



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LA CONFIABILIDAD EN EL
SISTEMA DE CABLEADO CGFO (CABLE DE GUARDA CON
FIBRAS ÓPTICAS) EN EL SECTOR ELÉCTRICO NACIONAL**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA

INGENIERÍA ELÉCTRICA-SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

P R E S E N T A :

ING. NANCY NAYELI CONTRERAS CORONA



TUTOR:
M.I. RODOLFO LORENZO BAUTISTA

2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Espinosa Pérez Gerardo René

Secretario: M.I. Haro Ruíz Luis Arturo

Vocal: M.I. Lorenzo Bautista Rodolfo

1^{er}. Suplente: Ing. Guerrero Cepeda Rafael

2^{do}. Suplente: Dr. Ángeles Camacho César

México D.F. Ciudad Universitaria, Posgrado de Ingeniería.

TUTOR DE TESIS:

M.I. Lorenzo Bautista Rodolfo

DEDICATORIA

Este trabajo comenzó como un sueño y hoy gracias al apoyo de mucha gente es una realidad.

Dedico esta tesis a mi familia: José Refugio, Ma. de los Ángeles, Gabriela, Marylin y Ernesto por enseñarme a ser la persona que soy y a quienes admiro por su fortaleza de carácter y permitirme llevar a cabo todos mis sueños e impulsarme para lograrlos con su apoyo incondicional, amor, alegría y ánimo contagioso, que no me dejaron desfallecer para así poder llevar a cabo la culminación de este proyecto.

Mil gracias de todo corazón, que Dios los bendiga, por que han sido una bendición en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios; quien puso los medios para que ingresara a la maestría dándome la fortaleza espiritual y física, quien me regala cada amanecer y por sobre todo quien me regala el entendimiento para realizar cada reto de mi vida.

A mis padres quienes nos han heredado el tesoro más valioso que puede darsele a una hija, amor. Quienes sin escatimar esfuerzo alguno han sacrificado gran parte de su vida para formarnos y educarnos. A quienes la ilusión de su existencia ha sido vernos convertidas en personas de provecho. A quienes nunca podré pagar con las riquezas más grandes del mundo.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); institución de enorme calidad que me brindó todo el apoyo durante mi estancia. Así mismo a la Coordinación de Estudios de Posgrado por el apoyo económico brindado durante la realización de este proyecto.

Quiero agradecer a mi asesor de tesis, el M.I. Rodolfo Lorenzo Bautista por sus conocimientos invaluable que me compartió para llevar a cabo esta investigación, y sobre todo su gran paciencia para esperar a que este trabajo pudiera llegar a su fin aún a pesar de tantas actividades que le ocupan. Por su confianza depositada en mí y porque en muchas oportunidades el tiempo transcurre muy rápidamente, pero descubres que no sólo hay conocimiento, sino también hay lazos de amistad y personas de gran calidad humana.

Agradezco al Ing. Gonzalo Mendoza Galván por todas sus enseñanzas, valiosos aportes y apoyos que sin duda alguna han aportado grandes beneficios para la realización de esta investigación, además de su amistad que hace de la vida un sabor especial y una experiencia enriquecedora en cada vivencia.

Reconozco y agradezco la valiosa colaboración al Ing. Félix R. Poy Segura por sus valiosos conocimientos en el área, enseñanzas personales y sugerencias, por brindarme una oportunidad y creer en mí para llevar a cabo cada meta trazada en esta Institución y en los proyectos de vida.

Agradezco a aquellas grandes personas que hacen posible el conocimiento en las aulas de docencia, a mis compañeros de la generación que siempre tendré en mi mente por cada ratito compartido de apoyo, escucha, alegría, complicidad y ánimo contagioso que compartimos juntos.

A todos ustedes muchas gracias.

RESUMEN

En México uno de los factores que puede dar lugar a la interrupción del suministro eléctrico son las descargas atmosféricas. Durante los últimos años se ha observado el comportamiento de las descargas atmosféricas específicamente en los Cables de Guarda con Fibra Óptica (CGFO), donde han provocado estragos considerables como la ruptura de las capas exteriores comprometiendo la resistencia mecánica de los mismos, así como daños más extensos que pueden llegar a las fibras ópticas de este sistema y tener interrupciones en los enlaces de telecomunicación.

En este trabajo se analiza la problemática referente a la ruptura de hilos como consecuencia de los altos niveles de transferencia de carga eléctrica que las descargas atmosféricas pueden inducir, manifestando las recomendaciones y consideraciones óptimas para el desempeño y seguridad del sistema de cableado con CGFO en el sector eléctrico. Paralelamente es propuesto un método equivalente de la prueba de Arco de Potencia con D.C. en el cable CGFO en base a la especificación de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) CFE E000-21-2009 y la IEC 60794-1-2 considerando la influencia del tipo de polaridad del relámpago en los daños causados sobre el CGFO.

Palabras clave: Cables de Guarda con Fibra Óptica (CGFO), arco de potencia, descarga atmosférica y fibras ópticas.

ABSTRAC

One of the factors that can lead to interruption of supply electric is lightning. Over the last few years have seen the behavior of lightning, specifically Optical Ground Wire (OPGW) has caused considerable damage such as rupture of the outer layers compromising the mechanical strength thereof, and further damage extensive than can reach the optical fibers of this system and have interruptions in telecommunication links.

This thesis analyzes the problems relating to the breakdown of threads as a result of high levels of electrical charge transfer can induce lightning, following the recommendations and considerations for optimal performance and system security of the wiring OPGW in the electricity sector. Parallel, it is proposed a method equivalent test for D.C. arc power OPGW on cable based on the specification of the Federal Electricity Commission (FEC) E000-21-2009 and IEC 60794-1-2 considering the influence of the type of polarity of lightning in the damage of the OPGW.

Keywords: Optical Ground Wire (OPGW), power arc, lightning and optical fibers

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iii
ABSTRAC.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO	iv
GLOSARIO DE TÉRMINOS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 Introducción	9
1.2 Estado del arte.....	10
1.3 Justificación y motivación	11
1.4 Objetivos.....	12
1.5 Estructura de la tesis	13
2.1 Introducción	15
2.2 Origen de las descargas atmosféricas	15
2.3 Polaridad de las descargas atmosféricas	18
2.4 Enfoque de los procesos involucrados en la descarga atmosférica de un rayo	21
2.4.1 Ruptura preliminar entre las regiones positivas y negativas	21
2.4.2 Canal precursor de descargas (<i>stepped-leader</i>).....	21
2.4.3 Proceso de conexión	22
2.4.4 Primera corriente de retorno	22
2.4.5 Corrientes de retorno subsecuentes	22
2.5 Componente continua de la corriente de descargas atmosféricas.....	23
2.5.1 Definición de la componente continua	23
2.5.2 Patrones de comportamiento observados en la ocurrencia de la componente continua de larga duración.....	25
2.6 Fases de una descarga nube-tierra	26
2.7 Nomenclatura adoptada	27
CAPÍTULO 3. SISTEMA DE CABLEADO CGFO	31
3.1 Introducción	31
3.2 Descripción del sistema de cableado CGFO.....	31
3.3 Fibra óptica	34
3.3.1 Tipos de fibra óptica	34
3.3.2 Características principales	35
3.4 Diseño del CGFO.....	37

3.4.1	Características generales y particulares del CGFO	40
3.5	Caja de empalmes	42
3.6	Herrajes y accesorios	43
CAPÍTULO 4. NORMAS Y ENSAYOS APLICABLES AL CGFO DE ACUERDO A CFE E0000-21-2010.....		46
4.1	Introducción	46
4.2	Especificación CFE E0000-21-2010. Cable de Guarda con Fibras Ópticas y Accesorios.....	46
4.2.1	Clasificación de los ensayos	47
4.2.1.1	Pruebas prototipo	47
4.2.1.2	Pruebas de rutina	51
4.2.1.3	Pruebas de aceptación.....	51
4.3	Normativas internacionales.....	52
4.4	Método equivalente para la prueba de Arco de Potencia en el cable CGFO empleando CD	53
4.4.1	Ensayo de Arco de Potencia de acuerdo a la CFE E0000-21-2010.....	54
4.4.2	Procedimiento de ensayo para el método equivalente de la prueba de Arco de Potencia	55
4.4.2.1	Ensayos con transferencia de carga de 100C variando el gap.....	57
4.4.2.2	Ensayos a 1cm de gap variando el nivel de transferencia de carga.....	59
CAPÍTULO 5. CÁLCULO SOBRE INCIDENCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS PARA UNA ZONA ESPECÍFICA.....		62
5.1	Introducción	62
5.2	Daños en el CGFO	62
5.3	Procedimiento de cálculo	63
5.3.1	Cálculo de la transferencia de carga (C).....	64
5.3.2	Datos y condiciones del estudio	64
5.4	Conclusiones del cálculo	69
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES		70
6.1	Introducción	70
6.2	Resultados obtenidos	70
6.3	Recomendaciones y proyecciones a futuro.....	71
APÉNDICE A		73
APÉNDICE B.....		105
BIBLIOGRAFÍA		107

GLOSARIO DE TÉRMINOS

SEP's	Sistemas Eléctricos de Potencia
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CGFO	Cables de Guarda con Fibra Óptica
LAPEM	Laboratorio de Pruebas a Equipos y Materiales
LT's	Líneas de Transmisión
CPTT	Coordinación de Proyectos de Transmisión y Transformación
RNFO	Red Nacional de Fibra Óptica
CC	Componente Continua
CCLD	Componente Continua de Larga Duración
OPGW	Optical Ground Wire
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos Electrónicos
CA	Corriente Alterna
CD	Corriente Directa

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Etapas de una descarga atmosférica [3]	17
Fig. 2.2 - Polaridad y categoría de los rayos	20
Fig. 2.3 - Forma de onda convencional de la corriente durante una descarga atmosférica [5]	24
Fig. 2.4 - Variación del campo eléctrico de la descarga atmosférica	25
Fig. 3.1 - Sistema CGFO	33
Fig. 3.2 - Estructura general de la fibra óptica	34
Fig. 3.3 - Factores de atenuación en la fibra óptica [7]	36
Fig. 3.4 - Dispersión cromática	37
Fig. 3.5 - Ejemplo de diseño de un CGFO [19].....	38
Fig. 3.6 - Ejemplo de diseño de una caja de empalme	43
Fig. 3.7 - Tipos de herrajes para el sistema de cableado CGFO	44
Fig. 4.1 - Continuación del procedimiento de ensayo para la prueba de Arco de Potencia de acuerdo a la especificación E0000-21-2010 [9].	55
Fig. 4.2 - Arreglo montaje para la prueba de Arco de Potencia	56
Fig. 4.3 - Arreglo general para el ensayo de Arco de Potencia [11]	57
Fig. 4.4 - Daños representativos de los ensayos en el punto 4.5.3.1	58
Fig. 4.5 - Diferencia de los daños en el tipo de polaridad a 200C.....	60
Fig. 4.6 - Daños al CGFO con el método equivalente.....	60
Fig. 4.7 - Gráfica del comportamiento de la prueba de tensión de carga residual	61
Fig. 5.1 - Daños al CGFO por un rayo [13].....	62
Fig. 5.2 - Torre tipo 2B1+0+2 y distancias promedio de la LT [16].....	65
Fig. 5.3 - Mapa isocerámico del área de transmisión oriente	66
Fig. 5.4 - Zoom del mapa isocerámico del área de transmisión oriente	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 - Nomenclatura adoptada.....	27
Tabla 3.1 - Optimización en el diseño de CGFO	33
Tabla 3.2 - Características electromecánicas del CGFO	42
Tabla 3.3 - Características de las fibras	42
Tabla 4.1 - Clasificación de los términos de las pruebas	47
Tabla 4.2 - Resultados de pruebas en CGFO con 100C y variando el gap	58
Tabla 4.3 - Resultados de pruebas en CGFO a 1 cm de distancia y variando la transferencia de carga	59
Tabla 5.1 - Resumen de la transferencia de carga Q en (C)	69

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El creciente desenvolvimiento tecnológico en conjunto con el aumento de la demanda de energía eléctrica exige actualmente un nivel mayor de confiabilidad para el fortalecimiento del servicio suministrado con el menor número de interrupciones posibles.

Las descargas eléctricas de origen atmosférico son una de las principales causas de salida de las líneas de transmisión en el país y es una de las mayores preocupaciones para quienes coordinan el suministro de energía eléctrica. La ocurrencia de estos grandes disturbios generados a partir de los relámpagos en distintas redes eléctricas del mundo, pone en manifiesto el problema de la vulnerabilidad de los sistemas eléctricos de potencia (SEP's). Para resolver esta situación es necesario que las empresas eléctricas cuenten con planes estratégicos de inversión para mantener actualizada la infraestructura de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, de tal forma que permita que el sistema eléctrico opere de forma segura, confiable y económicamente en beneficio de los consumidores y del país.

En los últimos 15 años, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) ha procedido a reemplazar los Cables de Guarda convencionales por Cables de Guarda con Fibra Óptica (CGFO). El uso de dichos cables permite optimizar las inversiones realizadas por la compañía eléctrica propietaria de la línea de alta tensión porque combina su función tradicional como cable de tierra con el uso de servicios de telecontrol y teleprotección del operador de la red eléctrica; además, permite a la compañía diversificar el negocio hacia las telecomunicaciones generando así un valor añadido que supera ampliamente su uso original como cable de tierra.

En general, el sistema y equipamiento utilizado para la instalación del CGFO es similar al utilizado en la del conductor de tierra convencional; sin embargo, debido a la existencia del núcleo de fibra óptica, debe tenerse un especial cuidado en evitar cualquier daño sobre las fibras.

En esta tesis se explican los criterios anteriores para la adecuada selección del CGFO, considerando los requerimientos: eléctricos, mecánicos y el sitio donde serán instalados en el Sistema Eléctrico Nacional. Se abarcan temas referentes a la descripción de la física y los efectos de las descargas atmosféricas sobre el CGFO, paralelamente se resume la evolución nacional e internacional de las normativas correspondientes en los métodos de ensayo, proponiendo equivalencias entre normativas con el fin de que sea aplicado en la CFE, en el Laboratorio de Pruebas a Equipos y Materiales (LAPEM) y Normas Mexicanas.

Se presenta un caso real de estudio para calcular las incidencias de descargas atmosféricas en una zona específica y considerar algunos aspectos vitales tanto para fabricantes como para usuarios; con la finalidad de optimizar el uso del CGFO y como consecuencia dar confiabilidad a la red eléctrica.

1.2 Estado del arte

Hoy en día el CGFO es usado extensivamente alrededor del mundo en líneas de transmisión (LT's), de tal manera que el promedio de la cantidad de fibra óptica se ha incrementado en relación al crecimiento de las empresas de servicios públicos para convertirse en operadores.

En el año de 1995 la CFE en México a través del Comité de Trabajo de la Coordinación de Proyectos de Transmisión y Transformación (CPTT); elaboró una especificación de acuerdo con las bases generales para la normalización en la CFE, con el objetivo de establecer las características técnicas y de aseguramiento de calidad que deben cumplir los CGFO para el blindaje en líneas de transmisión, sub-transmisión y subestaciones eléctricas, así como para enlaces de telecomunicaciones. La especificación CFE E0000-21 ha sido cuidadosamente revisada y modificada en el transcurso de los años con el fin de incrementar la seguridad de las líneas y la confiabilidad de la Red Nacional de Fibra Óptica (RNFO), teniendo la versión más reciente en el 2010; dicho

documento es de vital importancia para el desarrollo de la tesis así como también Normativas Internacionales de IEC e IEEE.

Actualmente, la CFE dispone de una RNFO de más de 28,000 kilómetros y se encuentra ubicada en las LT's de diferentes niveles de voltaje, proporcionando a la propia empresa los servicios de comunicación digital de alta capacidad, confiabilidad y calidad que se requieren para la seguridad y operación del Sistema Eléctrico Nacional, así como para los sistemas de información técnico-administrativos de los procesos sustantivos de generación, transmisión, distribución, control y construcción. Las tecnologías modernas de iluminación utilizadas en la red de fibra óptica permiten que las mismas fibras que se emplean para las aplicaciones técnico administrativas, tengan el potencial para proporcionar servicios a terceros. La operación de la red de fibra óptica está basada en los estándares de calidad para garantizar a los clientes la seguridad y confiabilidad de su información.

Históricamente, la formación de las tormentas y la contabilización de las descargas han sido estudiadas en un esfuerzo por entender los principios físicos de estos procesos. Las descargas atmosféricas han sido observadas desde las nubes usando sensores instalados en aeroplanos, globos a gran altitud y satélites. El tema de estimación del rayo en las LT's ha sido intensamente estudiado ya que su impacto en función de la gravedad del daño puede llegar a deteriorar el cable.

1.3 Justificación y motivación

Es evidente que la falta de suministro eléctrico y/o de telecomunicaciones para los consumidores tiene un impacto muy grande pudiendo ser de índole técnica, social y política. Considerando el aspecto técnico del problema referente a la interrupción del suministro eléctrico ocasiona entre otras cosas, que las líneas de producción se detengan. Uno de los factores que puede dar lugar a la interrupción del suministro son las descargas atmosféricas.

Durante los últimos años se ha observado el comportamiento de las descargas atmosféricas sobre estos cables, provocando estragos considerables que van desde la ruptura de las capas exteriores comprometiendo la resistencia mecánica de los mismos, hasta daños más extensos que pueden alcanzar a las fibras ópticas de este sistema y tener interrupciones en los enlaces de telecomunicación. Lo anterior induce a una colisión de pérdidas no tan sólo en tiempo, sino también económicas, laborales y en calidad del servicio.

Los diseñadores de CGFO están empleando los requerimientos mecánicos y eléctricos solicitados por los usuarios con el propósito de construir el cable más apropiado; sin embargo se debe tener en cuenta que el cable se instala en la parte superior de las LT's y uno de los propósitos es proteger a los conductores de fase ante las descargas atmosféricas. Es decir, funciona como captador de rayos de la línea por lo cual debe poseer una adecuada resistencia ante los impactos de rayos.

Derivado de lo anterior existe una amplia gama de pruebas que incluso algunas son de carácter obligatorio para certificar la calidad y seguridad del CGFO; sin embargo las pruebas conocidas nacionalmente como Arco de Potencia y Tensión Residual tienen un valor trascendental las cuales serán analizadas en esta tesis.

1.4 Objetivos

Los objetivos de esta tesis son:

- Establecer los criterios y las especificaciones adecuadas para la selección de CGFO, empleando una adecuación para el SEN del cálculo referente a la incidencia de descargas atmosféricas en una zona específica, de tal forma que se tenga una acertada confiabilidad para el SEN teniendo como consecuente:
 1. Reducción de fallas en redes eléctricas.

2. Continuidad en el servicio eléctrico, aprovechando en forma adecuada adicionalmente la función que nos da la fibra óptica en la transmisión de datos, y por ende la optimización de la comunicación.
 3. Reducción de los mantenimientos en las líneas de transmisión.
- Proponer un método equivalente de la prueba de Arco de Potencia con corriente directa (CD) en el cable CGFO en base a la especificación de CFE E000-21-2009 y la metodología indicada en la norma IEC 60794-1-2; referente a la ruptura de hilos como una consecuencia de los altos niveles de transferencia de carga eléctrica que las descargas atmosféricas pueden inducir. La utilización del método implicaría ganancias para la CFE dado que las pruebas serían de certificación nacional, así como para el Laboratorio de Pruebas a Equipos y Materiales (LAPEM) dado que brindaría los servicios a la CFE y compañías privadas nacionales e internacionales.
 - Analizar la influencia del tipo de polaridad del relámpago en daños causados sobre el CGFO.

1.5 Estructura de la tesis

El capítulo 1 lo constituye la presente introducción. El resto de la tesis consta de 5 capítulos los cuales son brevemente descritos a continuación.

En el capítulo 2 se presenta una introducción al fenómeno de la descarga atmosférica para encauzar en la descripción física de su composición y clasificación, se presentan los desarrollos y consideraciones que son aceptadas para llevar a cabo simulaciones en laboratorio.

En el capítulo 3 se describe al sistema de cableado CGFO incluyendo los herrajes y accesorios; así como también los principales problemas del sistema. Se recapitulan los ensayos recomendados por Normas Internacionales y Especificaciones Nacionales.

En el capítulo 4 se presentan los ensayos de las pruebas en base a los criterios de falla de acuerdo a las normativas específicamente de la prueba de arco de potencia realizando una comparativa con los datos de campo, para finalmente proponer una equivalencia del método empleando CD.

En el capítulo 5 se expone el desarrollo y cálculo sobre la incidencia de descargas atmosféricas para una zona específica a partir de un caso de estudio real en la CFE, con el propósito de que su adecuación sea considerada para llevarla a cabo a nivel nacional.

El capítulo 6 presenta las conclusiones generales de este trabajo, sus aportaciones y las recomendaciones óptimas para el desempeño y seguridad del sistema de cableado con CGFO en el sector eléctrico.

CAPÍTULO 2. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DEL RAYO

2.1 Introducción

En este capítulo se menciona la terminología básica de la descarga atmosférica, así como información sobre diversos aspectos de su naturaleza, los tipos de rayo, la polaridad y dirección de propagación del canal precursor, dando énfasis en la descarga que más interesa en términos prácticos; es decir, la descarga nube-tierra. Se presenta, también una normalización de las diversas terminologías utilizadas para definir los principales elementos que componen el fenómeno de la descarga atmosférica del rayo.

Los detalles físicos con relación a la formación de las nubes de tormentas, la pre y pos propagación de las descargas, las incidencias directas sobre las estructuras y LT, la transferencia de grandes cantidades de cargas electrostáticas entre nube y tierra ocasionado por el cierre del canal de descarga, los diversos componentes de las mismas, han sido ampliamente discutidos por la literatura técnica especializada internacional.

En 1905 se reportan ya estudios fotográficos de descargas atmosféricas realizadas con una cámara móvil [1]. Con la construcción de las primeras líneas a 230 KV, se empieza a considerar la importancia de la realización de mapas isoceráunicos, se van perfeccionando cada vez más las metodologías de recolección y procesamiento de datos de salidas de las líneas y se va adquiriendo una buena comprensión del efecto de las descargas atmosféricas sobre las líneas. Sin embargo, hoy se hace necesario emprender proyectos que eviten el alto número de salidas en algunas líneas.

2.2 Origen de las descargas atmosféricas

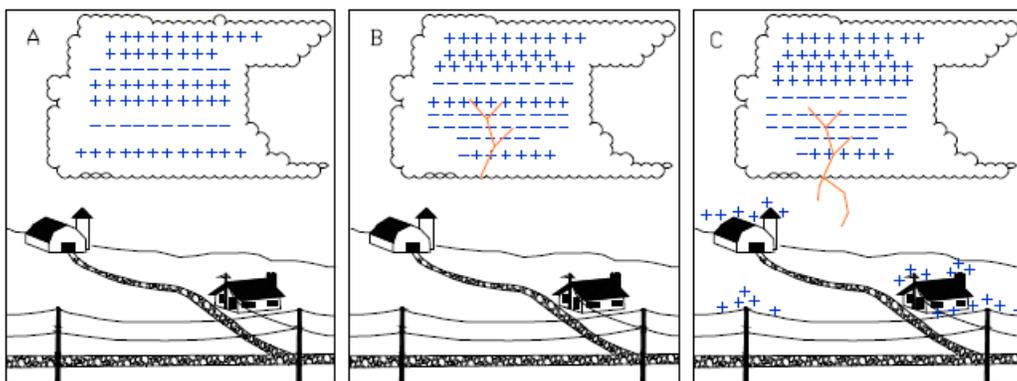
El rayo es una poderosa descarga electrostática natural, producida durante una tormenta eléctrica; generando un pulso electromagnético[2]. La descarga eléctrica precipitada del rayo es acompañada por la emisión de luz (el relámpago), causada por el paso de corriente eléctrica que ioniza las moléculas de aire, y por el sonido del trueno, desarrollado por la onda de choque. La electricidad (corriente eléctrica) que pasa a través

de la atmósfera caliente y expande rápidamente el aire, produciendo el ruido característico del rayo; es decir, el trueno.

Generalmente, los rayos son producidos por partículas positivas por la tierra y negativas a partir de nubes de desarrollo vertical llamadas *cumulonimbos*. Los cumulonimbos son nubes de gran desarrollo vertical, que internamente están formadas por una columna de aire cálido y húmedo que se eleva en forma de espiral rotatoria que tiene un sentido anti horario en el hemisferio norte y horario en el hemisferio sur. Su base suele encontrarse a menos de 2 km de altura mientras que la cima puede alcanzar unos 15 a 20 km de altitud. Estas nubes suelen producir lluvias intensas y tormentas eléctricas, especialmente cuando ya están plenamente desarrolladas.

La tropopausa es la zona de transición entre la troposfera y la estratosfera. Marca el límite superior de la troposfera, sobre la cual la temperatura se mantiene constante antes de comenzar nuevamente a aumentar sobre los 20 km snm [2]. Esta situación térmica evita la convección del aire y confina de esta manera el clima a la tropósfera. Cuando un cumulonimbo alcanza la tropopausa, las cargas positivas de la nube atraen a las cargas negativas, causando un relámpago o rayo.

Una de las teorías más aceptadas es la de **David S. Schonland** [3], la cual describe el ciclo de la nube de tormenta y la consecuente descarga; esta teoría parte de la existencia de los procesos de ionización y se puede resumir de la siguiente manera:



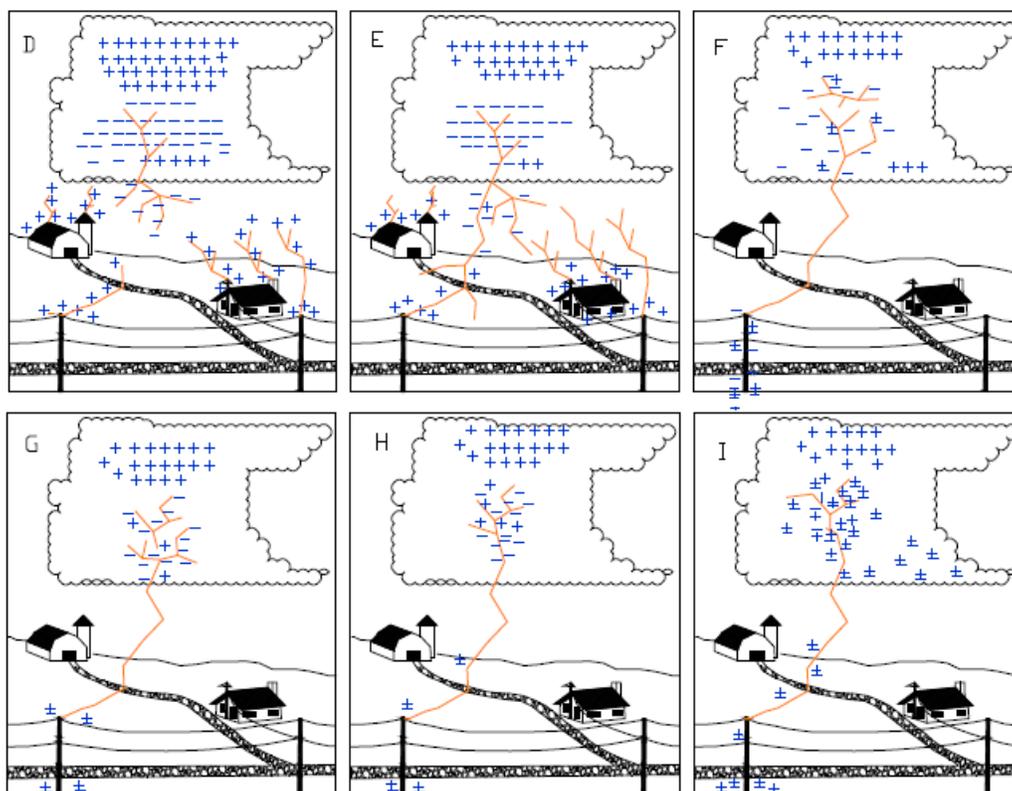


Fig. 2.1 Etapas de una descarga atmosférica [3]

En la Fig 2.1 se observan las diferentes etapas de una descarga atmosférica destacando en el apartado (A) que las cargas eléctricas en la nube se encuentran distribuidas en forma no homogénea, existiendo por consiguiente concentraciones desiguales de carga en la misma.

En el apartado (B) se observa que una vez que el gradiente eléctrico sobrepasa el valor crítico, comienzan a ocurrir pequeñas descargas en la nube. Estas, en virtud de la ionización por choque en el aire, se van degenerando en forma de avalancha denominada *pilot streamer* o descarga piloto, misma que avanza a una velocidad promedio de 150 a 200 Km/seg.

El apartado (C) muestra la rama de la descarga piloto orientada hacia la tierra logra imponerse en crecimiento, viéndose acompañada de pequeños puntos luminosos característicos de las descargas escalonadas *stepped leaders* o canal precursor de la descarga. Durante este proceso tanto la luminosidad como la corriente son pequeñas. Las descargas escalonadas parecen tener su origen en la acción del viento, llegando raras veces

a tierra; esto se debe a que la intermitencia de la descarga piloto (de 30 a 90 μ seg) les sustrae la energía necesaria para tales fines. Esta etapa ocurre a mucha mayor velocidad. A medida que la descarga se aproxima a tierra su gradiente eléctrico aumenta produciéndose un canal de recepción, mismo que puede salir desde la superficie de tierra o a su vez salir de un objeto o estructura construida por el hombre (edificaciones, torres, mástiles, etc.)

En el apartado (D) se observa que el canal de recepción con carga positiva sale al encuentro de la descarga piloto con gran cantidad de cargas negativas (positivas muy pocas veces), formándose así un canal plasmático. Para neutralizar la carga en la nube, una gran cantidad de cargas opuestas salen de tierra utilizando el mismo canal previamente ionizado. A través del canal plasmático ocurrirán todas las descargas sucesivas, de las cuales la primera es la denominada descarga de retorno o *stroke*.

En el apartado (E) se muestra el impacto provocado por las cargas eléctricas que la descarga de retorno introduce en la nube es tan fuerte que en la mayoría de los casos origina una segunda descarga orientada hacia la tierra, conocida como reencendido del canal de descarga o *dart leader*.

Este par de fenómenos (D) y (E); es decir, la descarga de retorno y el reencendido del canal de descarga pueden repetirse un número de veces apreciable y a esto se le denomina descargas sucesivas o *multiple stroke*, manifestándose como descargas separadas que utilizan el mismo canal, tal como se indica en los apartados (G), (H), (I) de la Fig. 2.1

2.3 Polaridad de las descargas atmosféricas

Es usual atribuir a las descargas atmosféricas de nube a tierra una clasificación en cuatro diferentes tipos en base a la polaridad y dirección de propagación del canal precursor de la descarga. La polaridad de la descarga atmosférica se atribuye a la misma polaridad de las cargas de la región en donde la nube se conecta a tierra por el canal de descarga.

Los rayos que inician en tierra son relativamente raros y ocurren normalmente en montañas o en estructuras altas, por lo que no los tomaremos en cuenta en lo subsiguiente.

Con relación a la dirección de la propagación o al canal precursor de la descarga, la mayoría de las veces inicia con un movimiento descendente a partir de la nube hacia la superficie de la tierra, alcanzando el suelo o cualquier estructura. Esto ocurre en función de la intensidad del campo eléctrico, originado en las cargas de la nube, una vez que se supera la rigidez dieléctrica del aire circunvecino se provoca la ionización del mismo. A partir de este canal aumenta hasta impactar a una cierta distancia crítica del suelo o de una estructura de tal manera que lo anterior está en función de la inducción de estas cargas, originando el surgimiento de un canal ascendente generalmente en la misma dirección del canal precursor descendente.

En el estudio y cálculo de sobre-voltajes un rayo puede ser visto como una fuente de corriente que puede tener polaridad positiva, negativa o ambas en una misma descarga, lo que se conoce como onda bipolar. En general, se han identificado cuatro tipos de rayo entre nube y tierra. Las descargas negativas forman el 95% de las descargas que caen a tierra a lo largo de todo el planeta y aproximadamente el 5% de las descargas son positivas [4].

También existen descargas iniciadas desde tierra hasta la nube sin embargo, estas descargas son relativamente raras y ocurren normalmente en zonas de gran altitud, desde los picos de las montañas o desde altas estructuras construidas por el hombre. Un aspecto adicional que se debe tener en cuenta es la distorsión que la presencia de objetos altos puede provocar en los parámetros de un rayo respecto al que se originaría en terreno plano.

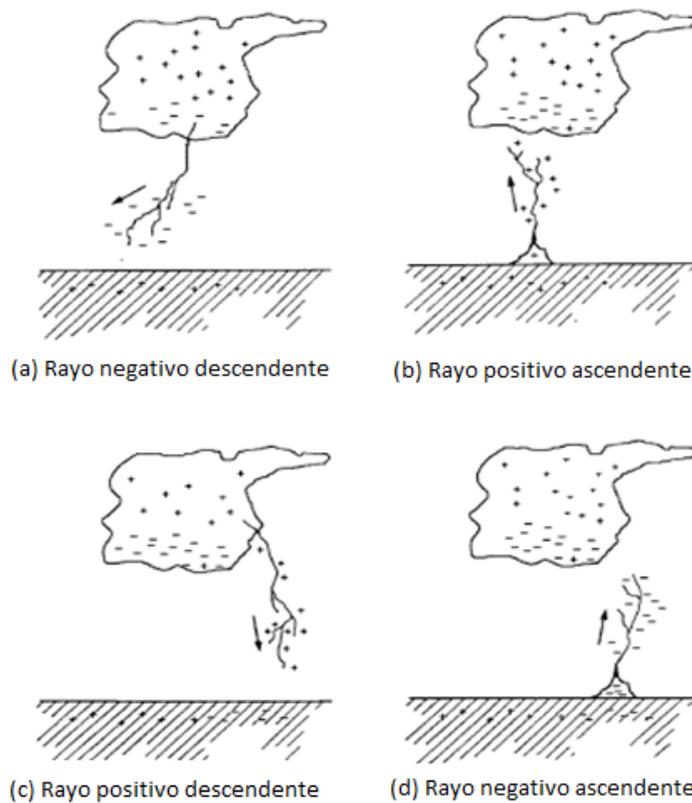


Fig. 2.2 Polaridad y categoría de los rayos

En la figura 2.2 se pueden ver las diferencias entre las cuatro categorías ilustradas. Los rayos de polaridad positiva tienen un considerable interés práctico porque tanto la corriente pico como la carga total transferida pueden ser mucho más grandes que las de la mayoría de los rayos con polaridad negativa más comunes. La información archivada sobre elevados picos de corriente, en el rango de 200 a 300 kA, proviene de rayos positivos [4].

Los rayos positivos contienen normalmente una única descarga de retorno seguida de un período de corriente continua. La mayoría de rayos positivos a tierra ocurren durante las tormentas de invierno, aunque estas tormentas producen pocos rayos en general y es relativamente raro que ocurran en tormentas de verano; aunque tormentas con carga predominantemente negativa acaban a menudo con descargas positivas. El porcentaje de descargas positivas en tormentas de verano aparentemente se incrementa con un aumento de la latitud geográfica y con un aumento de la altura del terreno; es decir, cuanto más cerca está la carga de la nube de la tierra mayor probabilidad de que ocurran descargas positivas,

aunque en la actualidad no se tiene suficientemente conocimiento sobre descargas positivas como para decir que esto es siempre una condición necesaria.

2.4 Enfoque de los procesos involucrados en la descarga atmosférica de un rayo

2.4.1 Ruptura preliminar entre las regiones positivas y negativas

El proceso de la evolución de las descargas atmosféricas se inicia por una ruptura primaria rigidez dieléctrica del aire dentro de la nube. Es necesario que la carga de la nube sea suficiente para producir una descarga inicial. Como consecuencia habrá grandes cantidades de las cargas antes aisladas dentro de la nube pero ahora conectadas por finas estructuras de filamentos conductores en forma de una red extensa. Tan pronto como las cargas ocupen un área lo suficientemente grande para crear una polarización, es posible suministrar la corriente necesaria para formar un enlace entre las cargas eléctricas de signo opuesto [4].

2.4.2 Canal precursor de descargas (*stepped-leader*)

Al final del proceso de la ruptura de la rigidez dieléctrica, se producen rupturas sucesivas que forman el canal precursor de la descarga conocido también como líder escalonado. El canal precursor se propaga en dirección a la tierra por un camino en pasos sucesivos como se muestra en la Fig. 2.1 (C). Los pasos del canal tienen una duración típica de 1 μ s y decenas de metros de largo (entre 10 y 50 m) y evolucionan buscando la manera más fácil para propagar la carga a tierra. Por lo general, existen ramificaciones en la propagación de estos canales en el suelo, que gran parte se pierde en el aire. La carga transferida por la intensificación de líder es cerca de 5 C, en un tiempo medio de decenas de milisegundos.

Cuando el canal precursor se encuentra a decenas de metros de la tierra, la diferencia de potencial existente entre la punta del líder y el suelo alcanza valores alrededor de 10×10^7 V, esto hace que el campo eléctrico en la punta del líder sea muy alto, creando las

condiciones para que ocurra la inducción de uno o más canales ascendentes de la tierra, que competirán por el cierre del canal. Cuando ocurre una conexión entre los canales se inicia el proceso de propagación de la onda de corriente a través del canal formado.

2.4.3 Proceso de conexión

Los canales ascendentes normalmente se forman a partir de los árboles, edificios, torres cuando se encuentran en localidades abiertas. La Fig. 2.1 (D) muestra el inicio del proceso conexión entre el canal precursor de descarga y el canal ascendente. Cuando los canales se encuentran definen la unión y para completar el canal, se genera una primera descarga de retorno.

2.4.4 Primera corriente de retorno

En el momento en que ocurre la conexión del canal entre la nube y la tierra es establecida una onda de corriente de alta intensidad llamada la corriente de retorno (*return stroke*), que se propaga a través del canal neutralizando las cargas acumuladas por el canal precursor de descarga, como se muestra en la Fig. 2.1 (E). La velocidad de propagación de esa corriente es mayor que 1/3 la velocidad de la luz (10^8 m/s). La corriente de retorno negativa tiene una amplitud media alrededor de 30 kA, con variaciones desde unos pocos de kA hasta centenas de kA [4].

La temperatura del canal puede llegar a 30000 °K y alcanzar valores elevados de presión. El aire alrededor del canal se expande abruptamente, comprimiendo el aire en sus alrededores dando frecuentemente resultando una onda sonora llamada trueno.

2.4.5 Corrientes de retorno subsecuentes

El reencendido del canal en la mayoría de las ocasiones, ocurre a lo largo del camino principal ionizado por el paso de la corriente de retorno. En algunos casos es posible que se utilice parte del canal ionizado y en seguida crearse un nuevo camino con dirección a la tierra. Por lo general, tal ocurrencia sucede para un intervalo de tiempo menor a 100 ms después de la corriente de retorno de anterior.

La fig. 2.1 (G), (H) e (I), muestra las etapas de las corrientes de retorno subsecuentes, que normalmente tienen una velocidad de propagación de la corriente más elevada, frentes de onda más rápidos y en la mayoría de los casos intensidades menores que las de la primer corriente de retorno.

2.5 Componente continua de la corriente de descargas atmosféricas

2.5.1 Definición de la componente continua

Se considera que la corriente de retorno de una descarga cesa por lo general después de 1ms. La literatura indica una duración máxima de 3 ms. Frecuentemente, después de esta corriente pasa a fluir por el canal de descarga una corriente de baja amplitud; esta corriente es conocida como la componente continua (CC) y se define por el bajo nivel de corriente (del orden de decenas a centenas de amperios), teniendo una duración de decenas a centenas de milisegundos [4]. En la Fig. 2.3 se ilustra esta componente.

La componente de corriente continua puede ser vista como un arco casi estacionario entre la fuente de carga de la nube y la tierra a lo largo del trayecto creado por la secuencia o secuencias de la corriente de retorno de la descarga [4].

Es importante diferenciar una componente continua de la parte de la corriente lenta que antecede a la primera corriente de retorno, asociada a la formación del canal ascendente y referida en la literatura como corriente continua.

Cada descarga individual *stroke* es seguida por una CC con una duración muy pequeña del orden de milisegundos. En la ingeniería, es de gran interés conocer el parámetro de la capacidad para disipar energía, principalmente en la componente de corriente continua que se mantiene en el canal por un largo período después de una o más descargas de retorno. Esta componente es conocida como componente continua de larga duración (CCLD). Puede ocurrir en las descargas de nube a tierra, fluyendo después de la primera descarga de retorno o después de alguna de las descargas subsecuentes.

A menudo, esta corriente contiene algunos picos (transitorios), que amplifican la corriente por intervalos de tiempo del orden de algunos milisegundos. A estas componentes se les llaman componentes M. La mayoría de las informaciones publicadas en la literatura técnica relativa a la ocurrencia de componente continua, es para descargas negativas.

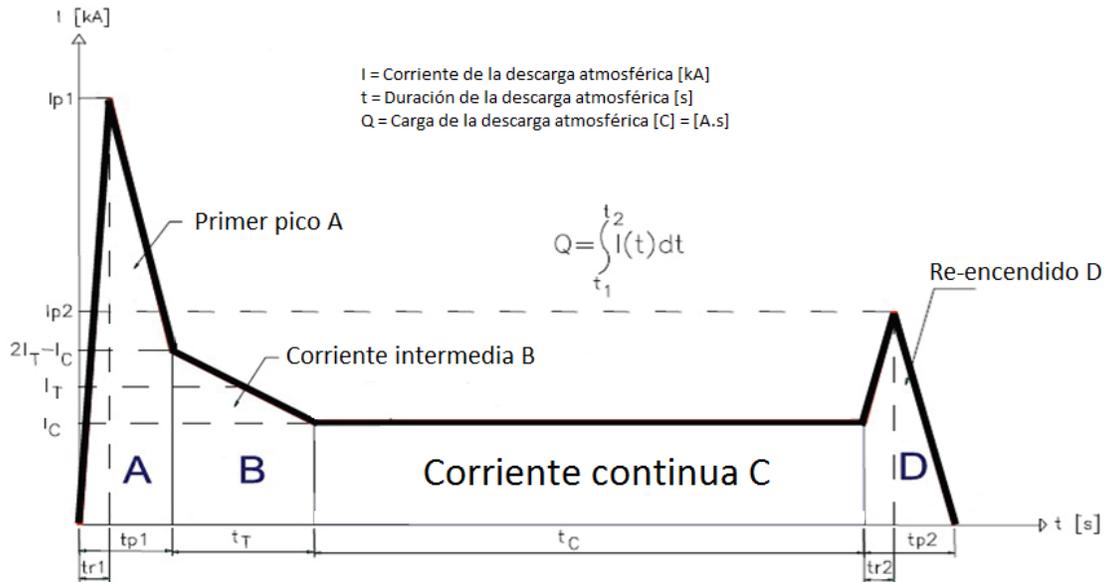


Fig. 2.3 Forma de onda convencional de la corriente durante una descarga atmosférica [5]

Componente A (primer pico)

Amplitud pico = 200 kA ± 10%
 Acción integral = 2000 kA²s
 Tiempo de duración ≤ 500 μs

Componente C (corriente continua)

Transferencia de carga = 200 C ± 20%
 Amplitud = 200 - 800 A
 Tiempo de duración = 0.25 - 1 s

Componente B (corriente intermedia)

Máxima transferencia de carga = 10 C
 Amplitud promedio = 2 kA ± 10%
 Tiempo de duración ≤ 5 ms

Componente D (reencendido)

Amplitud pico = 100 kA ± 10%
 Acción integral = 250 kA²s
 Tiempo de duración ≤ 500 μs

El comportamiento de campo eléctrico, que permite identificar la componente continua de la corriente se caracteriza por una variación lenta y larga del campo eléctrico, con la misma polaridad que la de la corriente de retorno [6].

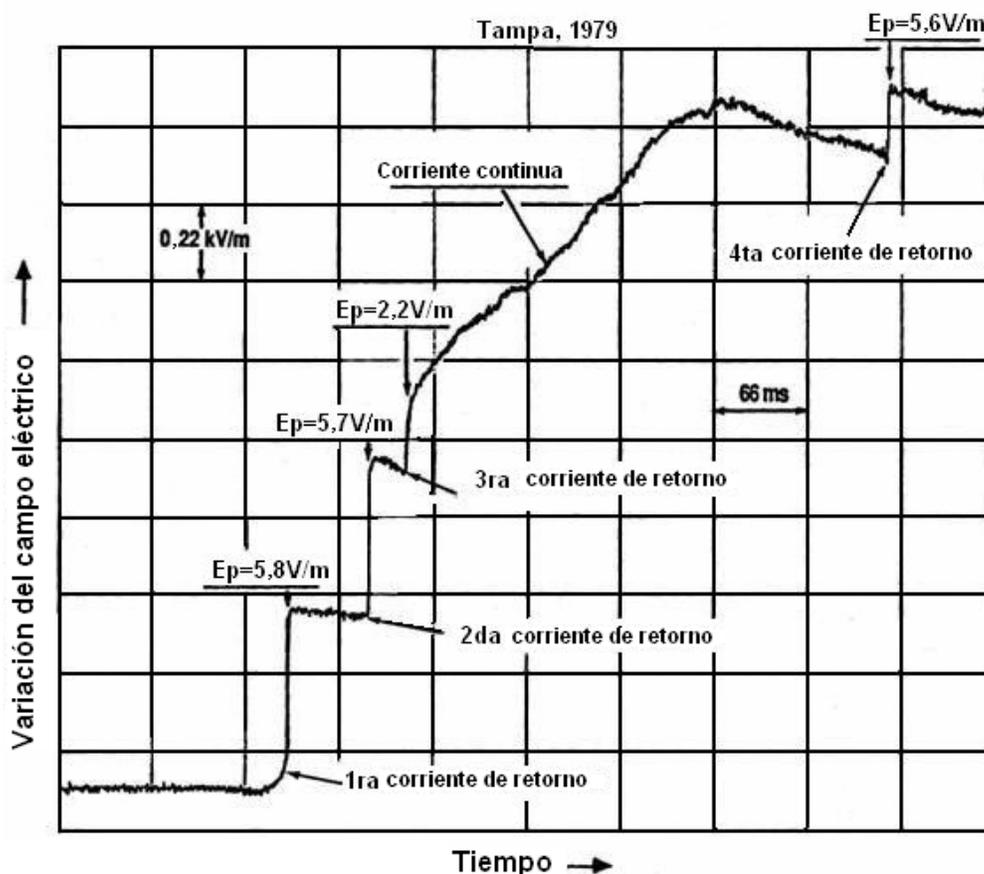


Fig. 2.4 Variación del campo eléctrico de la descarga atmosférica

La Fig. 2.4 ilustra tal variación para una descarga atmosférica con cuatro corrientes de retorno. La componente continua de la corriente acontece después de la tercera corriente de retorno, teniendo un tiempo aproximado de esta componente de 200 ms [4].

2.5.2 Patrones de comportamiento observados en la ocurrencia de la componente continua de larga duración

Rakov y Uman [4] sugieren un patrón para el inicio de una CCLD. Este modelo tiene las siguientes características:

- Las descargas de retorno que dan inicio a las corrientes continuas de larga duración tienden a presentar picos iniciales de campo eléctrico inferiores a los picos asociados a las descargas regulares. Las descargas regulares son definidas como descargas que no inician una CCLD.

- Las descargas de retorno que dan inicio a las CCLD son usualmente precedidos por intervalos de inter-descargas relativamente cortas.

2.6 Fases de una descarga nube-tierra

La Fig. 2.3 muestra esquemáticamente los perfiles de las corrientes que corresponden a las siguientes formas:

- En la zona A una secuencia de re-encendido del canal de descarga, el descenso del líder crea un camino conductor entre carga de la nube de origen y la tierra, así como también depósitos de carga negativa a lo largo de este camino. El movimiento de retorno después de que atraviesa camino va desde el suelo hacia la fuente de carga de la nube neutralizando la carga del líder negativo. Así entonces, el líder y las descargas de retorno sirven para el transporte eficaz de carga negativa de la nube a tierra.
- En la zona B el rayo sigue la corriente considerándose como casi un arco estacionario entre la fuente de carga de la nube y la tierra. Comúnmente esta corriente es de decenas a cientos de amperios, y la duración puede ser de varios cientos de milisegundos.
- En la zona C Las componentes-M de la descarga atmosférica del rayo pueden ser vistas como perturbaciones o picos durante la corriente continua y en el canal asociado luminosamente. Dando la impresión de que una componente-M consiste en la superposición de dos ondas que se propagan en direcciones opuestas. El modo de transferencia de carga a tierra de la componente-M requiere de la existencia de un canal que lleva una corriente continua y que actúa como una de guía de onda.

Podemos interpretar que en la primera fase de la descarga del rayo, el canal se propaga desde la nube hasta tierra en una serie de pasos discretos; dicho canal se ha iniciado en el interior de la nube a partir de un proceso preliminar de ruptura dieléctrica.

Mientras la punta del canal se acerca a tierra, el campo eléctrico en objetos puntiagudos de tierra o en irregularidades de la superficie aumenta hasta que ocurre la ruptura dieléctrica del aire. En ese momento se inician descargas desde esos puntos hasta que contactan con el canal. Una vez el canal ha contactado con tierra, comienza a descargarse por medio de una onda ionizante que se propaga hacia la nube a lo largo del canal previamente ionizado (primera descarga de retorno).

Por otro lado, si la nube dispone todavía de carga adicional, otro canal continuo puede propagarse hacia abajo a lo largo del primer canal residual e iniciar otra descarga de retorno. Algunos de estos segundos canales actúan como los primeros porque no siguen el canal de retorno previo.

2.7 Nomenclatura adoptada

La gran mayoría de los textos referentes a las descargas atmosféricas están escritos en lengua extranjera, principalmente en inglés. Por lo cual es propuesto hacer uso de esta nomenclatura en términos técnicos de mayor empleo de acuerdo a la literatura técnica aplicada. La terminología, indicada en la tabla 2.1, será empleada a lo largo de este trabajo.

Tabla 2.1 Nomenclatura adoptada

Español	Inglés	Descripción
Descarga Atmosférica	<i>Lightning</i>	Un concepto más amplio correspondiente al fenómeno integral involucrando el cierre del canal de descarga y la(s) descarga(s) subsecuente(s). Incluyendo las manifestaciones eléctricas, visuales y sonoras.
Relámpago	<i>Flash</i>	Efecto luminoso perceptible visualmente en función de la corriente de retorno en el canal de descarga.

<p>Trueno</p>	<p><i>Thunder</i></p>	<p>Fenómeno sonoro relacionado a la descarga atmosférica. Y causado por el brusco desplazamiento del aire que se inicia en las proximidades del canal de descarga, debido al calentamiento de este.</p>
<p>Descarga eléctrica</p>	<p><i>Electric discharge</i></p>	<p>Flujo de cargas a partir de un objeto cargado eléctricamente, que puede corresponder a un proceso disruptivo en un medio aislante o de una la perdida de cargar eléctrica a través de un medio conductor.</p>
<p>Canal precursor de descarga</p>	<p><i>Stepped leader</i></p>	<p>Corresponde al canal ionizado que evoluciona por pasos, correspondientes a descargas eléctricas (rupturas) sucesivas en el aire. Una evolución del canal puede cerrar un proceso de ionización entre la nube y el suelo (en el caso de descargas nube a tierra), que es seguido por el flujo de la corriente de la descarga por el canal formado. El cual puede ser ascendente o descendente, siendo denominado canal ascendente o descendente respectivamente.</p>
<p>Canal ascendente</p>	<p><i>upward leader</i></p>	<p>En un sentido genérico se refiere-a un canal ionizado configurado para la disrupción próxima del aire a tierra, y que evoluciona por pasos (descargas consecutivas) ascendentemente a partir de las estructuras aterrizadas o en la propia tierra.</p>
<p>Canal de descarga</p>	<p><i>discharge channel</i></p>	<p>Es el canal de ionización que conecta la nube a tierra, configurado a partir de la conexión de los canales ascendentes y descendentes por el cual fluye la corriente de retorno de la descarga.</p>
<p>Corriente de retorno</p>	<p><i>return current</i></p>	<p>Corriente que fluye por el canal ionizado correspondiente a un canal de descarga, seguido por el cierre del mismo.</p>

<p>Descarga de retorno</p>	<p><i>stroke</i></p>	<p>Evento asociado al flujo de la corriente de retorno correspondiente a una descarga eléctrica por el canal de descarga. Una descarga atmosférica (“flash”) puede incluir varias descargas de retorno (“strokes”) o una única descarga de retorno.</p>
<p>Primera descarga de retorno</p>	<p><i>first stroke</i></p>	<p>Primera descarga “stroke” de una descarga atmosférica.</p>
<p>Descarga(s) de retorno subsecuente(s)</p>	<p><i>subsequent stroke(s)</i></p>	<p>Conjunto de descargas de retorno subsecuentes a la primera descarga de retorno de una descarga atmosférica, o una de estas descargas de retorno.</p>
<p>Reencendido del canal de descarga</p>	<p><i>Dart leader</i></p>	<p>Corresponde al desplazamiento de cargas negativas de la nube por el canal restante de una descarga de retorno previa, que configura una corriente de valor reducido (algunos cientos de amperes). Esta corriente es responsable para el reencendido de una extensión del canal de la descarga, mientras este desaparece, y eso puede ser finalmente capaz de reiniciarlo y permitir una descarga de retorno subsecuente que al cierre del canal, en un punto de tierra próximo a la descarga anterior.</p>
<p>Punto de Conexión</p>	<p><i>Attachment point</i></p>	<p>Punto en el que ocurre o se encuentran los canales descendente y ascendente.</p>
<p>Distancia de inducción del canal ascendente</p>	<p><i>Striking distance</i></p>	<p>Distancia crítica entre el canal descendente y la estructura terrestre a partir de la cual se da un surgimiento del canal ascendente. Cuando alcanza tal distancia el canal descendente es capaz de inducir en el suelo el inicio de un canal ascendente.</p>

<p>Radio de atracción</p>	<p><i>Attractive radius</i></p>	<p>Distancia entre el canal descendente y la estructura terrestre a partir de la cual ocurrirá el cierre entre un canal descendente con un canal ascendente que se origina en la estructura terrestre. Cuando la distancia del canal descendente a la estructura alcanza el valor del radio de atracción, se tiene la expectativa de que se alcanza el cierre con algunos de los canales ascendentes anteriormente inducidos a partir de la estructura aterrizada.</p>
---------------------------	---------------------------------	--

CAPÍTULO 3. SISTEMA DE CABLEADO CGFO

3.1 Introducción

El CGFO también es conocido como *Optical Ground Wire (OPGW)* por sus siglas en inglés; en este capítulo se mencionan sus funciones, las principales características, tipos de cables, la estructura de los mismos, detalles de instalación, herrajes y accesorios, cajas de empalme y los empalmes propios. Por último se indican las operaciones y precauciones necesarias para instalar de manera exitosa el sistema CGFO.

3.2 Descripción del sistema de cableado CGFO

El CGFO es un tipo de cable que está diseñado para ser instalado en líneas de alta tensión que contiene en su interior un núcleo óptico el cual aloja a un determinado número de fibras; y que por sus características cumple dos funciones:

- a) Actúa como cable de guarda protegiendo a las líneas que transmiten la energía eléctrica ante las descargas atmosféricas.
- b) Constituye un medio de comunicaciones de alta velocidad a través de las fibras ópticas con un bajo coste de instalación y alta protección de la fibra.

Las fibras ópticas inicialmente se usaron para control y protección de las líneas eléctricas o para comunicaciones a nivel local. Para estos fines era suficiente un bajo número de fibras (6 u 8). Sin embargo, hoy en día se instalan cables de 36 fibras o más debido a que el objetivo ha cambiado dado que actualmente es el transporte masivo de información aprovechando la tecnología de comunicaciones ópticas y el derecho de vía de las líneas eléctricas a lo largo y ancho del país. La combinación de ambos elementos da beneficios muy importantes a las compañías eléctricas:

- Permite tener concentrada la información de toda la red en tiempo real para optimizar la explotación del sistema.

- Les brinda una vía propia de comunicación, de gran importancia en el mundo actual, que depende tanto de los sistemas como de las bases de datos.
- Crea una nueva y muy importante fuente de ingresos, al poder vender a otras entidades el servicio de transporte de información. Por esto, la instalación de fibras ópticas en líneas de energía se convierte en parte de la infraestructura básica de la empresa de la que el CGFO es la parte esencial, complementada con otros cables ópticos que llevan las fibras ópticas hasta un distribuidor en las salas de equipo.

La estructura del CGFO integra materiales que por sus características le dan propiedades especiales que le permiten tener un alto desempeño:

- Fibras ópticas monomodo o multimodo protegidas dentro de tubos holgados, que proporcionan una gran capacidad de transmisión de información a alta velocidad.
- Tubo de aluminio extruído para aislar el núcleo óptico y protegerlo de la humedad, así como para proporcionar un medio para la disipación de corrientes en caso de cortocircuito.
- Corona de alambres de acero recubierto de aluminio, acero o aluminio que le imprimen una gran resistencia mecánica a la tensión longitudinal.

El diseño se ha evaluado en diferentes pruebas bajo circunstancias controladas, simulando condiciones críticas de operación, lo cual permite optimizar su desempeño en cuanto a las características eléctricas, mecánicas, ópticas y ambientales. La tabla 3.1 indica la optimización en el diseño de CGFO.

Tabla 3.1 Optimización en el diseño de CGFO

Riesgo	Prevención
Tensión de la fibra	Protección holgada con longitud extra de la fibra
Generación de hidrógeno	Gel absorbente de hidrógeno
Penetración de agua	Tubo de aluminio extruído
Temperatura de corto circuito	Resistividad eléctrica y sección adecuadas
Corrosión metálica	Protección de aluminio
Vibración	Fibras protegidas por el gel de relleno
Comportamiento eléctrico	Resistente al corto circuito y al rayo

Aunado al CGFO los accesorios necesarios que forman parte del sistema de cableado CGFO en las líneas de alta tensión se muestran en la Fig. 3.1

- a) Cajas de empalme
- b) Cables de acometida
- c) Herrajes

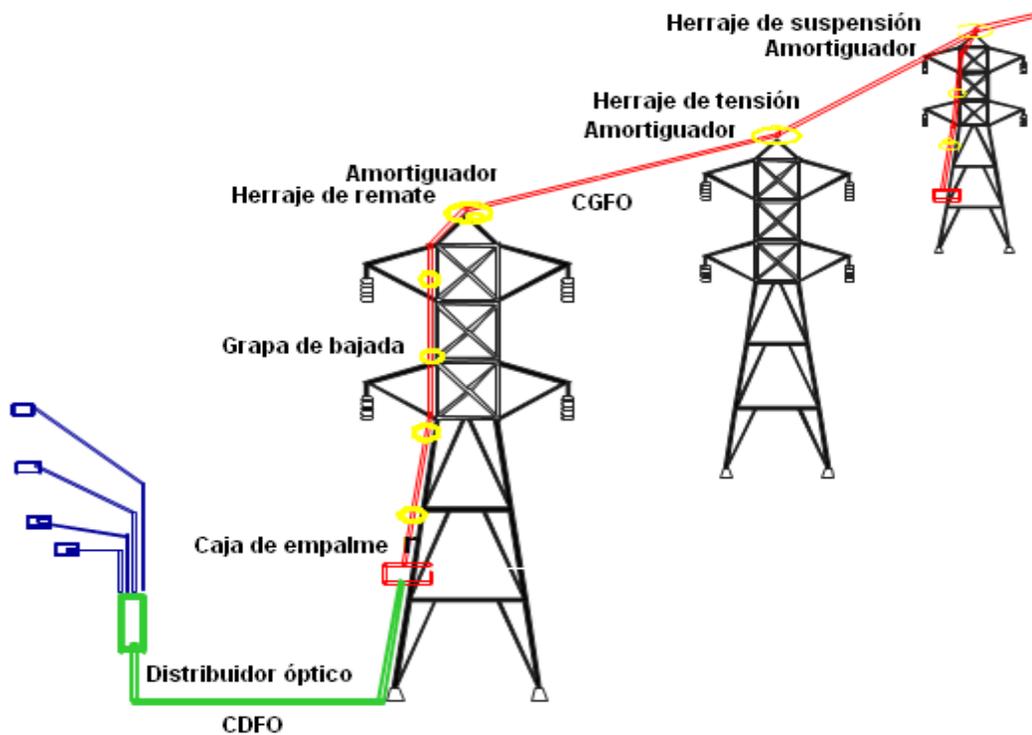


Fig. 3.1 Sistema CGFO

3.3 Fibra óptica

Una fibra óptica es un filamento delgado y largo de un material dieléctrico transparente, usualmente vidrio o plástico de un diámetro aproximadamente igual al de un cabello humano, al cual se le hace un revestimiento especial, con ciertas características para transmitir señales de luz a través de largas distancias como se ilustra en la Fig. 3.2

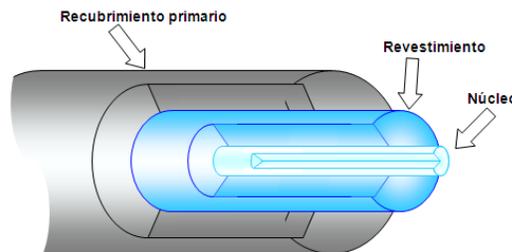


Fig. 3.2 Estructura general de la fibra óptica

Se emplean como guías para ondas de luz, basándose en el principio de la reflexión de la luz entre dos medios con índices de refracción diferentes. Las ventajas de la fibra óptica con respecto a un conductor de cobre son las siguientes:

- Es más barata por unidad de longitud
- Es más delgada
- Tiene menor degradación de la señal
- Las señales de luz no interfieren entre sí como las señales eléctricas
- Necesita menos potencia
- Tiene menor riesgo de producir incendios
- Es ligera y flexible
- La calidad de la transmisión es muy superior

3.3.1 Tipos de fibra óptica

A. Fibra monomodo

Potencialmente, esta es la fibra que ofrece la mayor capacidad de transporte de información. Tiene una banda de paso del orden de los 100 GHz/km. Los mayores

flujos se consiguen con esta fibra, pero también es la más compleja de implantar. Si el núcleo está constituido de un material cuyo índice de refracción es muy diferente al de la cubierta, entonces se habla de fibras monomodo de índice escalonado.

B. Fibra multimodo de índice de gradiente gradual

Las fibras multimodo de índice de gradiente gradual tienen una banda de paso que llega hasta los 500 MHz/km. Su principio se basa en que el índice de refracción en el interior del núcleo no es único y decrece cuando se desplaza del núcleo hacia la cubierta. Los rayos luminosos se encuentran enfocados hacia el eje de la fibra, estas fibras permiten reducir la dispersión entre los diferentes modos de propagación a través del núcleo de la fibra. La fibra multimodo de índice de gradiente gradual de tamaño 62.5/125 mm está normalizado.

C. Fibra multimodo de índice escalonado

Las fibras multimodo de índice escalonado están fabricadas a base de vidrio, con una atenuación de 30 dB/km, o plástico, con una atenuación de 100 dB/km. Tienen una banda de paso que llega hasta los 40 MHz por kilómetro. En estas fibras, el núcleo está constituido por un material uniforme cuyo índice de refracción es claramente superior al de la cubierta que lo rodea. El paso desde el núcleo hasta la cubierta conlleva por tanto una variación brutal del índice, de ahí su nombre de índice escalonado.

3.3.2 Características principales

a) Atenuación

Es la pérdida de potencia óptica que se da cuando la luz se propaga por la fibra; es medida en dB/km. Existe la atenuación intrínseca *scattering* que se ocasiona por defectos propios de los materiales, atómicamente ocurre por la interacción de las impurezas con la luz que viaja a través de la fibra. Y por otro lado también existe la atenuación extrínseca (macro y micro *bending*)

generalmente producida por curvaturas dadas en la fibra, las cuales se originan principalmente en la instalación de la misma.

Matemáticamente se calcula:

$$\text{Atenuación } \alpha = 10 \log \log_{10} \frac{P_e}{P_s} \text{ dB} \quad (3.1)$$

Donde:

$P_e = \text{Potencia de entrada}$

$P_s = \text{Potencia de salida}$

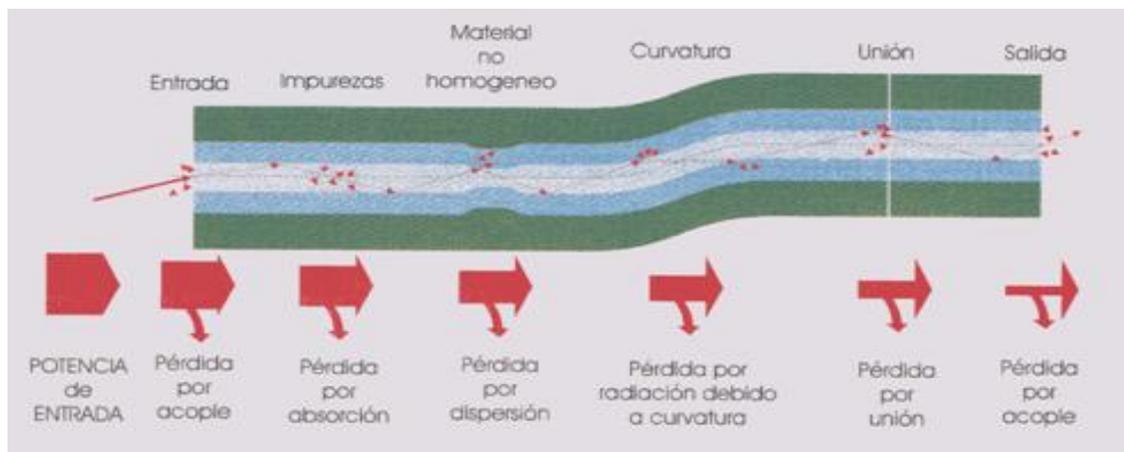


Fig. 3.3 Factores de atenuación en la fibra óptica [7]

La Fig. 3.3 muestra los múltiples factores que pueden producir atenuación en una fibra óptica, en condiciones normales de uso. La atenuación A de un enlace viene dada por [8]:

$$A = \alpha L + \alpha_s x + \alpha_c y \quad (\text{ec. 3.1})$$

Donde:

$\alpha = \text{coeficiente de atenuación típico de los cables de fibra en un enlace}$

$\alpha_s = \text{atenuación media por empalme}$

$x = \text{número de empalmes de un enlace}$

$\alpha_c = \text{atenuación media de los conectores de línea}$

$y = \text{número de conectores de línea de un enlace (si se facilita)}$

$L = \text{longitud del enlace}$

Debe preverse un margen adecuado para futuras modificaciones de la configuración del cable (empalmes suplementarios, largos de cable suplementarios, efectos del envejecimiento, variaciones de temperatura, etc.). La expresión anterior no incluye la pérdida de los conectores del equipo. El presupuesto de atenuación utilizado en el diseño de un sistema real debe tener en cuenta las variaciones estadísticas de esos parámetros.

b) Dispersión cromática

Indica el alargamiento del pulso óptico debido a variaciones en la velocidad de propagación para diferentes longitudes de onda como se indica en la Fig. 3.4

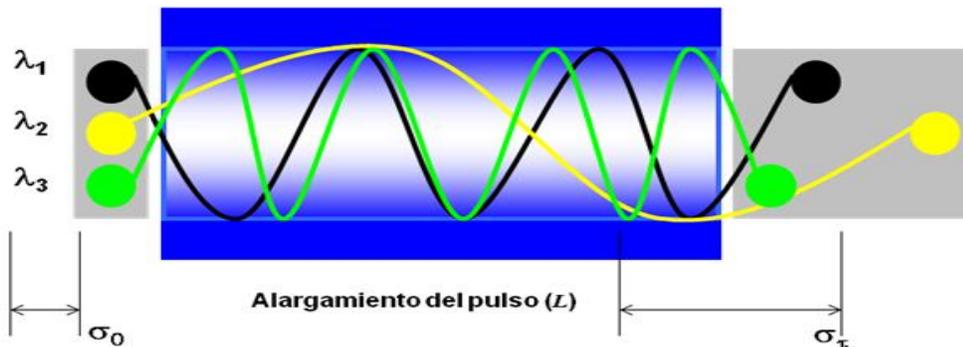


Fig. 3.4 Dispersión cromática

3.4 Diseño del CGFO

La descripción del siguiente diseño de CGFO se toma como un modelo ilustrativo, más no limitativo dicho cable se diseña para adaptarse a los requerimientos del cliente a nivel eléctrico, mecánico, de calidad y coste, optimizando el diámetro, peso, rotura y capacidad de cortocircuito.



Fig. 3.5 Ejemplo de diseño de un CGFO [19]

La Fig. 3.5 ejemplifica uno de tantos diseños de CGFO existentes y a continuación se describe su estructura de la siguiente manera.

A) Núcleo óptico

El núcleo óptico de este modelo de cable se compone de los siguientes elementos:

1. Elemento central dieléctrico. La función básica de este elemento es permitir la disposición de los tubos que contienen las fibras a su alrededor para configurar el núcleo óptico. Este elemento central es totalmente dieléctrico y fabricado con *vetrorresina*.

2. Tubos de PBT. El diseño de CGFO está realizado con una protección holgada de la fibra. Los tubos se fabrican en PBT especial, dependiendo del número de fibras serán la cantidad de tubos; estos tubos son fabricados por extrusión alrededor de las fibras ópticas. En la mayoría de los estándares cada búfer puede contener hasta 6 fibras ópticas. Cada tubo está lleno de gel higroscópico que impide la penetración de agua en los tubos. Una vez que los tubos están dispuestos alrededor del soporte central dieléctrico, son cubiertos de gel anti-humedad y absorbente de hidrógeno. Este elemento es necesario para evitar que la posible

generación de hidrógeno en el núcleo óptico pueda afectar a las fibras durante la vida útil del cable.

3. Fibras ópticas. Es posible acomodar todo tipo de fibras ópticas debiendo indicar las prestaciones y características de las mismas. La estructura con tubos holgados permite una longitud extra de fibra respecto a la longitud del cable. Lo anterior permite un margen de tracción sobre el cable sin que la fibra sufra tracción alguna. La ventaja de esta estructura radica en que en condiciones normales de instalación, la fibra nunca trabaja en tensión y por ello se puede garantizar una mayor vida.

4. Cintas de sujeción. Una primera cinta de poliéster se utiliza para la sujeción de los tubos que contienen las fibras. Sobre esta cinta, se aplica una cinta sintética especial para la protección térmica del núcleo óptico a elevadas temperaturas.

B) Parte metálica

La construcción de la parte metálica del cable se compone por:

1. Tubo de aluminio extruido. Es diseñado para proporcionar las características eléctricas y mecánicas necesarias para que el CGFO se comporte como cable de tierra convencional. El núcleo óptico queda completamente protegido a través del sellado total que ofrece el tubo de aluminio extruido que lo envuelve.
2. Corona de hilos. Es posible emplear una o dos coronas de hilos metálicos, que a su vez pueden ser:
 - Aleación de aluminio
 - Hilos de acero recubiertos por una capa de aluminio

La elección entre estos tipos de hilos dependerá de las prestaciones eléctricas y mecánicas que quieran darse al CGFO. En un mismo cable

o en una misma corona es posible utilizar uno o más tipos de hilos simultáneamente.

El tubo de aluminio provee al cable de un nivel adecuado de protección al cortocircuito, es la mejor solución para evitar la corrosión, asegura una perfecta estanqueidad del núcleo y proporciona una alta resistencia al aplastamiento.

Los hilos de acero recubiertos de aluminio así como los de aleación de aluminio dotan al cable de la carga requerida mecánica requerida, son la mejor solución para evitar la corrosión del cable.

3.4.1 Características generales y particulares del CGFO

De acuerdo a lo solicitado en la especificación CFE E0000-21 [9], se enlistan las siguientes características:

A. Características generales

El cable de guarda con fibras ópticas debe cumplir con lo siguiente:

- Las unidades ópticas deben estar alojadas holgadamente en contenedores que las protejan de daños por el ambiente y a cargas inducidas tales como compresión longitudinal, aplastamiento, doblez, torcido, esfuerzo a la tensión mecánica y efectos térmicos, así como a la humedad.
- Las unidades ópticas deben estar inmersas en un compuesto apropiado para impedir la penetración de humedad.
- La corona debe estar formada por alambres de acero con recubrimiento de aluminio o una combinación de estos con alambres de aleación de aluminio.
- El cable, herrajes y accesorios deben estar diseñados para resistir sin deterioro durante su vida útil, los ambientes marinos e industrial. Para el caso de que el cable, herrajes y accesorios estén expuestos a contaminación por guano, el fabricante debe proporcionar la

protección necesaria para evitar el daño del cable por este contaminante.

B. Características particulares:

- El diámetro del cable debe cumplir con el valor indicado en la tabla 3.2 de esta sección.
- El cable debe tener una capacidad de disipación térmica mayor o igual a $87 \text{ kA}^2\text{s}$ debida a la corriente de falla (este valor está considerado para un valor de 17 kA, por un periodo de 0.3 s para líneas con mayores niveles de corriente de falla, se debe calcular el factor de disipación adecuado), sin alterar sus características físicas debido a la temperatura alcanzada (tales como la formación del efecto de jaula de pájaro) y sin que sufran daño las fibras ópticas, y que los herrajes de fibra óptica sean capaces de soportar y transmitir esfuerzos térmicos y mecánicos. Adicionalmente la temperatura del núcleo del cable no debe exceder a $180 \text{ }^\circ\text{C}$ en cualquier punto de la muestra.
- Debe satisfacer la capacidad de transferencia de energía (ante la descarga atmosférica); es decir, cumplir con la capacidad que debe tener el CGFO para soportar la energía transmitida por la componente de corriente continua durante el impacto de una descarga atmosférica sobre el cable, esta corriente es de pequeña amplitud (de unos cientos de amperios), de una gran duración (del orden de 100 ms a 300 ms) y unidireccional, que fluye después del impacto de la descarga atmosférica. Esta corriente caracteriza la carga total transportada ($i dt$).
- Las características electromecánicas mínimas requeridas, se indican en la tabla 3.2 y para las fibras ópticas se indican en la tabla 3.3

Tabla 3.2 Características electromecánicas del CGFO

Características	Valores a cumplir
Número de fibras	≥ 36
Diámetro del cable	$\leq 16,2$ mm
Carga de ruptura	≥ 70 kN
Densidad lineal	$\geq 0,600$ kg/m
Resistencia (cd)/unidad de longitud a 20 °C	$< 1,46$ Ω /km
Capacidad de transferencia de energía (ante la descarga atmosférica)	100 C
Capacidad de disipación térmica (temperatura inicial 35 °C)	≥ 87 kA ² s
Relación de paso de cableado	Entre 10 y 16 veces el diámetro del cable
Sentido del cableado	Izquierdo
Velocidad de corrosión en cámara salina 720 h	≥ 72 g/(m ² x año)

Tabla 3.3 Características de las fibras

Tipo de fibra óptica	Recomendación UIT-T
Multimodo Índice gradual	G.651
Monomodo Dispersión nula	G.652
Monomodo Dispersión desplazada no nula	G.655

3.5 Caja de empalmes

La caja de empalmes es especialmente diseñada para dar la mayor versatilidad en las conexiones ópticas de CGFO y dieléctricos, permitiendo su uso en líneas de alta tensión y en otros sistemas de cable ópticos. Del mismo modo que en el caso del diseño del CGFO; se presenta a continuación uno de tantos diseños para las cajas de empalmes.

En este caso la caja es fabricada de aleación de aluminio, contiene una junta anti-envejecimiento realizada en neopreno perfectamente insertada en la ranura de la tapa misma que le proporciona la estanqueidad a la caja.

La caja se suministra con una placa de ensamblaje preparada con los dispositivos necesarios para la fijación de los cables, la sujeción de los organizadores,

y los elementos de distribución en caso necesario. También se suministra un kit que contiene todos los materiales necesarios para realizar los empalmes: protectores, cintillos, anillos de marcaje, clips, silicona, y gel de silicona anti-humedad.

Para sellar las entradas de los CGFO se utilizan prensaestopas con grado IP67. Para los cables dieléctricos, se utiliza una boquilla de aluminio y un manguito termoretractil. La fijación de la caja a la torre se realiza mediante una estructura de anclaje en acero galvanizado existiendo también las versiones para poste.

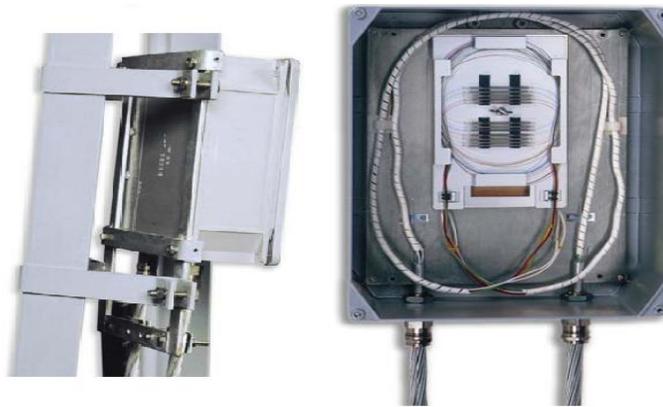


Fig. 3.6 Ejemplo de diseño de una caja de empalme

3.6 Herrajes y accesorios

Los herrajes son dispositivos que se utilizan para sujetar el cable de guarda con fibras ópticas a las estructuras y postes de las líneas de transmisión o subtransmisión. Se consideran accesorios a los amortiguadores de vibraciones, las abrazaderas, así como los ensambles (ángulos, placas, tornillos, pernos, tuercas, chavetas, arandelas, entre otros) para fijarlos.

A) Conjunto de tensión.

Son empleados en torres de suspensión. Estas torres representan el 20% del número total de las torres más las de empalme y terminales. Las torres de tensión son necesarias cuando se produce un cambio significativo en la dirección de la línea eléctrica. Este tipo de conjunto

debe estar diseñado de tal forma que no dañe la estructura del CGFO. Básicamente hay 3 tipos de conjuntos de tensión: pasante, bajante y final.

B) Conjunto de suspensión

Son usados en torres de suspensión, este tipo de torres representan aproximadamente el 80% de todas las torres; el herraje nunca debe dañar al cable de tierra.

C) Amortiguadores

Son empleados para prevenir la vibración del cable, debida al efecto que ocasiona el viento sobre el cable. Se instalan uno o más dependiendo de la distancia entre las torres y de las condiciones de viento en la zona.

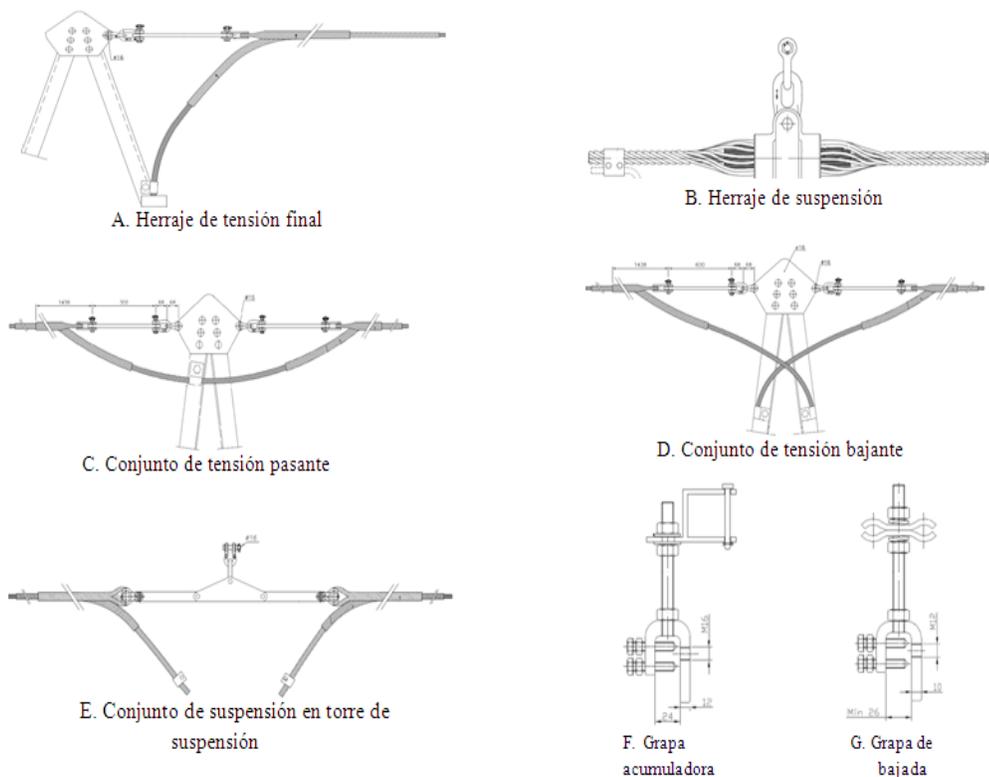


Fig. 3.7 Tipos de herrajes para el sistema de cableado CGFO

Para la instalación del CGFO sobre un tendido eléctrico de alta tensión son aplicables distintos tipos de accesorios como los que se muestran en la Fig. 3.7

CAPÍTULO 4. NORMAS Y ENSAYOS APLICABLES AL CGFO DE ACUERDO A CFE E0000-21-2010

4.1 Introducción

Este capítulo tiene como propósito hacer referencia de las pruebas aplicables en base a la especificación de CFE E0000-21-2010; así como también las principales normativas internacionales a las cuales remite dicha especificación. La intención principal de nombrar a las normativas internacionales es dar conocer los ensayos mínimos necesarios para asegurar los requerimientos funcionales del CGFO.

En este capítulo se realiza un análisis detallado específicamente del método de prueba de Arco de Potencia de acuerdo a la CFE E0000-21-2010 con respecto a las normativas internacionales IEC 60794.1-2 e IEEE Std.-1138 respectivamente.

Por último se desarrolla una propuesta del método para la prueba de Arco de Potencia en el CGFO aplicando CD en base a ensayos realizados en laboratorio efectuando una equivalencia con pruebas normalizadas y aceptadas por CFE-LAPEM.

4.2 Especificación CFE E0000-21-2010. Cable de Guarda con Fibras Ópticas y Accesorios

En el año de 1995 la CFE en México a través del Comité de Trabajo de la Coordinación de Proyectos de Transmisión y Transformación; elaboró una especificación de acuerdo con las bases generales para la normalización en la CFE, con el objetivo de establecer las características técnicas y de aseguramiento de calidad que deben cumplir los CGFO para el blindaje en líneas de transmisión, subtransmisión y subestaciones eléctricas, así como para enlaces de telecomunicaciones. La especificación CFE E0000-2-2010. Cable de Guarda con Fibras Ópticas y Accesorios [9] ha sido cuidadosamente revisada y modificada en el transcurso de los años teniendo la versión más reciente en el 2010.

El propósito de la E0000-21-2010 es establecer las características técnicas y de aseguramiento de calidad que deben cumplir CGFO para el blindaje en líneas de

transmisión, subtransmisión y subestaciones eléctricas, así como para enlaces de telecomunicaciones.

El LAPEM es una organización de la CFE que tiene como objetivo atender las necesidades del sector eléctrico nacional e internacional, proporcionando estudios de ingeniería especializada, pruebas de laboratorio y campo a equipos y materiales, así como gestión de calidad de suministros y sistemas, de manera confiable, oportuna y efectiva, sustentado en un alto grado de especialización de su personal, con una permanente actitud de servicio; en el LAPEM varios de los ensayos mencionados se llevan a cabo.

4.2.1 Clasificación de los ensayos

Los términos mencionados en la tabla 4.1 son empleados para clasificar cada prueba.

Tabla 4.1 Clasificación de los términos de las pruebas

Clasificación	Descripción
Pruebas prototipo	Se determinan las características del CGFO para su uso en la línea de transmisión diseñada.
Pruebas de aceptación	Refieren a las condiciones que el CGFO pueda experimentar durante su instalación.
Pruebas de rutina	Refieren a cualquier condición que el CGFO pueda experimentar en el tiempo de servicio.

4.2.1.1 Pruebas prototipo

Para los cables de guarda con fibras ópticas se deben efectuar las pruebas que se describen a continuación, la medición del cambio en la atenuación debe ser menor o igual a 0.20 dB/km a 1550 nm para fibras monomodo y 0.50 dB/km a 1300 nm para fibras multimodo:

- a) Para la evaluación del prototipo, se deben realizar todas las pruebas indicadas en la norma IEC 60794-4-10, con las siguientes precisiones para los parámetros de prueba que en ella no están especificados; además de las pruebas de arco de potencia, cámara salina, compresión y flujo del relleno.
- b) En la prueba de esfuerzo deformación, la longitud mínima de la muestra debe ser de 10 m y se lleva la muestra hasta la ruptura.
- c) En la prueba de desempeño a la tensión, la longitud mínima de la muestra debe ser de 10 m y cumplir con el cambio de atenuación solicitado.
- d) Para la prueba de paso por polea, se debe de utilizar un diámetro para las poleas de 40 veces el diámetro nominal del cable y cumplir con el cambio de atenuación solicitado.
- e) Para la prueba de vibración eólica con 100 millones de ciclos debe cumplir con la variación de atenuación solicitada.
- f) La prueba de galopeo se debe de realizar y cumplir con el cambio de atenuación solicitado.
- g) La prueba de penetración de agua se debe realizar.
- h) La prueba de Capacidad de disipación térmica (al corto-circuito), se debe realizar de acuerdo al método descrito en la norma IEC-60794-1-2 (*Method H1. Short Circuit Test*) [11], y los requerimientos que deben cumplirse son:
 - La máxima temperatura permitida sobre los alambres debe ser de 200 °C.
 - La máxima temperatura permitida sobre el tubo metálico protector de la unidad óptica, debe ser de 180 °C.
 - No debe haber daños físicos visibles sobre el cable.
 - No debe presentarse el efecto de jaula de pájaro (*birdcaging*).

- i) Para la prueba de arco de potencia se debe colocar una muestra de cable de guarda de 20 m o más, se somete a una tensión mecánica del 2% de la RTS nominal del cable, y se le aplica un arco de potencia a frecuencia industrial producido entre un electrodo de hierro y el propio cable colocado a una distancia de 1 cm a través de un fusible de acero de diámetro apropiado. Se aplica una corriente eléctrica simétrica de una duración entre 0.5 y 3 ciclos y de una amplitud tal que produzca una transferencia de carga eléctrica en el arco de 100 C a 110 C.

El arco de potencia se debe aplicar cada vez en tres porciones distintas del cable, separadas al menos 5 m y no debe presentar alambres rotos (entendiéndose como hilo roto la pérdida de continuidad física del mismo). La medición de la atenuación se hace antes, durante y después de cada aplicación de la corriente, el cambio en la atenuación debe ser menor o igual a 0.20 dB/km a 1550 nm para fibras monomodo y 0.50 dB/km a 1300 nm para fibras multimodo. Los equipos de medición deben estar libres de interferencia electromagnética radiada por el propio arco eléctrico.

Aunque cada muestra probada puede presentar daños a causa del arco de potencia establecido, la corona no debe presentar alambres rotos (entendiéndose como hilo roto la pérdida de continuidad física del mismo). Después se somete la muestra a una prueba de tensión mecánica, cuyo valor debe ser mayor o igual a 52.5 kN (75% de la carga de ruptura).

- j) La prueba de niebla salina se debe realizar exponiendo las muestras en posición horizontal. Se deben preparar un mínimo de tres muestras por cada tipo de cable, previamente desengrasados y dimensionados, cuya masa inicial debe ser menor de 160 g con una exactitud de 0.1 mg. Los extremos del cable se deben fijar para evitar el descableado y protegerlos

por medio de un mastique epóxico de tal manera que evite la penetración de la niebla salina. Las muestras se deben exponer a la vez en la cámara salina por 720 h. Después de la exposición, el cable se debe desbaratar y los productos de corrosión formados, se deben remover y pesar la muestra completa con una exactitud de 0.1 mg. La velocidad de corrosión se determina de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$V_c = \frac{\Delta m}{A \cdot t} \quad (\text{ec. 4.1})$$

Donde:

Δm = pérdida en masa (g)

A = área expuesta (m^2)

t = tiempo de exposición (años)

La diferencia de potencial electroquímico entre los componentes metálicos del cable, no debe ser mayor a 100 mV medido en una solución de cloruro de sodio de 0.33 molar a $25^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$.

- k) La prueba de compresión se debe realizar teniendo cuidado de que no existan esfuerzos iniciales en el arreglo. Fijarlo de tal manera que no haya movimientos laterales en el cable ni desplazamientos axiales sobre las placas. Es necesario colocar el cable de tal manera que la unidad óptica pueda ser examinada y medida durante la aplicación de la carga. Aplicar la carga a una velocidad constante hasta 4 400 N y mantenerla por 1 min, bajarla a un valor de carga de 2 200 N y mantenerla por 10 min, después retirar la carga y mantenerla por un periodo de 5 min, verificando el cambio final en la atenuación de la fibra. La variación máxima en la atenuación en forma permanente o temporal no debe ser mayor de 0.5 dB/km durante y después de la prueba para que el cable cumpla con este requisito.

- l) Referente a las pruebas prototipo para verificar la compatibilidad de los herrajes tipo compresión a tornillo y preformados con el cable de guarda con fibras ópticas, el fabricante de herrajes es el responsable de asegurar la calidad y compatibilidad con el tipo de CGFO, debiendo presentar la evidencia escrita que avale el cumplimiento de las pruebas.

4.2.1.2 Pruebas de rutina

El cable de guarda con fibras ópticas debe cumplir con el protocolo de pruebas descrito en la norma IEC 60794-4-10 [11].

4.2.1.3 Pruebas de aceptación

Las pruebas de aceptación son las siguientes:

- a) Carga a la ruptura y alargamiento de los alambres de aluminio y de acero recubierto de aluminio.
- b) Diámetro de los alambres de aluminio y de acero con recubrimiento de aluminio.
- c) Resistencia y resistividad eléctrica de los alambres de aluminio y de acero recubiertos de aluminio.
- d) Espesor de la capa de aluminio en los alambres de acero.
- e) Torcido de los alambres de acero.
- f) Enrollamiento de los alambres de aluminio
- g) Diámetros interno y externo.
- h) Carga a la ruptura.
- i) Alargamiento.
- j) Resistencia eléctrica en caso de que sea metálico.
- k) Resistencia cd / unidad de longitud a 20 °C.
- l) Carga nominal de ruptura.
- m) Diámetro.
- n) Densidad lineal.
- o) Relación de paso de cableado.

- p) Requerimientos ópticos:
 - coeficiente de atenuación
 - uniformidad en la atenuación
 - dispersión cromática
 - diámetro del campo modal
- q) Requerimientos geométricos:
 - error de concentricidad
 - diámetro del revestimiento
 - no circularidad del revestimiento
 - diámetro del recubrimiento primario

Las pruebas anteriormente descritas son de carácter obligatorio, ya que tienen por objeto establecer las características técnicas y de aseguramiento de calidad que deben cumplir los CGFO para el blindaje en líneas de transmisión, subtransmisión y subestaciones eléctricas, así como para enlaces de telecomunicaciones. En caso de presentarse resultado no satisfactorio en cualquiera de las pruebas de aceptación se debe rechazar el suministro.

La E0000-21 es totalmente confiable, ya que establece las especificaciones de rendimiento y ensayos que aseguren dentro de los criterios establecidos las capacidades mecánicas y eléctricas del cable, manteniendo correctamente la integridad mecánica del cable y de la fibra óptica así como la transmisión óptica. A continuación se mencionan los ensayos, procedimientos y criterios de aceptación más determinantes para una correcta funcionalidad del CGFO.

4.3 Normativas internacionales

Tanto los estándares de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), así como los del Instituto de Ingenieros Eléctricos Electrónicos (IEEE) son documentos que se desarrollan dentro de las sociedades y los comités de coordinación de normas correspondientes.

La IEC 60794-1-2 especifica los requisitos eléctricos, mecánicos y ópticos así como los métodos de prueba para los cables aéreos de fibras ópticas incluyendo el CGFO [10], paralelamente el IEEE Std. 1138-2009 describe el funcionamiento, requisitos de los ensayos, procedimientos, y criterios de aceptación para una línea de transmisión aérea, considerando el CGFO [11]. Esta norma considera los requerimientos funcionales eléctricos, mecánicos, ópticos, ambientales y arreglos generales; así como los requerimientos de los ensayos relacionados con el diseño, la instalación, el servicio y mantenimiento, incluyendo los ensayos de rutina.

Ambos estándares impactando y aportando notablemente a los lineamientos para los desarrollos y consideraciones del CGFO. Cabe destacar que realizó una traducción e interpretación 2010 en convenio de la UNAM - Prysmian Cables y Sistemas S.A. misma a la que se hace referencia en la cual se destaca la descripción de las pruebas así como los criterios de falla [18].

4.4 Método equivalente para la prueba de Arco de Potencia en el cable CGFO empleando CD

La capacidad de transferencia de energía (ante una descarga atmosférica), es la capacidad que debe tener el CGFO para soportar la energía transmitida por la componente de corriente continua durante el impacto de una descarga atmosférica sobre el cable y es caracterizada por la carga total transportada.

La intención de esta tesis es determinar el método equivalente de la prueba de arco de potencia en el CGFO con CD, en base a los daños de pruebas realizadas en el CGFO aplicando el método de dicha especificación, lo anterior dado que no existe equivalencia alguna en daño al cable empleando CD ya que en la actualidad el método se realiza empleando corriente alterna (CA). Por otra parte dado que se aplicará CD para llevar a cabo la equivalencia se hace referencia a la normativa IEC 60794-1.2 Método H2; así mismo se analizan las consideraciones que pueden afectar el resultado del ensayo.

Capítulo 4. Normas y ensayos aplicables al CGFO de acuerdo a CFE E0000-21

Cabe mencionar que los niveles de carga, la duración del impacto, la distancia entre el gap y el propio arreglo en relación con el electrodo y el conductor empleados en el ensayo de Arco de Potencia establecidos en el estándar IEC 60794-1.2, han recibido una amplia aceptación como un margen adecuado para establecer los daños causados por rayos en el CGFO; en este sentido recientemente en la última revisión de la norma IEEE Std. 1138-2009 se ha incluido esta prueba clasificándola como obligatoria y referenciando al método H2 de la IEC 60794-1.2

4.4.1 Ensayo de Arco de Potencia de acuerdo a la CFE E0000-21-2010

La Fig. 4.1 es una réplica del procedimiento de ensayo para la prueba de Arco de Potencia de acuerdo a la especificación E0000-21-2010, donde se indica lo siguiente:

CABLE DE GUARDA CON FIBRAS ÓPTICAS Y ACCESORIOS	ESPECIFICACIÓN CFE E0000-21
--	--

14 de 38

APÉNDICE A (Obligatorio)

PRUEBA DE ARCO DE POTENCIA

A.1 PROPÓSITO

Comprobar que el cable de guarda con fibra óptica no sea afectado severamente en sus características mecánicas y ópticas, por los efectos de una descarga eléctrica o un arco de potencia.

A.2 PROCEDIMIENTO

Una muestra de cable de guarda de 20 m o más, se somete a una tensión mecánica del 2 % del RTS nominal del cable, y se le aplica un arco de potencia a frecuencia industrial producido entre un electrodo de hierro y el propio cable colocado a una distancia de 1,0 cm a través de un fusible de acero de diámetro apropiado.

Se aplica una corriente eléctrica simétrica de una duración entre 0,5 y 3 ciclos y de una amplitud tal que produzca una transferencia de carga eléctrica en el arco de 100 C a 110 C.

El arco de potencia se debe aplicar cada vez en tres porciones distintas del cable, separadas al menos 5 m y no debe presentar alambres rotos (entendiéndose como hilo roto la pérdida de continuidad física del mismo).

La medición de la atenuación se hace antes, durante y después de cada aplicación de la corriente, el cambio en la atenuación debe ser menor o igual a 0,20 dB/km a 1550 nm para fibras monomodo y 0,50 dB/km a 1300 nm para fibras multimodo. Los equipos de medición deben estar libres de interferencia electromagnética radiada por el propio arco eléctrico.

Aunque cada muestra probada puede presentar daños a causa del arco de potencia establecido, la corona no debe presentar alambres rotos.

La prueba de resistencia mecánica remanente, en cada una de las tres posiciones probadas a sección completa, debe ser igual o mayor a 52,5 kN (75 % de la carga de ruptura, indicada en la tabla 1 y párrafo 8.1.1 de esta especificación).

8.1.1 Prueba de arco de potencia

El CGFO debe soportar la prueba de arco de potencia descrita en el Apéndice A de esta especificación sin rompimiento de ningún hilo (entendiéndose como hilo roto la pérdida de continuidad física del mismo) y la atenuación de la señal a través de la fibra óptica no debe variar más de lo indicado en la tabla 2 de esta especificación, con respecto a su valor inicial, al aplicarle 100 C a 110 C de carga.

Después se somete la muestra a una prueba de tensión mecánica, cuyo valor debe ser mayor o igual a 52,5 kN (75 % de la carga de ruptura, indicada en la tabla 1 de esta especificación).

Fig. 4.1 – Continuación del procedimiento de ensayo para la prueba de Arco de Potencia de acuerdo a la especificación E0000-21-2010 [9].

4.4.2 Procedimiento de ensayo para el método equivalente de la prueba de Arco de Potencia

Una de las razones por la cual se especifica la polaridad negativa en el arreglo de la prueba, se refiere a la estabilidad relativa del arco esta disposición simula una polaridad descendente de polaridad positiva, este efecto fue anteriormente observado en superficies metálicas [12]. El término de tipo de polaridad es relativo y es conveniente que se establezca desde un inicio. En este reporte se refiere y respeta la convención de la norma IEC.

El propósito del ensayo de arco de potencia es someter al CGFO a las condiciones de descarga atmosférica que se presentan en el campo. Los daños ocurridos se observan en la corona exterior de los alambres del cable, consecuentemente en la pérdida de tensión mecánica como resultado de los daños. El cable con denominación 37E56s [19] es el candidato para hacer el estudio, las características técnicas que son de nuestro interés son:

- Composición es de 10 hilos de acero recubiertos de aluminio con un diámetro aproximado de 3.17 ± 0.05 mm.
- Diámetro total del CGFO aproximado: 13.7 mm
- Peso aproximado: 563 kg/km

- Carga de rotura de acuerdo a CFE E0000-21: 70 kN



Fig. 4.2 Arreglo montaje para la prueba de Arco de Potencia

La Fig. 4.2 indica el montaje para la prueba, se coloca una muestra de 18 m de longitud aproximadamente en un banco de tracción al 2% de la RTS de acuerdo a la E0000-21-2010. En el punto medio del vano se instala un electrodo balanceado para aplicar las descargas de arco empleando un hilo de cobre fino entre el electrodo y el cable.

La medida de la corriente se realiza mediante un transformador toroidal de 100 kHz de ancho de banda, con una conversión de 1/5000 ($500A > 100mA$) [13]. Se ensayan diferentes niveles de transferencia de carga sobre el CGFO así como diferentes distancias entre el electrodo y el cable, lo anterior es necesario para determinar la equivalencia de daño entre pruebas; enseguida de cada descarga de arco se realiza una inspección visual analizando los daños y en algunos casos se lleva la carga de rotura remanente.

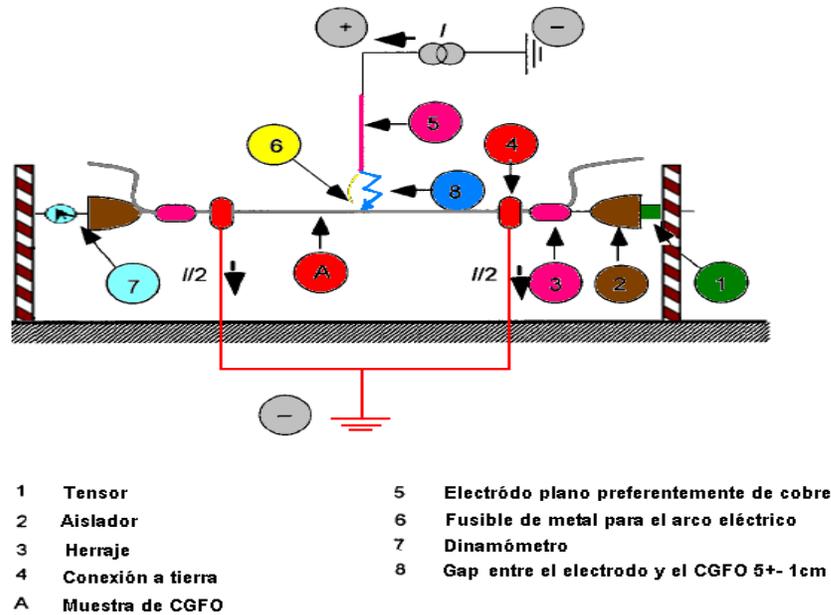


Fig. 4.3 Arreglo general para el ensayo de Arco de Potencia [11]

La Fig. 4.3 muestra el arreglo general para el ensayo en cuestión de acuerdo a la normativa IEC 60794.1-2-2003 y es el adoptado para las pruebas realizadas, denominando a este arreglo como polaridad negativa, la duración del arco se mantiene en 500ms de acuerdo a lo establecido en dicha norma.

4.4.2.1 Ensayos con transferencia de carga de 100C variando el gap

La tabla 4.2 muestra los resultados de los daños causados al cable en base a las condiciones de procedimiento mencionadas y considerando que se varía la distancia entre el electrodo y el cable.

Tabla 4.2 Resultados de pruebas en CGFO con 100C y variando el gap

No.	REFERENCIA	GAP (cm)	HILOS ROTOS	OBSERVACIONES
1	M1/3cm/7I	3	No	Daño nulo
2	M2/3cm/8I	3	No	Daño nulo
3	M3/3cm/9I	3	No	Daño nulo
4	M1/2cm/4I	2	No	Daño nulo
5	M2/2cm/5I	2	No	Daño nulo
6	M3/2cm/6I	2	No	Daño nulo
7	M1/1cm/1I	1	No	2 hilos afectados superficialmente
8	M1/1cm/2I	1	No	3 hilos afectados superficialmente
9	M1/1cm/3I	1	No	4 hilos afectados superficialmente



(a) Transferencia de carga 100C y 3 cm de gap



(b) Transferencia de carga 100C y 2 cm de gap



(c) Transferencia de carga 100C y 1 cm de gap

Fig. 4.4 - Daños representativos de los ensayos en el punto 4.5.3.1

La Fig. 4.4 muestra los daños más representativos de los ensayos anteriormente mencionados. En las pruebas anteriores se observa que el nivel de 100C y 1cm de gap está por debajo del daño equivalente buscado, por lo que se realizan otros ensayos con diferentes consideraciones.

4.4.2.2 Ensayos a 1cm de gap variando el nivel de transferencia de carga.

La tabla 4.7 muestra los resultados de los daños causados al cable en base a las condiciones de procedimiento mencionadas manteniendo constante el gap a 1cm y variando el nivel de transferencia de la carga así como la polaridad.

Tabla 4.3 Resultados de pruebas en CGFO a 1 cm de distancia y variando la transferencia de carga

No.	REFERENCIA	CARGA (C)	POLARIDAD		HILOS ROTOS	OBSERVACIONES
			(+)	(-)		
1	M5/15I/130C	130		*	No	3 hilos afectados focalizados
2	M6/17I/130C	130		*	No	3 hilos afectados focalizados
3	M7/18I/130C	130		*	No	3 hilos afectados focalizados
4	M8/19I/130C	130		*	No	3 hilos afectados focalizados
5	M9/10I/130C	130		*	No	3 hilos afectados focalizados
6	M11/12I/130C/PI	130	*		No	Daño nulo y distribuido
7	M12/13I/130C/PI	130	*		No	Daño nulo y distribuido
8	M11/14I/130C/PI	130	*		No	Daño nulo y distribuido
9	M1/1I/150C	150		*	2	Daño focalizado
10	M2/2I/150C	150		*	2	Daño focalizado
11	M3/3I/150C	150		*	2	Daño focalizado
12	M4/4I/150C	150		*	2	Daño focalizado
13	M3/3I/150C	150		*	1	1 hilo roto y 2 fusionados
14	M7/13I/150C/PI	150	*		No	Daño nulo y distribuido
15	M8/14I/150C/PI	150	*		No	Daño nulo y distribuido
16	M9/15I/150C/PI	150	*		No	Daño nulo y distribuido
17	M1/4I/200C	200		*	2	2 hilos rotos y 1 fusionado al límite de rotura
18	M2/5I/200C	200		*	No	3 hilos fusionados al límite de rotura
19	M3/6I/200C	200		*	2	2 hilos rotos y 1 fusionado al límite de rotura
20	M4/7I/200C	200		*	1	2 hilos rotos y 1 fusionado al límite de rotura
21	M5/8I/200C	200		*	2	2 hilos rotos y 1 fusionado al límite de rotura
22	M6/9I/200C	200		*	2	2 hilos rotos y 1 fusionado al límite de rotura
23	M10/19I/200C/PI	200	*		No	Daño nulo y distribuido
24	M11/20I/200C/PI	200	*		No	Daño nulo y distribuido
25	M12/20I/200C/PI	200	*		No	Daño nulo y distribuido
26	M13/21I/200C/PI	200	*		No	Daño nulo y distribuido

De acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos, es evidente que existe una diferencia muy grande de acuerdo a la polaridad empleada. La Fig. 4.5 muestra la diferencia más representativa a la cual se hace mención.



Fig. 4.5 Diferencia de los daños en el tipo de polaridad a 200C

Dadas las comparaciones y una vez recabados los resultados la serie de pruebas realizadas; las condiciones de equivalencia para los daños al CGFO en la prueba de Arco de Potencia en base a especificación de la Comisión Federal de Electricidad CFE E000-21-2010 es el referido en la norma IEC 60794-1-2 método H2, con las puntuales consideraciones de tener el gap a 1cm de distancia, el nivel de carga de transferencia a 130 C y un tiempo de duración del arco de 500 ms, a lo q corresponde una corriente continua de 260 A.

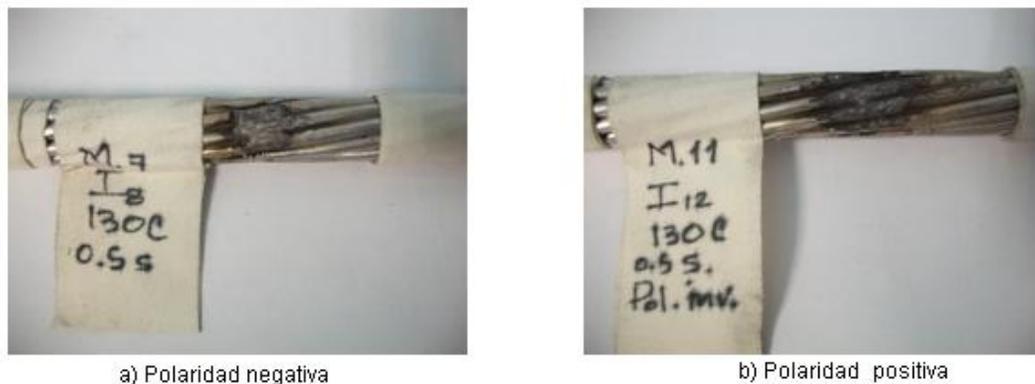


Fig. 4.6 Daños al CGFO con el método equivalente

En la Fig. 4.6 se muestran los daños más representativos de lo anterior nuevamente se comprueba que con la polaridad invertida el daño es mucho menor.

Una vez encontrado el punto de equivalencia adecuado, se realiza el ensayo de tensión de rotura residual y se verifica que cumpla con los requisitos de la especificación E0000-21.

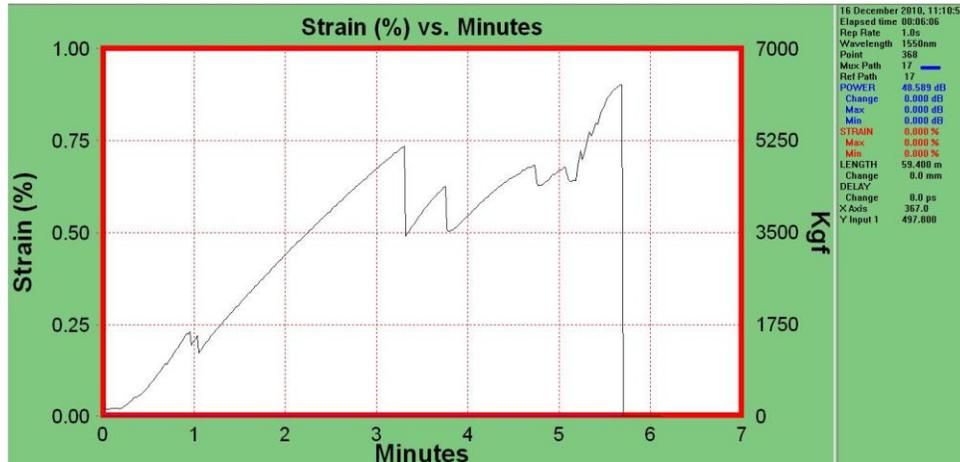


Fig. 4.7 Gráfica del comportamiento de la prueba de tensión de carga residual

En la Fig. 4.7 se muestra la gráfica del comportamiento del ensayo de tensión residual aplicada al CGFO después de la prueba de Arco de Potencia. En el resultado de la prueba de tensión mecánica residual se registró una RTS máxima alcanzada por el CGFO de 6316 Kgf lo que equivale a 61.92 KN esto representa el 88.5% de la RTS declarada para este cable.

De acuerdo a la especificación E0000-21 la RTS la muestra probada es sometida a una prueba de tensión mecánica, cuyo valor debe ser mayor o igual a 52.5 kN (75 % de la carga de ruptura, indicada en la tabla 1 de esta especificación); motivo por el cual el resultado de los ensayos realizados es de carácter satisfactorio respetando las puntuales consideraciones de tener el gap a 1cm de distancia, el nivel de carga de transferencia a 130 C y un tiempo de duración del arco de 500 ms, a lo q corresponde una corriente continua de 260 A.

CAPÍTULO 5. CÁLCULO SOBRE INCIDENCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS PARA UNA ZONA ESPECÍFICA

5.1 Introducción

El fenómeno de la descarga atmosférica es un agente causante de disturbios electromagnéticos de elevada magnitud en sistemas eléctricos, capaz de promover accidentes con personas o animales, daños en las redes y equipos eléctricos, pérdida de continuidad en el servicio, etc.

La formación del rayo es de interés científico produciéndose cuando la intensidad del campo eléctrico entre las áreas de carga alcanza un punto de finalización crítico. Lo anterior se ha llegado a considerar como un “arco casi inmóvil entre la carga de la nube y tierra, a través del paso creado por la secuencia de cadena de la propia descarga” [4].

5.2 Daños en el CGFO

Una componente continua de descarga atmosférica produce daños en la capa externa del cable a que van desde la fundición de los alambres hasta la ruptura de los mismos, comprometiendo la confiabilidad de la tensión mecánica.

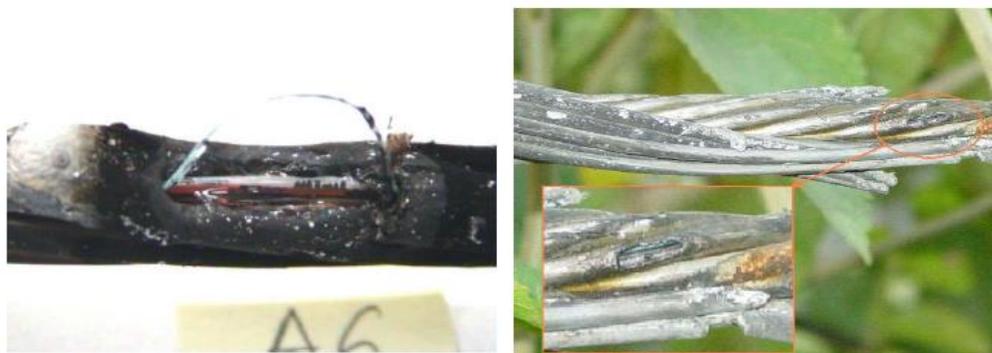


Fig. 5.1 Daños al CGFO por un rayo [13]

La Fig. 5.1 muestra los casos más críticos por daños al CGFO afectando a la fibra óptica y así mismo interrumpir la transmisión de datos.

5.3 Procedimiento de cálculo

Para determinar los efectos de las descargas atmosféricas sobre los sistemas eléctricos de potencia, es necesario considerar 2 aspectos:

- La densidad de rayos a tierra; es decir, ¿Cuántos rayos inciden en una cierta zona geográfica?
- El nivel cerámico, se refiere al número promedio de días con tormenta anual en un sitio.

La relación entre el nivel cerámico y la densidad de rayos a tierra está considerada por el siguiente modelo matemático:

Fórmula del CIGRE

$$N_g = (0.12 - 0.20)DT \quad (\text{ec. 5.1})$$

Fórmula del IEEE

$$N_g = 0.04 DT^{1.25} \quad (\text{ec. 5.2})$$

Donde:

$$N_g = \text{Número de rayos a tierra por } Km^2$$

$$DT = \text{Nivel cerámico}$$

Para las líneas de transmisión, la incidencia directa de las descargas atmosféricas es aproximadamente para un ancho de exposición. La expresión recomendada en las normas IEEE 1243 [14] es:

$$N = N_g \left(\frac{28h_t^{0.6} + b}{10} \right) \quad (\text{ec. 5.3})$$

Donde:

$$N = \text{Número de descargas (100 km/año)}$$

$$N_g = \text{Densidad de rayos (km}^2 \text{/año)}$$

$$h_t = \text{Altura del conductor en la torre (m)}$$

$$b = \text{Separación de los hilos de guarda (m)}$$

El número de veces que un rayo cae en el CGFO, será calculado sobre los reportes de falla y datos actuales de la línea de transmisión. El número de veces se decide con la altura del CGFO, se considera la distancia entre el CGFO y el cable a tierra convencional. Además, por conveniencia de análisis y cálculo la suposición de

que el CGFO y el cable de guarda compartan la misma probabilidad de la caída de un rayo es tomada en consideración.

5.3.1 Cálculo de la transferencia de carga (C)

Un dato tomado por un contador de flash de rayos muestra que el 95% de las descargas son negativos y sólo el 5% son positivos. A continuación se toma el modelo matemático de Berger [15] que involucra a la probabilidad de que una descarga sea (+) ó (-):

$$P(Q_-) = \frac{1}{1 + \left[\frac{Q_-}{7} \right]^{1.7}} \quad (\text{ec. 5.4})$$

$$P(Q_+) = \frac{1}{1 + \left[\frac{Q_+}{85} \right]^2} \quad (\text{ec. 5.5})$$

Si despejamos la transferencia de carga (Q) respectivamente en cada caso:

$$Q_{(-)} = (7)^{1.7} \sqrt[1.7]{\frac{1}{P(Q_-)} - 1} \quad (\text{ec. 5.6})$$

$$Q_{(+)} = (85)^2 \sqrt[2]{\frac{1}{P(Q_+)} - 1} \quad (\text{ec. 5.7})$$

Por lo tanto, mediante la expresión de la probabilidad de incidencia es posible calcular la cantidad de transferencia de carga (Q) de acuerdo a los años para los cuales fue proyectado el diseño de CGFO; es necesario conocer los parámetros actuales de cada línea de transmisión en estudio, así como las condiciones de sitio.

5.3.2 Datos y condiciones del estudio

Se analizará la LT Temascal II – Veracruz II 230 KV de la CFE [16], ubicada en el estado de Veracruz, México; con una longitud de 92 Km instalada en terreno plano. De acuerdo con los reportes internos de la CFE en dicha línea se han detectado 12 puntos dañados con 1 ó 2 hilos rotos durante un período de 2 años; derivado de lo anterior se optó por considerar ésta línea como candidata para dicho estudio.

Partiendo de la lista de distribución de la L.T. así como del perfil topográfico se eligió una torre y distancias promedio representativas de la línea, finalmente mostradas en la Fig. 5.2

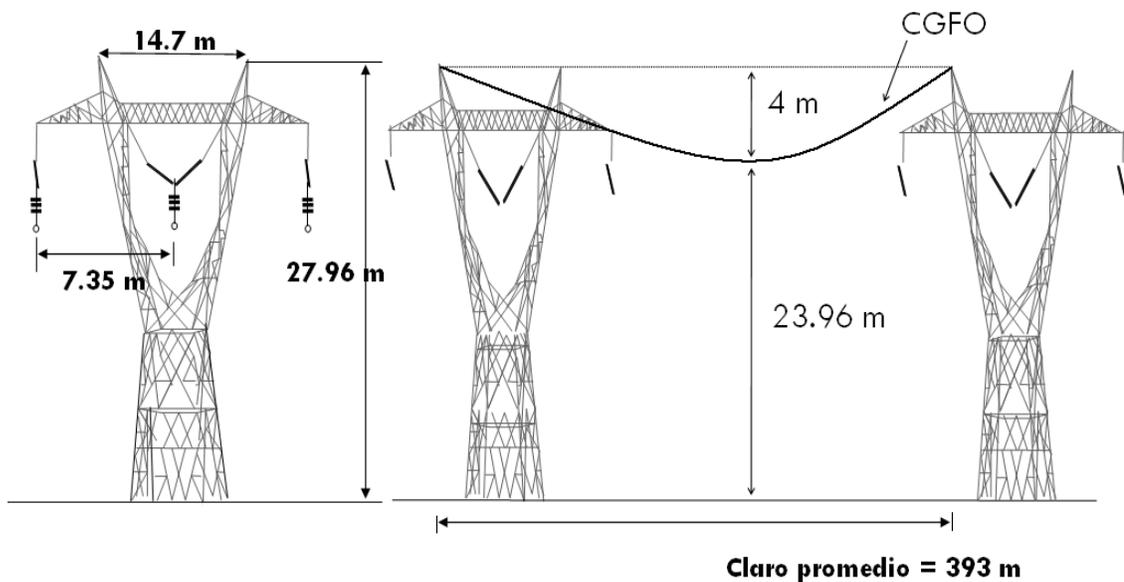


Fig. 5.2 Torre tipo 2B1+0+2 y distancias promedio de la LT [16]

Mediante un registro de isodensidad en la República Mexicana [17] realizado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas, se tienen los siguientes datos:

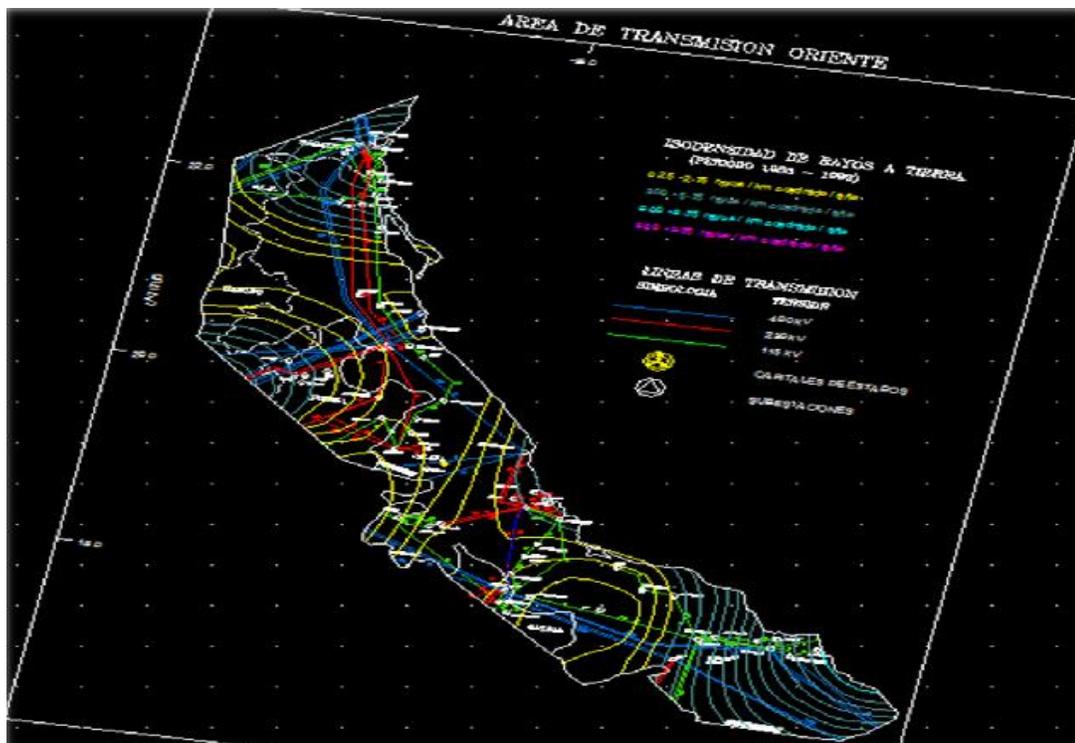


Fig. 5.3 Mapa isocerámico del área de transmisión oriente

Se hace un zoom de la Fig. 5.3 para ver la zona de interés, consideramos el nivel de isodensidad amarillo de 0.25 – 2.75 rayos por km²/año, tal como se muestra en la Fig. 5.4

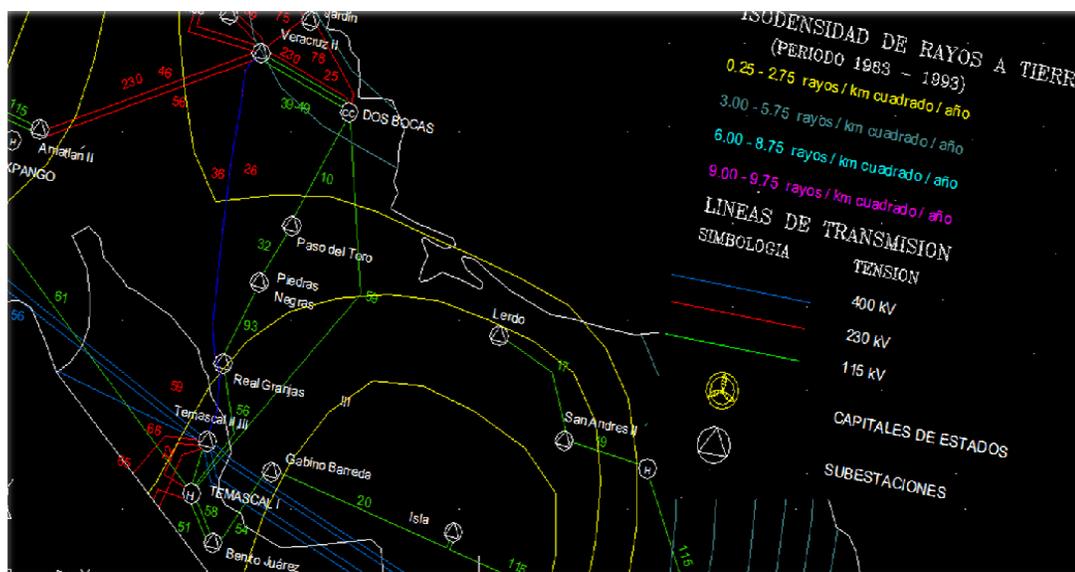


Fig. 5.4 Zoom del mapa isocerámico del área de transmisión oriente

De acuerdo con estudio realizado por parte del Sistema Eléctrico de Hydro-Québec en cual se tomaron casi un total de 34,000 muestras de cables dañados por el impacto de las descargas atmosféricas en una longitud de 90,000 km durante un período de 6 años, sólo 574 fueron conductores con alambres rotos [12]. Lo anterior arroja un índice de hilos rotos como se indica a continuación:

$$\text{Roturas de hilos} = \frac{\text{conductores con hilos rotos}}{(\text{longitud}) * (\text{años})} \quad (\text{ec. 5.8})$$

$$\text{Roturas de hilos} = \frac{574}{(90,000) * (6)} = 0.1 \text{ Roturas por cada } 100\text{km} \quad (\text{ec. 5.9})$$

La experiencia Japonesa dentro de un área con densidad de rayos a tierra con las mismas condiciones, es casi similar; es decir 0.08 roturas de hilos por año por cada 100 km [12]. Respecto a México, de acuerdo con los datos de la LT en estudio de la CFE se tendría:

$$\text{Roturas de hilos} = \frac{12}{(92) * (2)} = 0.06 \text{ Roturas por cada } 100\text{km} \quad (\text{ec. 5.10})$$

Lo anterior muestra un comportamiento similar respecto a los otros países. Considerando una media para el nivel de carga $Q_{(+)} = 85(\text{C})$ y $Q_{(-)} = 7(\text{C})$; aunado a lo anterior la CFE considera que el 98% de los impactos son negativos así como 10 años de proyección para el diseño del CGFO procedemos a calcular de ec. 5.3:

$$N = N_g \left(\frac{28 * h_t^{0.6} + b}{10} \right) = 2.75 \left(\frac{28 * (25.2933)^{0.6} + 14.7}{10} \right) = 57.5351 \text{ rayos}/100\text{km}/\text{año}$$

Donde:

- N = Número de descargas (100 km/año)
- N_g = Densidad de rayos ($\text{km}^2/\text{año}$)
- h_t = Altura promedio del conductor (CGFO) en la torre (m)
- b = Separación de los hilos de guarda (m)

Por diseño consideramos el extremo superior del nivel de densidad de rayos de acuerdo al mapa isoceráunico. La h_t se obtiene considerando que la línea está instalada en terreno plano:

$$h_t = h_g - \frac{2}{3} (h_g - h_{gw}) = 27.96 - \frac{2}{3} (27.96 - 23.96) = 22.6266 \text{ m} \quad (\text{ec. 5.11})$$

Donde:

h_t = Altura promedio del conductor (CGFO) en la torre (m)

h_g = Altura de la torre (m)

h_{gw} = Altura del claro promedio del CGFO (m)

Si consideramos que la longitud de la LT es de 92 km entonces corresponde un $N=52.9323$ rayos/100 km/año. Interpretando una tasa de incremento sobre una proyección de 10 años para el diseño y además que la probabilidad de que una descarga atmosférica incida en el CGFO o en el cable de guarda convencional es del 50%:

$$\text{Incremento de } Q = \frac{1}{(\text{No. rayos}) * (\text{años proyección})} = \frac{1}{(26.4661) * (10)} = 0.0037 \quad (\text{ec. 5.12})$$

Considerando el incremento obtenido sobre cada porcentaje de la polaridad del total de las descargas obtenemos de ec. 5.4 y ec. 5.5:

$$P(Q_-) = \frac{0.0037}{0.98} = 0.0038 \quad (\text{ec. 5.13})$$

$$P(Q_+) = \frac{0.0037}{0.02} = 0.1889 \quad (\text{ec. 5.14})$$

Ahora calculamos finalmente la transferencia de carga que deberá soportar el CGFO:

$$Q_{(-)} = (7)^{1.7} \sqrt{\frac{1}{P(Q_-)} - 1} = (7)^{1.7} \sqrt{\frac{1}{0.0038} - 1} = 183.6803 \text{ (C)} \quad (\text{ec. 5.15})$$

$$Q_{(+)} = (85)^2 \sqrt{\frac{1}{P(Q_+)} - 1} = (85)^2 \sqrt{\frac{1}{0.1889} - 1} = 176.1211 \text{ (C)} \quad (\text{ec. 5.16})$$

Es recomendable realizar una hoja de cálculo o emplear algún tipo de software dado que resulta ser más práctico y preciso por los decimales que se obtienen. A continuación en la tabla 5.1 se observa la variación de nivel de carga en función de los años de proyección.

Tabla 5.1 Resumen de la transferencia de carga Q en (C)

Años de proyección	Q (+)	Q (-)
1	N/A	46.42
2	20.58	70.61
3	65.17	89.98
4	89.84	106.78
5	109.07	121.89
6	125.38	135.8
7	139.8	148.77
8	152.87	160.99
9	164.9	172.59
10	183.68	176.12
15	233.33	223.92
20	263.17	276.46

5.4 Conclusiones del cálculo

De lo anterior se concluye que el nivel de carga requerido se ve influido directamente por varios parámetros como son: sitio de instalación (nivel isocerámico, tipo de terreno), condiciones de estructuras, vanos; así como los años para los cuales está proyectado el diseño del CGFO, cabe mencionar que una de las funciones de este tipo de cable es proporcionar protección a las fases de la LT, motivo por el cual es inevitable que no sufra daños sin embargo es posible lograr que dichos daños no sean causa de futuras fallas o pérdida de los enlaces en telecomunicaciones.

Una posible solución para líneas específicas como este caso sería reforzar las crucetas de las torres, lo anterior permitiría modificar las limitantes en peso y diámetro para un óptimo diseño del CGFO.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

6.1 Introducción

Las actividades de ésta tesis de maestría se basan en la actualización y consideración de las principales características del cable CGFO, apoyándose de normas y daños de eventos reales a causa de descargas atmosféricas que se reflejan como fallas en el sistema CGFO. Se propone un método de prueba alternativo en base a un daño equivalente para el CGFO, en base a la especificación de CFE E000-21-2009 y la metodología indicada en la norma IEC 60794-1-2; referente a la ruptura de hilos como una consecuencia de los altos niveles de transferencia de carga eléctrica que las descargas atmosféricas pueden inducir. La utilización del método implicaría ganancias para la CFE dado que las pruebas serían de certificación nacional, así como para el Laboratorio de Pruebas a Equipos y Materiales (LAPEM) dado que brindaría los servicios para la CFE y compañías privadas nacionales e internacionales.

6.2 Resultados obtenidos

Se han realizado numerosas investigaciones al tipo de polaridad de los rayos; con lo que respecta a esta tesis se comparte la conclusión de la experiencia brasileña concluyendo que los efectos de polaridad negativa en base al arreglo anteriormente mostrado es más dañina sobre el CGFO; dado que el daño se encuentra focalizado y el punto de concentración de carga se encuentra en el cable, en cambio en la polaridad positiva (entendiéndose como polaridad inversa) los daños son menores manifestándose de forma distribuida y teniendo una mayor concentración de carga en el electrodo. Lo anterior sirve como base para futuras consideraciones efectivas respecto a proyecciones de diseño y pruebas al CGFO.

En niveles de transferencia de carga mayor como son 150 C y 200 C la diferencia de los daños a partir del tipo de polaridad es mayor, derivado de lo anterior se hace énfasis en establecer el arreglo y la designación de la polaridad en los ensayos debido a que es un factor de referencia y afectación en los propios resultados. Para comprender mejor la causa del daño por los rayos en el CGFO, se estudiaron en el

capítulo 2 algunos parámetros importantes de un rayo, como el valor máximo de la corriente, la transferencia de carga y la duración de esta onda de corriente.

El conocimiento existente sobre la ruptura del hilo(s) del CGFO a causa del rayo aún no está universalmente definido, la ruptura del hilo(s) a causa del rayo está calculada sobre la descarga de energía del mismo. El método empleado para el cálculo de la transferencia de carga y los requerimientos de criterios están basados de acuerdo al estándar y las medidas de optimización de diseño de ingeniería; derivado de lo anterior es fundamental valorar la proyección de diseño.

6.3 Recomendaciones y proyecciones a futuro

Es verdad que muchas empresas le restan valor o importancia al aspecto de seguridad, pero es bien sabido que las pérdidas por la falta de seguridad pueden ser tremendamente caras, tanto en materia económica como en prestigio, en nivel de ventas, calidad de servicio, problemas legales, daños a empleados de la propia organización o a terceros es por ello que se recomienda, se solicite la garantía de contar con la tecnología de fabricación para garantizar que los hilos de la capa exterior sean preformados; lo anterior pensando en una posible ruptura de hilos no se destorchen particularmente en zonas con alto índice de rayos, de tal forma que sean causa para una falla entre CGFO y alguna de las fases; dado que el preformado cuenta con una memoria de retención tiende a regresar a su geometría inicial. Cabe mencionar respecto a este punto en casos de los ensayos en donde se presentaron hilos rotos, no hubo ningún destorche de hilos.

La principal causa de daños en el CGFO de las LT's se debe a la componente continua de la corriente de descarga. Estas son causadas por el sobrecalentamiento debido a la duración de este componente y la transferencia de carga eléctrica de alta; por lo que un trabajo de gran utilidad a futuro sería realizar un estudio similar como el propuesto en el capítulo 5 de esta tesis teniendo como objetivo actuar en toda la Red Eléctrica Nacional.

Referente al método de prueba de Arco de Potencia se espera tenga una buena aceptación y la aplicación por parte del Laboratorio de Pruebas a Equipos y Materiales (LAPEM) dado que es el órgano que emite las certificaciones en México de este tipo de pruebas y en cumplimiento de una serie de protocolos se procede a la homologación de los materiales. Se espera que la Traducción e Interpretación del Estándar IEEE 1138 para Pruebas y Desempeño para el Cable de Guarda con Fibras Ópticas (CGFO), en el Uso de Líneas de Transmisión Aéreas en el Sector Eléctrico [18] sea consultada en la versión castellana dado que es de gran apoyo para la consumación de criterios para las pruebas y diseño del cable.

Por último pero no menos importante es necesario considerar un tiempo de mantenimiento preventivo y no únicamente actuar en casos correctivos, lo anterior para proporcionarle un tiempo de vida útil más largo al sistema de cableado CGFO.

APÉNDICE A

IEEE Std. 1138 – 2009. Estándar IEEE para Pruebas y Funcionamiento del Cable de Guarda con Fibras Ópticas (CGFO) en el Uso de Líneas de Transmisión Aéreas del Sector Eléctrico. Traducción e interpretación 2010, Prysmian Cables y Sistemas S.A.¹

Esta norma considera los arreglos de funcionamiento tanto mecánico como eléctrico, los criterios de aceptación y los requisitos de los ensayos para el Cable de Guarda con Fibras Ópticas (CGFO), diseñado para ser instalado en líneas de transmisión aéreas.

1. Procedimiento para la medición y preparación de la fibra óptica

Para aumentar la sensibilidad ante los cambios en la atenuación, un número de fibras en cada muestra de ensayo serán empalmadas o concatenadas para formar un largo y continuo trayecto óptico. El número mínimo de fibras a empalmar para dar seguimiento a las pruebas aplicables, se muestran en la Tabla A1, siempre que sea posible, un número igual de fibras serán seleccionadas de cada unidad óptica.

Tabla A1 Número mínimo de fibras ópticas para la preparación de los ensayos

Número de fibras en el CGFO	Número mínimo de fibras para ser empalmadas y monitoreadas
1 a 24	Todas
25 a 48	24
49 a 96	36
97 a 192	48
193 a 384	60
385 a 768	72

Se instalará una fuente láser con la longitud de onda adecuada a un divisor óptico, el cual divide dos señales ópticas con la misma potencia nominal. Durante la prueba, el sistema de medición óptico (fuente, separador y receptor) se mantiene estable.

Durante los ensayos las lecturas de referencia y de los medidores de potencia óptica son controladas y registradas periódicamente en forma adecuada para su posterior análisis.

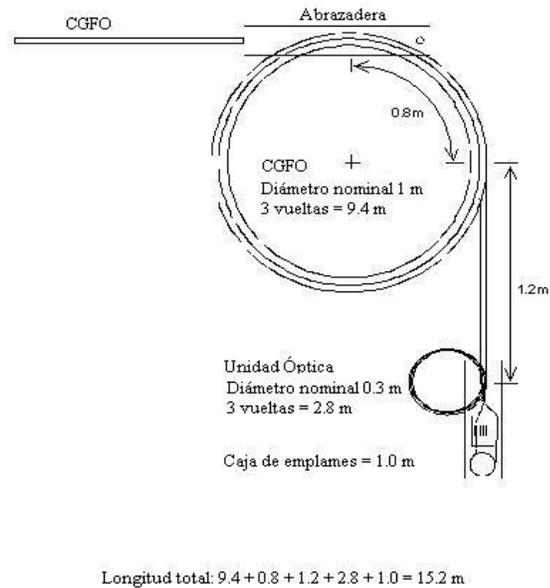


Figura A1 Arreglo de la preparación de la fibra para los ensayos

2. Ensayo de estiramiento (Creep)

El propósito de un ensayo de estiramiento es determinar las características de tensión de estirado en el CGFO a largo plazo. Esta información se utiliza para los cálculos de tensión-compresión durante el diseño de plantilla del CGFO.

Preparación

La preparación del ensayo se llevará de conformidad con la norma IEC 61395, a menos que se especifique lo contrario por parte del usuario y/o donde se indique en esta norma. La preparación de la muestra del CGFO será terminada cuando todos los componentes de carga del cable se encuentren fijos con el fin de prevenir movimientos relativos entre sí, en los puntos de carga. Un método recomendado es utilizar sujeciones con resina epóxica, para encapsular los componentes del cable en los puntos de carga.

La muestra del CGFO se instalará en un laboratorio adecuado para la prueba de estiramiento. La longitud de cable entre los puntos de carga de los conjuntos de sujeción será como mínimo 10 m. El cable será pretensionado mecánicamente a un máximo del 2% de la RTS. El cable no se mantendrá en el valor de la precarga por más de 5 min. Un transductor adecuado se utiliza para medir el alargamiento longitudinal del cable considerando una longitud de referencia de al menos 8 m. Se utilizará un medidor apropiado, como un elemento de carga o un dinamómetro para medir la tensión en el cable. La temperatura será medida en ambos extremos de la sección del cable. La prueba se llevará a cabo en un ambiente de temperatura controlada a $22\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$.

Procedimiento

El ensayo se realizará de conformidad con la norma IEC 61395 a menos que se especifique lo contrario por parte del usuario y/o donde se indique en esta norma. La tensión de ensayo será del 25% de la RTS del cable a menos que se especifique lo contrario por parte del usuario del cable.

El cable comienza a ser tensionado a un ritmo tal que el tiempo para llegar a la tensión de ensayo del $\pm 2\%$ de la RTS sea de $5\text{ min} \pm 10\text{ s}$. Se permite realizar ajustes finales para alcanzar la tensión de prueba, dentro de los 10 minutos desde el inicio de la carga. Sin embargo, la carga deberá permanecer dentro de $\pm 2\%$ de la tensión de prueba en todo momento mientras se hacen los ajustes finales. Se evitará tener repentinas cargas o descargas del cable durante la prueba. Se mantendrá en el cable la tensión de ensayo $\pm 1\%$ durante 1000 h. El alargamiento del cable y la tensión aplicada se controlan y registran durante el ensayo.

3. Ensayo de esfuerzo-deformación

El propósito de la prueba de esfuerzo-deformación es determinar las características de tensión-deformación y el módulo de elasticidad final (MOE) del CGFO. Esta información se utiliza para los cálculos de tensión-compresión durante el diseño de plantilla del CGFO.

Preparación

El ensayo se realizará de conformidad con la norma IEC 61089, a menos que se especifique lo contrario por parte del usuario y/o donde se indique en esta norma. La preparación de la muestra del CGFO será terminada cuando todos los componentes de carga del cable se encuentren fijos con el fin de prevenir movimientos relativos entre sí, en los puntos de carga. Un método recomendado es utilizar sujeciones con resina epóxica, para encapsular los componentes del cable en los puntos de carga. La muestra del CGFO se instalará en un laboratorio adecuado para la prueba de estiramiento. La longitud de cable entre los puntos de carga de los conjuntos de sujeción será como mínimo 10 m. El cable será pretensionado mecánicamente a un máximo del 2% de la RTS.

La muestra del CGFO se instalará en un laboratorio adecuado para la prueba de esfuerzo-deformación. La longitud de cable entre los puntos de carga de los conjuntos de sujeción será como mínimo 10 m. El cable es pretensionado mecánicamente a un máximo del 2% de la RTS y tendrá que estar soportado en toda su longitud, de tal manera que el cable no se levante a más de 10 mm en condiciones máximas de tensión. Un transductor adecuado se utiliza para medir el alargamiento del cable longitudinal con una longitud de referencia de al menos 8 m. Un medidor apropiado, como un elemento de carga o un dinamómetro se utiliza para medir la tensión en el cable. La prueba se llevará a cabo en un ambiente de temperatura controlada a $22\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Procedimiento

El ensayo se realizará de conformidad con la norma IEC 61089 a menos que se especifique lo contrario por parte del usuario de cable y/o donde se indique en esta norma. El cable se tensionará de acuerdo con el programa de carga de la siguiente tabla. Para reducir el estiramiento durante el tensionado, todas las cargas aplicadas se encuentran proporcionalmente distribuidas para alcanzar el 85% de la RTS en 2 min. Es necesario controlar y registrar el alargamiento del cable y la carga aplicada en intervalos mediante un sistema de registro de datos adecuado. Los datos se registrarán como mínimo cada 5 minutos durante cada período de retención y en todas las precargas. Son aceptables las lecturas más frecuentes y preferidas (Véase la tabla A.2).

Tabla A.2 Programa de la carga de tensión

Paso	Carga % RTS	Tiempo de duración (min)
Precarga	2	—
1	30	30
Precarga	2	< 2
2	50	60
Precarga	2	< 2
3	70	60
Precarga	2	< 2
4	85	60
Precarga	2	—

La pendiente de la curva de descarga final para 85% RTS es MOE final del cable. Es posible tensionar al término de la prueba de esfuerzo-deformación al cable probado, siempre y cuando así se acuerde entre el proveedor y el usuario, lo anterior con el propósito de obtener la resistencia a la rotura del cable. Si se lleva a cabo lo anterior, no se considera parte del ensayo de esfuerzo-deformación y por lo tanto las mediciones de la tensión en el cable no son necesarias. Si una prueba de resistencia a la rotura se realiza, la carga se aplicará a un ritmo tal que el tiempo para llegar a la RTS del cable sea al menos de 5 min. Una falla prematura del cable durante la prueba de resistencia a la rotura no invalida los datos obtenidos de la prueba de esfuerzo-deformación.

4. Ensayo del margen de deformación

El propósito de la prueba de margen de deformación, es determinar la tensión del cable y la tensión en las fibras ópticas cuando comienzan a alargarse. Esta información es de interés cuando el cable está expuesto a condiciones fuertes de hielo y viento.

Preparación

La preparación de la muestra del CGFO será terminada cuando todos los componentes de carga del cable se encuentren fijos con el fin de prevenir movimientos relativos entre sí, en los puntos de carga. Para las mediciones de atenuación óptica, el cable debe estar preparado de acuerdo al punto 6.2. El número

de fibras a empalmar se efectuará con arreglo al 6.2, menos el número que se usa para el alargamiento de la fibra.

Para la medición de la elongación en las fibras, al menos cuatro fibras se colocan juntas. La muestra del CGFO se instalará en una máquina de ensayo de tracción adecuada. La longitud del cable entre los puntos de carga de los conjuntos de sujeción será como mínimo 10 m. El cable será pretensionado mecánicamente a un máximo del 2% de la RTS. Estará soportado en toda su longitud de manera que el cable no se levantará más de 10 mm en las condiciones de tensión para la prueba. Se utiliza un transductor adecuado para medir el alargamiento en el cable con una longitud de referencia de al menos 8 m. Se emplea un medidor apropiado, como un elemento de carga o un dinamómetro para medir la tensión en el cable. La prueba se llevará a cabo en un ambiente de temperatura controlada a $22^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$.

Procedimiento

El cable será tensionará uniformemente para lograr el 100% de la RTS del cable en un tiempo de 20 a 30 min. Las lecturas de atenuación óptica y alargamiento de la fibra en el cable, deberán tomarse en intervalos periódicos durante la tensión aplicada. La carga será aumentada constantemente hasta que las fibras comiencen a alargarse. Los datos en los equipos se registrarán simultáneamente.

El margen de tensión se define como la carga del cable (tensión del cable) en la que las fibras se han alargado. La metodología para determinar el desempeño la tensión en la fibra se muestra en la norma IEC 60794-1-2, Método de E1.

Es posible tensionar al término de la prueba del margen de deformación al cable probado, siempre y cuando así se acuerde entre el proveedor y el usuario, lo anterior con el propósito de obtener la resistencia a la rotura del cable. Si se lleva a cabo lo anterior no se considera parte del ensayo del margen de deformación y por lo tanto las mediciones de la tensión en el cable no son necesarias. Si una prueba de resistencia a la rotura se realiza, la carga se aplicará a un ritmo tal que el tiempo para llegar a la RTS del cable sea al menos de 5 min. Una falla prematura del cable durante la prueba de resistencia a la rotura no invalida los datos obtenidos de la prueba del margen de deformación.

Criterios de aceptación

- a) El cable no deberá mostrar un incremento permanente en la atenuación óptica superior a 0.20 dB/km de fibra probada precargada a la tensión máxima de diseño (MRDT) para $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$ en fibras monomodo.

5. Ensayo de última resistencia de tensión a la ruptura

El propósito de la prueba verificar que la última resistencia de tensión real a la ruptura del CGFO cumple o supera la RTS especificada por el proveedor.

Preparación

La muestra del CGFO se instalará en una máquina adecuada para el ensayo. La longitud de cable entre los puntos de carga de los conjuntos de sujeción será como mínimo 10 m. Se utiliza un medidor apropiado, como un elemento de carga o un dinamómetro para medir la tensión en el cable.

Procedimiento

El cable será tensionado uniformemente, de tal manera que el tiempo para alcanzar la RTS del CGFO sea al menos 5 min. La última resistencia de tensión a la ruptura del cable, se define como la carga máxima que el cable puede soportar antes de fallar. Las fallas individuales de los hilos no constituyen necesariamente el rechazo del cable. Sin embargo, los hilos de la capa exterior no deberán fallar por debajo del 75% de la RST. Lo anterior es para asegurar que los hilos exteriores no se desliguen por debajo de la condiciones de carga máxima.

Este ensayo se puede realizar por separado o en el mismo cable de la muestra del ensayo de esfuerzo-deformación o bien, en el del margen de deformación; en este caso, la prueba de la última resistencia de tensión a la ruptura se llevará a cabo inmediatamente después de las pruebas anteriormente mencionadas.

Criterios de aceptación

- a) La última resistencia de tensión a la ruptura del CGFO tendrá que igualar o superar el 100% de la RTS del cable. Es considerado un rechazo, si cualquier hilo de la capa exterior falla en un nivel inferior al 75% de la RTS del cable. En caso de que la carga máxima aplicada no cumpla con el 100% de la RTS, la prueba deberá repetirse si ocurre lo siguiente:
- La ruptura se produce por debajo o dentro de 50 mm (2 pulgadas) entre los puntos de carga.
 - El CGFO se desliza en algún extremo de los puntos donde es aplicada la carga.

6. Ensayo de resistencia a la corriente directa (DC)

El propósito de la prueba de resistencia eléctrica es verificar que la resistencia real del CGFO a la corriente directa, no exceda la resistencia declarada por el fabricante.

Preparación y procedimiento

Se colocarán conectores de cobre en cada extremo de una muestra del CGFO de 5 m. Se conecta al cable una fuente de corriente calibrada de 10 A, utilizando pinzas tipo caimán. Se emplea una barra calibrada con una longitud de aproximada de 1 m, los bordes de las cuchillas estarán afilados con el fin de obtener una longitud de referencia precisa. No es necesario realizar mediciones ópticas en esta prueba.

La caída de potencial entre los bordes de las cuchillas se medirá con un micro-óhmetro y se mostrarán directamente como micro-ohmios. Las medidas de resistencia serán registradas cinco veces. La resistencia de DC por metro de cable, se calcula promediando las cinco mediciones individuales y dividiendo entre la longitud de referencia. Para minimizar el error debido al calentamiento, la corriente se inyectará a través del cable por solo unos segundos para obtener una lectura.

La temperatura en el momento de las pruebas deberá ser registrada. Si la temperatura del cable en el momento de la medición es menor que la especificada por

el fabricante del cable, entonces las mediciones de resistencia se corregirán a la temperatura especificada.

Criterios de aceptación

- a) La resistencia real a la corriente directa del CGFO, no será superior a la resistencia de DC declarada por el fabricante a la temperatura especificada.

7. Ensayo de paso por polea

El propósito de la prueba de paso por polea es someter al CGFO a una acción simulada de paso sobre una serie de poleas durante la instalación. La instalación incluye el tendido y las maniobras de tensionado.

Durante la instalación, es posible que el CGFO pueda llegar a ser excesivamente deformado. La unidad(s) óptica podría sufrir daños afectando negativamente el desempeño en las fibras ópticas.

Preparación

El arreglo general para la prueba de paso por polea se muestra en la Figura 4.2. Para las mediciones de atenuación óptica, el cable debe estar preparado según lo indicado en el punto 6.2. La longitud del CGFO entre los puntos de carga de los conjuntos de sujeción será como mínimo 8 m. La polea deberá estar apoyada rígidamente, de tal manera que no pueda balancearse. El diámetro de la polea no debe exceder el intervalo de 38 a 42 veces el diámetro del CGFO a menos que se especifique lo contrario. La polea puede ser con o sin ranuras y deberá ser revestida con un forro.

El cable se tensa inicialmente al $15\% \pm 1\%$ de la RST en un ángulo de desviación total de $30^\circ \pm 2^\circ$ entre la referencia y la polea. El método de fijación no está obligado a ser con un arreglo rígido, pero deberá limitar la torsión del cable que

ocurre cerca de los conjuntos de sujeción. Se utilizará un instrumento adecuado, como un dinamómetro o un elemento de carga para medir la tensión en el CGFO durante la prueba.

Procedimiento

Por lo menos 2.5 m de la muestra de cable deberá hacerse pasar 15 ciclos sobre la polea (es decir; 15 veces en cada sentido). Se ubicará y marcará el punto medio y los dos extremos con una longitud de 2.5 m antes de comenzar el ensayo. Un instrumento adecuado (por ejemplo: un calibrador o un micrómetro) se utiliza para medir el diámetro máximo y mínimo en las tres localidades; es decir, después de tensar, antes del primer ciclo y después del ciclo 15. Si es necesario, la tensión del cable puede ser ajustada entre los ciclos con el propósito de mantener el nivel de $15\% \pm 1\%$ de la RTS antes de cada ciclo.

La tensión del cable y las lecturas de las señales ópticas se registrarán al menos dos veces en cada ciclo, empleando un sistema de registro de datos adecuado.

Después de la prueba, la sección del cable que pasa sobre la polea se analiza y todos los componentes de cable se examinarán visualmente para detectar algún daño. El diámetro máximo y mínimo ($d_{\text{máx}}$ y $d_{\text{mín}}$ respectivamente) de la unidad (s) que contiene a las fibras se medirán en las mismas zonas en que se midió el diámetro del cable. Se calculará el porcentaje de ovalidad del cable y de la unidad (s) óptica después de la prueba mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Ovalidad} = ((d_{\text{máx}} - d_{\text{mín}}) / (d_{\text{máx}} + d_{\text{mín}})) * 100\% \quad (\text{ec. 4.2})$$

Criterios de aceptación

- a) Cualquier ovalidad del cable o de la unidad (s) óptica en las localidades medidas no deberá superar el 10%.
- b) Cualquier agrietamiento o rotura de alguno de los componentes del CGFO causado por la prueba estará constituyendo una falla. Esta evaluación se hace visualmente.

- c) Un incremento permanente en la atenuación óptica superior a 0.05 dB/fibra a 1550 nm \pm 20 nm para fibras monomodo es considerado como una falla.

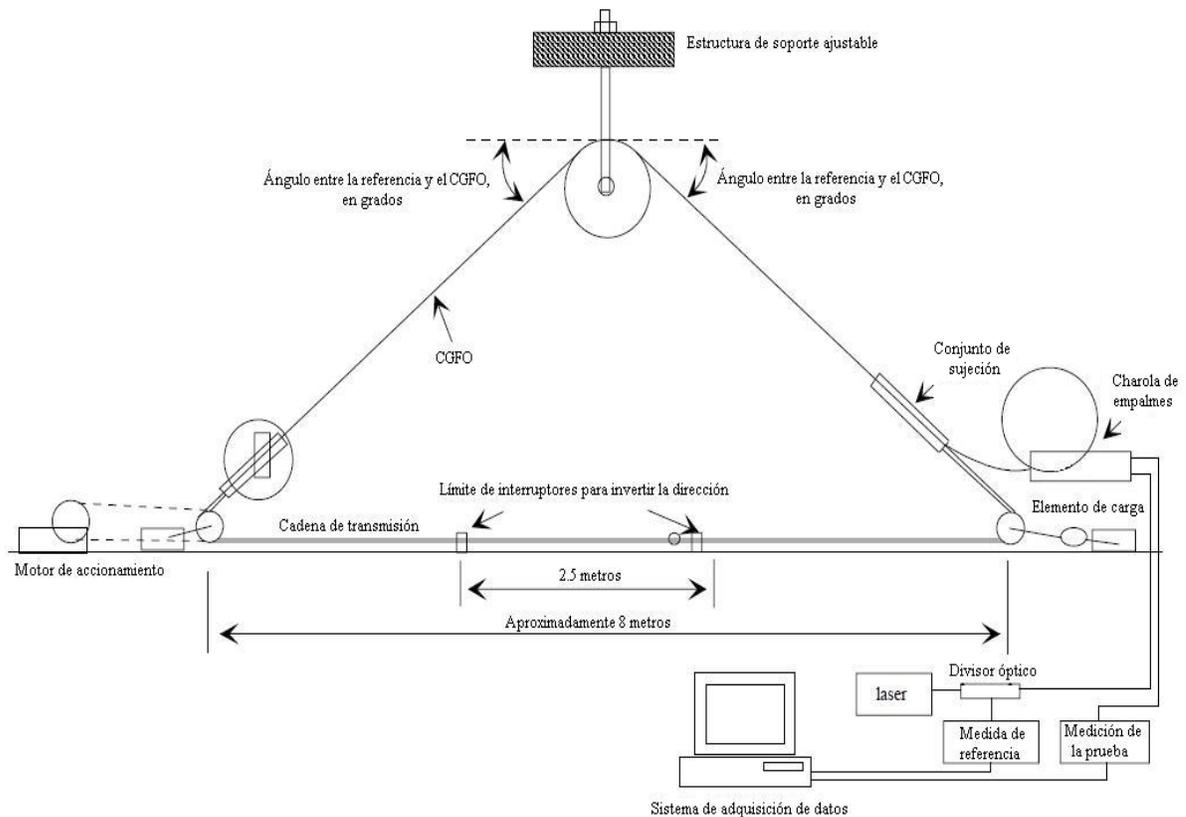


Figura A2 Arreglo general del ensayo de paso por polea

8. Ensayo de compresión

El propósito de la prueba de compresión es someter al CGFO para simular un aplastamiento o fuerzas de sujeción que podrían ocurrir durante la instalación y/o mantenimiento. El cable puede ser aplastado en medida que podría llegar a afectar a

Preparación

El arreglo del ensayo de compresión se muestra en la Figura 3. Una sección no probada de CGFO de la muestra preparada para la prueba de paso por polea, puede ser utilizada para el ensayo de compresión. El cable estará soportado entre dos placas de acero, la transferencia de la carga de compresión será uniforme en una longitud de 100 mm de la muestra. Los bordes de las placas serán ligeramente redondeados. El

cable y las placas se colocan en una máquina adecuada para el ensayo. La prueba se llevará a cabo en un laboratorio con temperatura controlada a $22\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se controlará y registrará la carga de aplastamiento y las lecturas de la señal óptica cada segundo por un sistema de registro de datos digitales.

Procedimiento

El cable se colocará entre las placas con una carga mínima, tal que el cable se encuentre perfectamente bien posicionado a lo largo de las placas de acero. La carga se irá incrementando gradualmente hasta el valor especificado por el proveedor en el lapso de 1 a 2 min. manteniéndose así durante 10 min. El ensayo se realizará en tres localidades con una distancia aproximada de 1 m entre cada una.

Se calculará el porcentaje de ovalidad del cable y de la unidad (s) óptica después de la prueba mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Ovalidad} = ((d_{\text{máx}} - d_{\text{mín}}) / (d_{\text{máx}} + d_{\text{mín}})) * 100\%$$

Criterios de aceptación

- a) Cualquier ovalidad del cable o de la unidad (s) óptica en las localidades medidas no deberá superar el 10%.
- b) Cualquier agrietamiento o rotura de alguno de los componentes del CGFO causado por la prueba estará constituyendo una falla. Esta evaluación se hace visualmente.
- c) Un incremento permanente en la atenuación óptica superior a 0.05 dB/fibra a $1550\text{ nm} \pm 20\text{ nm}$ para fibras monomodo es considerado como una falla.

Estos criterios se aplicarán a los tres puntos de prueba.

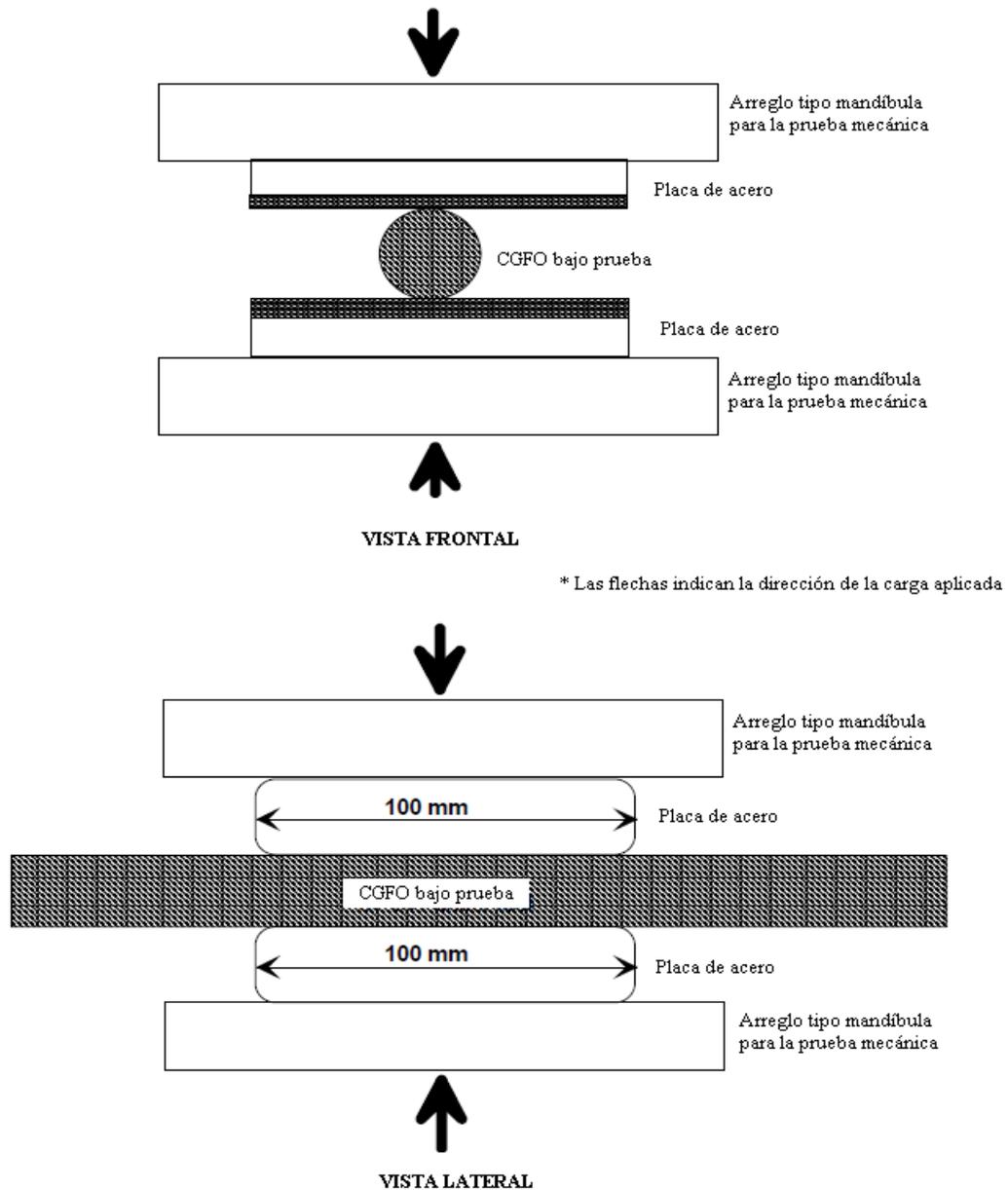


Figura A3 Arreglo general del ensayo de compresión

9. Ensayo de curvatura

El propósito del ensayo de curvatura es someter al CGFO a una acción de flexión similar a lo que podría presentarse durante la instalación. El cable y/o la unidad óptica podrían dañarse y por lo tanto afectar negativamente al desempeño óptico.

Procedimiento

El radio mínimo de curvatura especificado por el fabricante se utilizará para el arreglo del radio máximo de curvatura en la preparación de la prueba, a menos que sea acordado un valor más alto entre el proveedor y el usuario. La muestra del cable deberá enrollarse completamente dos veces en forma de hélice alrededor de un mandril con un radio no mayor que el mínimo radio de curvatura especificado por el fabricante. Se aplicará suficiente tensión para garantizar que la muestra se mantiene en estrecho contacto con el mandril. El cable se debe mantener en esta posición durante 1 minuto.

Es necesario establecer una referencia de medición óptica antes de la flexión. Otra lectura se registrará después de que el cable se enrolle alrededor del mandril y permanezca inmóvil. La diferencia entre las dos señales con respecto la medición óptica inicial proporciona el resultado del ensayo. El cambio en esta diferencia durante la prueba indica los cambios de la atenuación de la fibra en la prueba. Las señales se registrarán empleando un sistema de registro de datos digitales.

Criterios de aceptación

- a) El agrietamiento o rotura de cualquiera de los componentes del CGFO causado por la prueba estará constituyendo una falla. Esta evaluación se hace visualmente.
- b) No habrá incremento permanente en la atenuación óptica superior a 0.05 dB/fibra a $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$ para fibras monomodo se considera como rechazo.

10. Ensayo de torsión

El propósito del ensayo de torsión es someter al CGFO a una acción simulada de tirado durante la instalación (es decir, durante el tendido y tensionado). Derivado de lo anterior, el CGFO podría llegar a ser excesivamente deformado. La unidad(s) óptica también podría dañarse y afectar negativamente al desempeño óptico.

Preparación

Se instalará una muestra de CGFO en una máquina de tensión adecuada para realizar el ensayo. La longitud del cable entre los puntos de carga de los conjuntos de sujeción será como mínimo 10 m. Un conjunto de sujeción deberá estar conectado al dispositivo de tensión a través de un elemento de carga. El otro conjunto de sujeción se coloca en el extremo de la máquina de pruebas a través de un eslabón giratorio. La muestra de CGFO se fijará sobre sí mismo, a fin de permitir el movimiento de rotación sin afectar la disposición de empalme óptico.

La preparación de la muestra del CGFO será terminada cuando todos los componentes de carga del cable se encuentren fijos con el fin de prevenir movimientos relativos entre sí, en los puntos de carga. Para las mediciones de atenuación óptica, el cable debe estar preparado de acuerdo al punto 6.2.

Procedimiento

El cable se tensionará al 20% de la RTS. La muestra del cable deberá ser girada entre 1.5 y 2 vueltas, en el sentido de la disposición de los hilos. Este número de vueltas se calculará a partir de la longitud del cable de prueba con el fin de provocar un giro total en el cable de 90° por metro. La muestra del cable deberá ser girado a la posición inicial. El cable deberá girarse en sentido inverso para que sea extendido. La muestra deberá ser de nuevo invertida en dirección, para regresar la muestra de cable a su posición original. Esto constituye un ciclo de torsión y será repetido por segunda vez. Las mediciones de las señales de potencia óptica y de la tensión del cable, se llevarán a cabo continuamente cada 10 s usando un sistema de registro de datos digitales.

Criterios de aceptación

- a) El agrietamiento o rotura de cualquiera de los componentes del CGFO causado por la prueba estará constituyendo una falla. Esta evaluación se hace visualmente.
- b) Un incremento permanente en la atenuación óptica superior a 0.10 dB/km de fibra probada a $1550 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$ para fibras monomodo será considerado una como falla.

11. Ensayo de vibración eólica

El propósito del ensayo de vibración eólica es someter al CGFO y a los accesorios de soporte al amortiguamiento de vibraciones eólicas. Este tipo de vibración conductora es causada por el viento laminar a través del cable y es un fenómeno común en el campo. Los daños por fatiga pueden ocurrir en los componentes metálicos del cable o en las localidades de sujeción de los accesorios. Las señales ópticas también pueden verse afectadas negativamente en su desempeño por la vibración eólica.

Equipos para el ensayo

El CGFO deberá estar comprendido entre dos pilares intermedios. La longitud del vano de cable activo será de al menos 20 m. La longitud del vano de cable fijo será aproximadamente la mitad de la longitud de vano activo. Los extremos fijos de los pilares se utilizan para cargar y mantener la tensión en el CGFO. Los conjuntos de sujeción serán instalados entre los pilares intermedios. El conjunto de suspensión se apoya a una altura tal que el ángulo de flexión comprendido entre el cable del vano activo y la horizontal será de $1.5^\circ \pm 0.5^\circ$.

Un agitador controlado electrónicamente se utiliza para excitar al cable en el plano vertical. La estructura del agitador debe ser fijada firmemente al cable de modo que será perpendicular a la línea en el plano vertical, y es situado a una distancia adecuada para permitir un mínimo de cinco ciclos de vibración entre el conjunto de suspensión y el agitador. Se preparará el cable para las mediciones de atenuación.

Un micrómetro láser o cualquier otro medio adecuado se utiliza para medir la amplitud del lazo antinodo libre, y será medida a partir del conjunto de suspensión hacia el agitador. Se emplea un elemento de carga o un dinamómetro para medir la tensión del cable. Se destina un termopar para medir la temperatura del ambiente.

Se registrarán en intervalos periódicos con sistema de datos adecuado las señales de potencia óptica, amplitud pico a pico del lazo, frecuencia de vibración, número de ciclos, tensión del cable y la temperatura ambiente.

Procedimiento

El CGFO se tensionará al $25\% \pm 2\%$ de la RTS del cable y los ángulos externos del cable a partir del herraje de suspensión serán medidos. Esta tensión se aplica mediante un brazo de peso voladizo sobre uno de los pilares finales u otros medios adecuados.

La velocidad conducida del lazo libre (es decir, $f_{y_{m\acute{a}x}}$ = frecuencia pico a pico de vibración x de la amplitud en el lazo libre) se mantendrá a un valor promedio de al menos 275 mm/s pico para la duración de esta prueba. La frecuencia de oscilación será aproximadamente equivalente a la producida por una de 4.5 m/s de viento (es decir, frecuencia = 830 dividido entre el diámetro del CGFO en mm). La frecuencia de oscilación real deberá producir ondas estacionarias y una buena estabilidad del sistema. El propósito de la amplitud pico a pico del lazo libre, es ser aproximadamente una tercera parte del diámetro del cable. Este nivel de amplitud se mantendrá el segundo lazo a partir del conjunto de suspensión hacia el agitador. La frecuencia y la amplitud pueden variar ligeramente durante el ensayo, sin embargo, la velocidad promedio conducida en el lazo libre ($f_{y_{m\acute{a}x}}$) se mantendrá durante toda la prueba.

La amplitud del vano comprendido entre el conjunto de sujeción y el agitador, así como el vano pasivo no deberán exceder la amplitud del vano comprendido entre el agitador y el conjunto de suspensión.

Es necesario contar el número de vibraciones de los lazos y calcular las longitudes promedio para cada una de las tres secciones del CGFO. Las tres secciones son: (1) entre el conjunto de sujeción y el agitador, (2) entre el agitador y el conjunto de suspensión y (3) el vano pasivo comprendido entre los conjuntos de sujeción y suspensión respectivamente. El CGFO deberá ser sometido a 100 millones de ciclos de vibración. Las mediciones ópticas se efectuarán durante 15 minutos después de la finalización de los ciclos de las vibraciones.

Criterios de aceptación

- a) Cualquier fisura o rotura de cualquiera de los componentes del CGFO o de los accesorios de soporte constituye una falla. Esta evaluación se hace visualmente.
- b) Un incremento temporal o permanente en la atenuación óptica superior a 0.2 dB/km de fibra probada nominalmente a 1550 nm para fibras monomodo es considerado como una falla.

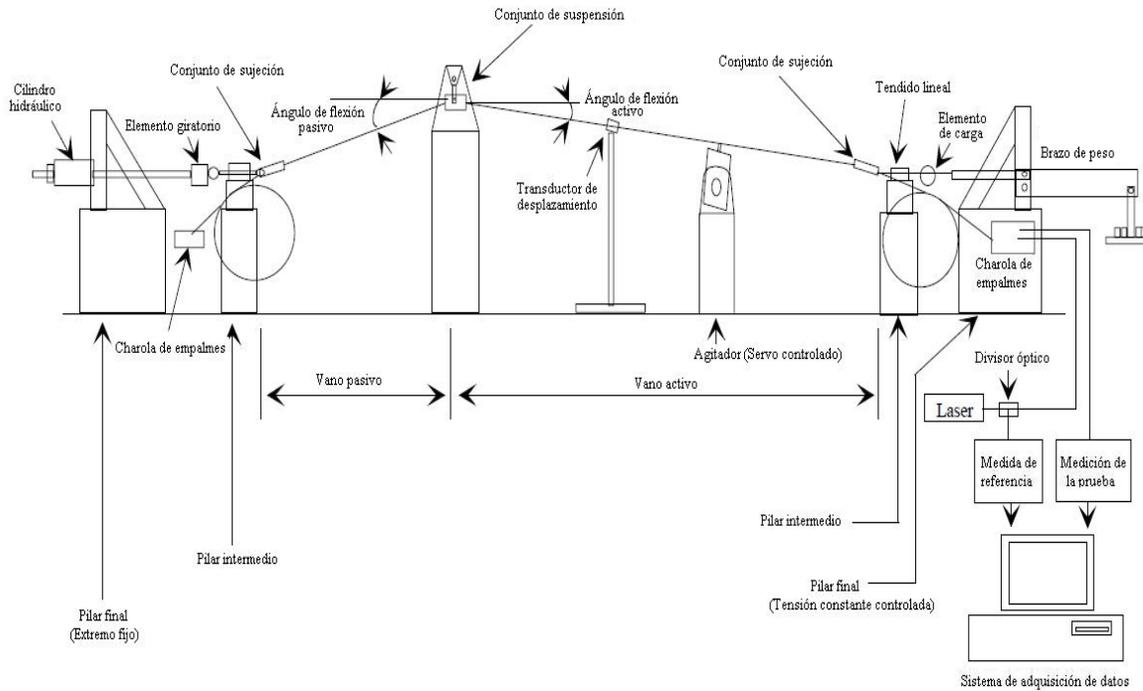


Figura A4 Arreglo general para el ensayo de vibración eólica

12. Ensayo de galopeo

El propósito del ensayo de galopeo es someter al CGFO y a los accesorios de soporte al movimiento de galopeo. Este tipo de movimiento en el conductor es causado por el viento a través de los cables con carga de hielo. Este fenómeno puede ocurrir en zonas que experimentan formación de cubiertas de hielo. La fatiga o cualquier otro daño se pueden llegar a producir en los componentes del cable, accesorios y/o en la estructura. Las señales ópticas también pueden verse afectadas negativamente en su desempeño por el galopeo.

Equipos para el ensayo

El CGFO deberá estar comprendido entre dos pilares intermedios. La longitud del vano de cable tanto activo como pasivo es aproximadamente 20 metros. El extremo fijo de los pilares se utilizará para cargar y mantener la tensión mecánica en el cable. La tensión inicial es aproximadamente del 2% de la RTS del cable. Esto se aplica mediante un brazo de peso voladizo u otros medios adecuados. Los conjuntos de sujeción serán instalados entre los pilares intermedios. El conjunto de suspensión se apoya a una altura tal que el ángulo de flexión comprendido entre el cable del vano activo y la horizontal sea de 1.5°. Se emplea un elemento de carga calibrado o un dinamómetro para medir la tensión en el cable.

Se utilizará un mecanismo adecuado (es decir, un accionamiento hidráulico o un motor de tracción) para hacer oscilar al cable en el plano vertical. El mecanismo se encuentra ubicado en el vano y conectado al cable para hacerlo oscilar con un movimiento constante entre el conjunto de suspensión y el agitador.

La amplitud del lazo será medida en las siguientes zonas: 1) vano activo, 2) un punto medio entre el conjunto de suspensión y de sujeción. Lo anterior se llevará a cabo mediante la observación de forma manual apoyando junto al cable una escala graduada. Se preparará el cable para las mediciones de atenuación y registrar en intervalos periódicos la amplitud pico a pico del lazo libre, frecuencia de galopeo, señales de potencia óptica, tensión y número de ciclos. Las lecturas, pueden ser registradas manualmente o mediante un sistema.

Procedimiento

Se tomarán las mediciones ópticas de referencia mientras el cable está en tensión y antes de comenzar la prueba. La diferencia entre la referencia y señales de prueba para la medición inicial, proporciona una base inicial en la lectura. El cambio en esta diferencia durante la prueba, indica el cambio en la atenuación de la fibra probada. El cable deberá someterse a 100 000 ciclos de galopeo en el modo de lazo simple. La frecuencia será ajustada de tal forma que el cable se presente estable ante los movimientos de galopeo del lazo en modo simple de la zona del vano activo. La amplitud pico a pico del lazo libre se mantendrá a un **veinticincoavo** (1/25) de la longitud del vano activo, para la duración de esta prueba. Se permiten movimientos

razonables por la sujeción y la suspensión con el fin de facilitar el constante movimiento de galopeo en el espacio activo. La amplitud de galopeo en el vano pasivo no deberá exceder la amplitud del vano activo.

Criterios de aceptación

- a) Cualquier fisura o rotura en alguno de los componentes del CGFO o de los accesorios de soporte es considerada como una falla. Esta evaluación se hace visualmente.
- b) Un incremento temporal o permanente en la atenuación óptica superior a 0.2 dB/km de fibra probada nominalmente a 1550 nm para fibras monomodo es considerado como una falla.

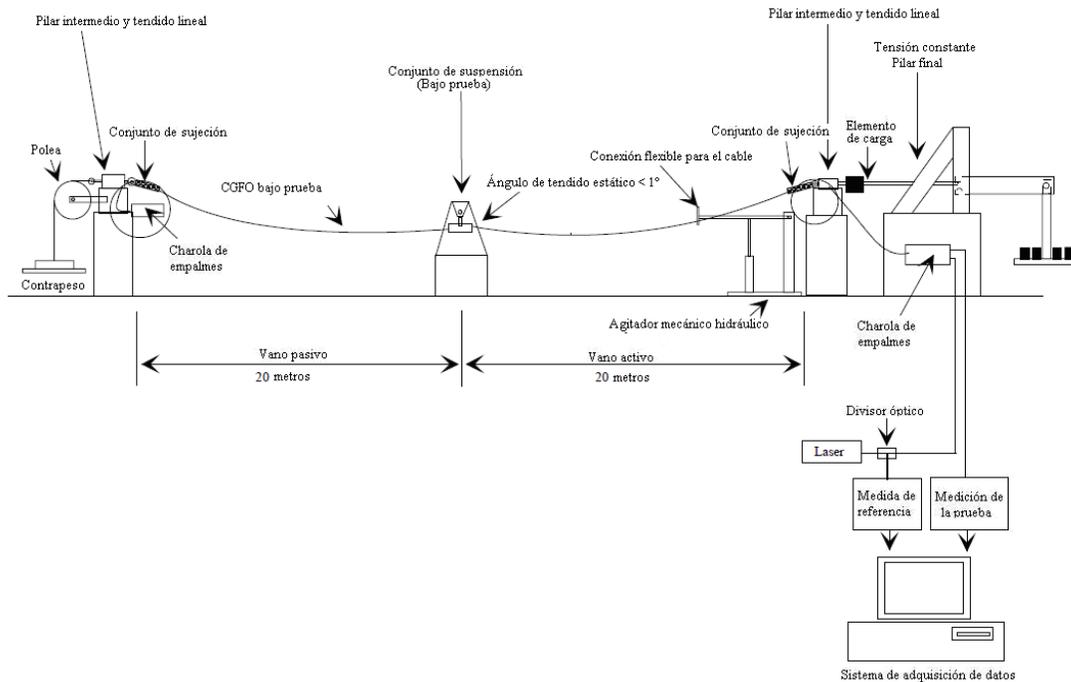


Figura A5 Arreglo general para el ensayo de galopeo

13. Prueba de cortocircuito

El propósito del ensayo de corto circuito es someter al CGFO a las condiciones de corto circuito que se presentan en el campo. El daño ocasionado puede ser manifestado en el trenzado del cable a través del fenómeno de jaula de pájaro o

canasteo (birdcaging), en la disminución de resistencia a la tensión mecánica, en la fusión o reblandecimiento de los componentes no metálicos por los efectos de las altas temperaturas. Las señales ópticas también pueden verse afectadas en su desempeño por las condiciones de corto-circuito.

Arreglo

Dos (2) muestras de CGFO se utilizarán para este ensayo, una muestra (A) es destinada para monitorear el desempeño en las fibras ópticas y para observar los daños físicos que puedan ocurrirle al cable durante el ensayo. La segunda muestra (B) se utiliza para medir la temperatura en la sección del cable. Si el ensayo se realiza a la intemperie las muestras tienen que colocarse de tal forma que los efectos del viento, radiación solar, etc. sean los mismos sobre las dos muestras de cable.

Los cables deberán estar conectados eléctricamente en serie y deben ser sometidos a la misma corriente de corto circuito, una baja circulación de corriente alterna (AC) debe usarse para mantener la temperatura de los cables y así medir la temperatura de la muestra en condiciones de corto circuito.

Muestra (A) destinada para efectos ópticos

Para las mediciones de atenuación óptica, la muestra debe prepararse de acuerdo a lo indicado en el punto 4.4.1. La longitud del cable entre los puntos de inyección de corriente será de al menos 10 m. Las fibras ópticas se concluirán en cada extremo de los puntos de sujeción. Se utilizará un medio adecuado para la tensionar al cable del 15% al 20% de la RTS cuando el cable está en la temperatura de referencia declarada por el fabricante. Un dispositivo apropiado, como un dinamómetro o un elemento de carga se utiliza para medir la tensión en esta muestra.

Muestra (B) destinada para efectos de temperatura

La temperatura en esta muestra será medida en tres puntos o más. Esto se logra normalmente utilizando termopares de respuesta rápida. Sin embargo, otras técnicas que proporcionen datos confiables y precisos se pueden emplear si están disponibles.

Si se utilizan termopares, deberán estar espaciados a una distancia de aproximadamente 1 m, a partir del punto medio de la muestra. Los termopares serán instalados en el cable con el fin de proporcionar la temperatura en los siguientes puntos de la muestra:

- a) Localizado donde se espera el incremento máximo de temperatura; lo anterior en función del diseño del CGFO, esto normalmente sería en las componente (s) de aluminio, tales como los alambres, un tubo de aluminio o el núcleo central ranurado, si aplica.
- b) Localizado en donde se espera el segundo incremento más alto de temperatura. Esto puede implicar a una componente de aluminio y una de acero o dos componentes de acero.
- c) Localizado dentro de la unidad óptica, lo anterior con la finalidad de medir la temperatura en las fibras ópticas.

Los termopares pueden ser "pellizcados" entre dos piezas adyacentes. Se reconoce que el termopar puede verse influenciado por los componentes de contacto con la unión para el arreglo del montaje. Los termopares deberán estar aislados de la instrumentación de otra índole, con el fin de impedir las interferencias eléctricas. Se utilizará un medio adecuado (es decir, tensores o un cilindro hidráulico) para la tensionar al cable, pero no es necesario registrar la lectura de la tensión.

Instrumentación y adquisición de datos

Se empleará un sistema de adquisición de datos adecuado para registrar cada aplicación de corto circuito o "pulso", las lecturas de potencia óptica (muestra A) y las lecturas en el termopar para la temperatura (muestra B). El aluminio, el acero y los componentes no metálicos del cable no alcanzarán sus temperaturas máximas respectivas en tiempos diferentes; normalmente la unidad óptica tendrá el tiempo más largo. Por esta razón, los datos se obtendrán durante un tiempo suficiente después de cada pulso a fin de registrar las temperaturas máximas de todos los componentes. Las temperaturas en los componentes metálicos pueden alcanzar sus máximos respectivos en menos de 1 s, motivo por el cual los datos de frecuencia de muestreo deberán ser lo suficientemente rápidos para capturar estos máximos.

Procedimiento

Los cables serán calentados a la temperatura de referencia especificada por el fabricante esto será verificado por la medición de temperatura más elevada sobre la muestra. Todos los termopares se mantendrán a una temperatura constante. Las señales ópticas se mantendrán estables durante al menos 15 minutos antes de proceder con la prueba.

En caso de realizar pulsos preliminares, estos no deben exceder el 50% del valor de corriente de corto circuito especificado por el proveedor y pueden ser aplicados en medida que el laboratorio considere adecuado para establecer los parámetros eléctricos apropiados. Estos pulsos preliminares no se consideran parte oficial de la prueba. Si es necesario, se permite que las señales ópticas se estabilicen después de los pulsos preliminares antes de proceder con la prueba oficial. Una vez estable, la diferencia entre los medidores de potencia se pone a cero, 5 minutos antes del primer pulso oficial ya es considerado el comienzo legal de la prueba. El cable será sometido a cinco (5) pulsos oficiales. Para estos pulsos, los valores máximos y mínimos de los parámetros eléctricos se muestran en la Tabla A3:

Tabla A3 Parámetros eléctricos

Parámetro	Observación
Falla I^2t	El valor mínimo de kA^2/s será especificado por el proveedor.
Duración de la falla	Se considera igual que la protección primaria de operación del interruptor, si se conoce, de lo contrario se tomará como máximo 0.5 s (30 ciclos).

El cable debe ser enfriado hasta la temperatura de referencia especificada después de cada pulso, de acuerdo a la lectura más alta del termopar. El cable debe llegar a la temperatura de referencia por lo menos 5 minutos entre cada pulso. Para cada pulso, la corriente de falla y la duración puede variar ligeramente de los valores especificados. El objetivo es lograr llegar al nivel de I^2t para cada pulso; para reconocer las maniobras prácticas en la prueba, se considera que el promedio de los cinco pulsos deberá superar el mínimo nivel de I^2t especificada por el proveedor. Sin embargo, un sólo pulso no deberá ser inferior al 95% del mínimo nivel de I^2t .

La muestra A destinada para fines ópticos, será examinada visualmente con el propósito de identificar el efecto de canasteo (birdcaging) u otros daños durante toda la prueba. Debido a que los componentes del cable puede ser deformados cuando los termopares son instalados (entre los alambres y el tubo contenedor), las observaciones realizadas sobre la temperatura de la muestra A no se consideran oficiales. Después del pulso final, los datos ópticos y de temperatura seguirán siendo tomados por lo menos 15 minutos después de que el termopar con la lectura más elevada ha vuelto a la temperatura de referencia. Las lecturas y observaciones finales tanto ópticas como de temperatura, serán tomadas en ese momento. Esto indica el final oficial de la prueba de corto circuito.

Las muestras del CGFO serán examinadas después de la prueba. Se deberá prestar atención particularmente a las secciones del cable más cercanas a los extremos de sujeción, y en el punto medio del vano. Cada componente que integra al cable será separada e inspeccionada para verificar el desgaste, decoloración, deformación y otros signos de descomposición.

Criterios de aceptación

- a) Cualquier fisura o rotura en alguno de los componentes de la muestra A, constituye una falla. Esta evaluación se hace visualmente.
- b) No deberá presentarse el efecto de canasteo (birdcaging) en cualquiera de los alambres de la muestra A, destinada para fines ópticos. El efecto de canasteo o jaula de pájaro (birdcaging), se define como una apertura permanente de los hilos de la corona, mayor al diámetro de dichos hilos y en referencia a la geometría normal del cable. Para que se considere que un hilo presenta canasteo, deberá verse traspasado un haz luz entre el alambre separado y el cable. Esta observación se realizará después de que el cable se ha enfriado a la temperatura de referencia después del último pulso. El efecto temporal de canasteo durante los pulsos no constituyen una falla.
- c) No habrá incremento permanente en la atenuación óptica superior a 0.05 dB/km de fibra probada nominalmente a 1550 nm \pm 20 nm para fibras monomodo.

- d) Si se especificó la temperatura máxima de cualquier componente metálico, no deberá verse excedida respecto a los valores indicados por el fabricante en cualquier momento durante el ensayo; además, la temperatura del núcleo óptico no será superior a 180 °C en cualquier momento durante el ensayo. Temperaturas superiores pueden ser convenidas entre el fabricante y el usuario.
- e) Cualquier desgaste excesivo, decoloración, deformación u otros signos de avería constituirán una falla.

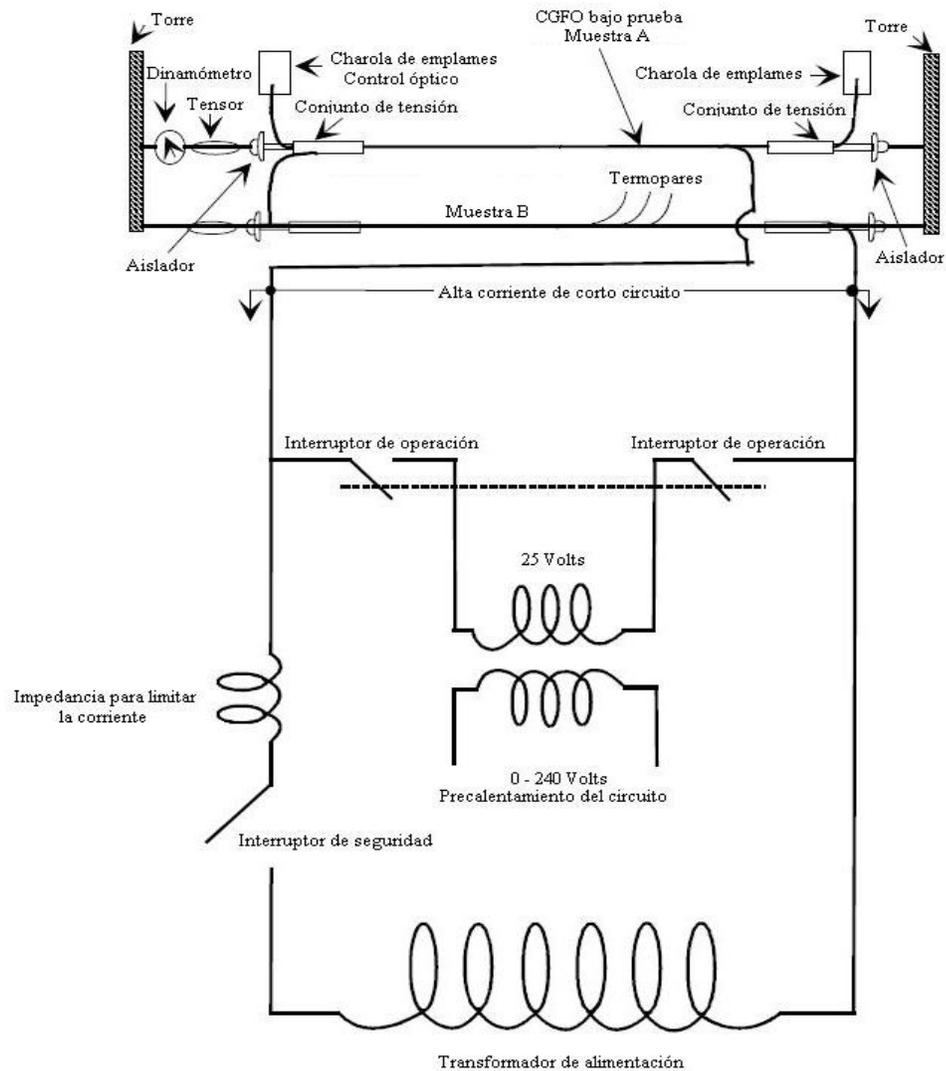


Figura A6 Circuito eléctrico y arreglo general para el ensayo de corto circuito

14. Ensayo de arco de potencia

El propósito del ensayo de arco de potencia es someter al CGFO a las condiciones de descarga atmosférica que se presentan en el campo. Los daños ocurridos se observan en la corona exterior de los alambres del cable, consecuentemente en la pérdida de tensión mecánica como resultado de los daños en los alambres debido a temperaturas extremadamente altas. Las señales ópticas también pueden llegar a ser afectadas por las condiciones del arco de potencia.

Preparación

La preparación para la prueba de arco de potencia será de conformidad con la norma IEC 60794-1-2, Método H2, a menos que se especifique lo contrario por parte del usuario y lo indicado en esta norma.

Arreglo

Una muestra de CGFO será instalada entre dos puntos de tensión. La longitud del cable entre los puntos de carga de los conjuntos de sujeción será mayor a 10 m. Se utilizará un elemento de carga o un dinamómetro para medir la tensión en el cable.

Red Óptica

Para las mediciones de atenuación óptica, la muestra deberá estar preparada según lo establecido en el punto 4.4.1. La atenuación óptica será monitoreada y grabada por un sistema de registro de datos digitales a una velocidad de muestreo adecuada. La tensión se puede registrar de forma manual.

Procedimiento

El ensayo se realizará de conformidad con la norma IEC 60794-1-2, Método H2, a menos que se especifique lo contrario por parte del usuario y lo indicado en esta norma. Cinco (5) secciones de la muestra del cable serán probadas por separado según la siguiente tabla. La clase del CGFO será convenida entre el usuario y el fabricante.

	Clase 0	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Corriente (A)	100	200	300	400
Duración (s)	0.5	0.5	0.5	0.5
Transferencia de carga (C)	50	100	150	200

Cada sección del cable se tensionará del 15% al 20% de la RTS. Un arco de corriente con polaridad negativa en el electrodo, será aplicado al cable a través de un filamento delgado de 5 cm \pm 1 cm de largo. Un filamento delgado puede ser utilizado para iniciar el arco hacia el cable. La transferencia de carga al cable debe estar especificada por el fabricante. La tolerancia para el nivel de transferencia de la carga es de \pm 10%. Una carga que excede 110% del valor especificado puede también puede ser aceptable.

Después de la prueba de arco de potencia, las secciones de la muestra del cable serán tensionadas mecánicamente para determinar la fuerza residual. En caso de existir hilos rotos, registrar el número y tipo (aluminio, ACS) de los alambres que hayan sido dañados. Para propósitos informativos, el cable y sus componentes deberán ser inspeccionados y los cambios en los materiales serán documentados.

Criterios de aceptación

- a) No habrá incremento permanente en la atenuación óptica superior a 0.05 dB/fibra nominalmente a 1550 nm \pm 20 nm para fibras monomodo.
- b) La tensión mecánica residual mínima en cualquiera de las secciones probadas del cable será mayor al 75% de la RTS.

15. Ensayo de penetración de agua

El propósito del ensayo de penetración de agua es determinar si la cantidad de compuesto para el bloqueo de líquido en el CGFO es suficiente y uniformemente distribuido para impedir la penetración de agua a través de la unidad óptica. Esta prueba sólo es aplicable para los diseños de cable que utilizan un compuesto para el bloqueo de agua dentro de la unidad óptica. El ingreso de agua en la unidad óptica puede perjudicar el funcionamiento en las fibras ópticas.

Preparación

La prueba de penetración de agua en el CGFO usando compuesto de bloqueo al agua, se basa en la más reciente revisión de la norma EIA/TIA-455-82-B, excepto que la segunda prueba de longitud, si aplica, deberá ser de 1 m en lugar de 3 m.

Deberá prepararse una sección de 1 m de CGFO para este ensayo. Todos los componentes del cable deberán ser retirados del compuesto bloqueador de la unidad que aloja a las fibras ópticas.

La unidad óptica con el compuesto bloqueador se colocará horizontalmente con uno de sus extremos conectado a un tubo contenedor de una columna de agua con una altura por lo menos de 1 m utilizando un ajuste adecuado. Comúnmente se utiliza para este propósito un tubo de plástico transparente. En ningún momento el compuesto bloqueador estará por encima de la unidad óptica.

El montaje del arreglo no obstaculizará la entrada de agua en la unidad óptica. Un platillo de colección o los medios equivalentes para detectar el agua, estarán colocados debajo del extremo abierto de la unidad óptica con el fin de detectar el agua que pueda penetrarse a través de él. No es necesario realizar mediciones ópticas para esta prueba.

Procedimiento

El depósito o tubo se llena de agua, tal que, la altura por encima de la unidad óptica sea por lo menos de 1 m. El agua se mantendrá en ese nivel durante al menos 1 hora. Durante y al concluir el período de 1 hora, el extremo abierto de la unidad óptica será controlado visualmente con la finalidad de detectar alguna penetración de agua.

Criterios de aceptación

- a) No deberán presentarse fugas de agua a través del extremo abierto de la muestra de 1 m. Si la primera muestra falla, una muestra adicional de 1 m,

tomada de una sección del CGFO inmediatamente adyacente a la primera muestra, podrá ser probada nuevamente.

16. Ensayo del flujo de relleno

El propósito del ensayo del flujo de relleno es determinar si el compuesto bloqueador de líquido en el CGFO es vulnerable al interactuar con temperaturas elevadas. Esta prueba sólo es aplicable para los diseños de cable que utilizan un compuesto de bloqueo a los líquidos. El impacto negativo del escurrimiento del relleno puede llegar a acumularse dentro de la caja de empalme.

Preparación

El ensayo se realizará de conformidad con la norma TIA/EIA-455-81-B, excepto que el ciclo de preacondicionamiento opcional, puede ser utilizado tal como se describe en el punto 5.1.1.2.1 de la norma IEEE Std. 1138-1994 [B39].

Deberán ser preparadas cinco muestras de CGFO, con una longitud total de 30.0 ± 0.5 cm cada una. Todos los hilos metálicos son cortados $13.0 \text{ cm} \pm 0.25$ cm de un extremo para exponer el relleno bloqueador de la unidad (s) óptica. Los extremos de la muestra no serán bloqueados ni sellados. Las muestras se suspenden verticalmente de una estructura de soporte. Se colocarán pequeños y ligeros platillos directamente por debajo de cada muestra con la finalidad de depositar el compuesto de relleno que pueda llegar a gotear de la unidad óptica. Las muestras serán blindadas de cualquier circulación de aire en un compartimiento. La temperatura en dicho compartimiento será medida con un termopar colocado cerca de la estructura de soporte que contiene a las muestras. No es necesario realizar mediciones ópticas para esta prueba.

Procedimiento

El compartimiento deberá ser precalentado por lo menos a una temperatura de 65 °C. Los cinco platillos de almacenamiento se pesan y registran utilizando una

escala con una precisión de al menos ± 0.001 g. Se colocarán en el compartimiento la estructura de soporte con las muestras.

Después de un período de 1 hora de preacondicionamiento, las muestras se retiran de la cámara y los platos son pesados y registrados. Los platos y las muestras son colocados nuevamente en el compartimiento; después de 23 horas adicionales (24 horas en total) las muestras son retiradas, los platos se pesan y registran nuevamente. Las variaciones en el peso de $\pm 0,001$ g, no se consideran debido a las fugas del relleno.

Criterio de aceptación

- a) El relleno y las fugas de compuesto no fluirán (pérdidas o goteo) a 65 °C.

17. Ensayo de ciclos de temperatura

El propósito del ensayo es someter al CGFO a temperaturas extremas que pueden ser experimentadas en campo.

Preparación

Se colocará una muestra con un mínimo de 500 m de fibra (fibra empalmada) en una cámara térmica adecuada. Para las mediciones de atenuación óptica, se preparará la muestra según lo dispuesto en el punto 4.4.1. Se utilizarán dos termopares para medir la temperatura en la cámara térmica, colocándolos sobre una muestra de CGFO de 25 cm en cualquiera de los lados del carrete del cable.

Procedimiento

El ensayo se realizará de conformidad con TIA/EIA-455-3. Se someterá el cable a dos ciclos térmicos. Un ciclo térmico comienza en la temperatura de la cámara a partir de $22\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$, bajando por lo menos a -40 °C con una exposición mínima de 16 horas. En el siguiente ciclo térmico, la temperatura se incrementará por lo menos a 85 °C y se mantendrá durante un tiempo mínimo de 16 horas. Para completar los ciclos la temperatura debe ser regresar a 20 °C . Todas las transiciones

de temperatura se realizarán a una velocidad de 20 °C a 40 °C por hora. La temperatura de la cámara térmica se basa en el promedio de los dos termopares situados en la muestra de cable de 25 cm.

Se registrarán las lecturas de los termopares y los datos ópticos como mínimo al inicio y al final de la prueba, y al principio y al final de cada período de retención.

Criterios de aceptación

- a) Un incremento temporal o permanente en la atenuación óptica superior a 0.2 dB/km de fibra probada nominalmente a 1550 nm \pm 20 nm para fibras monomodo, constituye una falla.

18. Prueba de corrosión de niebla salina

El propósito de este ensayo es someter al CGFO a la corrosión por niebla salina que puede ser experimentada por el cable en campo.

Preparación

Esta prueba se realizará dentro de una cámara de niebla salina por 1000 horas. Se prepararán tres muestras del cable de 75 cm \pm 5 cm cada una. Una tubería de contracción al calor o un sello de silicón se coloca sobre ambos extremos del cable a una distancia no superior a 7.5 cm \pm 0.5 cm en cada extremo de las muestras del cable; lo anterior con la finalidad de reducir o eliminar la corrosión que ocurre en los extremos abiertos de la muestra.

Procedimiento

Las muestras del CGFO se colocan dentro de una cámara de rociado de una sal estándar, tal como es definido en la norma ISO 9227:2006 [B40] o ASTM B 117 [B3]. Las muestras de cable se colocarán de forma horizontal en la cámara salina, con la intención de simular un modelo del CGFO horizontalmente suspendido. Para los ensayos de niebla salina, las pruebas correrán continuamente por 1000 horas.

Criterios de aceptación

Al final de la prueba, los cables deberán ser retirados de la cámara salina y examinados para detectar los daños debidos a la corrosión. Los cables han pasado la prueba si:

- a) No existen zonas en los hilos de acero recubiertos de aluminio, que se hayan dañado manifestándose como picaduras, exponiendo la resistencia de las componentes subyacentes de acero en cualquier instante.
- b) No existen zonas en los conductores de aluminio sólido que se hayan visto marcadas en forma de hoyos con una profundidad total mayor al 10% del diámetro individual de los alambres en el punto del daño.
- c) No existen daños en la tubería interna que contiene a las fibras ópticas.
- d) En el caso de tubo de aluminio recubierto, no se permite el desprendimiento de la capa de aluminio que cubre al tubo de acero inoxidable.
- e) En el caso de "otros" tubos recubiertos, no se permite la eliminación de la capa que externa de los elementos subyacentes.

APÉNDICE B

PUBLICACIONES

- N. Contreras, M. Peña. “*Ahorro de Energía*” Revista Dimensión de la Sociedad Mexicana de Ingenieros, SMI 2005.
- N. Contreras, “*Optimización en el Proceso de Instalación del Cable CGFO y otros Cables*”. Reunión de Verano de Potencia RVP-AI 2009, Acapulco.
- F. Poy, N. Contreras “*Taller teórico práctico empalmes y mediciones de fibra óptica en cable CGFO y otros cables*”. Reunión de Verano de Potencia RVP-AI 2009, Acapulco.
- N. Contreras, “*Evaluación de la Confiabilidad del Sistema OPGW en el Sector Eléctrico Nacional*” Primer Congreso de Alumnos de Posgrado 2011, Universidad Nacional Autónoma de México.
- N. Contreras, R. Lorenzo, F. Poy “*Evaluation of the Reliability of OPGW System in the Electricity Sector Mexican against Lightning*”. Paper ID: 1754989, 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2011, Italy and 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2011 Canada.
- N. Contreras, R. Lorenzo, F. Poy “*Evaluation of the Reliability of OPGW System in the Electricity Sector Mexican against Lightning*”. Manuscript ID: Spectrum-12-04-00023. (En espera de confirmación para ser impreso).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C.T.R. Wilson. *Investigations on lightning discharges and on the electrical field of thunderstorms*, Philosophical Tr., Royal Society, 1920
- [2] Shell J. *Cloud Types: common cloud classifications*. Department of Atmospheric Sciences (DAS) at the University of Illinois at Urbana-Champaign. University of Illinois, 2010
- [3] H. Torres. *El Rayo, mitos, leyendas, ciencia y tecnología*. UNIBIBLOS, Bogotá 2002, 410p. ISBN 958-701-213-5
- [4] Vladimir A. Rakov. *Lightning. Physics and effects*, University of Florida. Martin A. Uman, University of Florida. Hardback. Ed. 2003
- [5] MIL STD – 1757A, *Lightning Qualification Test Techniques for Aerospace Vehicles and Hardware*, 1983.
- [6] M. Brook, N. Kitagawa, *Radiation from Lightning Discharges in the Frequency Range 400 to 1000 Mc/s*, JGR, V69, 2431-34 (1964).
- [7] <http://www.textoscientificos.com/redes/fibraoptica/propiedades-tranmision>
- [8] Unión Internacional de Telecomunicaciones. *Serie g: sistemas y medios de transmisión, sistemas y redes digitales. Características de los medios de transmisión – cables de fibra óptica*, Rev. 2003
- [9] Especificación CFE E0000-21-2010. *Cable de Guarda con Fibras Ópticas y Accesorios*. Comisión Federal de Electricidad, Rev. 2010
- [10] IEC Std. 60794-1-2. *Optical Fiber Cables: Part 1-2, Generic Specification – Basic Optical Cable Test Procedures*, Rev. 2003
- [11] IEEE Std 1138-2009, *IEEE Standard for Testing and Performance for Optical Ground Wire (OPGW) for Use on Electric Utility Power Lines*.
- [12] William A. Chisholm, Jody P. Levine, Craig J. Pon, Marco Jusevicius. *Progress in Protecting Power Systems Against Impulse Charge and Continuing Current Effects of Lightning Flashes*. IX International Symposium on Lightning Protection, 2007 Brazil.
- [13] J. Martín. *Efectos del Lightning sobre OPGW según la Norma IEC 60794-1-2*. Prysmian Cables y Sistemas, S.L. 18/12/08

- [14] IEEE Std. 1243-1997. *Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines*.
- [15] William A. Chisholm, Jody P. Levine. *Lighting Arc Damage to Optical Fiber Ground Wires (OPGW). Parameters and Test Methods IEEE 2001*
- [16] *Archivo bibliográfico de la LT Temascal II – Veracruz II 230 KV de la Comisión Federal de Electricidad (CFE)*.
- [17] *Archivo bibliográfico de isodensidad en la Republica Mexicana 2009*. Instituto de Investigaciones Eléctricas – Comisión Federal de Electricidad.
- [18] Nancy Contreras. *Estándar IEEE 1138-2009 para Pruebas y Desempeño del Cable de Guarda con Fibras Ópticas (CGFO), en el Uso de Líneas de Transmisión en el Área del Sector Eléctrico*. Traducción e Interpretación 2010
- [19] E. Castillo. *Ficha técnica de OPGW 36E45s PRYSMIAN, 27/08/09*