuto de duración de la interrupción.

Para la evaluación del *SAIDI* se debe tener una clasificación del indicador que permita identificar las causas de las fallas atribuibles al distribuidor como responsable de la operación y mantenimiento; asimismo identificar las causas que no son atribuibles a la operación y el mantenimiento considerados como caso fortuito, fuerza mayor o casos excepcionales.

$$SAIDI = \frac{TR * UA}{UTPRO} + \frac{TRCF * UCF}{UTPRO}$$

TR = Es el tiempo de restablecimiento de una interrupción por causas atribuibles al distribuidor.

UA = Es el número total de usuarios finales afectados por una interrupción.

TRCF = Tiempo de restablecimiento de la interrupción debido a casos fortuitos y de fuerza mayor o eventos excepcionales.

UCF = Usuarios afectados por una interrupción debida a casos fortuitos y de fuerza mayor o eventos excepcionales.

UTPRO = Son los usuarios totales promedio que recibe el suministrador dentro de una división de distribución de un periodo dado del año de gestión.

2.3.2.- Índice de la Frecuencia Promedio de Interrupciones de Distribución (SAIFI)

Es la cantidad de interrupciones promedio que un usuario experimenta en un periodo determinado atribuibles a la operación y mantenimiento y/o por casos fortuitos, fuerza mayor o casos excepcionales, contabilizado después del quinto minuto de duración de la interrupción. Para la evaluación del *SAIFI* se debe tener una clasificación del indicador que permita identificar las causas de las fallas atribuibles al distribuidor como responsable de la operación y mantenimiento; asimismo identificar las causas que no son atribuibles a la operación y el mantenimiento considerados como caso fortuito, fuerza mayor o casos excepcionales.

$$SAIFI = \frac{UA}{UTPRO} + \frac{UCF}{UTPRO}$$

UA = Es el número total de usuarios finales afectados por una interrupción.

UCF = Usuarios afectados por una interrupción debido a Casos Fortuitos y de Fuerza Mayor o Eventos Excepcionales.

UTPRO = Son los usuarios totales promedio que recibe el Suministrador dentro de una División de Distribución de un periodo dado del año de gestión.

2.3.3.- Índice de Duración Promedio de las Interrupciones por Usuario en Distribución (CAIDI).

Es la duración promedio que un usuario experimenta por cada interrupción atribuible a la operación y mantenimiento y/o por casos fortuitos, fuerza mayor o casos excepcionales, contabilizado después del quinto minuto de duración de la interrupción. Para la evaluación del *CAIDI* se debe tener una clasificación del indicador que permita identificar las causas de las fallas atribuibles al Distribuidor como responsable de la operación y mantenimiento; asimismo identificar las causas que no son atribuibles a la operación y el mantenimiento considerados como casos fortuitos, fuerza mayor o casos excepcionales.

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI}$$

2.4 INTERRUPCIONES DEL SERVICIO

En el análisis de confiabilidad de sistemas de distribución, es común hablar de las interrupciones del servicio, estas interrupciones pueden ser de diferentes tiempos y por diversas causas. El estado operativo de una interrupción se asocia a una emergencia (por ejemplo, una línea abierta, un transformador fuera de servicio, o algún interruptor que se encuentre abierto), ya que indica que se perdió la confiabilidad del sistema y en donde se ven afectados los usuarios finales.

2.4.1 Tipos de Interrupciones

Una interrupción se puede definir como la suspensión del servicio a uno o más usuarios, independientemente si el usuario esté o no utilizando el suministro de energía en el momento. Este es el resultado de uno o más elementos o componentes del sistema que se encuentran fuera de servicio, dependiendo de la

configuración de la red de distribución. Los diferentes tipos de interrupción que se pueden presentar en las redes de distribución son los siguientes:

- a) Interrupción instantánea. Es una interrupción que dura algunos ciclos y que normalmente son asociados a una variación en la tensión, en donde las protecciones no llegan a los valores de operación cuando la falla es liberada, pero algunos equipos o maquinarias salen de operación. Por lo general esta interrupción es menor a un segundo.
- b) Interrupción transitoria. Es la interrupción del servicio eléctrico a uno o más usuarios. Tiene una duración limitada o requiere un periodo para restablecer el servicio, ya sea automáticamente o por medio de una operación de conmutación manual en el sitio en el que un operador está inmediatamente disponible. Por lo general, es de algunos minutos y algunas veces menor a cincuenta segundos.
- c) Interrupción temporal. Tiene una duración de más de un minuto, normalmente el tiempo que se requiere para restablecer el servicio, está dado por el tiempo necesario para que se haga un seccionamiento manual en el sitio por medio de un operador que no está disponible, por lo que la restauración es, por lo general, de algunos minutos a una hora.
- d) Interrupción programada. Es una interrupción debida a un corte de energía planeado, resultado de políticas de mantenimiento, y los usuarios son informados de antemano.
- e) Interrupción permanente. Es una interrupción permanente del servicio eléctrico a uno o más usuarios y por más de un minuto, la cual, es resultado de una o más instalaciones afectadas, sin embargo, no es transitoria o temporal, debido a que se requiere reparar o sustituir algunas de las instalaciones que están fuera de servicio.

Las interrupciones permanentes dan motivo a este trabajo en particular hablando del daño específico a cables cubiertos, la ocurrencia de este tipo de fallas no es recurrente pero cuando sucede la afectación representa una desviación de los indicadores de confiabilidad, así como el riesgo potencial de un accidente.

2.4.2 Fallas por cables cubiertos caídos en la Zona Universidad de la Comisión Federal de Electricidad.

Las afectaciones económicas que se presentan al momento de ocurrir una falla se estiman por la energía dejada de vender, la mano de obra que se utiliza para la atención de las fallas y por los gastos de maquinaria utilizada para realizar las reparaciones, de ahí la importancia de minimizar el impacto de estos eventos con el fin de conservar la rentabilidad de la empresa.

El nivel de confiabilidad puede considerarse como apropiado, cuando el costo de evitar interrupciones no excede los costos de las consecuencias que originan esas interrupciones a los usuarios. Los costos de confiabilidad son usados para revisar tarifas y tramitar su incremento, según sea el caso [15].

Las figuras 11, 12 y 13 muestran algunas fallas ocurridas en el área de distribución Contreras de la Zona Universidad de la División Valle de México Sur (DVMS) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), la cuales representaron afectaciones económicas importantes por el tiempo que dejó de suministrar energía.



Figura 11.- Falla de cable cubierto, queda energizado después de liberar el arco por medio de seccionamiento automático.



Figura 12.- Falla por ruptura de cable cubierto.



Figura 13.- Falla de cable cubierto, queda sobre poste de madera a una altura de 1.7m con respecto al nivel de piso.

CAPÍTULO 3 ESPECIFICACIONES Y NORMAS.

En este capítulo, se hace referencia a la especificación de CFE E0000-29 para cables cubiertos, en donde se puede observar las recomendaciones que se hacen de algunas pruebas a considerar en la aprobación de un cable cubierto; así mismo se describe la norma de referencia de esta especificación ASTM-D2303 1997, para medir la resistencia a la carbonización del aislamiento cubierta, también se describe el procedimiento de plano inclinado de la norma EN 50397-1:2006 utilizada para medir la resistencia a la erosión de la cubierta de los cables.

3.1. Especificación CFE E0000-29, cables cubiertos para líneas aéreas de 15 a 38 kV.

El objetivo de esta especificación es el establecer las características que deben cumplir los cables cubiertos con conductor de aluminio, cobre o aluminio con acero reforzado (ACSR por sus siglas en inglés) para tensiones de hasta 38 kV con aislamiento-cubierta de polietileno de cadena cruzada (XLPE) que utiliza CFE. Estos cables son utilizados en redes de distribución aérea de media tensión y de acuerdo a esta especificación se clasifican como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1.-Clasificación de cables semiaislados de 15 a 38 kV.

Tensión nominal entre fases (kV)	Sección transversal (mm ²)	Descripción corta del cable		
		Aluminio (AAC)	Aluminio con refuerzo de acero (ACSR)	Cobre (Cu)
15	241.70	Cable SA-AAC (477) - XLP15	---	---
	170.45	Cable SA-AAC (366.4) - XLP15	Cable SA-ACSR (336.4) - XLP15	Cable SA-Cu (336.4) - XLP15
	135.16	Cable SA-AAC (266.8) - XLP15	Cable SA-ACSR (266.8) - XLP15	Cable SA-Cu (266.8) - XLP15
	85.03	Cable SA-AAC (3/0) - XLP15	Cable SA-ACSR (3/0) - XLP15	Cable SA-Cu (3/0) - XLP15
	53.48	Cable SA-AAC (1/0) - XLP15	Cable SA-ACSR (1/0) - XLP15	Cable SA-Cu (1/0) - XLP15
25	170.45	Cable SA-AAC (336.4) - XLP25	Cable SA-ACSR (336.4) - XLP25	Cable SA-Cu (336.4) - XLP25
	135.16	Cable SA-AAC (266.8) - XLP25	Cable SA-ACSR (266.8) - XLP25	Cable SA-Cu (266.8) - XLP25
	85.03	Cable SA-AAC (3/0) - XLP25	Cable SA-ACSR (3/0) - XLP25	Cable SA-Cu (3/0) - XLP25
	53.48	Cable SA-AAC (1/0) - XLP25	Cable SA-ACSR (1/0) - XLP25	Cable SA-Cu (1/0) - XLP25
38	241.70	Cable SA-AAC (477) - XLP38	---	---
	170.45	Cable SA-AAC (336.4) - XLP38	Cable SA-ACSR (336.4) - XLP38	Cable SA-Cu (336.4) - XLP38
	135.16	Cable SA-AAC (266.8) - XLP38	Cable SA-ACSR (266.8) - XLP38	Cable SA-Cu (266.8) - XLP38
	85.03	Cable SA-AAC (3/0) - XLP38	Cable SA-ACSR (3/0) - XLP38	Cable SA-Cu (3/0) - XLP38
	53.48	Cable SA-AAC (1/0) - XLP38	Cable SA-ACSR (1/0) - XLP38	Cable SA-Cu (1/0) - XLP38

Nota: Los números 15, 25 y 38 al final de XLP, indican a la tensión nominal entre fases en kV.

A continuación, se describen las características dieléctricas y eléctricas que deben cumplir este tipo de conductores de acuerdo a la especificación.

3.1.1. Pantalla semiconductor

Sobre el conductor se debe aplicar una capa de material semiconductor termofijo extruido de color negro, compatible con el aislamiento-cubierta y el conductor. Esta capa debe tener las mismas o mejores características térmicas que el aislamiento-cubierta. El espesor mínimo de esta cubierta se muestra en la tabla 2, los valores de referencia son obtenidos de la norma NMX-J-177 [16].

Tabla 2.- Espesor mínimo de la pantalla semiconductor.

Sección transversal del conductor (mm ²)	Espesor de la pantalla sobre el conductor en (mm)	
	En un punto cualquiera	Promedio
De 53.48 a 107.2	0.30	0.38
De 107.2 a 253.4	0.41	0.51

3.1.2. Aislamiento-cubierta.

El material de aislamiento-cubierta debe ser un compuesto extruido de polietileno de cadena cruzada (XLP), resistente a las descargas superficiales (carbonización), abrasión e intemperie. El espesor mínimo del aislamiento-cubierta en cualquier punto no debe ser menor al 90% del valor promedio indicado en la norma NMX-J-177, en la tabla 3, se observan los valores de referencia.

Tabla 3.- Espesor promedio del aislamiento cubierta y tensión de prueba.

Sección transversal del conductor (mm ²)	Tensión entre fases (kV)	Espesor promedio (mm)	Tensión de prueba	
			(kV) rcm	(kV) c.d.
De 53.48 a 67.43	15	2.5	15	36
Mayor de 67.43	15	3	18	43
De 53.48 y mayores	25	4	24	58
De 53.48 y mayores	38	5.3	33	79

3.1.3. Características eléctricas.

En esta sección se presentan las características eléctricas que deben cumplir los conductores cubiertos de acuerdo a la especificación:

1.- Resistencia del conductor.

La resistencia del conductor debe cumplir con lo establecido en la norma NOM-063-SCFI, $0.028 \left(\Omega * \frac{mm^2}{m} \right) a 20^\circ C$ para conductores de aluminio, [9].

2.- Tensión.

El cable debe soportar una tensión eléctrica de corriente alterna del valor eficaz indicado en la tabla 3, durante 5 minutos y con frecuencia entre 48 y 62 Hz. Como alternativa, el requisito establecido puede ser verificado con tensión eléctrica de corriente continua por un tiempo de 5 minutos de acuerdo con los valores de la tabla 3.

3.- Resistividad eléctrica superficial de la cubierta.

La resistividad eléctrica superficial de la cubierta, a temperatura ambiente, no debe ser inferior a $2 \times 10^5 M\Omega$.

4.- Resistencia a la carbonización del compuesto de la cubierta.

Este requisito es aplicable al compuesto de la cubierta de los cables previstos por esta norma, antes de su aplicación en el cable. La tensión inicial de carbonización para el material debe ser mayor a 2.25 kV.

5.- Resistencia a la carbonización del cable.

El cable debe soportar un mínimo de 200 h, bajo las condiciones de prueba contenidas en la norma ASTM-D2132-1998 [17].

- Aplicación simultánea de la tensión definida por tiempo determinado y formación de banda seca

6.- Resistencia del compuesto de la cubierta al intemperismo artificial.

Este requisito es aplicable al compuesto de la cubierta de los cables previstos, antes de su aplicación en el cable. El material debe ser sometido a las condiciones de envejecimiento durante 1500 h, de acuerdo con la norma ASTM-G155-2000 [18].

- Humedecer la muestra con spray de agua salina en volumen y tiempo determinado
- Secado natural de la muestra, durante la cual se realiza la deposición de sal en la superficie de la cubierta

Después del envejecimiento, las pruebas deben presentar una retención de elongación a ruptura de mínimo, 75% del valor inicial.

7.- Resistencia a la abrasión.

El cable debe soportar 16000 ciclos, sin que ocurra contacto eléctrico entre el cilindro abrasivo y el conductor, cuando se aplica el método de prueba incluido en la especificación de CFE E0000-29 [19], el cual se describe a continuación.

- a) La prueba (aproximadamente 75 cm de cable terminado) debe ser preacondicionado a la temperatura ambiente de prueba, por un período de 48 h. Después de limpiar las barras, la prueba debe colocarse sobre el rotor, de forma que una de las extremidades sea fijada horizontalmente, a una distancia aproximada de 15 cm del eje del rotor. La otra extremidad debe quedar libre y portar una masa de 10 Kg.
- b) La prueba debe ser sometida a un movimiento circular uniforme, con una velocidad correspondiente a ocho vueltas por minuto, en sentido de las manecillas del reloj, estando la parte fija de la prueba a la izquierda del observador.

Algunas de las pruebas de referencia que se deben considerar son:

- a) Resistencia eléctrica
- b) Alta tensión CA
- c) Resistencia de aislamiento a temperatura ambiente
- d) Resistividad eléctrica superficial del aislamiento-cubierta
- e) Resistencia a la carbonización del compuesto aislamiento-cubierta, referencia norma ASTM-D2303-1997.
- f) Resistencia a la carbonización de cable
- g) Resistencia a la abrasión.

3.2 Descripción de norma ASTM-D2303 1997

La norma ASTM D2303-97 describe los métodos de prueba estándar para contaminantes líquidos, seguimiento de plano inclinado y erosión de materiales aislantes. A continuación, se describe brevemente su alcance y la importancia del método de plano inclinado para pruebas de aislamiento de equipo eléctrico.

3.2.1 Alcance

Estos métodos de prueba cubren la evaluación de la resistencia relativa al tracking y a la erosión de los sólidos aislantes utilizando la prueba de plano inclinado de contaminantes líquidos.

Se describen dos procedimientos de prueba de tracking y uno de erosión:

- a) Un 'método de voltaje variable' para evaluar la resistencia al tracking.
- b) Un 'método de tiempo de seguimiento' para evaluar la resistencia al tracking.
- c) Un método para la determinación cuantitativa de la erosión.

Si bien se especifica una solución de contaminante en particular, se pueden usar otras concentraciones del mismo contaminante o diferentes contaminantes para simular diferentes condiciones ambientales o de servicio.

Esta norma no pretende abordar todos los problemas de seguridad asociados con su uso, sino se deben establecer prácticas adecuadas de seguridad y salud caso por caso, así como determinar la aplicabilidad de las limitaciones antes de su uso [20].

3.2.2 Resumen del método de prueba

Inicialmente se monta un arreglo de electrodos como el que se presenta en la figura 14. Posteriormente se dirige un rocío de agua a la muestra de prueba humedeciendo la superficie. Se aplica una diferencia de tensión de 3.5kV de corriente alterna a 60 Hz entre los electrodos. La evaporación no uniforme del agua del contaminante (debido a la tensión aplicada) propicia la formación de arcos en áreas localizadas de alta resistencia. Estos arcos producen altas temperaturas en el aislamiento subyacente con la carbonización resultante de la mayoría de los materiales

orgánicos. La carbonización concentra el campo eléctrico. En tales casos, se forma una pista de carbono que atraviesa la distancia entre los electrodos y provoca fallas. Los materiales que no siguen el rastro pueden erosionarse bajo la acción del arco. Tal erosión generalmente progresa desde un electrodo superior a través del espesor de la muestra hacia el electrodo subyacente.

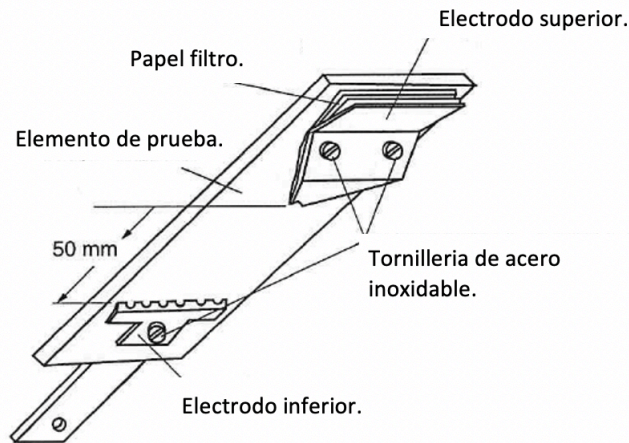


Figura 14.-Esquema de electrodos de prueba para muestras sencillas.

Los objetos bajo prueba se clasifican de acuerdo al tiempo que es necesario para que se forme un camino conductor carbonizado entre los electrodos, o hasta que la erosión sea tal que se produzca una falla. La falla se indicará cuando la corriente aumente lo suficiente como para activar un dispositivo de sobrecorriente.

3.2.3 Importancia y uso

El aislamiento eléctrico en servicio puede fallar como resultado del tracking, la erosión o una combinación de ambos, si se expone a ambientes de alta humedad relativa y contaminación. Esto es particularmente cierto en el caso de los aislamientos orgánicos en aplicaciones al aire libre, donde la superficie del aislamiento se contamina con depósitos de humedad y suciedad, por ejemplo, polvo de carbón o niebla salina.

Este método es una prueba acelerada que simula una contaminación exterior extremadamente severa. Se cree que las condiciones más severas que probablemente se encontrarán en el servicio al aire libre serán menos severas en comparación con las condiciones especificadas en este método de prueba.

Este método de prueba puede clasificar los materiales cómo resistentes al tracking, afectados por el tracking o susceptibles al tracking. Los valores de prueba exactos para estas categorías según se apliquen a aplicaciones dadas, se determinarán en las especificaciones del material.

Los materiales resistentes al tracking, a menos que ocurra una falla por erosión primero, pueden durar muchos cientos de horas bajo prueba.

La erosión, aunque puede progresar lateralmente, generalmente resulta en una falla perpendicular a la superficie de la muestra. Por lo tanto, solo se pueden comparar muestras del mismo espesor nominal para determinar la resistencia a la erosión inducida por el tracking. La extensión de la erosión puede estimarse a partir de mediciones de la profundidad de penetración de la erosión.

3.3 Descripción de norma EN 50397-1:2006

Esta norma cubre los requisitos de construcción, rendimiento y prueba para conductores cubiertos para líneas aéreas con una tensión nominal superior a 1 kV y hasta 36 kV c.a. incluye los accesorios relacionados.

En el anexo C “Resistencia a la descarga superficial y a la erosión”, se describe el método de ensayo para la evaluación de los materiales usados como aislamiento eléctrico a frecuencia industrial (48 Hz a 62 Hz) a partir de la medida de la resistencia al tracking y a la erosión, usando un líquido contaminante y muestras de cable inclinadas.

Es importante recalcar la nota número 1 de este anexo:

“Las condiciones de ensayo están diseñadas para acelerar la obtención de los efectos, pero no reproduce todas las condiciones que se pueden dar estando en operación”.

3.3.1 Muestras de ensayo

Las muestras de conductor recubierto acabado deben ser de una longitud mínima de 200 mm.

La superficie de las muestras debe estar ligeramente desgastada. La abrasión debería realizarse con un papel abrasivo P- 600 con agua destilada, hasta que toda la superficie esté mojada y tome un aspecto mate uniforme al secarse.

3.3.2 Equipo eléctrico

En la figura 15, se muestra un circuito esquemático. Como se debe llevar a cabo la prueba con niveles de media tensión, es necesario realizar la prueba en un lugar apropiado para el manejo de estas tensiones.

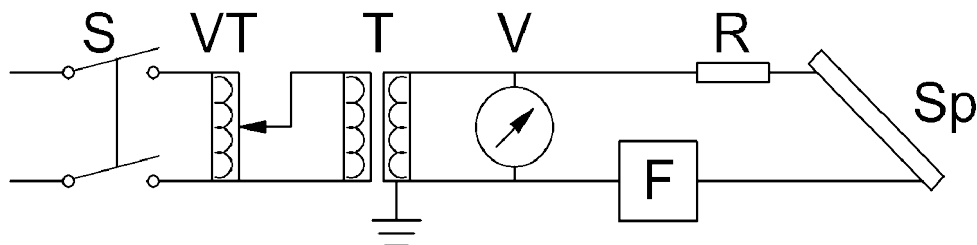


Figura 15.-Diagrama esquemático del circuito.

- S.- Interruptor de alimentación
- VT.- Transformador de relación variable
- T.- Transformador de alto voltaje
- R.- Resistor en serie
- V.- Voltímetro
- Sp.- Elemento de prueba
- F.- Dispositivo de sobrecorriente, fusible o relé.

Tabla 4.-Resistencias serie y flujo contaminante.

1	2	3
Tensión de ensayo kV	Flujo contaminante ml/min	Resistencia serie, Resistencia kΩ
3,5	0,30	22

3.3.4 Contaminante

El contaminante se compondrá de $(0,1 \pm 0,002)\%$ en masa de NH_4Cl (cloruro de amonio) y $(0,02 \pm 0,002)\%$ en masa de iso-octilfenoxipolietoxietanol (un agente humectante no iónico) en agua destilada.

Este contaminante debe tener una resistividad de $(3,95 \pm 0,05) \Omega \cdot \text{m}$ a $(23 \pm 1)^\circ \text{C}$.

El contaminante no debe tener más de cuatro semanas y su resistividad debe ser verificada antes de cada serie de pruebas.

3.3.5 Papel aplicador

Ocho capas de papel de filtro de las dimensiones aproximadas en mm indicadas en la figura 18, deben estar sujetos entre el electrodo superior y la muestra para que actúe como depósito del contaminante.

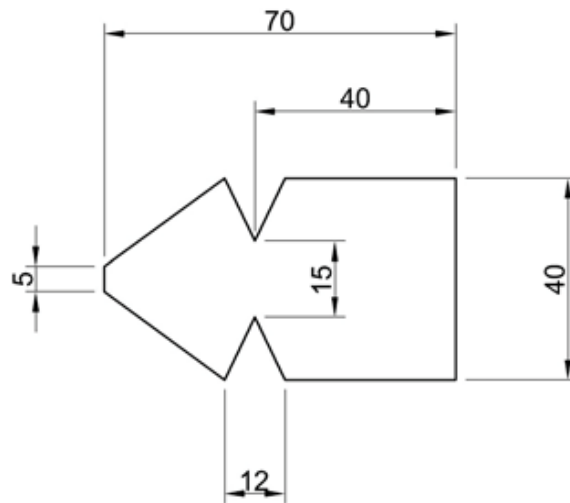


Figura 18.- Papel aplicador.

3.3.6 Flujo de contaminantes

El contaminante debe introducirse en esta almohadilla de papel de filtro para que se produzca un flujo uniforme entre los electrodos superior e inferior antes de la aplicación de tensión.

NOTA 2 “Esto se puede hacer bombeando el contaminante a través de un tubo hacia la almohadilla de papel filtro. El tubo se puede sujetar entre los papeles que se usan como filtro mediante un clip de acero inoxidable. Otra posibilidad es gotear el contaminante en la almohadilla de papel de filtro con un tamaño de gota y número fijos de gotas por minuto”.

3.3.7 Montaje

La muestra debe montarse en un ángulo de 45 ° con respecto a la horizontal como se muestra en la figura 17, con los electrodos a $(50 \pm 0,5)$ mm de distancia.

Para cada ensayo, se utilizará una nueva almohadilla de papel de filtro.

3.3.8 Ajuste del flujo de contaminantes

Empiece a introducir el contaminante en la almohadilla de papel de filtro permitiendo que el contaminante moje el papel a fondo. Ajustar el flujo de contaminantes y calibrar para dar un caudal como se especifica en la tabla 4.

Observe el flujo durante al menos 10 minutos y asegúrese de que el contaminante fluya de manera constante por la cara de la muestra de prueba entre los electrodos. El contaminante fluirá desde el orificio del electrodo superior y no desde los lados o la parte superior del papel de filtro.

3.3.9 Aplicación de la tensión

Con el contaminante fluyendo uniformemente en la velocidad especificada, de acuerdo con la tabla 4, encienda y eleve el voltaje al nivel de prueba de acuerdo con la tabla 4. La tensión se mantendrá constante durante 6 h.

3.3.10 Evaluación de la prueba

La prueba es exitosa si la corriente en el circuito de alto voltaje no excede los 60 mA para cualquiera de los elementos de prueba durante 6h.

Se informará la profundidad máxima de erosión y la distancia de tracking sobre la cubierta, si el elemento de prueba no dura el tiempo establecido o registra un tracking mayor a $(25 \pm 0,5)$ mm de distancia, se considera que es una prueba fallida [21].

3.4 Tracking y Resistencia a la Erosión.

Los materiales poliméricos son materiales orgánicos que consisten un gran número de moléculas de bajo peso molecular, moléculas con uniones débiles, a diferencia de los materiales inorgánicos como la porcelana y el vidrio. Por lo tanto, estos pueden ser degradados por menos temperatura en comparación con los inorgánicos. Bajo condiciones de degradación, se forma una capa de carbón que hace a la superficie conductora (tracking) y tiene como consecuencia una falla eléctrica o flameo en el caso de aislamientos que no pueden soportar el aguante de la tensión aplicada.

La remoción de las pistas de carbón conductor deja una trayectoria erosionada. Si la erosión del material es significativa, entonces esto puede potencialmente ocasionar una falla en el material aislante por la pérdida de masa, si esta falla se presenta en la cubierta de un conductor, la pérdida del material supone una posible falla en el conductor por la eventual fusión de este. La erosión es un proceso muy lento de degradación, en cambio el tracking no lo es [22].

El tracking y la resistencia a la erosión del polímero se puede obtener de la estructura química, ciertos enlaces químicos liberan carbono cuando se rompen dichos enlaces, mientras que otros remueven el carbono como producto gaseoso. En la figura 19 se muestra una descripción gráfica de cómo el fenómeno de banda seca en presencia de contaminación propicia una descarga eléctrica en la superficie de un cable.

Este fenómeno surge principalmente en combinación de tres factores: alto potencial eléctrico, contaminación y humedad. Cuando estos tres factores están presentes y existen regiones húmedas en la superficie del material se incrementará el gradiente de potencial en esa zona, dando pie a que se presente una descarga eléctrica entre dos regiones húmedas.[23]

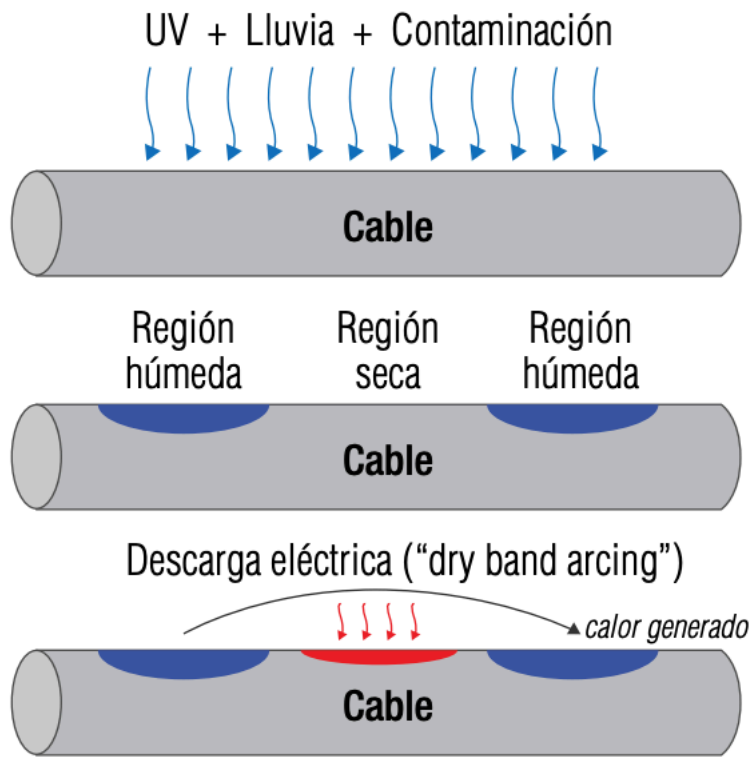


Figura 19.-formación de descarga eléctrica por fenómeno de banda seca.

CAPÍTULO 4 PRUEBAS DE LABORATORIO.

En este último capítulo se muestran los resultados de pruebas realizadas a muestras que fueron proporcionadas para su evaluación a los laboratorios de ESIME y ESIQIE Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional. Las muestras de cables que fueron tomadas de secciones de cable que han sido instaladas en redes de distribución. Estas muestras fueron probadas por estudiantes de ingeniería. Como se verá en esta capítulo los resultados en cuanto a la resistencia a la erosión del aislamiento no son satisfactorios.

4.1 Pruebas experimentales

Como se describió en el capítulo anterior, en base a las normas de referencia ASTM-D2303 1997 y EN 50397-1:2006, el método de plano inclinado es una de las pruebas que demuestran la resistencia de los materiales aislantes sólidos a la erosión y a la formación de trayectorias carbonizadas causadas por descargas superficiales.

La prueba de plano inclinado tiene como principal objetivo evaluar la resistencia a la erosión de los materiales aislantes poliméricos que se encuentran en la intemperie y son dañados por las descargas superficiales.

Por tal motivo, con el fin de evaluar el desempeño de los cables cubiertos; instalados en las RGD, de la División Valle de México Sur, Zona Universidad, y determinar si estos cumplen con los requerimientos necesarios conforme a la especificación CFE E0000-29, se proporcionaron muestras de cable de diferentes marcas a estudiantes de ingeniería, para someterlos a esta prueba tomando como referencia la norma EN 50397-1:2006, pues esta describe mejor el procedimiento para pruebas en muestras de cable cubierto.

A continuación, se resume, la prueba realizada y los valores obtenidos en el laboratorio de Alta tensión de la ESIME unidad Zacatenco.

4.2 Desarrollo de la prueba de Plano Inclinado con muestras de cable

Con las muestras de cable proporcionados, se obtuvieron 4 diferentes marcas de fabricantes, de estos cuatro fabricantes se implementaron 5 segmentos de 20 cm cada uno. Cada grupo pertenece a un fabricante distinto y se denominan grupo 1, grupo 2, grupo 3 y grupo 4.

En la figura 19, se muestra el arreglo elaborado por los estudiantes de ingeniería para la realización de la prueba del plano inclinado con muestras de cable cubierto.

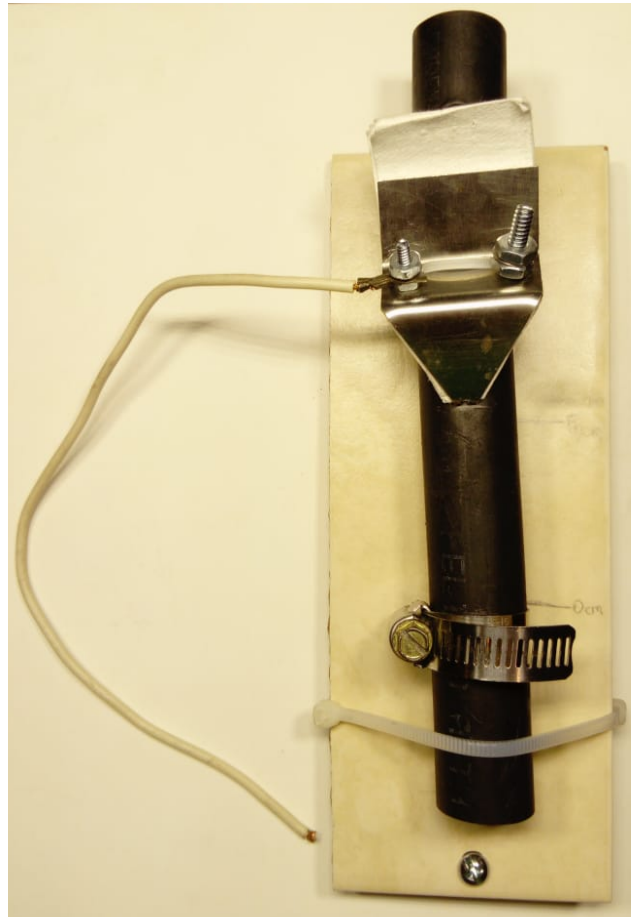


Figura 20.- Arreglo para prueba de plano inclinado con muestras de cable [24].

En la figura 21, se observa el arreglo completo, se puede observar el flameo y descargas superficiales presentadas durante la prueba del plano inclinado en muestras de cable proporcionado.



Figura 21.- Muestras de cable durante prueba de plano inclinado [24].

4.2.1 Resultados

La figura 22, muestra la evidencia fotográfica de todos los cables que se sometieron a la prueba de plano inclinado.



Figura 22.- Evidencia de las muestras después de ser expuestas a la prueba con un valor inferior de tensión 2.5 kV [24].

En la tabla 6, se muestran los datos obtenidos por los estudiantes de ingeniería luego de someter a la prueba del plano inclinado las 20 muestras de cable cubierto.

Tabla 5.- Resultados en muestras de cable [24].

RESULTADOS EN MUESTRAS EN CABLE								
# de muestra	GRUPO 1							
	tiempo de falla [hh:mm]	tensión de falla [kV]	Masa			Promedios		
			inicial [g]	final [g]	perdida [g]	tiempo de falla [hh:mm]	tensión de falla [kV]	masa perdida [g]
1	01:03	2.75	200.241	200.051	0.19	00:43	2.60	0.1072
2	00:28	2.5	202.57	202.495	0.075			
3	00:23	2.5	207.353	207.299	0.054			
4	00:44	2.5	195.031	194.95	0.081			
5	01:01	2.75	202.406	202.27	0.136			
# de muestra	GRUPO 2							
	tiempo de falla [hh:mm]	tensión de falla [kV]	Masa			Promedios		
			inicial [g]	final [g]	perdida [g]	tiempo de falla [hh:mm]	tensión de falla [kV]	masa perdida [g]
1	00:12	2.5	149.375	149.127	0.248	00:09	2.50	0.20
2	00:11	2.5	154.438	154.264	0.174			
3	00:05	2.5	148.101	147.91	0.191			
4	00:04	2.5	154.868	154.656	0.212			
5	00:17	2.5	156.594	156.429	0.165			
# de muestra	GRUPO 3							
	tiempo de falla [hh:mm]	tensión de falla [kV]	Masa			Promedios		
			inicial [g]	final [g]	perdida [g]	tiempo de falla [hh:mm]	tensión de falla [kV]	masa perdida [g]
1	01:18	2.75	148.713	148.027	0.686	00:51	2.65	0.49
2	01:02	2.75	148.467	147.756	0.711			
3	00:29	2.5	150.626	150.581	0.045			
4	01:10	2.75	148.752	147.912	0.84			
5	00:18	2.5	150.211	150.05	0.161			
# de muestra	GRUPO 4							
	tiempo de falla [hh:mm]	tensión de falla [kV]	Masa			Promedios		
			inicial [g]	final [g]	perdida [g]	tiempo de falla [hh:mm]	tensión de falla [kV]	masa perdida [g]
1	00:10	2.5	192.443	192.385	0.058	00:20	2.50	0.09
2	00:23	2.5	192.904	192.877	0.027			
3	00:39	2.5	194.484	194.203	0.281			
4	00:14	2.5	190.383	190.354	0.029			
5	00:15	2.5	191.596	191.562	0.034			

Como se puede ver, todas las muestras de cable fallaron a una tensión considerablemente baja y en un tiempo corto con respecto a los valores de referencia.

De los cuatro grupos de muestras evaluados ninguno logro pasar la prueba de resistencia a la erosión por tracking. La norma empleada para la realización de esta prueba establece 3.5 kV como tensión de inicio, sin embargo, apenas y se logró superar los 2.5 kV de tensión de prueba.

Aún con un valor menor de tensión, se puede observar que ninguna de las muestras soportó las 6 h de prueba establecidas para su aceptación, además de que todos los tramos de cable presentaron tracking mayor de 25mm de longitud sobre la cubierta.

4.3 Análisis de microestructural de las muestras de cable

En los laboratorios de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) se realizaron diversas pruebas para determinar qué elementos se encuentran en el material con que están hechas las muestras de cable que previamente fueron evaluadas mediante la prueba de plano inclinado.

A) Espectroscopia de energía dispersa (EDS)

Al realizar la prueba EDS en muestras de cable se encontró de manera dispersa partículas que muy probablemente sean de carbonato de calcio, calcita o piedra caliza, CaCO_3 . En la figura 24, se muestra una de las partículas que fueron identificadas con composición de CaCO_3 , esta tiene un tamaño de aproximadamente 4 μm .

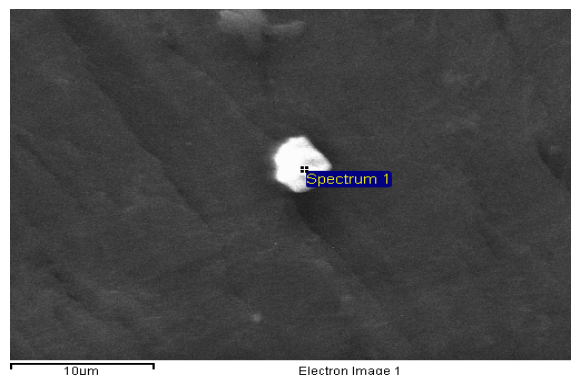


Figura 23.-.- Partícula de carbonato de calcio (CaCO_3) identificada en una muestra de cable [24].

B) Espectroscopía RAMAN

Se realizó la prueba de espectroscopia de RAMAN, los resultados obtenidos mediante esta prueba indican que en una de las muestras existen partículas de grafito dispersas en la cubierta del cable. En la figura 25, se aprecia una región de una muestra de cable donde se identificaron cristales de grafito.

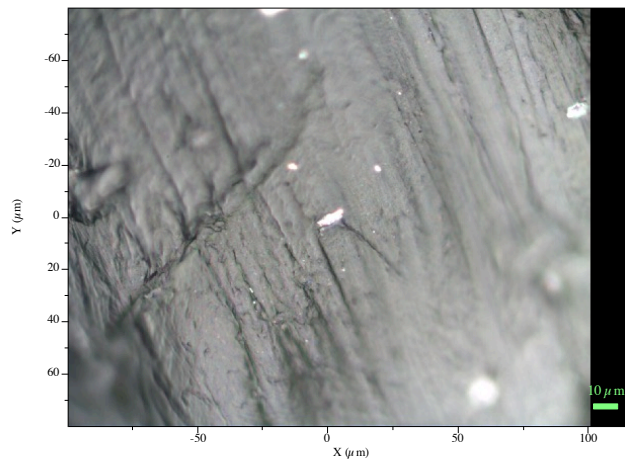


Figura 24.- Región de muestra de cable evaluada mediante prueba de RAMAN [24].

Por medio de la espectroscopia de RAMAN se pudo detectar la presencia de cristales de grafito. El grafito es un cristal formado por átomos de carbono al cual se le considera un material semiconductor con la característica de que cuanto más se incrementa su temperatura mayor es su conductividad eléctrica. Eso representa un grave problema ya que se habla de un material que en presencia de altas temperaturas tiene la propiedad de conducir la electricidad y ha sido encontrado de manera dispersa en las muestras de cable.

El grupo de muestras donde se encontraron los cristales de grafito es el grupo que menos tiempo soportó la prueba de plano inclinado y el segundo grupo con más pérdida de masa.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

5.1 CONCLUSIONES

La reducción de las interrupciones en las líneas de distribución de energía mediante el uso de cables cubiertos en líneas aéreas de distribución es una prometedora solución para aumentar la confiabilidad de las redes de distribución. Sin embargo, el uso de este tipo de cables trae como consecuencia otro tipo de fallas más complejas, en menor medida, pero de consecuencias más graves.

En la especificación de CFE E0000-29 “Cables Semiaislados para Líneas Aéreas de 15 a 38 kV”, se establecen las características que deben cumplir los cables cubiertos con conductor de aluminio, cobre o ASCR para tensiones de hasta 38 kV con aislamiento-cubierta de polietileno de cadena cruzada (XLP), que utiliza la empresa.

Dentro de las características eléctricas que deben cumplir los cables cubiertos, se encuentra la resistencia a la carbonización del compuesto aislamiento-cubierta y se hace referencia a la norma ASTM-D2303-2013, en esta norma los métodos de prueba cubren la evaluación de la resistencia relativa al tracking y la erosión de los sólidos aislantes utilizando la prueba de plano inclinado de contaminantes líquidos, en muestras planas, y no propiamente a muestras de materiales ya extruidos sobre un conductor.

La norma europea BS EN 50397-1:2006, establece los estándares para la evaluación de tracking y la erosión de cables cubiertos, esta norma se utilizó como referencia en la realización de pruebas de plano inclinado, en los laboratorios de la ESIME unidad Zacatenco, a diferentes tipos de marcas de conductores, los resultados de las pruebas realizadas indican que la cubierta de estos no son resistentes a la erosión por descargas superficiales, de acuerdo con los estándares establecidos.

De acuerdo con las fallas presentadas en las redes de distribución de CFE y a las pruebas de laboratorio se sugiere la modificación a la especificación E0000-29, en donde se incluyan las pruebas prototipo con los estándares de la norma BS EN 50397-1:2006 y un apéndice adicional (B), en donde se establezcan la metodología

para realizar pruebas de plano inclinado en el Laboratorio de Pruebas Equipos y Materiales (LAPEM).

Con las modificaciones realizadas a la especificación E0000-29, se pretende mejorar el desempeño de los cables cubiertos instalados en las redes de distribución de CFE al garantizar que el material extruido en los conductores será resistente al tracking y a la erosión provocado por las condiciones del entorno en el cual se instalan los conductores cubiertos.

Probablemente el mejoramiento de los materiales utilizados en las cubiertas de los cables provoque un incremento en los costos de adquisición, pero si se toma en cuenta la seguridad de terceras personas y del propio personal que opera las redes de distribución es incomparable el costo beneficio por lo que es factible considerar la inversión, esto sin dejar a un lado los gastos de operación y restablecimiento de fallas, la energía dejada de vender y la percepción del cliente hacia la empresa.

5.2 TRABAJOS FUTUROS.

Como continuación de este trabajo de tesis y como en cualquier otro proyecto de investigación, existen diversas líneas de investigación que quedan abiertas y en las que es posible continuar trabajando; estas líneas pueden servir para retomarlas posteriormente o como opción a trabajos futuros para otros investigadores. A continuación, se presentan algunos trabajos futuros que pueden desarrollarse como resultado de esta investigación o que, por exceder el alcance de esta tesis, no han podido ser tratados con la suficiente profundidad.

- Realizar pruebas de laboratorio en donde se identifique la causa raíz de la perforación de un conductor fuera de la zona de contacto del conductor con cualquier superficie, ni ramas de árbol.
- Realizar simulaciones en Comsol, mejorando las condiciones de la cubierta de los conductores, y estudiar si el tracking y la erosión se eliminan o solo disminuye su tiempo de aparición.
- Implementar un método de detección de descargas parciales en redes aéreas que se pueda implementar con los equipos de protección y monitoreo existentes en CFE, con el fin de detectar de manera oportuna la ruptura de conductores cubiertos.
- Verificar la factibilidad de la instalación de hilo de guarda en zonas urbanas donde se presenta un gran número de descargas atmosféricas, y se tiene instalado conductor cubierto, para minimizar la incidencia de daño a las cubiertas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ramírez Castaño, Samuel. Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Redes de distribución de energía IMPRESO Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales Enero de 2004 Tercera Edición.
- [2] Secretaria de Gobernación, Diario Oficial de la Federación. DOF: 11/10/2009, Decreto por el que se extingue el organismo descentralizado Luz y Fuerza del Centro.
- [3] P. Barker, R. Schainker. Power Quality Implications of Transmission and Distribution Construction: Tree Faults and Equipment Issues. EPRI, Palo Alto, CA 1008506 Final Report, March 2005.
- [4] Solís, N., Gutiérrez, J. A., Naredo, J. L., & Ortiz, V. H. Analysis of complex faults in distribution systems. In Proceedings of the International Conference of Power Systems Transients IPST'2007, Lyon, June 4 (Vol. 7).
- [5] Ramirez-Vazquez, Isaias, and Fermin P. Espino-Cortes. "Electric-field analysis of spacer cable systems for compact overhead distribution lines." IEEE transactions on power delivery 27.4 (2012): 2312-2317.
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT BR 10296. Material isolante elétrico - Avaliação da resistência ao trilhamento e erosão sob condições ambientais severas. Rio de Janeiro, 25/08/2014.
- [7] Jorge Cuevas, F., Peña López, M., & Sandoval Mendoza, R. M. Tesis (Ingeniero Electricista). Medición de la resistencia a la erosión por descargas eléctricas superficiales de materiales poliméricos . Ciudad de México, IPN, ESIME, Unidad Zacatenco, 2016.

[8] Nasser, E., & Loeb, L. B. (1963). Impulse streamer branching from Lichtenberg figure studies. *Journal of Applied Physics*, 34(11), 3340-3348.

[9] Xavier, R. J., & Rao, Y. N. (1990, October). Surface tracking on porcelain insulating material and determination of DC pollution performance of insulators. In *Annual Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* (pp. 599-604). IEEE.

[10] Alghamdi, A. S. G., Auckland, D. W., & Varlow, B. R. (1992, June). The influence of mechanical properties on the surface tracking of polyester resin. In [1992] *Proceedings of the 4th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics* (pp. 261-264). IEEE.

[11] Lee, C. H., & Kim, S. W. (1998, September). Effects of compounding ingredients on surface tracking of EPDM. In *Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials. 1998 Asian International Conference on Dielectrics and Electrical Insulation. 30th Symposium on Electrical Insulating Ma* (pp. 297-300). IEEE.

[12] Ugur, M., Kuntman, A., & Merev, A. (1999, October). Investigation the effect of environmental factors on the performance of polymeric outdoor insulation. In *1999 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* (Cat. No. 99CH36319) (Vol. 2, pp. 743-746). IEEE.

[13] Lehtonen, M. (2010, June). Fault rates of different types of medium voltage power lines in different environments. In *Proceedings of the 2010 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference* (pp. 197-202). IEEE.

[14] Olvera Contreras, J. D. Tesis (Ingeniero Electricista). Estudio de problemas de compatibilidad dieléctrica en cables semi-aislados para redes de distribución. Ciudad de México, IPN, ESIME, Unidad Zacatenco, 2013.

[15] ITM-PGIIE-Planeacion Y Operación De Sistemas Eléctricos De Distribucion- J.H. TOVAR HERNANDEZ-2004.

[16] NORMA NMX-J-177-ANCE-2018, "Conductores Determinación de Espesores de Pantallas Semicondutoras, Aislamientos, Cubiertas o cualquier otro Elemento de un Conductor Eléctrico-Método De Prueba", SINEC-20180829174736231.

[17] ASTM D2132-98, Standard Test Method for Dust-and-Fog Tracking and Erosion Resistance of Electrical Insulating Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1998,

[18] ASTM G155-13 "Standard Practice for Operating Xenon Arc Light Apparatus for Exposure of Non-Metallic Materials" ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

[19] Especificación CFE Cables semiaislados para líneas aéreas de 15 a 38 kV, Noviembre 2017.

[20] ASTM D2303-13, Standard Test Methods for Liquid-Contaminant, Inclined-Plane Tracking and Erosion of Insulating Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013,

[21] EN 50397-1 : 2006. Covered Conductors For Overhead Lines and the Related Accessories for Rated Voltages Above 1 Kv A.C. And Not Exceeding 36 Kv A.C. Publisher: European Committee for Standards - Electrical

[22] Palacios Lopez, Arturo. (2002). "Análisis fractal de las trayectorias de descargas eléctricas superficiales en aislamiento polimérico considerando diferentes niveles

de contaminación”, ESIME Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México.

[23] Furukawa. (Mayo de 2016). Cables ADSS resistentes al efecto tracking.

[24] Santos, Jose Carlos. (2020). “Medición de la Resistencia a la Erosión por Descargas Superficiales en Cubiertas para Cable Semiaislado”, Proyecto de Ingeniería, ESIME Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México.