

Dirección Área de Conocimiento Industria y Producción

“ Método simplificado de análisis del comportamiento de una línea de distribución primaria 7.6/13.2 kV ante la incidencia de una descarga atmosférica.”

Trabajo monográfico para optar al título de Ingeniero Eléctrico

Elaborado por:

**Br. Cristobal Cruz
Ramos.**

Carnet: 2019-1011S

**Br. William Miguel
Flores Silva.**

Carnet: 2019-1013S,

**Ing. Carlos Abraham
Pérez Méndez**

**Febrero 2026
Managua, Nicaragua**

Resumen

En el desarrollo de esta investigación brindamos algunos aportes para mejorar la protección ante sobretensiones atmosféricas en las líneas de distribución primaria 7.6/13.2 kV que inciden en los transformadores monofásicos de distribución conectados a líneas de distribución aérea, causando la falta de continuidad del suministro de la energía eléctrica a los usuarios finales.

También abordamos el análisis de desempeño de las líneas de distribución en media tensión 7.6/13.2 kV frente a las descargas provocadas por rayos bajo los criterios de la IEEE 1410-2010 y presentamos la curva de incidencia de descarga atmosférica sobre la línea de distribución y su efecto destructivo que causa flameo en los aisladores de la línea.

Hemos determinado la tasa de flameo de una línea de distribución eléctrica de media tensión en función de actividad atmosférica de caída de rayos para el municipio de Managua.

A la presente tesis contiene adjunta un disco CD-ROM, con archivos digitales que competen a este trabajo.

Índice

Introducción	1
Antecedentes	4
Justificación	5
Objetivos	6
Objetivo General:	6
Objetivos específicos:	6
I. Marco Teórico.....	7
CAPÍTULO I. Desempeño de las líneas eléctricas de distribución en media tensión 7.6 kV/13.2 kV, frente al impacto de las descargas atmosféricas.	11
1.1 Generalidades.....	11
1.2 Impedancia Característica de la línea.	13
1.3 Forma de Onda de Tensión.....	18
CAPÍTULO II. Tasa de flameo de las líneas eléctricas de distribución en media tensión 7.6 kV/13.2 kV, frente al impacto de las descargas atmosféricas, en la zona del municipio de Managua.	21
2.1 Mapa Isoceráunico mundial.	21
2.2 Efecto de la altura de las estructuras y tasa de descarga atmosférica.....	22
CAPÍTULO III. Análisis del desempeño de las líneas de distribución de en media tensión 7.6 kV/13.2 kV, frente al impacto de las descargas atmosféricas provocadas por rayo, bajo los criterios de la norma IEEE 1410-2010, en el municipio de Managua.	24
3.1 Alcances de la Norma.	24
3.2 Parámetros de incidencia de calidad del servicio eléctrico de redes de distribución de media tensión 7.6/13.2 kV de Nicaragua.....	24

3.3 Estadística de Indicadores de calidad del servicio eléctrico de redes de distribución de media tensión 7.6/13.2 kV de Nicaragua.....	25
3.4 Comportamiento de las redes de distribución de media tensión 7.6/13.2 kV de Nicaragua, ante el fenómeno de flameo por incidencia de descarga atmosférica.....	26
3.5 Nivel de tensión de flameo de aisladores instalados en las redes de distribución de media tensión 7.6/13.2 kV de Nicaragua.....	28
3.6 Modelo matemático de la descarga atmosférica que impacta en las redes de distribución de media tensión 7.6/13.2 kV.....	30
CAPÍTULO IV. Propuesta de alternativas de mejora ante la incidencia de descargas atmosféricas de las líneas de distribución de media tensión 7.6/13.2 kV en Nicaragua, tomando en cuenta la norma IEEE Std 1410-2010.....	33
CAPÍTULO V. El uso de contrapeso para mejora de las líneas de distribución de media tensión 7.6/13.2 kV contra descargas atmosféricas.....	35
CAPÍTULO VI. Identificación de parámetros característicos de las descargas atmosféricas en el municipio de Managua.	37
Conclusiones y Recomendaciones.....	40
Conclusiones	40
Recomendaciones.....	41
Bibliografía	42
ANEXO	44

Índice de Figuras

Figura 1	2
Figura 2 Clasificación de rayos	7
Figura 3	14
Figura 4	15
Figura 5	15
Figura 6	17
Figura 7	18
Figura 8	19
Figura 9	21
Figura 10	29
Figura 11	29
Figura 12	32

Índice de Tablas

Tabla 1	16
Tabla 2	26
Tabla 3	31
Tabla 4	39

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino, por darme la sabiduría necesaria para afrontar los desafíos y la perseverancia para alcanzar este logro tan importante.

A mis padres, por su amor incondicional, sacrificio y apoyo constante, quienes con sus enseñanzas y ejemplo me mostraron el valor del esfuerzo, la disciplina y la fe.

A mi familia, por acompañarme con aliento y paciencia en los momentos más exigentes de esta etapa académica.

A mis amigos y compañeros de carrera, por compartir conmigo jornadas de estudio, aprendizajes y experiencias que enriquecieron no solo mi formación profesional, sino también mi vida personal.

A mis docentes y mentores, por su dedicación, entrega y compromiso en la formación de ingenieros íntegros, capaces de contribuir al desarrollo de nuestra sociedad.

A mi alma máter, por abrirme las puertas al conocimiento, a la investigación y al crecimiento profesional, brindándome las herramientas necesarias para servir con responsabilidad como futuro ingeniero eléctrico.

Este trabajo es el reflejo de todos aquellos que creyeron en mí, y a cada uno de ustedes dedico con gratitud este logro.

Introducción

La descarga atmosférica es un fenómeno natural que siempre ha llamado la atención de la humanidad según data en registros históricos. Durante las distintas épocas, se han generado aportes en busca de entender este fenómeno que coexiste y es parte de la existencia planetaria. Según la teoría de Urey, los rayos contribuyen con la energía necesaria para la generación de los aminoácidos, los cuales componen las proteínas, mismas que a su vez son la base de la vida. Por otro lado, según la teoría de Wilson, los rayos son generadores de tensión que mantienen la diferencia de potencial entre la tierra y la Ionosfera, situación indispensable para mantener el equilibrio eléctrico global; otras teorías presentan a los rayos como fijadores de nitrógeno en la tierra, elemento indispensable para la vida de las plantas. Teorías recientes aún en estudio afirman que, los rayos también son productores de Ozono, siendo este un aspecto favorable para la vida sobre el planeta tierra (Washington, 2024). Sin embargo, los rayos también son fuentes de corriente con alto poder destructivo que ponen en riesgo la vida de personas y animales, dado que son capaces también de producir incendios forestales, destrucción de estructuras y construcciones, generar sobretensiones en redes de electricidad y telecomunicaciones, etc. El científico David Romps, en el año 2014 indicó que existe un incremento del 12% en la cantidad de rayos por cada grado centígrado de calentamiento global del aire y estima que para finales del siglo XXI la cantidad de rayos que impacten la tierra se incrementará en un 50%. Usualmente las líneas de distribución en media tensión que dan servicio de electricidad al sector residencial por medio de transformadores se ven afectadas con sobretensiones producidas por descargas de rayos que impactan ya sea directamente sobre la línea o en lugares cercanos a la misma. La importancia de analizar el comportamiento de una línea de distribución primaria de media tensión en 7.6/13.2 kV, ante la incidencia de una descarga atmosférica es mitigar el impacto negativo y destructivo que pueden causar la sobretensión asociadas a las descargas atmosféricas, sobre todo en los transformadores de distribución conectados a lo largo de las líneas eléctricas, a fin de evitar que se superen los niveles de aislamiento estándar del transformador.

En el caso de Nicaragua existen redes de distribución primaria eléctricas en los niveles de tensión urbano en 7.6/13.2 kV y a nivel rural en 14.4/24.9 kV. En cuando los indicadores estadísticos de incidencias de descargas atmosféricas en líneas de distribución, no se cuenta con información sobre este indicador, de manera general sólo se llevan estadísticas de los indicadores de calidad del servicio de la frecuencia media de interrupción por kVA instalado (FMik) y del indicador del tiempo total de interrupción por kVA instalado (TTik).

Los indicadores técnicos de continuidad del servicio eléctrico **FMIK** y **TTIK** están definidos en la Normativa de Calidad del Servicio conforme al artículo **NCS 1.1.4**, asociados a la continuidad del servicio eléctrico, y corresponden a:

- Frecuencia Media de Interrupción (**FMIK**): Para un periodo determinado, representa la cantidad de veces que el KVA promedio sufrió una interrupción de servicio.
- Tiempo total de interrupción (**TTIK**): Para un periodo determinado, representa el tiempo total en que el KVA promedio no tuvo servicio (INE, 2025).

Figura 1

Datos Estadísticos Indicadores de Calidad del servicio

DISNORTE	FMIK	TTIK
Urbano	4.1	7
Rural	15	27
DISSUR	FMik	TTik
Urbano	4.1	7
Rural	15	27

Fuente: https://www.ine.gob.ni/?page_id=122532

Las líneas de distribución en media tensión ya sean en 7.6/13.2 kV o 14.4/24.9 kV, son una parte fundamental y físicamente un eslabón en la cadena de abastecimiento del suministro de la energía eléctrica, desde las fuentes de generación de la energía, las líneas de transmisión y el cliente final. Es de suma importancia mantener la confiabilidad en las líneas independientemente de las condiciones ambientales del sector por el cual atraviesan las mismas. El estudio y coordinación del aislamiento en líneas de distribución en media tensión

es de mucha importancia para el correcto funcionamiento del sistema y cumplir con los requerimientos de la demanda de la energía y el suministro continuo y confiable al cliente final.

Antecedentes

Ya que no se cuentan en Nicaragua con datos estadísticos específicos de los recuentos de fallas por descargas atmosféricas que impactan en la operación de las redes de distribución del país, no sabemos a ciencia cierta cual es la incidencia que estos tienen y cuantas averías de transformadores están asociadas a las sobretensiones de las descargas atmosféricas, las cuales producen daños en el aislamiento, transformadores de distribución en postes, equipos de maniobras y otros daños y la interrupción del servicio a los usuarios finales.

De forma particular mencionamos que no existe ninguna referencia de estudio previo a este tema de investigación en Nicaragua, pero si a nivel centroamericano e internacional.

En cuando a las estadísticas de niveles de descarga por incidencia de rayos en nuestro país tampoco tenemos un mapa indicativo por área geográfica y todos los estudios asociados a descargas atmosféricas se basan en el mapa internacional de la NASA.(National Aeronautics and Space Administration).

Un tema asociado a la protección de descargas atmosféricas tiene que ver con la coordinación de aislamiento de las líneas de distribución.

La coordinación de aislamiento consiste en la selección de un conjunto de tensiones soportadas normalizadas para caracterizar el aislamiento de equipos, en función de las sobretensiones que podrían aparecer en el sistema, teniendo en cuenta las condiciones ambientales y las características de los dispositivos de protección disponibles (Medellin, 2025). En cuanto a este tema hemos revisado las normas de construcción para redes eléctricas de Nicaragua, de las empresas distribuidoras de electricidad, DISNORTE y DISSUR, pero no hacen referencia al tema de coordinación de aislamiento de redes de distribución, sólo aspectos eléctricos y mecánicos de las líneas eléctricas.

Justificación

Como ya lo mencionamos en la introducción y los antecedentes, la incidencia de una descarga atmosférica en una línea de distribución eléctrica causa sobretensiones destructivas en los transformadores de distribución conectados a lo largo de las líneas eléctricas, al exceder los niveles de aislamiento estándar del transformador, más la interrupción del servicio eléctrico a los usuarios finales.

Mediante esta propuesta de investigación, queremos aportar con algunas recomendaciones para mejorar la protección ante sobretensiones atmosféricas en las líneas de distribución primaria 7.6/13.2 kV que inciden en los transformadores monofásicos de distribución conectados a líneas de distribución aérea, causando la falta de continuidad del suministro de la energía eléctrica a los usuarios finales,

Para el estudio y análisis de la presente investigación nos basaremos en la guía de diseño de la IEEE Std 1410-2010 “Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines” (Researche, s.f.).

Objetivos

Objetivo General:

- Investigar a nivel teórico el desempeño de las líneas de distribución de media tensión 7.6/13.2 kV frente a las descargas atmosféricas que impactan directamente la línea, la influencia de campos eléctricos generados por impactos indirectos y las técnicas de diseño utilizadas para mejorar el desempeño.

Objetivos específicos:

- 1) Calcular la tasa de flameo en función de los parámetros del rayo, la línea y la actividad atmosférica de la zona de incidencia(caso del municipio del Managua).
- 2) Realizar la evaluación del desempeño de las líneas de distribución en media tensión 7.6/13.2 kV frente a las descargas provocadas por rayos bajo los criterios de la IEEE 1410-2010.
- 3) Realizar la propuesta de alternativas de mejoras ante la incidencia de descargas atmosféricas de las líneas de distribución primaria de media tensión 7.6/13.2 kV, tomando como referencia la norma IEEE Std 1410-2010
- 4) Investigar la técnica de uso de contrapeso para la mejora de la puesta a tierra y mejorar el desempeño a los rayos.
- 5) Identificar los parámetros característicos de las descargas atmosféricas en el municipio de Managua.

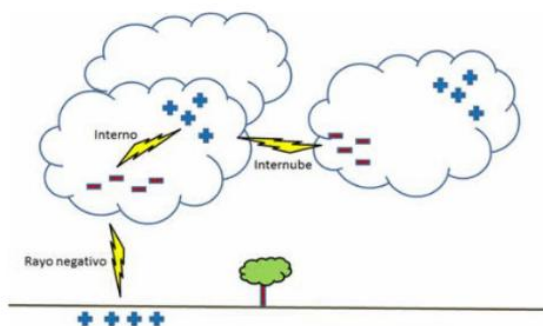
I. Marco Teórico

En este apartado vamos a detallar los conceptos y bases teóricas vinculadas a las descargas atmosféricas.

El aire no es un aislante perfecto, dado que su resistencia dieléctrica es de aproximadamente 30 kV/cm, cuando se alcanza cierto nivel de tensión eléctrica entre dos puntos inevitablemente se producirá una chispa (tamaño familiar, a la que llamamos rayo) (Edu, 2024).

Dependiendo de la carga, los rayos se clasifican en negativos (electrones o iones con carga negativa) y positivos (iones con carga positiva) según su origen (Fig. 2) tenemos los rayos internos (dentro de la nube), internube (de nube a nube), nube a tierra (80% de los rayos producidos y por ende los que nos interesan a nosotros) y de tierra a nube. A pesar de la poca duración que tienen (microsegundos), tienen un potencial destructor increíble ya que hablamos de una corriente típica de 30 kA, hasta casos donde se han registrado 300 kA, de allí que tengamos que proteger nuestras instalaciones y a nosotros mismos.

Figura 2
Clasificación de rayos



Fuente:

https://www.academia.edu/9600500/Diseno_de_sistema_de_proteccion_contra_descarga_electrica

Nivel Básico de Aislamiento (NBA): también conocido como Basic Insulation Level (BIL) en inglés, es un valor que indica la capacidad de un equipo eléctrico para soportar sobretensiones de tipo impulso, como las causadas por rayos o maniobras. Es esencial para la coordinación de aislamiento en sistemas eléctricos y asegura que los equipos puedan soportar las tensiones impuestas por los fenómenos externos (Rosario, 2025).

Voltaje de flameo de impulso crítico, VFIC (CFO) (aisladores): El valor cresta de la onda de impulso que, bajo condiciones especificadas, causa flameo a través del medio que lo rodea en el 50% de las aplicaciones (EPN, 2023).

Descarga directa: Una descarga directa tipo rayo a cualquier parte de la red o instalación eléctrica.

Línea de distribución: Líneas de energía eléctrica que distribuyen energía desde una subestación de suministro principal a los usuarios, generalmente a tensiones de 34.5 kV o menos.

Densidad de descargas tipo rayo a tierra, DRT (GFD) (Ng): El número promedio de descargas tipo rayo por unidad de área por unidad de tiempo en una ubicación particular.

DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Las descargas atmosféricas son un fenómeno natural muy poderoso, causado por la separación de cargas eléctricas positivas y negativas tanto entre nubes, como entre nubes y tierra. Para la formación de las descargas atmosféricas, una de las principales teorías reconoce la acción del viento que tienen sobre las partículas de agua que caen creando electrostática.

La carga eléctrica se forma al separar estas fuertes corrientes de aire en partículas ionizadas. Las cargas más comunes son las negativas hasta un 90% de los rayos detectados. A medida que incrementa la carga se comienza la ionización del aire y es así, que se van formando caminos para conducir la carga hacia el punto con potencial cero que es la tierra. Las descargas atmosféricas es una de las principales causas de fallas en líneas de distribución aérea, estas fallas causan interrupciones momentáneas o permanentes en los circuitos de distribución. La preocupación de la calidad de energía ha creado más interés en el estudio del comportamiento

de los rayos para aplicar medidas de protección contra rayos en las líneas de distribución como una forma de reducir las interrupciones, sobrevoltajes, etc.

Resulta difícil controlarlas o predecirlas, la duración de la descarga, su polaridad, su intensidad y otras características, sólo pueden definirse en el momento en el cual ocurre, este fenómeno es generado por la diferencia de potencial entre las nubes y tierra, produciendo una descarga eléctrica, se estima que el 80% de las descargas tienen una magnitud mayor a 20kA, y con picos de magnitud de 200kA. Estos fenómenos generan tensiones unos 200 millones de voltios en el suelo. La duración del evento es de aproximadamente 100 microsegundos. La descarga atmosférica produce un pulso electromagnético que es acompañado por la emisión de luz (relámpago) causada por el paso de corriente eléctrica que ioniza las moléculas del aire. Seguida por el sonido característico del trueno que se produce por la onda de choque de la corriente eléctrica que pasa a través de la atmósfera, calienta y expande rápidamente el aire.

Las descargas tipo rayo pueden causar flameos por:

A. Descargas directas

B. Tensiones inducidas por descargas cercanas.

Descargas directas sobre líneas de distribución de energía generan flameo del aislamiento en la mayoría de los casos. Por ejemplo, un rayo tan pequeño como de 10 kA podría producir una sobretensión de cerca de 2000 kV.

Muchas de las tensiones inducidas por rayos en líneas de distribución que terminan cerca de la línea son inferiores a 300 kV. Los rayos pueden ser colectados por objetos muy altos, de tal modo que la altura y la distancia de la línea de distribución a puntos de resguardo tales como árboles y edificios tendrá influencia en el comportamiento de la línea a las descargas tipo rayo.

La descarga atmosférica o rayo se origina cuando un gradiente eléctrico excede el aislamiento del aire, provocando una migración de cargas en la dirección a tierra, pero esas cargas pueden ser positivas o negativas y depende de la carga predominante quien define la polaridad de la descarga. Una descarga de una nube con cargas positivas en dirección a tierra

es llamado rayo con polaridad positiva. Una descarga de una nube con cargas negativas en dirección a tierra es llamado rayo con polaridad negativa.

Hay tres tipos de descargas atmosféricas, dentro de las nubes, entre nubes y de nube a tierra, las más comunes son las descargas dentro de las nubes, pero nos interesan las descargas a tierra, debido a que estas son las que afectan las líneas de distribución y transmisión eléctrica.

Para estimar la confiabilidad de una línea de distribución se toma en cuenta que tan expuesta está a las descargas atmosféricas, para este propósito se calcula la densidad de descargas a tierra (N_g) y la cantidad de impactos a tierra por km por año.

El nivel isoceráunico (El nivel isoceraúnico de un lugar es el número promedio de días del año en los que hay tormenta.) se mide por medio de la observación particular en la que simplemente se determinaba si en un día se había escuchado alguna descarga atmosférica en cada región. La densidad de rayos a tierra, es medida mediante los localizadores terrestres de rayos y representa con mayor exactitud la actividad de rayos en cada zona particular. El número de descargas atmosféricas que inciden en las zonas de influencias de líneas de transmisión o distribución es fundamental en la determinación del nivel de aislamiento necesario para el buen comportamiento de la línea, ósea, para una alta confiabilidad (Salesiana, 2025).

Para un nivel isoceráunico dado el número de descargar que impactan la línea es conocido actualmente con mucha certeza.

En las tormentas se producen relámpagos entre nubes, en la misma nube y de nube a tierra. Estos últimos afectan las líneas de distribución eléctrica aéreas provocando interrupciones en el servicio que provocan baja confiabilidad de la red. Si este fenómeno afecta la confiabilidad de la línea, el diseñador debe conocer la densidad de destellos a tierra (GFD) para determinar la exposición a los rayos para la línea de distribución. Esta densidad de descargas a tierra está definida como el número de descargas a tierra por unidad de área por unidad de tiempo, la medida más utilizada es N_g [flashes/km²/año].

CAPÍTULO I. Desempeño de las líneas eléctricas de distribución en media tensión 7.6 kV/13.2 kV, frente al impacto de las descargas atmosféricas.

1.1 Generalidades

Las descargas atmosféricas se deben a la formación de nubes cargadas con electricidad estática, generalmente carga negativa en la parte inferior, y carga positiva en la parte superior de la nube. Como consecuencia de estas cargas, se genera un campo eléctrico cada vez más intenso entre nubes vecinas, así como entre las nubes y tierra (Plata, 2023).

El rayo es una descarga transitoria de elevada intensidad, donde la mitad de estos rayos ocurren en el interior de la nube, y la otra mitad se dan entre nube y tierra. Las descargas atmosféricas tienen su origen en las nubes llamadas Cúmulos Nimbus, con pisos cercanos a los 1000 metros y techos en los 12000 metros. Dentro de la nube hay producción de vientos de hasta 220 Km/h y hielo que constituirá el granizo, con formaciones de diferentes tamaños. Estos vientos producen, en la generalidad de los casos y como ya hemos anticipado, cargas eléctricas en las nubes, positivas en la parte superior y negativas en su parte inferior.

Los rayos procedentes de una nube, tienden a impactar en tierra dentro de un área circular de aproximadamente 10 km de diámetro, dentro de este área el impacto es casi aleatorio. Existe una probabilidad alrededor de un 20 % de que una segunda descarga caiga a 2, 3, o 4 km de la primera, y existe una probabilidad más pequeña de que una descarga caiga a unos 8 km o más de la primera. El valor medio de la distancia entre sucesivos puntos de impacto se encuentra en unos 3,5 km. El comportamiento de las descargas atmosféricas tiene un marcado carácter aleatorio, por lo que generalmente es necesario un elevado número de medidas para determinar con precisión su distribución.

Uno de los métodos convencionales de protección contra rayos en sistemas de distribución son los pararrayos; estos pueden colocarse en subestaciones, transformadores, reguladores, etc, pero si se tiene un aislamiento en la línea con un soporte al impulso relativamente bajo, se tendrán flameos en los aisladores, con la consiguiente interrupción de servicio.

Una reducción de los espaciamientos y los bajos niveles de aislamiento de la línea puede aumentar la vulnerabilidad de la línea a flameos por rayos. Por ello se requiere de un conocimiento real de los factores involucrados en el comportamiento de la línea de distribución ante descargas

atmosféricas. Esto lleva a la necesidad de realizar un estudio sobre los efectos que producen las descargas atmosféricas en los circuitos de distribución (Cañizales, 2000).

Las líneas de distribución, a pesar de que constituyen una parte muy importante en el costo y operación de un sistema eléctrico, han permanecido en muchos casos sujetas a operación costosa y poco confiable debido a que, en zonas de alta incidencia de rayos a tierra, las líneas que se ven sometidas severamente a descargas directas sobre los conductores de fase.

Los voltajes producidos por una descarga atmosférica son los mismos tanto en líneas de transmisión como en líneas de distribución, pero con diferentes efectos, ya que en distribución se tienen niveles de aislamiento muy bajos, que en la mayoría de las veces produce flameos en los aislados.

Se estima que la incidencia de descargas atmosféricas directas al conductor produce salidas de líneas en el 90% de los casos y aun los rayos indirectos producen voltajes inducidos que pueden alcanzar valores de hasta 300 kV en los conductores (Cañizales, 2000).

La descarga directa atmosférica en los conductores de fase de una línea de distribución de media tensión, representa el caso crítico desde el punto de vista de dimensionamiento dieléctrico y comportamiento de las líneas. Se pueden presentar tensiones que excedan la rigidez dieléctrica proporcionada por la cadena de aisladores y distancias en aire entre conductores de fase-tierra, produciendo el arco que conduce a la falla (descarga disruptiva).

Se considera que, a partir del punto de incidencia del rayo sobre los conductores de fase, la corriente se divide en dos partes iguales y la onda de tensión viaja en ambas direcciones de la línea a la velocidad de la luz. El valor de la tensión para una magnitud de corriente de rayo dada se calcula como (Lagos, 2012):

$$V_c = \frac{Z_c I}{2} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

Z_c : Impedancia característica de la línea de distribución Ω/km .

I : Magnitud de la corriente del rayo.

V_c : Voltaje del conductor de fase con respecto a tierra al incidir una descarga atmosférica sobre este en (kV Cresta).

1.2 Impedancia Característica de la línea.

Una forma práctica de determinar la impedancia característica de la línea de distribución es utilizando la siguiente ecuación:

$$Z_c = 60 \ln \left(\frac{Y}{re} \right) \quad \text{Ecuación (2)}$$

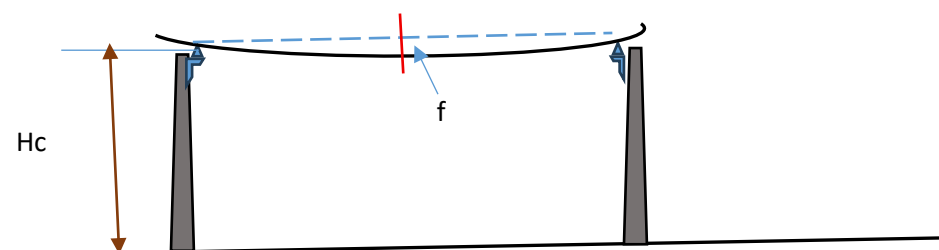
Donde ;

Y: Altura media o efectiva del conductor de fase en metros.

re: radio equivalente del conductor en metros.

Para determinar la altura Y, se consideran tres tipos de desniveles del terreno

Terreno plano



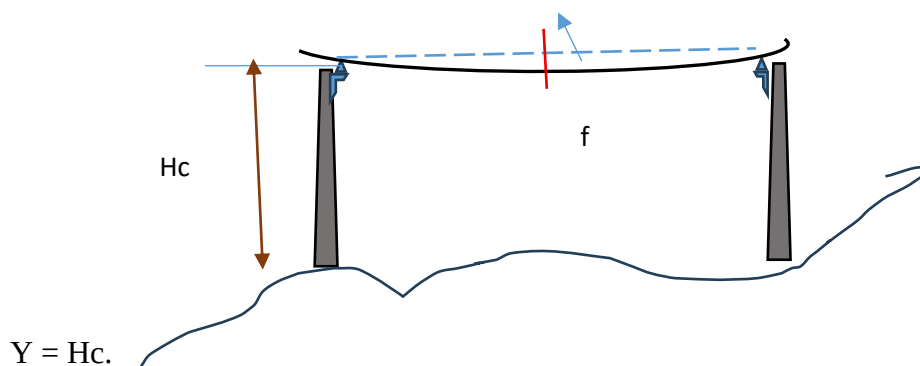
$$Y = Hc - \frac{2}{3}f \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

Hc: Altura del conductor de fase con respecto a tierra en metros

f : Catenaria del conductor en su claro medio en metros.

Terreno a desnivel



De manera generalizada consideraremos el caso especial de montaje de líneas de distribución primaria de media tensión en 7.6/13 kV trifásicas a nivel, bajo la premisa de líneas troncales a conductor 336.4 MCM Linnet. En una estructura de apoyo de 14 metros con una profundidad de entierre de 2 mts, es decir $H_c = 12$ metros.

Figura 3

Características del Conductor



Cable ACSR
336.4 KCMIL (Linnet)



Ref. Nexans: 200014

Conductor concéntrico compuesto por alambres de aluminio (1350-H19) dispuestos helicoidalmente sobre un núcleo de acero galvanizado.

APPLICATION

Líneas aéreas de transmisión y distribución de energía eléctrica. También utilizados como neutro portante para cables de distribución aérea tipo múltiplex.

Nota: Cualquier otra aplicación o uso no descrita anteriormente se considera como prohibida.

Construcción

Conductor concéntrico compuesto por alambres de aluminio 1350-H19, dispuestos helicoidalmente sobre un núcleo de acero galvanizado.

Características Opcionales bajo pedido:

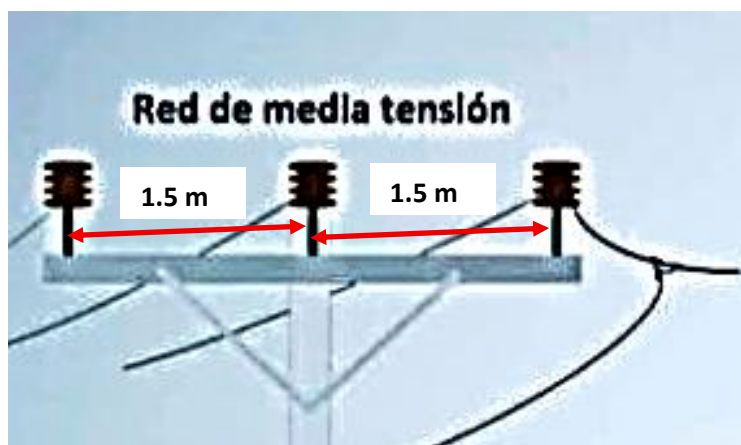
- Núcleo de acero galvanizado con grasa, para mejorar la protección contra la corrosión ocasionada por la capa de zinc.

Fuente: <https://www.nexans.co/.rest/catalog/v1/product/pdf/200014>

Figura 4*Datos del conductor*

Características dimensionales	
Número de Hilos de Aluminio	26
Número de Hilos de Acero	7
Diámetro de Hilos de Aluminio	2,888 mm
Diámetro de Hilos de Acero	2,245 mm
Área del aluminio	170,32 mm ²
Peso aproximado	688,7 kg/km
Área del Acero	27,71 mm ²
Diámetro del conductor	18,3 mm
Diámetro exterior nominal	- mm
Número de conductores	33
Sección del conductor	198,03 mm ²
Características eléctricas	
Max. Resistencia DC del Conductor a 20 ° C	0,168 Ohm/km
Intensidad de corriente admisible	529,0 A
Características mecánicas	
Carga de rotura mínima	6400 kgf
Tipo de dureza	1350-H19
Características de uso	
Embalaje	Carrete

Fuente: <https://www.nexans.co/.rest/catalog/v1/product/pdf/200014>

Figura 5*Distancia de seguridad*

Fuente: <https://www.sectorelectricidad.com/38403/voltaje-en-lineas-de-distribucion-de-baja-tension/>

Tabla 1*De Tendido de conductores*

LINNET ZONA B												
seccion (mm2)			179.5				T. de rotura (daN)		14050			
diametro (mm)			18.3				T. MAXIMA (daN)		46833.3			
peso unitario (daN/mm2)			0				CHS (10°C)		17%			
modulo elasticidad (daN/mm2)			7700				EDS (20°C)		15%			
coef. de dilatacion (°c -1x10 -6)			19,1				velocidad viento (km/h)		80			
VANO (m)	30°c + V		CHS: 15°C		EDS: 25°C		15°c + V		TENSION		H	
	v: 2,433		v: 0,0		v: 0,0		v: 2,433		MAXIMA (daN)			
	h: 0.0		h: 0,0		h: 0,0		h: 0.0					
	T	F	T	%	T	%	T	F	T	C.S	Fmax	Fmin
20	610.33	0.20	631.72	0.17	445.82	0.12	789.41	0.16	1206.80	11.64	166.74	2852.96
30	743.54	0.37	631.72	0.17	454.12	0.12	900.46	0.31	1202.28	11.69	242.00	2836.84
40	863.55	0.57	631.72	0.17	464.04	0.12	1007.37	0.49	1254.66	11.20	312.45	2814.52
50	973.40	0.79	631.72	0.17	474.68	0.13	1108.35	0.70	1333.45	10.54	378.46	2786.24
60	1075.13	1.03	631.72	0.17	485.44	0.13	1203.50	0.92	1414.12	9.94	435.36	2752.29
70	1170.10	1.29	631.72	0.17	495.93	0.13	1293.26	1.17	1492.42	9.41	473.82	2713.12
80	1259.31	1.57	631.72	0.17	505.93	0.14	1378.14	1.43	1567.91	8.96	509.95	2669.22
90	1343.50	1.86	631.72	0.17	515.30	0.14	1458.61	1.72	1640.43	8.56	544.04	2621.16
100	1423.22	2.17	631.72	0.17	524.02	0.14	1535.05	2.01	1709.99	8.22	576.32	2569.62
110	1498.93	2.49	631.72	0.17	532.05	0.14	1607.81	2.32	1776.67	7.91	606.98	2515.37

Fuente : <https://core.ac.uk/download/pdf/250142711.pdf>

Parámetros del modelo de la línea de distribución:

Tipo de terreno: A nivel

Tipo de conductor 336.4 MCM Linnet

Diámetro del conductor = 18.3 mm = 0.0183 m

Radio del conductor $r_e = D/2 = 0.0183 \text{ m}/2 = 0.00915 \text{ m}$ Altura del conductor de fase con respecto a tierra $H_c = 12 \text{ m}$ Altura media o efectiva del conductor $Y = H_c = 12 \text{ m}$

Con estos parámetros y utilizando la ecuación No.2, calculamos la impedancia característica de la línea por unidad de longitud por fase:

$$Z_c = 60 \ln \left(\frac{Y}{r_e} \right)$$

$$Z_c = 60 \ln \left(\frac{12m}{0.00915m} \right)$$

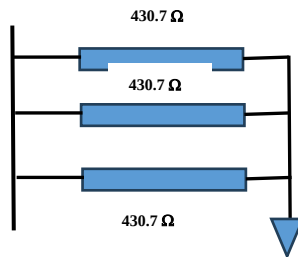
$$Z_c = 60 \ln \left(\frac{Y}{r_e} \right) = 430.7 \, \Omega$$

La línea de distribución de media tensión trifásica en 7.6/13.2 kV, se modela con una distancia media de un vano de 100 metros, y el lugar de incidencia de la descarga atmosférica divide la línea en dos segmentos de 50 metros cada uno.

La conexión de la impedancia característica al inicio y final de la línea de distribución en cada fase se muestra en la siguiente figura.:

Figura 6

Modelo de la línea



Fuente: Propia

El valor normalizado de la corriente de una descarga atmosférica, también conocida como corriente de rayo, se define como la corriente de cresta que drena a tierra durante la operación de un dispositivo de protección contra sobretensiones (DSE). Este valor es un parámetro clave en el diseño y selección de pararrayos y otros sistemas de protección contra rayo (Ecuador, 2000).

Para nuestro estudio tomaremos un valor de una corriente de descarga atmosférica de 20 kA.

Introduciendo datos en la ecuación No. 1, podemos calcular el valor del Voltaje del conductor de fase con respecto a tierra al incidir una descarga atmosférica sobre este en (kV Cresta).

$$V_c = \frac{Z I}{2} = \frac{430.7 \times 20 \text{ kA}}{2} = 4300.7 \text{ kV}$$

1.3 Forma de Onda de Tensión.

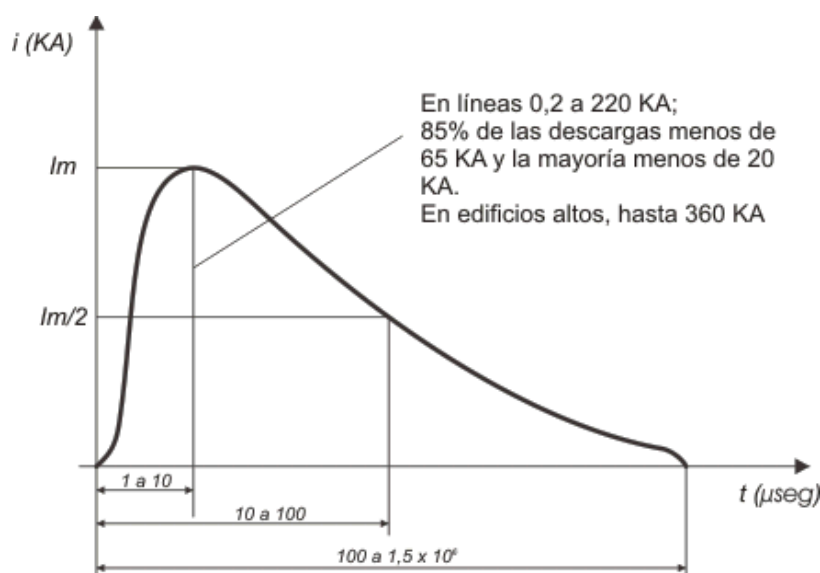
Cuando una descarga atmosférica impacta sobre una línea de distribución, se produce una onda viajera, la cual es una perturbación de voltaje o corriente causada por una descarga atmosférica (rayo) que se propaga a lo largo de la línea. Estas ondas viajan a velocidades cercanas a la de la luz, desde el punto de impacto del rayo hasta los extremos de la línea o elementos conectados como subestaciones. Son de corta duración y alta frecuencia, y pueden causar sobretensiones que dañan equipos eléctricos (Páez, 2016).

Los estudios de perturbaciones transitorias en sistemas eléctricos han demostrado que las descargas atmosféricas y las operaciones de maniobra son seguidas de ondas viajeras con un frente de onda escarpado (Páez, 2016).

La tensión de impulso es una tensión unidireccional la cual crece rápidamente hasta su valor máximo y luego decae lentamente hasta el valor de cero. La forma de onda se define en función de los tiempos T_1 x T_2 , valores dados en microsegundos, donde T_1 es el tiempo que transcurre entre el inicio y el pico de la onda; y T_2 el tiempo total desde el inicio hasta el momento en que la tensión ha caído el 50% de su valor máximo (Páez, 2016).

Figura 7

Forma de Onda de tensión



Fuente: <https://www.textoscientificos.com/fisica/alta-tension/generacion-impulsos>

La Comisión Electrotécnica Internacional ha especificado que el aislamiento de las líneas de transmisión y equipos de Alta Tensión deben soportar impulsos de voltaje tipo rayo estándar con una forma de onda 1.2/50 μ s.

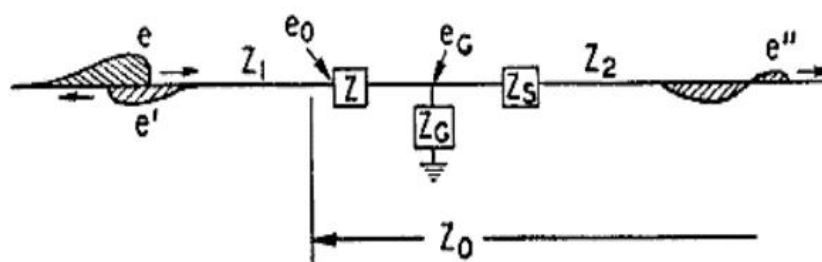
Cuando un descargar atmosférica (rayo) cae sobre un conductor de fase o cable blindado, la corriente del rayo tiende a dividirse en ambas direcciones del conductor.

La corriente del rayo verá la impedancia del conductor de tal manera que se generará una tensión. La tensión y la corriente generadas por el rayo viajarán a lo largo del conductor como ondas viajeras (Páez, 2016).

Esta teoría está basada sobre un circuito de un solo conductor y supone que la línea de transmisión será ideal. Es decir, la línea puede ser representada como una impedancia característica pura $Z_c = (L/C)$, donde L y C serán determinados en el supuesto de que la tierra es una verdadera superficie de potencial cero (Páez, 2016).

Figura 8

Circuito equivalente de la línea



Fuente: <https://dSPACE.UPS.EDU.EC/bitstream/123456789/13150/1/UPS-GT001720.pdf>

Donde

e : Onda incidente

e' : Onda reflejada

e'' : Onda refractada

Z : Impedancia característica de la línea 1

ZG : Punto de transición o derivación

ZS : Impedancia característica de la línea 2

ZO : Impedancia equivalente del circuito

CAPÍTULO II. Tasa de flameo de las líneas eléctricas de distribución en media tensión 7.6 kV/13.2 kV, frente al impacto de las descargas atmosféricas, en la zona del municipio de Managua.

2.1 Mapa Isoceraúnico mundial.

El nivel isoceraúnico, números de días del año en los que se escuchan truenos, es actualmente el índice utilizado como indicativo de la cantidad de actividad eléctrica atmosférica de una región. De allí la importancia de entender las causas y características del trueno. El nivel isoceraúnico de un lugar es el número promedio de días del año en los que hay tormenta. Se considera día con tormenta a aquel en el que al menos se escucha un trueno (hidrometeorología-Panamá, 2025).

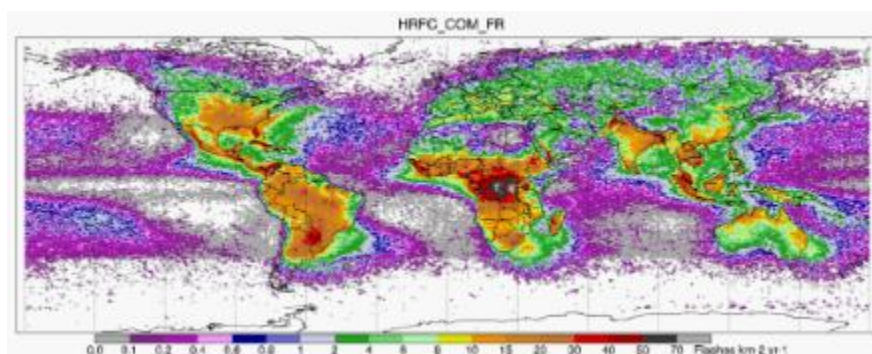
El nivel de riesgo de rayos está representado en el mapa ceraúnico, por unas líneas de diferentes valores, (líneas isoceraúnicas), estas líneas determinan geográficamente las zonas de más o menos riesgo de actividad de rayos. Cada línea isoceraúnica tiene un valor, y este valor es el resultado de la aparición de días de tormentas por kilómetro cuadrado por año, donde al menos aparece un solo rayo.

A continuación, presentamos un mapa mundial de niveles isoceraúnico.

Figura 9

Mapa

Isoceraúnico mundial



Fuente: <https://www.meteoswiss.admin.ch/weather/weather-and-climate-from-a-to-z/thunderstorms/lightning-the-regions-of-the-world-with-the-most-lightning.html>

De acuerdo a este mapa, el nivel de descargas atmosféricas de Nicaragua tiene un rango entre 20 y 30 descargas atmosféricas por kilómetro cuadrado.

El departamento occidental de Nicaragua Chinandega, presenta la mayor cantidad de rayos registrados por km² en el periodo de un año en Centroamérica. Son más de 64 rayos por km² en Chinandega, valor superior a la media de Nicaragua que es de 21 eventos por km².

La tasa de descargas atmosféricas en una línea de distribución se refiere a la frecuencia con la que ocurren rayos que impactan directamente o cerca de la línea, causando sobretensiones que pueden interrumpir el servicio eléctrico y dañar equipos. Esta tasa se expresa generalmente en número de impactos por cada 100 kilómetros de línea por año.

Factores que influyen en la tasa de descargas:

- **Ubicación geográfica:** Zonas con mayor actividad tormentosa tienen tasas más altas.
- **Topografía:** Terrenos montañosos o con elevaciones pueden atraer más rayos.
- **Altura de la línea:** Líneas más altas son más susceptibles.
- **Protección:** La presencia de pararrayos y sistemas de puesta a tierra reduce la tasa de fallas.

2.2 Efecto de la altura de las estructuras y tasa de descarga atmosférica

La altura de las estructuras de las líneas tiene efectos importantes en el comportamiento frente a las descargas atmosféricas; a mayor altura, más descargas caerán sobre la línea. Por tanto, **la tasa de descargas sobre la línea** está dada por la siguiente formula (México, 2022):

$$N = Ng \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde:

h : altura de la estructura (m)

b : ancho de la estructura (m)

Ng : N° de descargas/km²/año

N : N° de descargas/100km/año

Tomado en consideración son siguientes datos para una línea de distribución de media tensión, 7.6/13.k V en el municipio de Managua, calculamos la tasa de descargas atmosféricas:

h : altura de la estructura (m) = 12 m.

b : ancho de la estructura (m) = 3.0 m

N_g : N° de descargas/km²/año = 20

$$N = N_g \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10} \right)$$

$$N = N_g \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) = 20 \left(\frac{28 \times 12^{0.6} + 3.0}{10} \right)$$

$N = 254.11$ descargas/100km/año.

CAPÍTULO III. Análisis del desempeño de las líneas de distribución de en media tensión 7.6 kV/13.2 kV, frente al impacto de las descargas atmosféricas provocadas por rayo, bajo los criterios de la norma IEEE 1410-2010, en el municipio de Managua.

3.1 Alcances de la Norma.

La norma IEEE 1410-2010, titulada "Guía IEEE para mejorar el rendimiento de las líneas aéreas de distribución de energía eléctrica frente a rayos," se enfoca en reducir las fallas causadas por rayos en líneas de distribución de hasta 69 kV. La guía identifica factores que contribuyen a estas fallas y sugiere mejoras para instalaciones existentes y nuevas. Se centra principalmente en la protección del aislamiento de las líneas y no en la protección de equipos.

Esta norma identifica factores como la magnitud y forma de onda de las descargas de rayos, la impedancia de la torre o poste, la distancia entre los conductores y el suelo, y la resistencia de puesta a tierra. Todos estos factores serán los que evaluamos en nuestro estudio para las redes eléctricas de distribución en media tensión, 7.6/13.2 kV.

3.2 Parámetros de incidencia de calidad del servicio eléctrico de redes de distribución de media tensión 7.6/13.2 kV de Nicaragua

Los indicadores técnicos de continuidad del servicio eléctrico **FMIK** y **TTIK** están definidos en la Normativa de Calidad del Servicio conforme al artículo **NCS 1.1.4**, asociados a la continuidad del servicio eléctrico, y corresponden a (Instituto Nicaraguense de energía, 2000):

- Frecuencia Media de Interrupción (**FMIK**): Para un periodo determinado, representa la cantidad de veces que el KVA promedio sufrió una interrupción de servicio.
- Tiempo total de interrupción (**TTIK**): Para un periodo determinado, representa el tiempo total en que el KVA promedio no tuvo servicio.

Los indicadores en el periodo de los años 2004 al 2007, fueron evaluados conforme lo establecido en el Anexo Calidad del Servicio: Etapa I, Sub Etapa 3 de la Normativa de Calidad del Servicio, los cuales fueron establecidos de forma global:

c) Subetapa 3.

1. $FMIK \leq 1,8$ veces por semestre

2. TTIK $\leq$ 4.6 horas por semestre

A partir del año 2008 se calcularon discriminando las categorías **Urbano** y **Rural** y posteriormente, debido a la crisis que enfrentaba el sector energético a nivel nacional, el gobierno de la República de Nicaragua y las empresas distribuidoras de electricidad firmaron el **Protocolo de Entendimiento entre el gobierno de Nicaragua y las concesionarias DISNORTE/DISSUR**, ratificado por la Asamblea Nacional. En este protocolo se definieron nuevos parámetros de Indicadores de Calidad referidos a la Continuidad del Servicio Eléctrico, que a la fecha están vigentes

3.3 Estadística de Indicadores de calidad del servicio eléctrico de redes de distribución de media tensión 7.6/13.2 kV de Nicaragua

Una de las variables que le dan confiabilidad a un sistema de distribución de energía eléctrica es el de control de sobretensiones inducidas en la red, ya que provienen de un fenómeno natural en el caso de las descargas atmosféricas, que para niveles menores a 300 kV son las de mayor pico. El primer elemento que recibe, opone y a su vez protege a un equipo es su aislamiento, resistencia de oposición o aguante a un determinado nivel de tensión, diseñado y dado por los fabricantes para distintas condiciones de operación, tal es el caso de aisladores tipo cerámica, vidrio, polímero, crucetas de hierro, madera, fibras, plásticos reforzados, de igual manera para apoyos o postes, de hormigón, metálicos, plásticos reforzados, entre otros. El nivel de aislamiento que ofrece un elemento o una estructura está en función de:

- 1 Condiciones ambientales (altitud, húmedo, seco, lluvia, hielo, contaminación,
- 2 etc).
- 3 El tipo de estructura (Centrada, Semi-Centrada, Pasante, Volado, Retención,
- 4 Suspensión, etc.).

La estadística del comportamiento de los indicadores de calidad del servicio eléctrico de las redes eléctricas de distribución, sólo están dadas hasta el año 2019, a la fecha actual no tenemos ningún registro.

Tabla 2*Estadística de indicadores de calidad del servicio*

EMPRESA DISTRIBUIDORA DISNORTE									
Año	Semestre	FMIK				TTIK			
		URBANO		RURAL		URBANO		RURAL	
		Resultado	Normado	Resultado	Normado	Resultado	Normado	Resultado	Normado
2008	I	4.47	1.80	8.47	1.80	9.10	4.60	39.11	4.60
	II	4.87	1.80	9.66	1.80	10.32	4.60	57.30	4.60
2009	I	4.90	4.10	4.50	22.00	6.40	7.00	13.75	36.90
	II	3.03	4.10	3.65	22.00	5.13	7.00	10.45	36.90
2010	I	2.97	4.10	4.50	22.00	4.67	7.00	11.62	36.90
	II	3.09	4.10	3.65	22.00	5.13	7.00	10.45	36.90
2011	I	2.35	4.10	6.43	22.00	3.75	7.00	16.43	36.90
	II	3.61	4.10	8.69	22.00	4.35	7.00	20.77	36.90
2012	I	2.76	4.10	5.57	22.00	4.21	7.00	15.06	36.90
	II	2.71	4.10	6.88	22.00	3.49	7.00	15.26	36.90
2013	I	2.34	3.30	4.80	22.00	3.26	6.40	12.90	36.90
	II	2.33	3.30	5.22	22.00	3.45	6.40	13.71	36.90
2014	I	2.33	3.30	5.22	22.00	3.45	6.40	13.71	36.90
	II	2.49	3.30	5.20	22.00	5.17	6.40	18.60	36.90
2015	I	2.77	3.30	5.40	22.00	5.51	6.40	17.60	36.90
	II	1.94	3.30	5.50	22.00	3.41	6.40	14.40	36.90
2016	I	2.81	3.30	5.60	22.00	4.63	6.40	13.70	36.90
	II	2.90	3.30	6.40	22.00	5.90	6.40	17.60	36.90
2017	I	2.00	3.30	5.70	22.00	3.60	6.40	14.30	36.90
	II	2.69	3.30	7.20	22.00	5.41	6.40	20.00	36.90
2018	I	2.00	3.30	4.50	22.00	3.10	6.40	11.50	36.90
	II	1.80	3.30	4.00	22.00	2.80	6.40	10.20	36.90
2019	I	1.50	3.30	3.50	22.00	2.30	6.40	8.60	36.90

Fuente: https://www.ine.gob.ni/?page_id=122532

3.4 Comportamiento de las redes de distribución de media tensión 7.6/13.2 kV de Nicaragua, ante el fenómeno de flameo por incidencia de descarga atmosférica.

Las líneas de distribución de media tensión en 7.6/13.2 kV se caracterizan por presentar bajos niveles de aislamiento, usualmente entre 100 y 200 kV; estructuras de soporte de alturas variables entre 10 y 15 m; y recorridos, en la mayor parte de los casos, a través de

terrenos protegidos por apantallamientos naturales o artificiales, tales como: árboles, cerros o edificaciones.

Por ello, las líneas de media tensión están expuestas mayormente a sobretensiones atmosféricas inducidas, y el 90% de los flameos de los aisladores son por este tipo de sobretensiones.

Tradicionalmente, los equipos de media tensión se han protegido de las sobretensiones de origen atmosférico mediante el uso de pararrayos, mientras que en las líneas en estos niveles de tensión, se ha permitido el flameo de los aisladores, y cuando éstos daban lugar a desconexiones por cortocircuitos, operaban los interruptores de recierre para restaurar el suministro del servicio eléctrico.

Recientemente, sin embargo, la confiabilidad se ha convertido en un factor muy importante debido al, cada vez, más difundido uso de aparatos electrónicos muy sensibles a las interrupciones momentáneas.

Por ello, es necesario reducir al mínimo el flameo en el aislamiento de las líneas y, por tanto, las interrupciones momentáneas.

El flameo de una estructura utilizada para líneas de electricidad, significa inestabilidad en el comportamiento del nivel de aislamiento que esta tiene, inestabilidad que ocurre por el cambio repentino de voltaje, cambios que pueden suceder por factores internos o externos de una red, los de naturaleza interna son propios de la operación de la línea, tales como armónicos, fallas tierra, rechazos de carga, pérdida del neutro, encendido y apagado de capacitores, energización de líneas y transformadores, ferresonancia, efecto ferranti, etc.

Los factores externos están ligados a las descargas atmosféricas, impactan directamente sobre una fase o que caen cerca de las líneas caso ya sea por factores internos o externos el resultado es la presencia de sobretensión en la fase de una línea, voltajes de distintas amplitudes dependiendo de su origen.

El nivel de aislamiento que las estructuras presentan depende de su voltaje nominal y de acuerdo a normativas locales, nacionales o internacionales establece referentes para su diseño y construcción.

En nuestro caso nacional para líneas de distribución de media tensión 7.6/13.2 kV, en Nicaragua, tenemos:

Para líneas de distribución en media tensión (VLL <40 KV) :

NORMA : IEEE 1410 - 2004 [16]:

Recomienda los siguientes niveles de aislamiento :

Aislamiento = 300 KV (De fase a tierra) , para estructuras colocadas sobre suelos con resistividades menores a 1000 -

Aislamiento = 420 KV (De fase a tierra) , para estructuras colocadas sobre suelos con resistividades mayores a 1000 -

3.5 Nivel de tensión de flameo de aisladores instalados en las redes de distribución de media tensión 7.6/13.2 kV de Nicaragua.

Hoy en día la tecnología ha permitido el uso de aisladores para redes eléctricas de distribución de media tensión, que ofrecen muchas ventajas para enfrentar tanto las condiciones adversas ambientales, como las descargar atmosféricas, uno de ellos son los aisladores poliméricos.

Los aisladores de suspensión polimérico de 15 kV se han convertido en una solución destacada en el ámbito de la distribución de energía eléctrica. Este tipo de aislador, fabricado principalmente con materiales compuestos, ofrecen una mayor durabilidad y eficiencia en comparación con los aisladores tradicionales de porcelana o vidrio (JDELECTRICOS, 2025).

Figura 10*Aislador Polimérico*

Fuente; <https://jdelectricos.com.co/aislador-de-suspension-polimerico-de-15-kv/>

En cuanto sus características eléctricas como tensión de flameo se detallan en el siguiente resumen de una ficha técnica:

Figura 11*Características técnicas del aislador polimérico*

MODELO Model		IL 15/70 C-T	IL 15/70 B-S	IL 35/70 C-T	IL 35/70 B-S
	UNIDADES Unit	HORQUILLA	ROTULA	HORQUILLA	ROTULA
Tension nominal (Un) Nominal Voltage	kV	15	15	35	35
Frecuencia Frequency	Hz	50/60	50/60	50/60	50/60
Carga mecanica nominal (CMN) Nominal Mechanical Load (NML)	kN	70	70	70	70
Carga mecanica de rutina (CMR) Routine Mechanical Load	kN	35	35	35	35
Tension resistida a frecuencia industrial bajo lluvia (1 min) Withstand Flashover Voltage at industrial frequency - Wet (1 min)	kV	45	45	95	95
Tension resistida a frecuencia industrial seco, Withstand Flashover Voltage at industrial frequency - Dry (1 min)	kV	55	55	110	110
Tension resistida de impulso atmosferico en seco (positiva) Withstand Flashover atmospheric impulse in dry (positive)	kV	115	115	230	230
Longitud (L) Length (L)	mm	386	360	615	544
Longitud (L1) Length (L1)	mm	340	340	524	524
Diametro Aleta (D). Sheds Diameter (D)	mm	98	98	98	98
Distancia de fuga. Creepage Distance	mm	430	430	900	900
Distancia de arco Arc Distance	mm	210	210	414	414
Numero de aletas Number of Sheds		4	4	8	8
Peso neto aproximado. Weight Approx.		1,2	1,2	1,9	1,9
Normas IEC 61109. Standard IEC 61109	kg	SI YES	SI YES	SI YES	SI YES
Nivel de contaminación. Contamination Level		4	4	4	4

3.6 Modelo matemático de la descarga atmosférica que impacta en las redes de distribución de media tensión 7.6/13.2 kV.

Los transitorios por descargas atmosféricas pueden ser aproximadamente representados por la diferencia de dos exponenciales, simplemente por un ajuste apropiado de los parámetros E, a y b, donde (Páez, 2016):

E; Magnitud de la fuente en voltios.

a : Es el tiempo de frente de onda.

b: Es tiempo de cola de onda

$$e(t) = E(e^{-at} - e^{-bt})$$

Ecuación (5)

En nuestro caso particular tomaremos los valores de:

E= 4300.7 kV (Ver valor calculado con Ec.(1), pág.#17)

a = 0.1

b = 0.2

En una hoja de cálculo en Excel hemos tabulado los valores anteriores en una escala de tiempo de 0 a 56 segundos para obtener la onda de voltaje tipo rayo.

Tabla 3

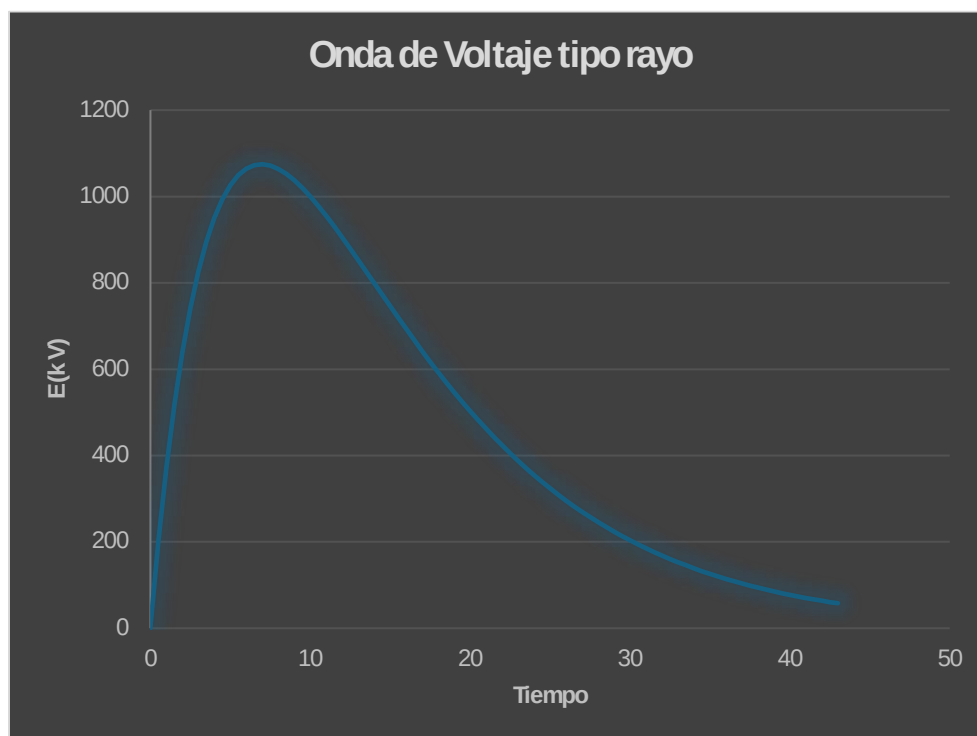
Valores de voltaje de la Onda Incidente sobre la línea

Tiempo (s)	E(V)	a	e	-at	e ^{-at}	b	e	-bt	e ^{-bt}	e ^{-at} ·e ^{-bt}	E(x(e ^{-at} ·e ^{-bt}))
0	4300.7	0.1	2.71828183	0	1	0.2	2.71828183	0	1	0	0
0.5	4300.7	0.1	2.71828183	-0.05	0.95122942	0.2	2.71828183	-0.1	0.90483742	0.046392006	199.5181022
1	4300.7	0.1	2.71828183	-0.1	0.90483742	0.2	2.71828183	-0.2	0.81873075	0.066106665	370.318934
1.5	4300.7	0.1	2.71828183	-0.15	0.86070798	0.2	2.71828183	-0.3	0.74081822	0.119889756	515.6068725
2	4300.7	0.1	2.71828183	-0.2	0.81873075	0.2	2.71828183	-0.4	0.67032005	0.148410707	638.2692878
2.5	4300.7	0.1	2.71828183	-0.25	0.77880078	0.2	2.71828183	-0.5	0.60653066	0.172270123	740.8821195
3	4300.7	0.1	2.71828183	-0.3	0.74081822	0.2	2.71828183	-0.6	0.54881164	0.192300685	825.7677183
3.5	4300.7	0.1	2.71828183	-0.35	0.70468800	0.2	2.71828183	-0.7	0.4965853	0.208102786	894.9876514
4	4300.7	0.1	2.71828183	-0.4	0.67032005	0.2	2.71828183	-0.8	0.44932896	0.220991082	950.416346
4.5	4300.7	0.1	2.71828183	-0.45	0.63762815	0.2	2.71828183	-0.9	0.40659666	0.231058492	993.713256
5	4300.7	0.1	2.71828183	-0.5	0.60653066	0.2	2.71828183	-1	0.36787944	0.238651219	1026.367296
5.5	4300.7	0.1	2.71828183	-0.55	0.57694981	0.2	2.71828183	-1.1	0.33287108	0.244078727	1049.70938
6	4300.7	0.1	2.71828183	-0.6	0.54881164	0.2	2.71828183	-1.2	0.30119421	0.247617424	1064.828286
6.5	4300.7	0.1	2.71828183	-0.65	0.52204578	0.2	2.71828183	-1.3	0.27253179	0.249513984	1073.08479
7	4300.7	0.1	2.71828183	-0.7	0.4965853	0.2	2.71828183	-1.4	0.24659696	0.24998834	1075.124853
7.5	4300.7	0.1	2.71828183	-0.75	0.47236655	0.2	2.71828183	-1.5	0.22313016	0.249236393	1071.890954
8	4300.7	0.1	2.71828183	-0.8	0.44932896	0.2	2.71828183	-1.6	0.20189652	0.247432446	1064.132721
8.5	4300.7	0.1	2.71828183	-0.85	0.42741493	0.2	2.71828183	-1.7	0.18268352	0.244731408	1052.516366
9	4300.7	0.1	2.71828183	-0.9	0.40659666	0.2	2.71828183	-1.8	0.16529889	0.241270772	1037.633207
9.5	4300.7	0.1	2.71828183	-0.95	0.38674102	0.2	2.71828183	-1.9	0.14956862	0.237172004	1020.077359
10	4300.7	0.1	2.71828183	-1	0.36787944	0.2	2.71828183	-2	0.13533528	0.232544158	1000.10266
10.5	4300.7	0.1	2.71828183	-1.05	0.34993775	0.2	2.71828183	-2.1	0.12245643	0.227481321	978.3289166
11	4300.7	0.1	2.71828183	-1.1	0.33287108	0.2	2.71828183	-2.2	0.11080316	0.222067925	955.0475265
11.5	4300.7	0.1	2.71828183	-1.15	0.31663677	0.2	2.71828183	-2.3	0.10025884	0.216377926	930.5765449
12	4300.7	0.1	2.71828183	-1.2	0.30119421	0.2	2.71828183	-2.4	0.09071795	0.210476259	905.1952455
12.5	4300.7	0.1	2.71828183	-1.25	0.2869048	0.2	2.71828183	-2.5	0.082036	0.204419786	879.1482283
13	4300.7	0.1	2.71828183	-1.3	0.27253179	0.2	2.71828183	-2.6	0.07427358	0.198258215	852.6491045
13.5	4300.7	0.1	2.71828183	-1.35	0.25924026	0.2	2.71828183	-2.7	0.06720551	0.192034748	825.8838403
14	4300.7	0.1	2.71828183	-1.4	0.24659696	0.2	2.71828183	-2.8	0.06081006	0.185796901	799.0137265
14.5	4300.7	0.1	2.71828183	-1.45	0.23457029	0.2	2.71828183	-2.9	0.05502322	0.179547068	772.1780755
15	4300.7	0.1	2.71828183	-1.5	0.22313016	0.2	2.71828183	-3	0.04978707	0.173343032	745.4966348
15.5	4300.7	0.1	2.71828183	-1.55	0.21247977	0.2	2.71828183	-3.1	0.0450462	0.167198771	719.0717533
16	4300.7	0.1	2.71828183	-1.6	0.20189652	0.2	2.71828183	-3.2	0.0407622	0.161134314	692.9903443
16.5	4300.7	0.1	2.71828183	-1.65	0.19204951	0.2	2.71828183	-3.3	0.03688317	0.155166741	667.325604
17	4300.7	0.1	2.71828183	-1.7	0.18268352	0.2	2.71828183	-3.4	0.03337327	0.149310254	642.1386008
17.5	4300.7	0.1	2.71828183	-1.75	0.17377394	0.2	2.71828183	-3.5	0.03019738	0.14357656	617.4797117
18	4300.7	0.1	2.71828183	-1.8	0.16529889	0.2	2.71828183	-3.6	0.02732372	0.137975166	593.3897954
18.5	4300.7	0.1	2.71828183	-1.85	0.15723717	0.2	2.71828183	-3.7	0.02472353	0.13251364	569.8014109
19	4300.7	0.1	2.71828183	-1.9	0.14956862	0.2	2.71828183	-3.8	0.02237077	0.127197847	547.0397822
19.5	4300.7	0.1	2.71828183	-1.95	0.14227407	0.2	2.71828183	-3.9	0.02024191	0.12203216	524.8237111
20	4300.7	0.1	2.71828183	-2	0.13533528	0.2	2.71828183	-4	0.01831564	0.117019644	503.2663844
20.5	4300.7	0.1	2.71828183	-2.05	0.1287349	0.2	2.71828183	-4.1	0.01657268	0.112162228	482.3760948
21	4300.7	0.1	2.71828183	-2.1	0.12245643	0.2	2.71828183	-4.2	0.01499558	0.107460651	462.1568838
21.5	4300.7	0.1	2.71828183	-2.15	0.11648416	0.2	2.71828183	-4.3	0.01356955	0.102915599	442.6091156
22	4300.7	0.1	2.71828183	-2.2	0.11080316	0.2	2.71828183	-4.4	0.01227734	0.098525811	422.7599074
22.5	4300.7	0.1	2.71828183	-2.25	0.10539622	0.2	2.71828183	-4.5	0.011109	0.094290228	405.5136837
23	4300.7	0.1	2.71828183	-2.3	0.10025884	0.2	2.71828183	-4.6	0.01005184	0.090207008	387.9532792
23.5	4300.7	0.1	2.71828183	-2.35	0.09539916	0.2	2.71828183	-4.7	0.00906528	0.086273885	371.0380977
24	4300.7	0.1	2.71828183	-2.4	0.09071795	0.2	2.71828183	-4.8	0.00822975	0.082488206	354.7570286
24.5	4300.7	0.1	2.71828183	-2.45	0.08625959	0.2	2.71828183	-4.9	0.00744658	0.078847003	339.0975076
25	4300.7	0.1	2.71828183	-2.5	0.082036	0.2	2.71828183	-5	0.00673795	0.075347052	324.0458269
25.5	4300.7	0.1	2.71828183	-2.55	0.07808167	0.2	2.71828183	-5.1	0.00609675	0.071984819	309.585453
26	4300.7	0.1	2.71828183	-2.6	0.07427358	0.2	2.71828183	-5.2	0.00551656	0.068757014	295.7032892
26.5	4300.7	0.1	2.71828183	-2.65	0.07065121	0.2	2.71828183	-5.3	0.00499159	0.065696919	282.3823241
27	4300.7	0.1	2.71828183	-2.7	0.06720551	0.2	2.71828183	-5.4	0.00451658	0.062889932	269.606289
27.5	4300.7	0.1	2.71828183	-2.75	0.06392786	0.2	2.71828183	-5.5	0.00408977	0.05984109	257.3585748
28	4300.7	0.1	2.71828183	-2.8	0.06081006	0.2	2.71828183	-5.6	0.0037123	0.05711278	245.6224338
28.5	4300.7	0.1	2.71828183	-2.85	0.05784432	0.2	2.71828183	-5.7	0.00334597	0.054496355	234.3810771
29	4300.7	0.1	2.71828183	-2.9	0.05502322	0.2	2.71828183	-5.8	0.00302755	0.051995665	223.6177578
29.5	4300.7	0.1	2.71828183	-2.95	0.05233971	0.2	2.71828183	-5.9	0.00273944	0.049600261	213.315843
30	4300.7	0.1	2.71828183	-3	0.04978707	0.2	2.71828183	-6	0.00247875	0.047308316	203.4588754
30.5	4300.7	0.1	2.71828183	-3.05	0.04735892	0.2	2.71828183	-6.1	0.00224287	0.045116057	194.0306249
31	4300.7	0.1	2.71828183	-3.1	0.0450462	0.2	2.71828183	-6.2	0.002039843	0.043031972	185.051324
31.5	4300.7	0.1	2.71828183	-3.15	0.04285213	0.2	2.71828183	-6.3	0.0018363	0.041015582	176.3967461
32	4300.7	0.1	2.71828183	-3.2	0.0407622	0.2	2.71828183	-6.4	0.00166156	0.039100647	168.1601513
32.5	4300.7	0.1	2.71828183	-3.25	0.03877421	0.2	2.71828183	-6.5	0.00150344	0.037270769	160.2903947
33	4300.7	0.1	2.71828183	-3.3	0.03688317	0.2	2.71828183	-6.6	0.00136037	0.035522799	152.7729032
33.5	4300.7	0.1	2.71828183	-3.35	0.03508435	0.2	2.71828183	-6.7	0.00123091	0.033853442	145.5934989
34	4300.7	0.1	2.71828183	-3.4	0.03337327	0.2	2.71828183	-6.8	0.00111378	0.032259495	138.7384093
34.5	4300.7	0.1	2.71828183	-3.45	0.03174564	0.2	2.71828183	-6.9	0.0010073	0.03073785	132.02494756
35	4300.7	0.1	2.71828183	-3.5	0.03019738	0.2	2.71828183	-7	0.00091188	0.029285501	125.9481561
35.5	4300.7	0.1	2.71828183	-3.55	0.02872464	0.2	2.71828183	-7.1	0.0008251	0.027899635	119.987529
36	4300.7	0.1	2.71828183	-3.6	0.02732372	0.2	2.71828183	-7.2	0.00074659	0.026577137	114.3002915
36.5	4300.7	0.1	2.71828183	-3.65	0.02599113	0.2	2.71828183	-7.3	0.00067554	0.02531559	108.8747579
37	4300.7	0.1	2.71828183	-3.7	0.02472353	0.2	2.71828183	-7.4	0.00061125	0.024112274	103.6995955
37.5	4300.7	0.1	2.71828183	-3.75	0.02351775	0.2	2.71828183	-7.5	0.00055308	0.022964661	98.7841195
38	4300.7	0.1	2.71828183	-3.8	0.02237077	0.2	2.71828183	-7.6	0.00050045	0.02187032	94.05768704
38.5	4300.7	0.1	2.71828183	-3.85	0.02127974	0.2	2.71828183	-7.7	0.00045283	0.020826099	89.57028864
39	4300.7	0.1	2.71828183	-3.9	0.02024191	0.2	2.71828183	-7.8	0.00040973	0.019832176	85.29224133
39.5	4300.7	0.1	2.71828183	-3.95	0.0192547	0.2	2.71828183	-7.9	0.00037074	0.018883958	81.21423918
40	4300.7	0.1	2.71828183	-4	0.01831564	0.2	2.71828183	-8	0.00033546	0.017980176	77.32734404
40.5	4300.7	0.1	2.71828183	-4.05	0.01742237	0.2	2.71828183	-8.1	0.00030354	0.017118886	73.62297594
41	4300.7	0.1	2.71828183	-4.1	0.01657268	0.2					

Cuya gráfica se muestra a continuación:

Figura 12

Forma de Onda de Voltaje incidente sobre la línea



Fuente: Propia.

CAPÍTULO IV. Propuesta de alternativas de mejora ante la incidencia de descargas atmosféricas de las líneas de distribución de media tensión 7.6/13.2 kV en Nicaragua, tomando en cuenta la norma IEEE Std 1410-2010.

Como vemos de la tabla No.3 y su gráfica de la figura No,12 el valor máximo de la magnitud de la onda de voltaje incidente tipo rayo sobre la línea de distribución, tiene una magnitud máxima calculada de 1,075.12 kV, cuyo efecto sería destructivo para los aisladores de la línea causando flameo, siendo el nivel máximo de sobretensión soportada por línea de 95 kV.

La experiencia y las observaciones muestran que muchas de las salidas relacionadas con las descargas tipo rayo de las líneas de bajo aislamiento son ocasionadas por rayos que chocan con tierra en las proximidades de la línea. Muchas de las tensiones inducidas por rayos en líneas de distribución que terminan cerca de la línea son inferiores a 300 kV. Los rayos pueden ser atraídos por objetos muy altos, de tal modo que la altura y la distancia de la línea de distribución a puntos de altos tales como árboles y edificios tendrá influencia en el comportamiento de la línea ante las descargas tipo rayo.

Las descargas atmosféricas pueden tener un efecto muy significativo en la confiabilidad de una línea, especialmente si sus postes son más altos que el medio que la rodea.

Tomando en consideración la norma IEEE Std 1410-2010, exponemos las siguientes consideraciones a seguir para minimizar la incidencia de las descargas atmosféricas de efectos negativos sobre las líneas de distribución en media tensión 7.6/13.2 kV en Nicaragua:

- 1 En vista de que los árboles próximos al trazado de la línea de distribución juegan un papel predominante en el comportamiento de las líneas de distribución frente al fenómeno de descargas atmosféricas, así como también las edificaciones próximas, pueden interceptar muchas descargas tipo rayo que de otra manera pudieran caer sobre la línea, se debe evitar al máximo el tendido de las líneas en sus proximidades. Es decir, tender la línea de distribución a campo abierto.
- 2 Garantizar un buen nivel de aislamiento de la línea de distribución , en este caso al menos 95 kV.

- 3 Dimensionar los aisladores utilizados en la línea de distribución en correspondencia con el voltaje de flameo normado para el voltaje de la línea de distribución.
- 4 Determinar los índices de descargas atmosféricas en la zona de trazado de la línea de distribución, para así dimensionar sus protecciones contra descargas atmosféricas.
- 5 Dimensionar el valor de la resistencia de puesta a tierra de las estructuras de la línea de distribución.
- 6 Proteger los dispositivos sensibles conectados a la línea de distribución de media tensión con pararrayos.

CAPÍTULO V. El uso de contrapeso para mejora de las líneas de distribución de media tensión 7.6/13.2 kV contra descargas atmosféricas.

El uso de contrapesos en un sistema de puesta a tierra ayuda a mejorar su desempeño ante rayos al aumentar el área de contacto con el suelo y reducir la resistencia a tierra. Los contrapesos, que son conductores enterrados, facilitan la dispersión de la corriente del rayo, disminuyendo el riesgo de daños a la estructura y equipos conectados (Roja, 2021).

Los sistemas de puesta a tierra son cruciales para la seguridad eléctrica y la protección contra rayos. Un sistema de puesta a tierra efectivo reduce la tensión en caso de fallas a tierra, protege los equipos y minimiza el riesgo de incendios y lesiones.

¿Cómo funcionan los contrapesos?

Un contrapeso es un conductor enterrado, generalmente cables, que se extiende radialmente desde la base de una estructura o torre. Al estar en contacto con el suelo, el contrapeso aumenta el área efectiva de contacto entre el sistema de puesta a tierra y el terreno, lo que ayuda a:

- **Reducir la resistencia a tierra:**

Una menor resistencia a tierra permite que la corriente del rayo se disperse más fácilmente, evitando que la tensión en la estructura aumente demasiado.

- **Mejorar la dispersión de la corriente:**

La corriente del rayo se distribuye sobre una mayor área del suelo, lo que reduce la concentración de corriente en un punto específico y disminuye el riesgo de daños.

- **Proteger contra sobretensiones:**

Al reducir la resistencia a tierra y mejorar la dispersión de la corriente, los contrapesos ayudan a proteger los equipos conectados al sistema contra daños causados por sobretensiones generadas por rayos.

Tipos de contrapesos:

- **Contrapesos radiales:** Cables que se extienden desde la base de la torre hacia afuera, como radios de una rueda.
- **Contrapesos circulares:** Cables que forman un círculo alrededor de la base de la torre.
- **Contrapesos en malla:** Una red de cables entrelazados que cubre un área específica.

CAPÍTULO VI. Identificación de parámetros característicos de las descargas atmosféricas en el municipio de Managua.

El uso de contrapesos en un sistema de puesta a tierra ayuda a mejorar su desempeño ante rayos al aumentar el área de contacto con el suelo y reducir la resistencia a tierra. Los contrapesos, que son conductores enterrados, facilitan la dispersión de la corriente del rayo, disminuyendo el riesgo de daños a la estructura y equipos conectados.

PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.

En su camino, el rayo calienta el aire a temperaturas cercanas a los 30.000 °C (algo más que la temperatura de la superficie del Sol), haciéndole estallar produciendo el sonido que conocemos como ‘trueno’ (imagen, 2000).

Cuando el potencial eléctrico entre nube y tierra alcanza un cierto valor, de alrededor de 10.000 V, el aire deja de comportarse como aislante y comienza a hacerlo como conductor, siendo entonces atravesado, durante una fracción de segundo, por una enorme descarga eléctrica de unos 20.000 A y que en ocasiones puede alcanzar valores de hasta 200.000 A.

Realmente, cada rayo está compuesto por una secuencia de entre 2 y 5 descargas individuales con una duración de 20 a 50 mseg. La energía media por cada descarga es de uno 3.000 J (equivalente a una explosión de un kilo de dinamita).

La enorme cantidad de energía que libera un rayo hace que los mayores efectos del rayo sean los incendios y electrocuciones debidos a impactos directos. Pero, tal y como veremos, no son menos importantes los efectos interferentes en equipos eléctricos y electrónicos.

Existen más de 15 parámetros relacionados con las descargas eléctricas atmosféricas. De entre ellos, los más relevantes son:

- **Nivel ceraúnico:** Es el número de días del año en los que, al menos, es oído un trueno. En algunos zonas del planeta el nivel ceraúnico puede llegar hasta 300.

- **Densidad de rayos a tierra (DRT):** es el número de rayos a tierra por kilómetro cuadrado al año. Es un parámetro complementario al nivel ceráunico que permite cuantificar la incidencia de rayos en la zona.
- **Polaridad del rayo:** signo de las cargas transferidas. Normalmente son electrones, pero en algunos casos pueden transferirse cargas positivas.
- **Impedancia del canal:** Se pueden considerar a la nube y a la tierra como placas de un condensador que se descargan a través de un canal con una impedancia de unos 5 kW , de carácter inductivo debido a que la formación del canal requiere de un cierto instante de tiempo.
- **Corriente de pico:** es, junto al gradiente máximo de corriente del rayo, el parámetro más importante de una descarga. Resulta importante para el diseño de protección contra rayos.
- **Gradiente máximo de corriente del rayo:** $(di/dt)_{max}$, se utiliza para el cálculo de tensiones electromagnéticas inducidas que se presentan en los lazos metálicos, abiertos o cerrados, en cualquier instalación y son las causantes de daños de equipos electrónicos (televisores, teléfonos, equipos de comunicación, etc.).
- **Cuadrado de la corriente de impulso del rayo:** este parámetro se utiliza para el cálculo del calentamiento y los esfuerzos electromecánicos al circular la corriente del rayo por conductores metálicos de las protecciones primarias.

Los valores máximos que llegar a alcanzar algunos de estos parámetros quedan reflejados en la siguiente tabla:

Intensidad de Pico = $I_{pico} = 100 \text{ kA}$
Gradiente máximo de subida = $(di/dt)_{max} = 100 \text{ kA}/\mu\text{s}$
Energía útil = $\int i^2(t)dt = 5kA^2s$

De esta forma, si se desea una protección completa, esta debería actuar ante una descarga de 100 kA, mientras que en un equipo que sea permisible el fallo deberá soportar corriente de pico de 6 A. La elección de un tipo de protección u otra dependerá del coste del sistema de protección y de las pérdidas que se tendrían si no se usan. En la siguiente tabla se muestra los valores que deberá soportar nuestro sistema de protección para unos niveles de seguridad medio y extremos:

Parámetros característicos del municipio de Managua:

A nivel estadístico no se cuenta con ningún registro de los parámetros de incidencia de las descargas atmosféricas a nivel del municipio de Managua, la entidad encargada de llevar esta información, INETER, El Instituto de Estudios Territoriales de Nicaragua, no cuenta con esta información, así nos basaremos en los indicadores de la norma IEEE-1410-2010, referidos en la siguiente tabla:

Tabla 4

Parámetros característicos de descargas atmosféricas

Parámetro	Valor medio	Valor máximo
Corriente pico (kA)	0 a 25	230
Gradiente de corriente (kA/ μ s)	8	50
Duración del rayo (Seg)	0.1 a 0.3	1.5
Duración de cada descarga (mSeg)	0.5 a 3	400
Intervalo de tiempo entre impulsos (mSeg)	30 a 40	500
Tiempo hasta el valor de pico (μ Seg)	1 a 4	10
Número de descargas de un rayo	2 a 4	34

Fuente: Norma IEEE-1410-2010.

Conclusiones y Recomendaciones.

Conclusiones

- A partir de nuestra investigación sobre la incidencia de descargas atmosféricas en las líneas eléctricas de distribución de media tensión, se deduce que existe un alto porcentaje de fallas provocadas por medios externos como descargas atmosféricas, y que para mejorar estas deficiencias se debe seguir estudiando y comprendiendo este tipo de problemas, con el fin de evitar que ocurran y mejoren la calidad del servicio de energía eléctrica del país.
- Que mediante nuestra investigación pudimos verificar mediante el modelo en Excel de la onda de voltaje de la descarga atmosférica el efecto de la onda viajera, que son provocadas por el impacto de una descarga atmosférica en una línea de distribución.
- Que pudimos establecer la evaluación de las descargas atmosféricas en las líneas de distribución de media tensión conforme la norma IEEE -1410-2010.
- Que logramos establecer conforme la norma IEEE-1410-2010, los parámetros característicos relevantes de las descargas atmosféricas.

Recomendaciones

- Se recomienda que el organismo encargado de vigilancia de condiciones atmosféricas y climatológicas de Nicaragua, INETER, se encargue de monitorear las descargas atmosféricas con fines de elaborar y mantener actualizado un mapa isoceraúnico. La falta de información obliga a consultores e investigadores a asumir premisas que no necesariamente son las más adecuadas para el diseño de las líneas de alta y media tensión.
- Se recomienda que los concesionarios de distribución cuyas áreas de concesión se encuentren ubicados en zonas donde se produzcan descargas atmosféricas, lleven también un registro del comportamiento de las líneas eléctricas de distribución de media tensión frente a las sobretensiones atmosféricas.

Bibliografía

- 1 Cañizales, P. (2000). *Estudio de sobrevoltajes en redes de distribución*. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/8793/3/T1560.pdf>
- 2 Ecuador, E. P. (2000). *Cálculo de descargas atmosféricas en subestaciones*. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/8861/3/CD-5936.pdf>
- 3 Edu, A. (2024). Obtenido de https://www.academia.edu/9600500/Diseno_de_sistema_de_proteccion_contra_descarga_electrica
- 4 EPN. (2023). Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4874/1/C%C3%A1lculo%20del%20comportamiento.pdf>
- 5 hidrometeorología-Panamá, D. d. (2025). Obtenido de <https://www.imhpa.gob.pa/uploads/documentos/ISOCERAUNICO2021.pdf>
- 6 imagen, L. d. (2000). *Parámetros característicos de las descargas atmosféricas*. Obtenido de https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/EMC/trabajos_02_03/Proteccion_contra_descargas_atmosfericas/6/6.htm
- 7 INE. (2025). Obtenido de https://www.ine.gob.ni/?page_id=122532
- 8 Instituto Nicaraguense de energia, I. (2000). *Indicadores de Calidad del Servicio*. Obtenido de https://www.ine.gob.ni/?page_id=122532
- 9 JDELECTRICOS. (2025). *Aisladores Poliméricos*. Obtenido de <https://jdelectricos.com.co/aislador-de-suspension-polimerico-de-15-kv/>
- 10 Lagos, F. G. (2012). *Estudio estadístico de descargas atmosféricas en línea eléctricas*. Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/10561/1/68.pdf>

- 11 Medellín, E.-E. P. (2025). Obtenido de
https://www.essa.com.co/site/Portals/clientes/Norma_Tecnica_Vigente/Normas_Complementarias_Dise%C3%B1o/GM-03%20GUIA%20METODOLOGICA%20COORDINACION%20DE%20AISLAMIENTO%20PARA%20REDES%20DE%20DISTRIBUCION.pdf
- 12 México, I. P. (2022). *Estudio Estadístico de descargas atmosféricas*. Obtenido de
<https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/10561/1/68.pdf>
- 13 Páez, L. (2016). *Modelación de ondas viajeras en líneas eléctricas de distribución*. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/13150/1/UPS-GT001720.pdf>
- 14 Plata, U. d. (2023). *Protección contra descargas atmosféricas*. Obtenido de
[https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/electrica/5_anio/transmision_distribucion_energia_electrica/files/Protecciones%20contra%20sobretensiones%20-%20Descargas%20atmosf%C3%A9ricas_rev.1%20\(1\).pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/electrica/5_anio/transmision_distribucion_energia_electrica/files/Protecciones%20contra%20sobretensiones%20-%20Descargas%20atmosf%C3%A9ricas_rev.1%20(1).pdf)
- 15 *Researche*. (s.f.). Obtenido de
https://www.researchgate.net/publication/274476372_Lightning_Performance_of_Grounding_of_Overhead_Power_Distribution_Lines
- 16 Roja, A. S. (2021).
- 17 Rosario, U. T. (2025). Obtenido de
https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/electrica/5_anio/transmision_distribucion_energia_electrica/files/Aislacion.pdf
- 18 Salesiana, U. T. (2025). Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18815>
- 19 Washington, O. (2024). *Universidad Politécnica Salesiana*. Obtenido de
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21463/1/UPS-GT003542.pdf>

ANEXO

**IEEE std 1410-2010 GUÍA PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO DEL RAYO SOBRE LAS
LINEAS AEREAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGIA**

Marzo, 2013

Introducción

El rayo es una de las principales causas de fallas en líneas de distribución habituales. Estas fallas pueden causar interrupciones momentáneas o permanentes en los circuitos de distribución. Las preocupaciones acerca de la Calidad de la energía han creado más interés en un relámpago, y una mejor protección contra el rayo en las líneas aéreas de distribución está siendo considerada como una forma de reducir el número de interrupciones momentáneas y huecos de tensión. El rayo suele causar fallas temporales en las líneas de distribución aéreas. Si la falla se elimina por medio de un interruptor o un reconectador, el circuito puede ser vuelto a cerrar con éxito. En el pasado, esto era aceptable, pero ahora con el crecimiento de las cargas sensibles, las interrupciones momentáneas son una preocupación importante.

Los rayos también pueden provocar fallas permanentes. De cinco a diez por ciento de las fallas causados por rayos se cree que causan daño permanente a los equipos. Falta temporales también pueden causar interrupciones permanentes si la falla se borra por un dispositivo de un solo disparo de protección, tal como un fusible.

Las estimaciones sobre el rendimiento de las líneas de distribución eléctrica contienen muchas incertidumbres. Algunos de los elementos básicos como la intensidad de los rayos mide la densidad del suelo flash (GFD), o la estimación del número de golpes directo a una línea de distribución puede tener errores significativos. A menudo, los cálculos aproximados o generalmente aceptado son tan eficaces como los cálculos detallados. Esta guía está pensada para proporcionar estimaciones de fallas causadas por rayos, fallas que están vinculadas a las variables físicas, como la altura de la línea, la presencia de paralelo groundwires neutros o gastos generales (OHGW), los intervalos entre los electrodos de tierra y / o dispositivos de protección contra sobretensiones, la proximidad de la línea para objetos cercanos y las características del suelo.

Otro objetivo de esta guía es proporcionar estimaciones revisadas de las fallas causadas por relámpagos que muestran la eficacia de diversas opciones de mejora. Las estimaciones utilizando esta guía puede ser utilizada para comparar protección contra rayos mejorada con otros métodos de mejora de la fiabilidad del sistema y calidad de la alimentación tales como los programas de poda de árboles o esquemas mejorados de protección, como el uso de reconectores adicionales o seccionadores. Esta guía también debería beneficiar en la evaluación de las normas de diseño.

Resumen

Esta guía diseñada por la IEEE describe los métodos para calcular el rendimiento de un rayo encima de las líneas de distribución, y está escrito por el diseñador de la línea de distribución. En esta guía se

reconoce que el diseño de una línea perfecta, no existe, y que una serie de transacciones se realizan en cualquier diseño de línea de distribución. Mientras que algunos parámetros tales como la tensión, el enrutamiento, y la capacidad puede ser predeterminado, otras decisiones se toman en la discreción del diseñador. El diseñador puede ejercer control sobre el material y la geometría de la estructura, blindaje (si la hay), la cantidad de aislamiento, conexión a tierra, y la colocación de los descargadores. Esta guía ayudará a los diseñadores de las líneas de distribución a optimizar el diseño de la línea a la luz de las consideraciones de costo-beneficio.

1.1 Alcance

En esta guía se identificarán los factores que contribuyen a las fallas causadas por rayos en las líneas de distribución aéreas y sugerir futuras mejoras en construcciones nuevas y existentes, a su vez norma se limita a la protección de aislamiento de línea de distribución para el sistemas eléctricos de potencia con niveles de tensiones menores o iguales a 69.

1.2 Propósito

El propósito de esta norma es presentar alternativas para la reducción de descargas atmosféricas cerca a las líneas de distribución o sobre las líneas de distribución; obteniendo con ello el aumento significativo de la confiabilidad, seguridad y estabilidad del sistema eléctrico de potencia.

3. Definiciones

Citando algunos conceptos que define la norma IEEE std 1410-2010, se tiene lo siguiente:

3.1 descargas eléctricas (rayos): Una descarga disruptiva del aislamiento como resultado de un rayo en una parte de la red o de la instalación eléctrica que se encuentra normalmente puesta a tierra.

3.2 impulso básico nivel de aislamiento (BIL) (impulso nominal) (pararrayos): Voltaje Nominal. Tolerable de impulso por Rayos o nivel básico de impulso.

3.3 relámpagos de nube a tierra: Relámpago descendente desde la tierra a la nube.

3.4 impulso crítico tensión de flameo (CFO) (aislantes): El valor de cresta de la onda de impulso que, en determinadas condiciones, causa flashover a través del medio circundante sobre 50% de las solicitudes.

3.5 flash directo: Un rayo con una o más rutas de retorno impactando directamente a cualquier parte de una red o instalación eléctrica.

3.6 destello directo: Un rayo que impacta directamente en cualquier parte de una instalación de red o eléctrica.

3.7 Distribución línea: Líneas de energía eléctrica que distribuyen la energía de una subestación principal a otras subestaciones bien sean de transmisión, generación, distribución o simplemente de llegada o salida de circuitos.

3.8 flashover (general): una descarga disruptiva a través de aire alrededor o sobre la superficie de sólidos o líquidos aislamiento, entre partes de diferente potencial o polaridad, producidos por la aplicación de tensión en el que la ruta de circulación se vuelve lo suficientemente ionizada para mantener un arco eléctrico.

3.9 electrodo de tierra: Conductor o grupo de conductores en contacto con el suelo con el propósito de proporcionar una conexión entre las instalaciones eléctricas y el suelo con el fin de garantizar la circulación de corrientes de fallas a la hora de una contingencia..

3.10 densidad de destellos a tierra (GFD) (Ng): El número de destellos de relámpagos por unidad de área y por unidad de tiempo en un área en particular.

3.13 inducida por tensión (caídas de rayos): La tensión inducida en una instalación de red eléctrica o por una carrera cerca.

3.14 rayo de retorno primero: una descarga de rayo a tierra inicia cuando la punta de una baja líder dio un paso se encuentra con un líder ascendente de la tierra.

3.15 relámpago: La descarga del rayo completa, lo más a menudo compuesta de uno o más de los líderes una nube seguida de una o más carreras de retorno.

3.16 relámpago posterior : una descarga de rayo que puede seguir una trayectoria ya establecida por un primer golpe.

3.17 corte de relámpago: Un corte de energía después de una descarga disruptiva rayo que da lugar a fallos del sistema actual, lo que requiere el funcionamiento de un dispositivo de conmutación para solucionar el fallo.

3.18 rendimiento de una línea de relámpago: El rendimiento de una línea expresada como el número anual de relámpagos como descargas disruptivas de un kilómetro de circuito o la torre de línea de base kilómetro.

3.19 de óxido de metal sobretensiones (MOSA): Un pararrayos utilizando elementos de válvula fabricados a partir lineal resistencia de óxido de metal materiales.

3.20 trazo cercano: Un rayo que no termina directamente en cualquier parte de una red, pero induce una sobretensión importante en él.

3.21 sobrecarga de toma de tierra (OHGW): Cable a tierra o cables colocados por encima de los conductores de fase con el propósito de interceptar golpes directos con el fin de proteger a los conductores de fase de los golpes directos. Ellos puede conectarse a tierra directamente o indirectamente a través de huecos cortos. Un OHGW también funciona como un cable apantallado.

3.22 blindaje ángulo: El ángulo entre la línea vertical que pasa por el cable y una línea overheadground conectar el cable de tierra en el techo con el conductor blindado.

3.23 blindaje: Cable a tierra (s) situado cerca de los conductores de fase a los efectos de: a) La reducción de la incidencia de descargas atmosféricas directas a los conductores de fase,
 b) Reducción de tensiones inducidas contra las señales externas campos electromagnéticos,
 c) La reducción de la impedancia propia oleada de toma de tierra de una sobrecarga (OHGW) del sistema,
 o d) El aumento de la impedancia mutua de un sistema de OHGW a los conductores de fase protegidas.
 La neutro a tierra debajo de un conductor de fase como funciones de un cable **apantallado** (funciones b, c, d), pero no como una OHGW (una función).

3.24 chispa: Cualquier corto espacio de aire entre dos conductores aislados eléctricamente o de forma remota conectados eléctricamente entre sí.

3.25 sobretensiones: Un dispositivo de protección para limitar las sobretensiones en los equipos mediante la desviación de sobretensiones actual y devolver el dispositivo a su estado original. Es capaz de repetir estas funciones tal como se especifica.

4. Parámetros del rayo

4.1 incidencias del relámpago

Los rayos ocurren durante las tormentas de lluvia, tormentas de nieve y otros fenómenos naturales. Sin embargo, en la mayoría de las áreas, las tormentas son la principal fuente de los rayos. Las tormentas producen intracloud, de nube a nube y nube toground-rayo. Intracloud rayo es la más frecuente, pero de nube a tierra un rayo afecta a las líneas de distribución aéreas. Durante una tormenta, las interrupciones de energía son causadas por el viento y los relámpagos. Las Interrupciones originada por el viento, los árboles, y el equipo dañado a veces se supone que son causadas por un rayo, que hacen que el número de interrupciones del rayo causadas aparecen artificialmente alta.

La fiabilidad de una línea de distribución depende de su exposición a los rayos. Para determinar la exposición, el diseñador de las líneas de distribución necesita saber la densidad de destellos de tierra (GFD), definida como el número de destellos por unidad de área por unidad de tiempo. La medida preferida es la densidad de destellos N_g , el número de destellos nube-tierra por kilómetros por año

4.1.1 Consideraciones estadísticas

Los rayos y relámpagos causados por las tasas de interrupción tienen una variación considerable año tras año, la desviación estándar histórica para las mediciones anuales de la actividad de los rayos varía de 20% a 50% de la media. Las estimaciones de GFD para una región pequeña como 10 km × 10 kilómetros tienen una mayor desviación estándar de alrededor de 30% a 50% de la media. Grandes regiones como 500 kilómetros × 500 kilómetros tienen una desviación estándar menor de 20% a 25% de la media. En las zonas de menor los niveles de actividad de los rayos, la desviación estándar relativa es mayor.

Con tales desviaciones estándar grandes, se necesitan muchos años de datos para estimar un valor medio con precisión. Esto es especialmente cierto cuando se utiliza el flash en tierra de datos para

una región localizada o estimar causados por rayos las tasas de interrupción en una línea de distribución de los datos de corte.

Las estimaciones de la media GFD también se pueden obtener directamente a partir de datos de la red de detección de rayos-o desde contadores de Rayo. Si muchos años de datos están presentes, esto tiene la ventaja de identificar variaciones regionales. Un tamaño de retícula mínimo que proporciona al menos 400 registros en cada célula sobre el periodo seleccionado de observación se utiliza para permitir una comparación significativa de las áreas adyacentes.

4.1.2 Bajos datos de densidad de destellos del trueno

La densidad de destellos sobre el terreno N_g de las zonas templadas pueden estimarse a partir de T_d , el nivel ceraúnico, utilizando La ecuación (1) de Anderson et al. [B6]:

$$N_g = 0,04 T_d^{1.25}$$

Donde:

N_g es la densidad de destellos sobre el suelo por km² por año

T_d es el número de días con tormentas por año

Torres et al. [B29] señaló que esta expresión tiene errores inaceptablemente grandes en áreas tropicales, recomendando las expresiones alternativas para la ecuación (1):

País	Expresión alternativa para la ecuación (1)
México	$N_g = 0.024 T_d^{1.12}$
Brasil	$N_g = 0.030 T_d^{1.12}$
Colombia	$N_g = 0.0017 T_d^{1.56}$

Otra estimación de GFD puede ser obtenido a partir de los registros de horas tormenta eléctrica, como se ha mostrado por la Ecuación a continuación:

$$N_g = 0,054 T_h^{1.1}$$

Donde

N_g es la densidad del suelo en destellos del flash por km² por año

T_h es el número de horas de tormenta por año

Con la incertidumbre en la elección de expresiones apropiadas, la mala calidad estadística de las observaciones en regiones con un rayo limitado (una región con $T_d = 5$ requerirá 80 años de observaciones para cumplir el criterio de 400 observaciones) y la disponibilidad inmediata de mejores alternativas, el uso de datos para predecir el trueno sobre la línea de distribución eléctrica cuyo desempeño debe ser interrumpido.

4.1.3 Baja densidad destello de un relámpago fugaz densidad óptica

En la mayoría de las áreas del mundo, una indicación de la actividad de los rayos puede ser obtenida a partir de observaciones de transitorios de rayos ópticos, véase Christian et al. [B24]. Sensores satelitales responden a todos los tipos de rayo con una cobertura relativamente uniforme en todas las áreas. Con un promedio suficiente, la densidad óptica transitoria. Los datos de la Figura 1 proporcionan mejores estimaciones de la densidad del suelo de flash de observaciones trueno, que tienen una amplia gama de relaciones entre la densidad del suelo flash y tormentas eléctricas horas o días. Hay también variaciones regionales en la relación de destellos del terreno a destellos totales, ver Boccippio et al. [B14], pero una mediana de valor de 0,33 flashes de tierra a los flashes totales se recomienda para las regiones tropicales y templadas.

Para las áreas sin sistemas terrestres de localización de rayos o contadores relámpago, la recomendada estimación de la densidad del suelo flash es:

$$N_g = N_t / 3$$

Donde;

N_g es la densidad del suelo en destellos del flash por km² por año

N_t es la total (nube-tierra) densidad de destellos ópticos por km² por año.

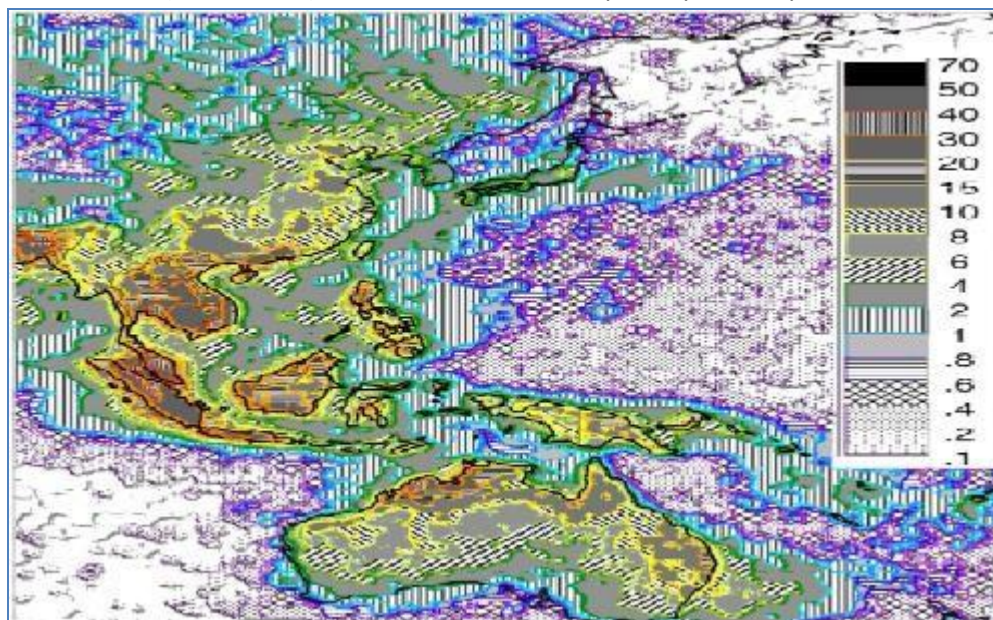
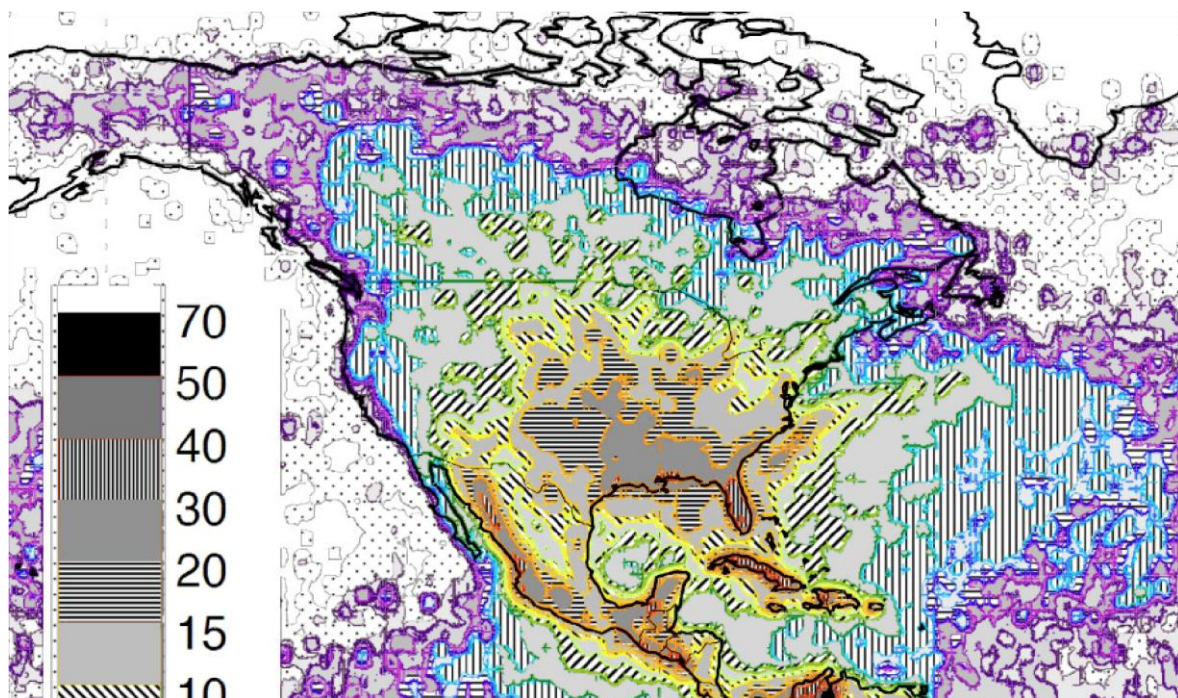
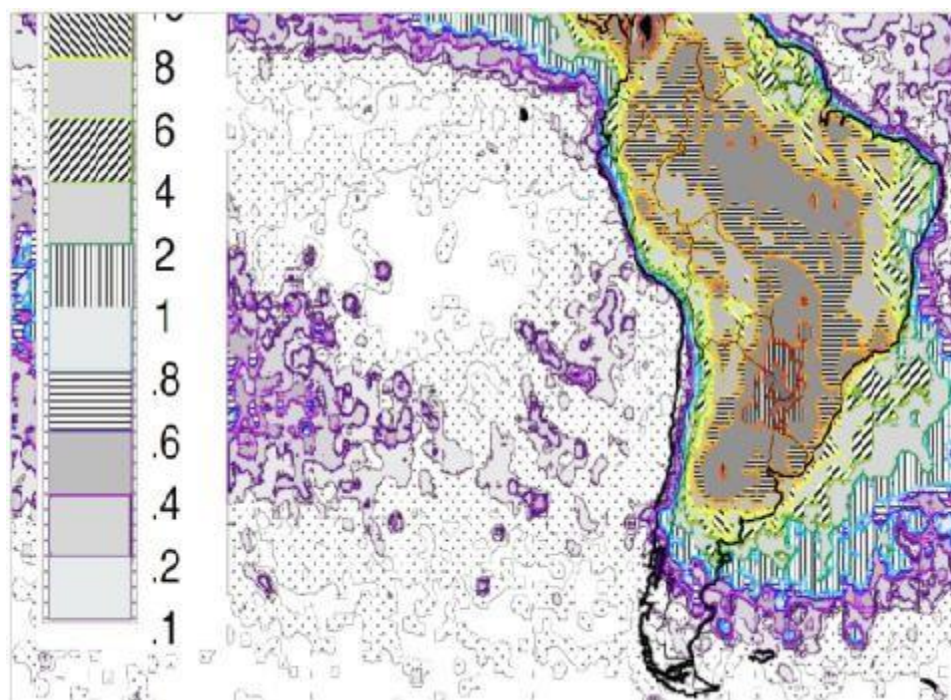
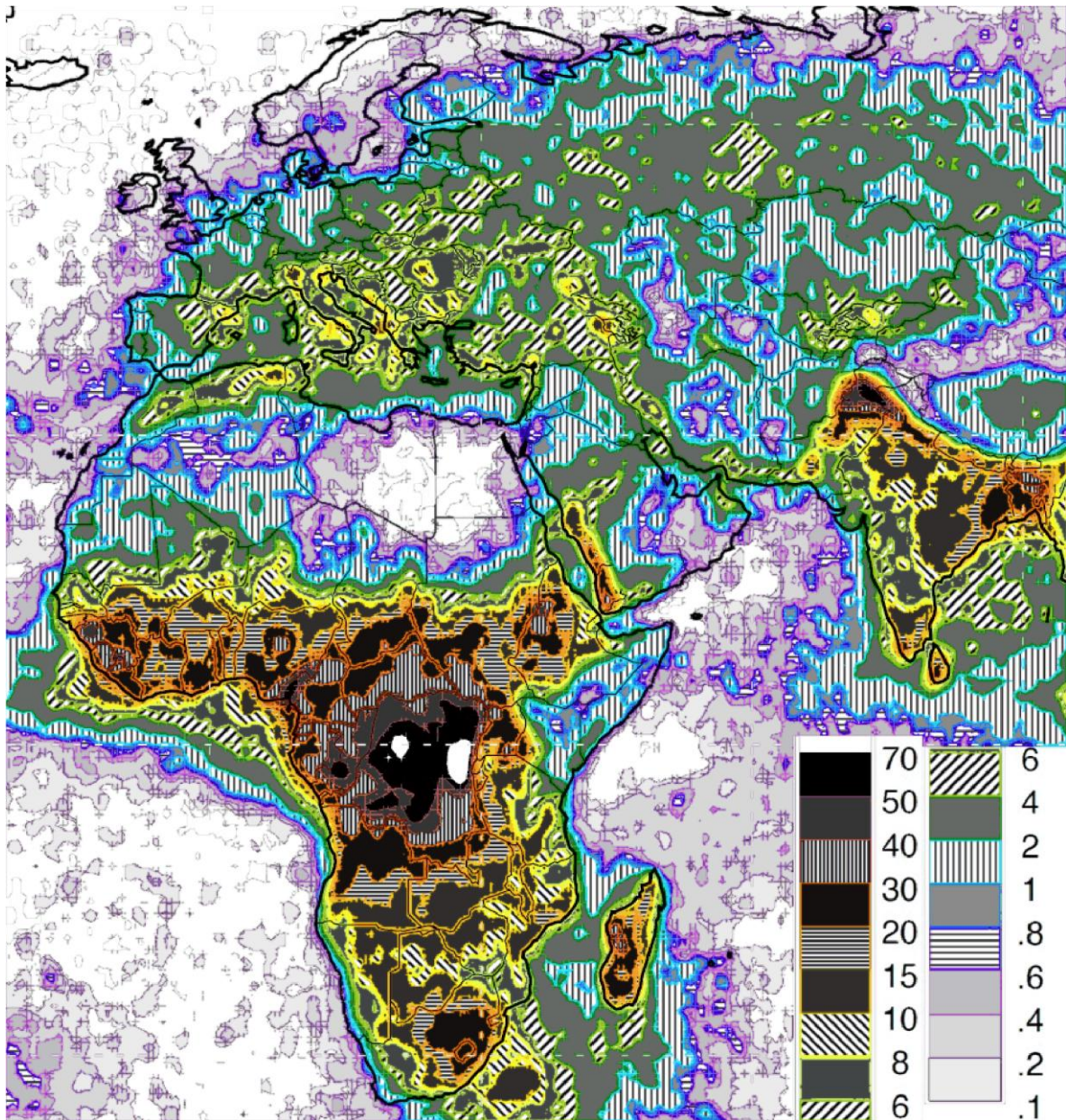


Figure 1 a— Total (cloud + ground) lightning activity (N_t , optical flashes per km² year-1)for Asia and Australia, adapted from Christian et al. [B24]

Figura 2 - Mapa de distribución general de alimentos de EE.UU. contiguos (reimpreso con el permiso de Vaisala) [B78]







4.1.4 Ground flash density from lightning location networks

A more detailed depiction of lightning activity may be obtained from lightning ground flash density (GFD) maps, which are created from information obtained via present-day lightning-detection networks or lightning flash counter networks that have been operated in the past. A sample GFD map of the United States from a lightning location network is shown in Figure 2.

Redes y matrices de ubicación de destellos de relámpagos se tienen en venta libre en América del Norte y otras partes del mundo. Con suficiente experiencia, estas redes proporcionan mapas detallados de distribución de densidad de destellos a tierra (GFD) con mucho mayor detalle y precisión que los que han estado disponibles acerca de los truenos o datos ópticos transitorios. Los sistemas de localización También proporcionan cantidades medidas que sean más útiles y detallados que los datos ceraúnico. Además de proporcionar la densidad de destellos a tierra, sobre las redes eléctricas de distribución también puede indicar la fecha, hora, lugar, número de descargas, polaridad, pico campos electromagnéticos radiados y la estimación correspondiente de corriente de pico

En muchas áreas del mundo, estos sistemas han acumulado datos suficientes para satisfacer los propósitos del diseño en áreas de cuadrícula fina como 20 km × 20 km. Mapas de GFD se están utilizando actualmente para el diseño de la línea de distribución, estimar causas de los relámpagos, descargas disruptivas, y para muchos otros tipos de análisis de rayos.

4.2 Características eléctricas de los relámpagos

4.2.1 Parámetros de forma de onda

La corriente de sobretensión impresionado se considera que es una fuente de corriente. Destellos directos a los conductores no protegidos causar sobretensiones que tienen la forma de onda igual a la corriente de accidente cerebrovascular. La Figura 3 describe el típico cóncava forma de onda de corriente de rayo con el uso de los parámetros mostrados.

Parámetros en la figura 3	Descripción
I_{10}	10% interceptar a lo largo de la forma de onda actual
I_{30}	30% a lo largo de interceptar la onda de choque de corriente
I_{90}	90% interceptar a lo largo de la forma de onda actual
$I_{100} = I$	pico inicial de corriente
IF	pico final del actual
$T_{10/90}$	<i>Tiempo entre I_{10} y I_{90} intersecciones con el frente de onda</i>
$T_{30/90}$	<i>Tiempo entre I_{30} y I_{90} intercepta en el frente de onda</i>
S_{10}	instantáneo de la velocidad de aumento de la corriente a I_{10}
$S_{10/90}$	pendiente media (I_{10} y I_{90} a través de intersecciones)
$S_{30/90}$	pendiente media (I_{30} y I_{90} a través de intersecciones)

Sm	I9 máxima tasa de aumento de la corriente a lo largo del frente de onda, típicamente a I90
td 10/90	duración equivalente de frente de onda lineal derivada de IF / S10/90
td 30/90	duración equivalente de frente de onda lineal derivada de IF / S30/90
t m	fr equivalente duración de la onda lineal derivada de IF / Sm
QI	(I cargo impulso (tiempo integral de la corriente) en forma de onda actual

Figura 3 - Descripción de los parámetros de forma de onda de rayos actuales [B27]

Desde un punto de vista circuito simplificado, las sobretensiones de rayo cercano esta acoplada inductivamente a la forma de onda actual. Esto significa que la magnitud pico de sobretensión está relacionada con la pendiente máxima Sm y la duración de la sobretensión está relacionada con T10-90.

4.2.2 Log-normal distribución estadística

Desde el amplio resumen presentado por el Grupo de Trabajo CIGRE 33,01 [B27] y complementado por observaciones de líneas de transmisión en Japón por Takami y Okabe [B110], log-normal de las distribuciones de los rayos parámetros se supone. La ecuación general para la función de probabilidad logarítmica normal de densidad para cualquier x parámetro particular es dada por la ecuación (4)

$$f(x) = \frac{1}{\beta \cdot X \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{Z^2}{2}\right] \quad (4)$$

$Z = (\ln(X/M))/\beta$ donde

f(x) es la densidad de probabilidad M es el valor medio de

x β es la desviación estándar logarítmica (en base e)

4.2.3 Parámetros de la descarga negativa hacia abajo

Los golpe relámpagos constan de un primer choque o golpe y puede tener uno o más golpes posteriores, siguiendo el mismo camino y que termina en el mismo lugar en la línea. Los primeros trazos tienen mayores picos de corriente y los subsiguientes tienen una mayor velocidad de subida de corriente como se muestra en la Tabla 1.

Los valores de M y β en la ecuación (4) para los parámetros del rayo más relevantes utilizadas en el cálculo de

distribución de las tasas de interrupción de línea se presentan en la Tabla 1, sobre la base de CIGRE Grupo de Trabajo de 33,01 [B27].

Parámetros de la distribución log-normal para las descargas negativas

Parámetros	Primera carrera		posterior carrera	
	M, media	β logarítmicas desviación estándar	M, media	β a, logarítmicas desviación estándar
TIEMPO FRONTAL(μ s)				
$td_{10/90}$ $T_{10/90}/0.8$	= 5.63	0.576	0.75	0.921
$td_{30/90}$ $T_{30/90}/0.6$	= 3.83	0.553	0.67	1.013
$tm=IF / Sm$	1.28	0.611	0.308	0.708
INCLINACION (kA/ μ s)				
Sm , Maximum	24.3	0.599	39.9	0.852
$SI0$, at 10%	2.6	0.921	18.9	1.404
$SI0/90$, 10-90%	5.0	0.645	15.4	0.944
$S30/90$, 30-90%	7.2	0.622	20.1	0.967
CRESTA DE CORRIENTE (kA)				
II , initial	27.7	0.461	11.8	0.530
IF , final	31.1	0.484	12.3	0.530
Ratio, II/IF	0.9	0.230	0.9	0.207
OTROS PARAMETROS RELEVANTES				
Tail Time to Half Value tn (μ s)	77.5	0.577	30.2	0.933
Numero de golpes por destello	1	0	2.4	0.96 based on median $N_{total}=3.4$
Cargo de golpes, QI (Coulombio)	4.65	0.882	0.938	0.882
$\int I^2 dt$ ((kA) ² s)	0.057	1.373	0.0055	1.366

Intervalo intergolpe	-----	-----	35	1.066

En aras de la manipulación de la distribución probabilística de una manera sencilla, se adopta la siguiente expresión (Anderson [B4]) para la probabilidad de un primer tiempo pico de corriente I_0 que excede de un valor i_0 :

$$P(I_0 \geq i_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{i_0}{31.1}\right)^{2.6}}$$

donde

$P(I_0 \geq i_0)$ es la probabilidad de que la primera carrera de retorno tenga un pico de corriente que exceda i_0 , i_0 es el futuro primer trazo de retorno de corriente de pico (kA)

Cuando el pico de mediana primera carrera de retorno de corriente de 31,1 kA de la Tabla 1 se utiliza para i_0 en la ecuación (5), la probabilidad de que el rayo pico de corriente I_0 que excede el punto medio es de aproximadamente 0,5. La ecuación (5) se aplica a los valores de I_0 inferiores a 200 kA. Esta se encuentra en revisión por Borghetti et al. [B17] y [B20]. Reciente mediciones eléctricas de la red de detección en América del Norte indican la posibilidad de una menor mediana de valores actuales, véase Cummins et al. [B35], que puede ser el resultado de errores de clasificación de subsiguiente golpes en los sistemas de medición a distancia. La distribución de los valores de tiempos posteriores de picos de corriente se aproximan (IEEE Std 1243-1997).

$$P(I_0 \geq i_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{i_0}{12}\right)^{2.7}}$$

Donde: TRADUCIR LO QUE SIGUE

4.2.4 La amplitud y la dependencia de la frecuencia

Hay una alta correlación entre la S_m inclinación máxima y la corriente de pico S_I en la Tabla 1, lo que significa que la forma de onda misma en la Figura 3 se puede usar incluso aunque la amplitud de pico de corriente pueda variar a lo largo de un factor de 100:1 a partir de 2 kA a 200 kA. Esta correlación puede ser explotada mediante el equivalente tiempo lineal de 1,28 ms frente a los primeros golpes y 0,31 ms para movimientos posteriores en la evaluación del rendimiento del relámpago sobre la línea de distribución. Un tiempo equivalente de frente lineal de 2,0 ms, usado en IEEE Std 1243-1997 es apropiado para los primeros eventos de gran amplitud de tiempos que tienden a causar backflashovers en la línea de transmisión con niveles más altos de resistencia de aislamiento y groundwires generales.

5. COMPORTAMIENTO DE LAS LÍNEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN ANTE

LAS DESCARGAS TIPO RAYO

Esta sección describe como se estima el número de flameos (arco por encima del aislador, entre el conductor activo y el soporte puesto a tierra) directos e inducidos en circuitos de distribución. Las descargas tipo rayo pueden explicar muchas de las interrupciones de energía en las líneas de distribución. Dichas descargas pueden causar flameos por:

- a) Descargas directas
- b) Tensiones inducidas por descargas cercanas (descargas indirectas)

Las descargas directas sobre líneas de distribución de energía generan flameo del aislamiento en la mayoría de los casos. Por ejemplo, un rayo tan pequeño como de 10 kA podría producir una sobretensión de cerca de 2000 kV, la cual está excesivamente distante de los niveles de sobretensión de líneas que operan hasta 69 kV. Sin embargo, la experiencia y las observaciones muestran que muchas de las salidas relacionadas con las descargas tipo rayo de las líneas de bajo aislamiento son ocasionadas por rayos que chocan con tierra en las proximidades de la línea. Muchas de las tensiones inducidas por rayos en líneas de distribución que terminan cerca de la línea son inferiores a 300 kV. Los rayos pueden ser atraídos por objetos muy altos, de tal modo que la altura y la distancia de la línea de distribución a puntos de altos tales como árboles y edificios tendrá influencia en el comportamiento de la línea ante las descargas tipo rayo.

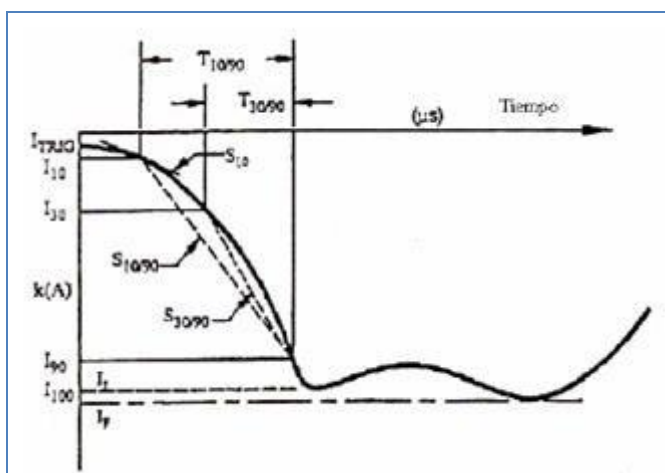


Ilustración 1. Descripción de los parámetros de las ondas tipo rayo

5.1. Descargas tipo rayo en líneas aéreas

5.1.1. Altura de la estructura

Las descargas atmosféricas pueden tener un efecto muy significativo en la confiabilidad de una línea, especialmente si sus postes son más altos que el medio que la rodea. Muchos rayos son atraídos por las estructuras más altas. La rata de recolección de rayos N , en campo abierto (sin árboles o edificios en la cercanía), es estimada de acuerdo a la ecuación de Eriksson.

$$N = Ng * \frac{28h^{0.6} + b}{10}$$

Donde:

h = Altura del poste (m) b = Ancho de la estructura (m)

Ng = Densidad de descargas (rayos/km²/año)

N = Rayos/100km/año

Para la mayoría de las líneas de distribución el factor b , ancho de la estructura, es despreciable. De la ecuación anterior, si la altura del poste aumenta un 20%, porcentaje de ocurrencia de rayos a la línea de distribución se incrementará en un 12%. La exposición de la línea de distribución a las descargas atmosféricas depende de qué tanto sobresalen las estructuras por encima del terreno que las sostiene. Las estructuras localizadas en lo alto de las montañas, cordilleras o cerros serán más vulnerables a las descargas atmosféricas que aquellas protegidas por medios naturales.

5.1.2. Protecciones por árboles y estructuras cercanas

Los Árboles y edificios pueden jugar un papel predominante en el comportamiento de las líneas de distribución frente al fenómeno de descargas atmosféricas. Los árboles y los edificios pueden interceptar muchas descargas tipo rayo que de otra manera pudieran caer sobre la línea. El factor de protección S_f , se define como la porción por unidad de una línea de distribución protegida por objetos cercanos. El número de descargas a la línea es entonces $N_s = N(1 - S_f)$

Nota: Un factor de protección de 0.0 significa que la línea de distribución está en campo abierto y que no dispone de objetos para protecciones en las cercanías, y un factor de 1.0 significa que la línea de distribución está completamente protegida contra descargas directas tipo rayo. La figura a continuación muestra los medios para aproximarse a los factores de protección con objetos de varias alturas, para una línea de distribución de 10 metros de altura. Se asume que los objetos están en una línea uniforme y paralela a la línea de distribución. Se podría representar como una hilera de árboles o edificios paralela a la línea de distribución.

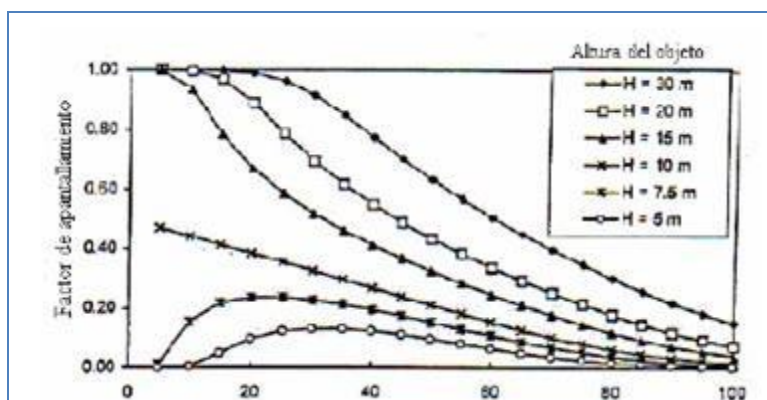


Ilustración 2: Distancia entre el objeto y la línea en metros

La figura anterior indica los factores de protección por cercanía de objetos de diferentes alturas para una línea de distribución de 10 metros de altura. Este dibujo esquemático puede utilizarse también para objetos que están ubicados en ambos lados de la línea de distribución si se suman los factores de protección para los lados derecho e izquierdo (si la suma de los factores de protección es mayor de uno, entonces el factor total de protección es igual a uno).

5.2. Flameos por tensión inducidas

De acuerdo a Rusck, la máxima tensión que puede ser inducida en una línea de energía en el punto más cercano al rayo puede estimarse por:

$$I_o \square h \quad U_{\max} = 38.8 \square \quad y$$

Donde:

I_o : es la corriente pico de la descarga

H_a : es la altura promedio de la línea sobre el nivel de tierra. y : es la distancia más corta entre la línea y la descarga tipo rayo

La ecuación anterior es utilizada para un conductor simple, infinitamente largo sobre una tierra perfectamente conductora. Un cable neutro puesto a tierra o un cable protegido en la parte alta reducirá la tensión a través del aislamiento por un factor que depende de las puestas a tierra y de la proximidad del cable de tierra a las fases conductoras. Este factor varía típicamente entre 0.6 y 0.9. La frecuencia de flameo por las tensiones inducidas puede aumentarse dramáticamente para los bajos niveles de aislamiento. La figura a continuación presenta la frecuencia de flameo como una función del voltaje de flameo de impulso crítico VFIC, (CFO) de la línea. A su vez muestra resultados para dos configuraciones de puestas a tierra. El circuito sin conexión a tierra no dispone de cable de neutro a tierra ni del cable protegido, tal como ocurre con el circuito de tres líneas sin puesta a tierra o el de cuatro líneas con una puesta a tierra. Los resultados para un circuito con puestas a tierra son los de un circuito con un cable neutro a tierra o un cable protegido en la parte alta. El circuito con puestas a tierra presenta muy pocos flameos para un VFIC dado debido a que el cable de puesta a tierra reduce el esfuerzo de la tensión a través del aislamiento. Las disposiciones de los circuitos sin conexión a tierra o con una puesta a tierra,

sin embargo, pueden presentar mayores tendencias a presentar voltajes de flameo fase a tierra más altos que una disposición de circuito equivalente con multipuestas a tierra, debido a la falta del cable de neutro a tierra. Los valores están normalizados para una densidad de descargas, DRT (GFD) de una descarga/km²/año y una altura de la línea de distribución de 10 m. Los resultados se pueden escalar linealmente con respecto a la longitud y el DRT (GFD).

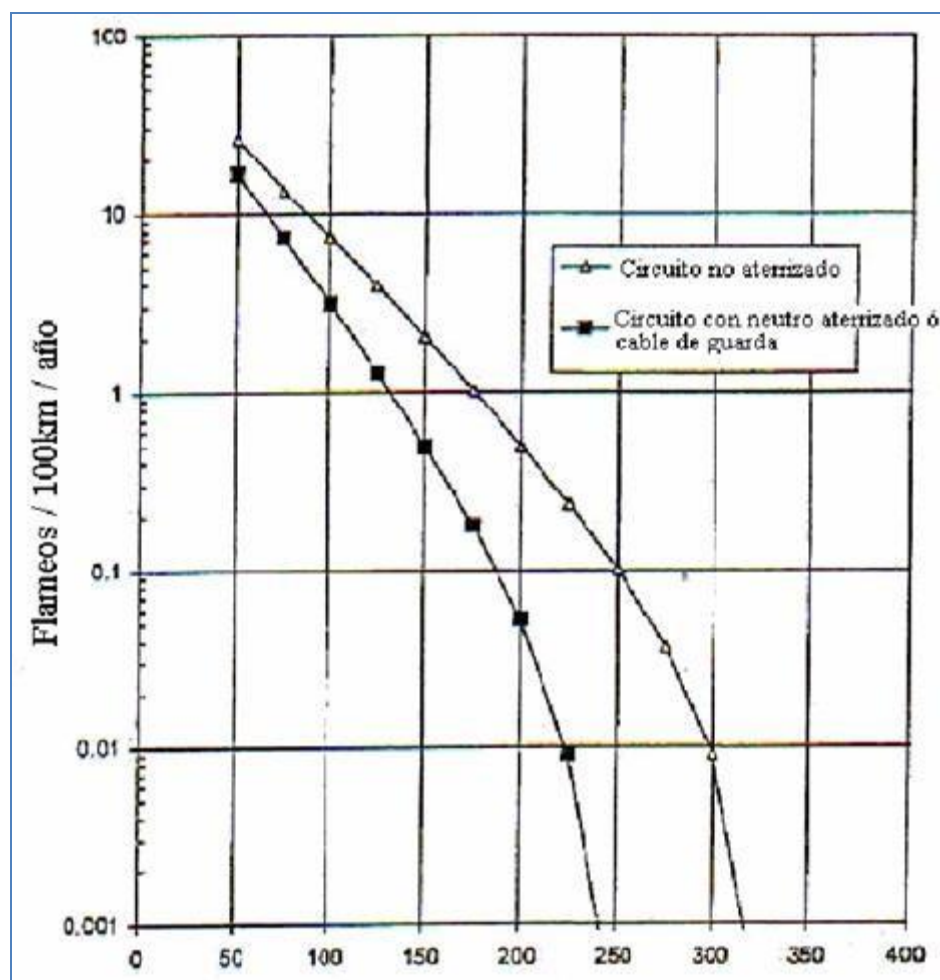


Ilustración 3 Numero de flameos de tensiones inducidas versus nivel de aislamiento de la línea de distribución, voltaje de flameo de impulso critico, VFIC en kV

Los resultados mostrados en la figura anterior son para una línea de distribución en campo abierto sin edificios y sin árboles en la cercanía. El número de flameos inducidos depende de la presencia de objetos cercanos que puedan proteger la línea de descargas directas. Esto puede incrementar los flameos por voltajes inducidos debido a que ocurren muchas descargas en las áreas cercanas. Como un punto de referencia, una línea de distribución en campo abierto con una altura de 10 metros y con una densidad de descargas a tierra, DRT de 1 descarga/km²/año tendrá aproximadamente 11 descargas /100 km/año debidas a descargas directas, utilizando la ecuación:

$$N = Ng * \frac{28h^{0.6} + b}{10}$$

En campo abierto, las tensiones inducidas serán un problema solamente para líneas con muy bajos niveles de aislamiento. Por ejemplo, el número de flameos por tensiones inducidas excederá el número de flameos por descargas directas para un circuito sin puestas a tierra solamente si el voltaje de flameo de impulso crítico VFIC (CFO) es inferior a 75 kV. En áreas protegidas, los flameos generados por tensiones inducidas son los de mayor preocupación. Típicamente, una suposición que se utiliza para líneas de distribución es que si el voltaje de flameo de impulso crítico es mayor o igual a 300 kV los flameos por tensiones inducidas serán eliminados. Casi todas las mediciones de tensiones inducidas han sido inferiores a 300 kV, una línea con voltaje de flameo de impulso crítico mayor de 300 kV tendrá muy pocos flameos generados por tensiones inducidas. Otro factor a considerar es que la mayoría de las líneas de distribución tienen transformadores de distribución protegidos con pararrayos, los cuales proveen algún grado de reducción de los flameos por tensiones inducidas.

Pasos a seguir:

1. *Recolección de los datos de la línea de distribución a estudiar.*

Ubicación (para ubicar en el mapa isoceraunico la densidad de descargas atmosféricas).

Longitud de las líneas

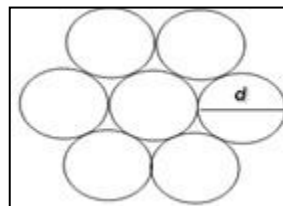
Altura de las estructuras.

Disposición espacial de los conductores.

2. *Recolección de la información de la línea de distribución de energía eléctrica. Valor del radio medio geométrico de los conductores de la línea.*

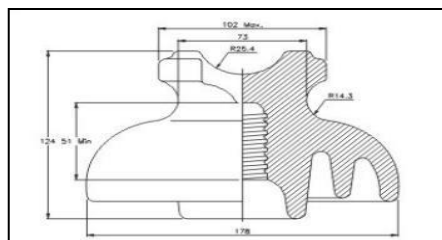
<i>Tipo de conductor</i>	<i>Capacidad (A)</i>	<i>Resistencia eléctrica DC a 20° C (Ω/Km)</i>	<i>Numero de hilos por conductor</i>	<i>Diámetro de los hilos (m)</i>
---------------------------------	-----------------------------	---	---	---

$$RMG = 2.17 * \frac{d}{2}$$



3. *Características y dimensiones del aislador*

<i>Clase Ansi</i>	<i>Voltaje típico de aplicación (kV)</i>	<i>Distancia de fuga</i>	<i>CFO (kV)</i>	<i>Altura (mm)</i>
--------------------------	---	---------------------------------	------------------------	---------------------------



4. Determinación de los índices de fallas.

Determinación del índice de falla de la línea no protegida.

$$If_{sp} = \frac{\text{numeros de fallas} * 100 \text{ km} * 1 \text{ año}}{\text{longitud de la línea} * \text{cantidad años de registro}}$$

5. Determinación del índice de falla de la línea protegida (con descargadores de sobretensión)

Índice de falla para Impactos (If_{CP}^{ID}) Directos

Índice de falla para Impactos (If_{CP}^{IC}) Indirectos

El índice de falla total será la sumatoria de $(If_{CP}^{IC}) + (If_{CP}^{ID})$

6. Determinación del índice de falla para impactos directos.

Se determina el número de impactos directos al conductor de fase

$$Nd = \frac{Ng}{10} * (38 * h^{0.5} + b)$$

Donde:

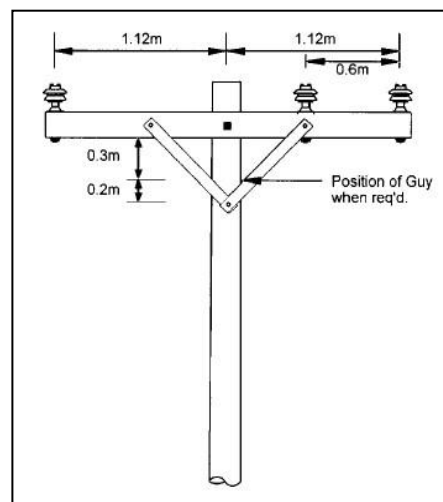
Nd : Número de impactos directos.

Ng : Densidad de rayos a tierra (N° de descargas/100km²/año).

b : Distancia horizontal entre los conductores externos (m).

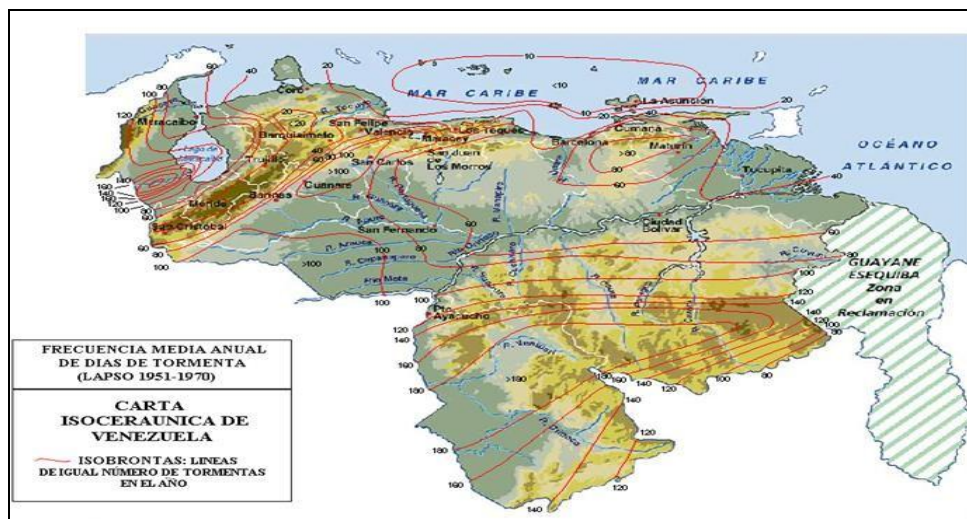
h : Altura promedio de los conductores de fase (m) La densidad de rayos a tierra Ng viene dada por:

$$Ng = 0.04 * (Td^{1.25})$$



T_d = Numero de tormentas días por año

Country	Alternative Expression for Equation (1)
Mexico	$N_g = 0.024 T_d^{1.12}$
Brazil	$N_g = 0.030 T_d^{1.12}$
Columbia	$N_g = 0.0017 T_d^{1.56}$



Se determina el índice de falla a través de la ecuación

$$(If_{CP}^{ID}) = P(I_0) * Nd$$

Donde:

$P(I_0)$: Probabilidad de exceder el valor de corriente I_0 (%).

I_0 : Valor de corriente del rayo (kA).

$$P(I_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_0}{51}\right)^{2.6}}$$

7. Determinación del índice de falla para impactos indirectos.

La máxima tensión (U_m) que puede ser inducida en una línea de energía en el punto más cercano al lugar donde ocurrió la descarga atmosférica, puede estimarse por la siguiente ecuación:

$$U_m = 30 * \left(1 + \frac{v/c}{\sqrt{(2 - \frac{v}{c})^2}} \right) * \left(\frac{h * I_p}{d} \right)$$

Um= máximo voltaje en la locación más cercana al sitio de la descarga atmosférica v= Velocidad de la onda de retorno de la tensión inducida, típicamente se usa $c/3$.

c= Velocidad de la luz $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

h= Altura del conductor sobre el nivel del suelo Ip= Corriente

pico de la descarga atmosférica

d= Es la distancia más corta entre la línea y la descarga atmosférica

CFO: Critical Flashover: El valor cresta de la onda de impulso que, bajo condiciones específicas, causa flameo a través del medio que lo rodea en el 50%de las aplicaciones Mediante un programa computacional se estima el índice del corriente pico de descarga atmosférica que produce una tensión Um inducida mayor al CFO, y así poder obtener el valor al cual se produce una falla.

Table 2—Critical Flashover Voltage of Primary and CFO-Added Components

CFO ^{1,2} of Primary Insulation			Added CFO of second component		Added CFO of third component
Description	Type ³	CFO _{inv} (kV)	Description	CFO _{add,sec} (kV/m)	Description and CFO _{add,third} (kV/m)
Polymer Insulator	15 kV to 35 kV		Wood pole	210	Wood Pole 65 Fiberglass Standoff 200
			Fiberglass pole	410	
Ceramic Pin-Type Insulator	ANSI 55-4 ANSI 55-5 ANSI 55-6	105	Wood pole	235	
		120	Wood crossarm	250	
		140	Fiberglass pole	400	
		Fiberglass crossarm	250		
		Fiberglass standoff	315		
Vertical Ceramic Insulator String	1x102mm 2x102mm 3x102 mm (4")	75	Wood pole	90	
		165	Wood crossarm	160	
		250	Fiberglass crossarm	250	
		Fiberglass standoff	315		
Horizontal Ceramic Insulator String	1x102mm 2x102mm 3x102 mm (4")	75	Wood pole	90	
		165	Wood crossarm	295	
		250	Fiberglass crossarm	250	
		Fiberglass standoff	315		
Description	Type	CFO _{inv} (kV/m)	Description and CFO _{add,sec} (kV/m)		
Wood Fiberglass	Pole	330	Wood Pole 65 Fiberglass Standoff: 200		
	Crossarm	360			
	Pole	470			
	Standoff	500			
Air		600			

NOTE 1—All values are CFO levels obtained in standard wet tests.

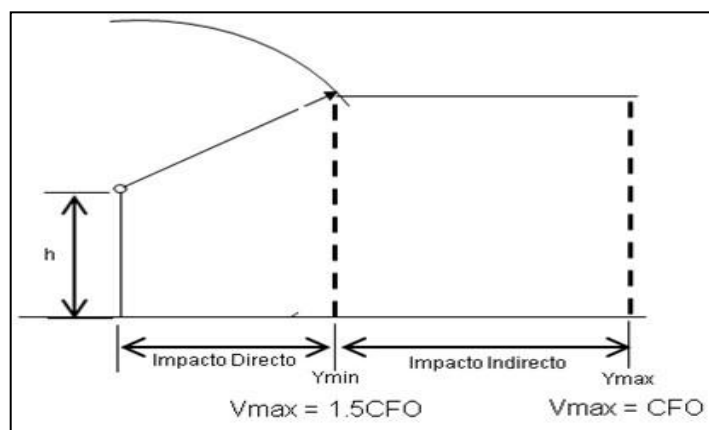
NOTE 2—Values are the minimum of the negative and positive polarity values.

NOTE 3—Insulators are shown as examples only. Refer to manufacturer’s data for more exact values.

200kA

$$I_{f_{CP}}^{IC} = 2 \times 0.001 \times (Y_{\max} - Y_{\min}) \times Ng \times P(I_o)$$

$I_o = 5kA$



6. OHGW Protección en líneas de distribución (cable de guarda)

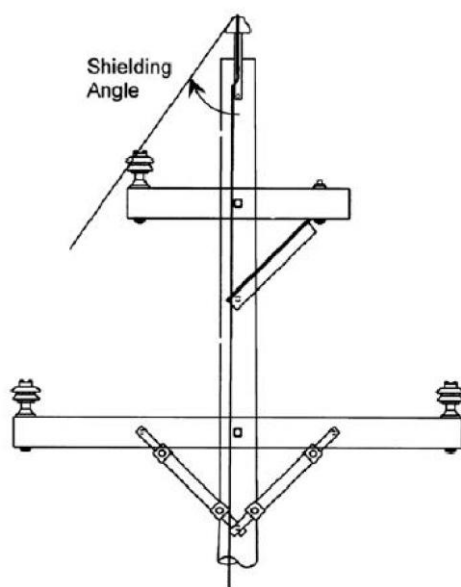


Figure 7—OHGW shielding angle

6.1 Blindaje ángulo

Un ángulo de apantallamiento (como se muestra en la Figura 7) de 45° o menos se recomienda para que la mayoría de los relámpagos se terminará en el cable de guarda OHGW en lugar de en los conductores de fase. Esta norma sólo es válida para las líneas de menos de 15 m de altura con separación del conductor a menos de 2 m. Las líneas de mayor altura requieren menores ángulos de apantallamiento.

Para obtener más información sobre la protección general de cable de guarda, referirse a la IEEE Std 1243-1997 y su referencias. La mayoría de las curvas de ángulo de apantallamiento se dibujan para circuitos de transmisión, a partir de una corriente crítica de 5 kA para causar una descarga disruptiva. Se debe reconocer que las corrientes críticas para circuitos de distribución serían más bajas, en el intervalo de 2 a 3 kA aceptado como el rayo mínimo actual. Esto actuar para reducir el requerido ángulo de apantallamiento

En las zonas donde existen líneas de distribución con un ángulo de 45 ° se desempeñan bien, esta práctica puede continuar. Un menor ángulo de apantallamiento de 30° se debe utilizar para la nueva construcción o las normas de diseño y de calidad de potencia mejorado en las líneas existentes.

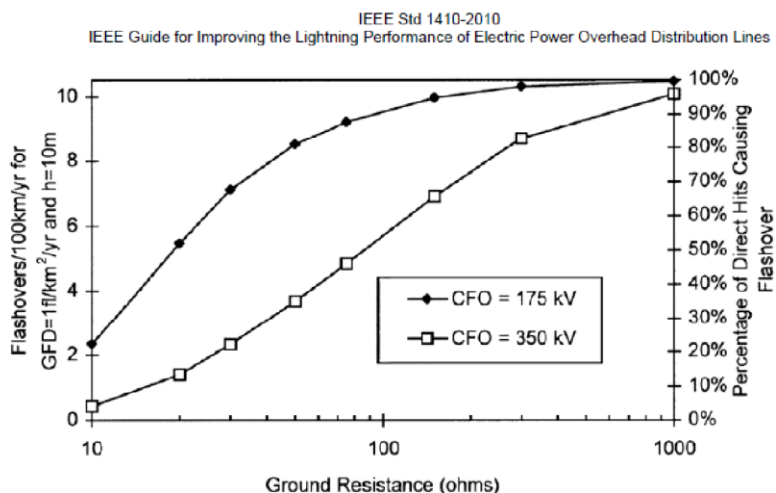
6.2 Requisitos de aislamiento

La eficacia en líneas de distribución depende en gran medida del aislamiento proporcionado entre el suelo y los conductores de fase. Si el cable de tierra está en contacto con el polo de toda su altura, es difícil proporcionar un aislamiento adecuado. En un poste de madera, por lo general es necesario aislar el cable de tierra desde el polo de los aisladores de fase y crucetas. Esto se puede conseguir con varillas de fibra de vidrio o separadores montados horizontalmente en el poste para sostener el cable de tierra de 30 cm - 60 cm de distancia desde el poste, como se muestra en la Figura A.2. La toma de tierra a la fase más cercana es el valor límite. También se deberían aislar los cables de retención para obtener el CFO necesario

Un CFO en exceso de 250 kV a 300 kV es necesario para la eficacia de las aplicaciones OHGW. Mediante el uso de separadores de tierra, no es difícil de lograr este nivel de aislamiento en las líneas de distribución.

6.3 Efecto de puesta a tierra y aislamiento nivel

Para lograr la eficacia de un diseño de OHGW, la resistencia del suelo debe ser inferior a 10 Ω si el CFO es inferior a 200 kV. Si se presta atención al nivel de aislamiento y el CFO es de 300 kV-350 kV, con una resistencia a tierra de 30 Ω proporcionará un rendimiento similar. El OHGW debe conectarse a tierra en cada poste. La figura 8 muestra el rendimiento del impacto directo y el efecto de puesta a tierra con una simulación por computador ejemplo de una OHGW con los CFO de 175 kV y 350 kV. Se activa-rayo estudios computarizados confirman que el comportamiento de los electrodos de tierra bajo las actuales condiciones de iluminación de sobretensiones están presentado en Rakov et al. [B93]



6.4 Distribución subterránea

Las líneas de distribución en las estructuras de transmisión pueden ser especialmente susceptibles a descargas disruptiva. Mayores alturas y grandes estructuras la protección se basara en descargas disruptivas directas a las estructuras. El cuidado debe deben adoptarse para mantener altos niveles de aislamiento para evitar las tasas anormalmente altos chorros de llamas.

Además, el esfuerzo de voltaje desarrollado a causar una descarga disruptiva es más alta en el circuito de distribución que el circuito de transmisión. Esto ocurre porque los conductores de distribución están más lejos del OHGW, y por lo tanto, tienen una tensión inferior acoplada y una tensión superior a través del aislamiento en comparación con cualquiera de los conductores de transmisión. La resistencia de aislamiento en el sótano de distribución también es por lo general menos en el circuito de transmisión.

Se debe tener cuidado para mantener la resistencia de tierra baja y los altos niveles de aislamiento para evitar anormalmente altas sobre tarifas de los circuitos de distribución. Descargadores de línea en cada poste también deben ser considerados para circuitos. Estos pararrayos pueden ayudar incluso si se instala en una sola fase, por el aumento voltaje acoplado en las otras fases.

6,5 Cable de guarda y descargadores

Para eliminar una buena parte de posibles descargas disruptivas, se pueden usar descargadores sobre cada polo y cada fase en junto con un OHGW. Los descargadores protegerán el aislamiento de backflashover. Y el OHGW desviara la mayor parte de la corriente a tierra, por lo que los descargadores no están sujetos a la entrada de mucha energía. Hacer el diseño de pararrayos menos dependiente de los niveles de aislamiento y puesta a tierra. Uno de los límites de este enfoque es la creciente ocurrencia de flashover cuando la separación de fase a OHGW es menor que el radio corona de la oleada actual de la OHGW. El ingeniero de diseño debe determinar el mínimo distancia de separación, utilizando el cálculo del radio de corona en IEEE Std 1243-1997.

Definición

3.21 sobrecarga de toma de tierra (OHGW): Cable a tierra o cables colocados por encima de los conductores de fase para el propósito de interceptar golpes directos con el fin de proteger a los conductores de fase de los golpes directos. Ellos pueden conectarse a tierra directamente o indirectamente a través de huecos cortos. Un OHGW también funciona como un cable apantallado.

Resumen

Esta guía de diseño contiene información sobre los métodos para mejorar el rendimiento de las líneas aéreas de distribución, y está escrito por el diseñador de la línea de distribución. En esta guía se reconoce que un diseño de la línea perfecta no existe, y que una serie de compromisos se hacen en cualquier diseño de distribución de línea. Mientras que algunos parámetros como la tensión, el enrutamiento, y la capacidad puede ser predeterminado, otras decisiones se realizan a discreción del diseñador. El diseñador puede ejercer control sobre el material y la geometría de la estructura, el blindaje (si la hay), la cantidad de aislamiento, conexión a tierra, y la colocación de los descargadores. Esta guía le ayudará al diseñador de distribución de la línea de optimizar el diseño de la línea a la luz de las consideraciones de costo-beneficio.

Alcance

En esta guía se identificarán los factores que contribuyen a las fallas causadas por rayos en las líneas de distribución aéreas y sugerir mejoras a las construcciones existentes y nuevas. Esta guía se limita a la protección de aislamiento de línea de distribución para el sistema de tensiones de 69 kV y por debajo. Consideraciones de equipos de protección están cubiertos en IEEE Std C62.22™ -2009,1

Propósito

El propósito de esta guía es presentar alternativas para la reducción de relámpagos causados por descargas disruptivas en las líneas de distribución aéreas.

7. Protección de líneas de distribución con pararrayos o descargadores de sobretensión

Descargadores de distribución proporcionan protección contra sobretensiones para el aislamiento de equipos tales como transformadores y reguladores. Estos descargadores de funcionar como impedancias altas en los voltajes de operación normales y se convierten en bajas impedancias en condiciones de sobretensiones eléctricas. El descargador de sobretensiones conduce corriente a tierra al tiempo que limita el voltaje en el equipo a la suma de la tensión de descarga del descargador más la tensión inductiva desarrollada por la corriente de descarga en línea de pararrayos y conductores de tierra.

Los descargadores pueden ser usados para proteger el aislamiento de líneas de distribución mediante la reducción de la aparición de flashovers y las interrupciones del circuito. Existen varios tipos de

descargadores, tales como internamente gapped carburo de silicio, internamente, externamente o no gapped óxido metálico, se han utilizado con el tiempo.

Desde el punto de vista de protección de aislamiento de línea de distribución, todas lo llevan a cabo de una manera similar. Las diferencias en características de voltaje de descarga harán que sólo una pequeña diferencia en la protección de aislamiento, ya que existe un margen considerable. Varios estudios separados han investigado la eficacia de los diferentes pararrayos, consulte Paolone et al.[B84], [B85], y Short et al. [Células B104]. Estudios sobre el desempeño de pararrayos con rayos inducidos en las líneas de distribución se presentan en De la Rosa et al. [B46], Fernández et al. [B53], [B54], Master et al. [B72], y Mata et al. [B73] y [B74]. En general, los supresores o descargadores no se debe utilizar uno solamente, es más eficiente colocar varios en paralelo, véase Mata et al. [B73] y [B74], esta configuración puede limitar la disipación de energía a niveles razonables.

Para la selección de la calificación de pararrayos, consulte IEEE Std C62.22-2009 o las directrices del fabricante. Para la protección de equipos (especialmente los cables subterráneos), a veces es necesario seleccionar un descargador con el nivel de protección más bajo posible. Sin embargo, para la protección de aislamiento de la línea, esto no es normalmente necesario debido a que el nivel de protección pararrayos es en general considerablemente más bajo que el del cable.

Al aplicar los descargadores de protección, la tasa de fracaso de los descargadores agregados debe ser considerada junto con la mejora de flashover en la línea que se obtiene sumando los descargadores.

7.1 Efectos de la longitud del cable de los descargadores.

Descargador que lleva conectar la línea de distribución y los terminales de tierra de los descargadores para el equipo que protegen, contienen una pequeña cantidad de inductancia inherente. Esta inductancia hace que " $L (di / dt)$ " caídas de tensión aparezcan a través de los cables que conducen la corriente de rayo. Cualquier caída de voltaje a través de un cable de pararrayos se sumará a la tensión de descarga de sobretensiones. Esto aumentará el voltaje que aparece a través del dispositivo (s) protegido por el descargador.

El efecto de la longitud de la línea principal en la protección del aislamiento de línea de distribución no es tan significativo como lo es con la protección del equipo. Para los equipos de arriba, el margen es generalmente muy alto. Además, el nivel de aislamiento de la línea es generalmente mucho mayor que BIL equipo estándar. Por supuesto, siempre es una buena práctica para mantener la línea del descargador de distribución y los conductores de tierra lo más corto y recto posible. Consulte la IEEE Std C62.22-2009 o más información sobre longitudes de conductor pararrayos.

7.2 Flashovers inducidos por impactos cercanos

Los pararrayos en gran medida puede reducir la tasa de flashovers, debido a las tensiones inducidas por impactos de rayos cercanos. La Figura 9 muestra los resultados para un CFO de aislamiento de 150 kV de un circuito sin conexión a tierra. Tenga en cuenta que el espaciamiento de descargador incluso

relativamente ancha puede reducir la tensión inducida por descargas disruptivas significativamente (8 tramos produce al menos una reducción del 25%). En muchos circuitos de distribución con transformadores de frecuentes, los descargadores se utilizan para proteger los transformadores, pueden proporcionar una protección significativa de descargas disruptivas inducidas. Las técnicas se describen en el Anexo B.

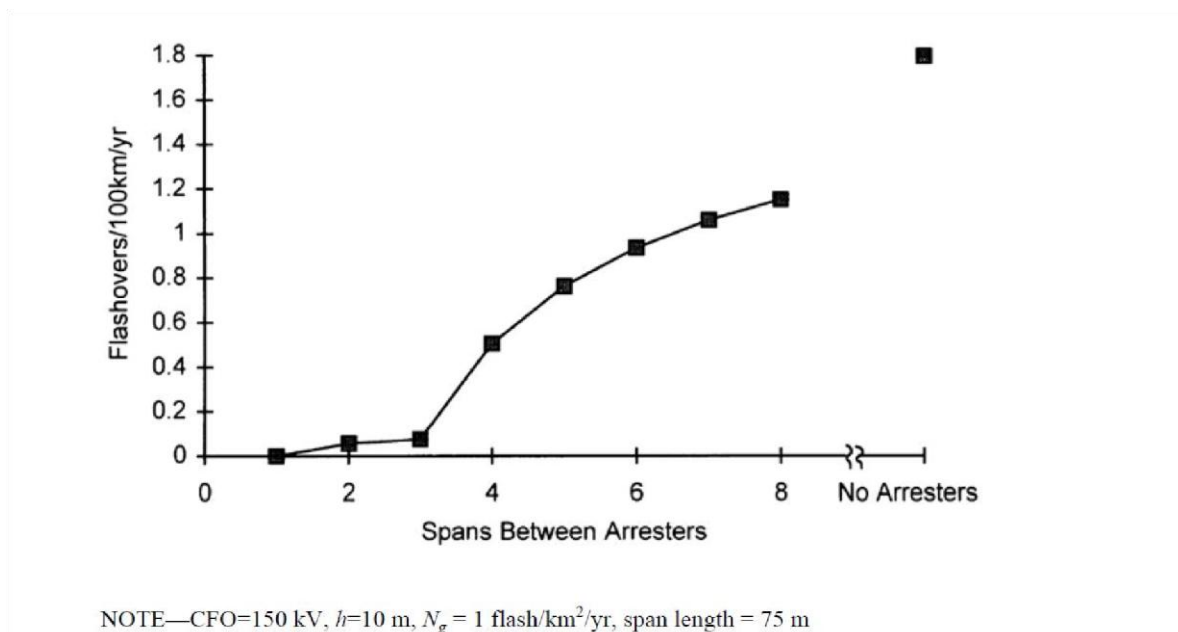
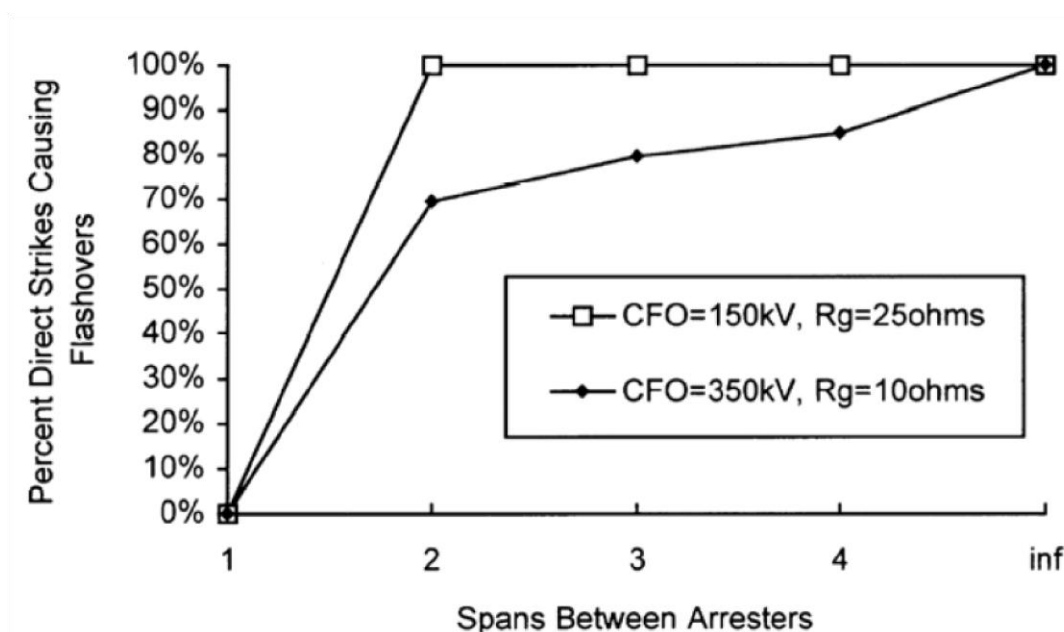


Figure 9 — Flashovers en funcion de la sepación entre descargadores.

Descargador puede ser incluso más eficaz en la reducción flashovers si se utilizan para proteger poste con los niveles de aislamiento pobres. Estos "puntos débiles" pueden incluir recortes, postes sin salida, o postes cruzados. La colocación de pararrayos en estos polos puede ser más rentable que la mejora del nivel de aislamiento.

7.3 Flashovers producidos por impactos directos.

La protección contra destellos directos es difícil debido a las corrientes transitorias elevadas, altas tasas de subida, y el contenido energético grande en cada rayo. En teoría, los descargadores pueden proporcionar protección contra impactos directos, pero deben ser utilizados a intervalos muy cercanos (prácticamente en todos los postes). La figura 10 muestra las estimaciones de flashover a diferentes separaciones de pararrayos para proteger contra impactos directos (véase el Anexo B para más detalles y supuestos). El análisis de la figura 10 se supone que el cable neutro está conectado a tierra en cada poste. El alto número de descargas disruptivas, de acuerdo con la Figura 10, puede ser engañoso cuando el cable neutro no está conectado a tierra, excepto en los postes donde descargadores se aplican a todas las fases, y el nivel de aislamiento de neutro a tierra es alto.



NOTE—Span length is 75 m.

Figura 10-Eficacia de separación pararrayos para protección impacto directo

7.3.1 Capacidad de absorción de los descargadores

Si el conductor de una de las fases está situado de tal manera que intercepta todas las descargas atmosféricas, los descargadores se pueden aplicar a la fase superior, la cual hace que actúen como un cable de guarda OHGW. Al ser impactado, el descargador de primera fase se realizará la subida a tierra. El circuito estará protegido si la resistencia a tierra de los pararrayos es lo suficientemente baja y el aislamiento de las fases sin protección es suficientemente alta. Como un OHGW, se debe tener cuidado de mantener el nivel de aislamiento a alta en las fases sin protección.

Las curvas para un OHGW (véase la Figura 8) pueden ser utilizadas para estimar la eficacia de un descargador de diseño de primera fase. Los descargadores de sobretensiones se deben utilizar en prácticamente cada poste o torre para lograr una protección óptima.

7.3.2 Capacidad de absorción Energía Descargadores

Descargadores de distribución se dividen en tres clasificaciones de energía, tal como se observa en la tabla 3.

Tabla 3-Clasificación de los pararrayos en los Sistema de Distribución

Arrester Class	Block Diameter (mm)	Energy Rating (kV/kJ MCOV)	Energy Rating (J/cm ³)	Failure Rate per Direct Stroke in Unshielded Line
Light Duty	25	3.0	170–200	33%–100%
Normal Duty	32	4.8	170–200	17%–50%
Heavy Duty	40	6.7	170–200	12%–33%

Las calificaciones de energía en la Tabla 3, son los valores mínimos de los fabricantes, establecidos para la conmutación de las pruebas de sobretensión de descarga. De hecho, la mayoría de los bloques de alta calidad MOV absorber más de 500 J/cm³, con destrucción constante $I \cdot t$, independientemente de la duración del aumento aplicado desde segundos hasta microsegundos, ver Ringler et al. [B95]. Las estimaciones de la tasa de fracaso de los descargadores de la Tabla 3 son para tres fases más neutro, sin cable de guarda, que tiene pararrayos en todos los postes y cada fase. Para líneas con descargadores sólo en el equipo y / o protección de línea con dos o más tramos entre descargadores, la tasa de fracaso descargador por impacto directo puede ser considerablemente menor. Los descargadores son, en promedio, una mayor distancia de la terminación de flash, y aisladores sin protección entre la terminación y descargador de descarga disruptiva por lo general, desviando la mayor parte de la corriente a tierra y minimizar deber energía. La energía en el descargador inducida por sobretensiones o terminaciones en OHGW es también mucho menor que para la terminación directa en fases, y hay la misma consecuencia de avería del descargador de reducido índice de fracaso de estos casos

Descargadores de carga ligera se utilizan normalmente sólo en casos especiales para proteger las instalaciones subterráneas. La industria en general utiliza ya sea el servicio normal o descargador de alta resistencia para la protección de las líneas de distribución aéreas. La capacidad de energía mayor de los descargadores de trabajo pesado mejora su tasa de supervivencia en un 5% -15% en comparación a la normalidad de servicio descargadores.

En las aplicaciones expuestas (por ejemplo, una línea de distribución al aire libre sin un OHGW), la clase descargadores distribución metaloxide pueden sufrir tasa de fracaso inaceptable debido a los flashes directos. Un porcentaje significativo de los relámpagos directos al pararrayos resulta en una de energía que excede la capacidad publicada por el fabricante, y en 4/10microsegundo descarga la onda de prueba, consulte McDermott et al

[B76]. Esto se ve atenuado por el hecho de que los bloques de óxido de metal puede tener más capacidad de absorción de energía producto de sobretensiones, que la clasificación publicada, ver Ringler et al. [B95]. Otro mecanismo de fallo de algunos diseños de pararrayos de óxido de metal es la ocurrencia de flashovers alrededor de los bloques cuando el descargador es sometido a múltiples eventos. Superficie debido a flashovers de varios trazos son mucho menos probable para los disipadores de espaciamientos sin aire, tales como descargadores de polymer-housed, ver Darveniza et al. [B40]. Varios estudios, tanto de campo y de laboratorio, han evaluado el rendimiento de los pararrayos debido a los dos eventos de un impacto y múltiple impacto, por ejemplo Darveniza et al. [B41],[B42], Fernández et al. [B52], Mata et al. [B73], [B74], y Schoene et al. [B102] y [B103].

En las aplicaciones expuestas (por ejemplo, una línea de distribución al aire libre sin un OHGW), clase de distribución descargadores metaloxide pueden sufrir tasa de fracaso inaceptable debido a los flashes

directos. Un porcentaje significativo de los relámpagos directos a consecuencia pararrayos en el deber de energía que excede la capacidad publicada por el fabricante y el 4/10 μ s onda de descarga de prueba, consulte McDermott et al [B76]. Esto se ve atenuado por el hecho de que los bloques de óxido de metal puede tener bastante más de sobretensiones capacidad de absorción de energía que la clasificación publicada, ver Ringler et al. [B95]. Otro mecanismo de fallo de algunos diseños de pararrayos de óxido de metal es la ocurrencia de

Flashovers alrededor de los bloques cuando el descargador es sometido a múltiples tiempos eventos. Superficie debido a descargas disruptivas de varios trazos son mucho menos probable para los disipadores de espaciamentos sin aire, tales como descargadores de polymer-housed, ver Darveniza et al. [B40]. Varios estudios, tanto de campo y de laboratorio, han evaluado el rendimiento pararrayos debido a los dos eventos de impacto simple y multiple, por ejemplo Darveniza et al. [B41],[B42], Fernández et al. [B52], Mata et al. [B73], [B74], y Schoene et al. [B102] y [B103].

La energía disipada en un pararrayos durante un flash directo no es normalmente la energía total del flash. Algunos cobran impulso, y la mayor parte de carga de la cola de las ondas y corrientes continuas, se comparte con otros descargadores cercanos o en los flujos a tierra a través del sistema de distribución en sí. Los estudios con cohete disparado para crear un rayo y la interpretación de las mediciones directas en empresas de servicios públicos han comprobado que los altos niveles de disipación de energía ocurre que generalmente exceden la calificación de un descargador de distribución único, pero el 75% de esta energía provenía de corrientes continuas DC, entreimpactos, ver Barker et al. [B9]. También se sabe que, a pesar de la alta probabilidad de un fallo del descargador de sobretensiones aislado por un flash directo, menos fallos de lo esperado se reportan debido a descargadores adyacentes absorber parte de la energía. Descargadores utilizados en la protección de línea rural en los alimentadores expuestos con frecuencia ven los niveles de energía que causan los fracasos.

El descargador que falla tiende a localizarse cerca del impacto, pero no es siempre más cercano a la terminación en el conductor expuesto. Normalmente, un solo descargador fallará eléctricamente, dejando a los demás intactas, pero los fallos de múltiples de descargador a un único flash se han encontrado en las pruebas de campo.

Cuando se interpreta en todo el sistema, una tasa de errores elevada de descargador en respuesta a un impacto directo puede no tener un impacto significativo sistema. Tomando el caso de un circuito de distribución de 50 km de 13,2 kV con una mezcla de alimentadores principales trifásicos y laterales de una sola fase, con descargadores en todos los postes y en todas las fases, habría cerca de 1000 postes y 2000 descargadores. En terreno abierto, esta línea obtendrá cerca de 20 destellos por año en una zona con alta densidad de flash como es Florida. Esto llevaría al fracaso de dos a siete descargadores heavy-duty por año. Después de considerar el medio ambiente menos expuesto, y la reducción de la incidencia de un rayo en climas moderados, lo observado es que las tasas de fallas de descargadores heavy-duty es de una o dos cada cinco años en Nueva York por Barker et al. [B9] puede conciliarse con la Tabla 3.

Los descargadores puede fallar por una variedad de razones, además de la excesiva energía de los rayos. Fallos también puede ocurrir cuando los límites temporales de sobretensión se exceden, desde la entrada de humedad a largo plazo o de fallos de los componentes mecánicos. Las líneas aéreas con descargadores

deben ser revisadas y realizarles mantenimiento periódicamente, de lo contrario el rendimiento se degradará con el tiempo.

8. Protección de líneas de distribución subterráneas

Para completar, es razonable incluir el uso de cable subterráneo en lugar de construcción de aéreos como un método para mejorar el rendimiento de una línea de distribución aérea por efecto de un rayo. Estos generalmente presenta una serie de problemas de fiabilidad, es decir, el tiempo adverso (rayos, viento y hielo) y las interferencias (vegetación y animal), con un conjunto diferente de problemas relacionados con el envejecimiento de las características dieléctricas del cable, dig-ins y mucho tiempo para encontrar y reparar las fallas. En la mayoría de los casos, el equilibrio económico es a favor de la construcción de líneas aéreas. Los cables enterrados no son inmunes a los daños causados por rayos, ya sea por daños o impactos directos o sobretensiones inducidas.

8.1 Daños ocasionados por impacto directo de rayos a cables subterráneos

En 1993, se realizó un experimento en el Camp Blanding, Florida, para estudiar los efectos de los rayos en sistemas subterráneos de distribución de energía. Los cables fueron de 15kV, coaxiales, con aislamiento de polietileno entre el conductor central y la pantalla externa concéntrica (neutro). Uno de los cables (cable A) tenía un aislamiento y fue colocado en un conducto de PVC, otro (Cable B) tenía una chaqueta aislante y fue enterrado directamente, y el tercero (Cable C) no tenía chaqueta y fue enterrado directamente. Los tres cables enterrados 5 m de separación a una profundidad de 1 m. Treinta relámpagos fueron accionados, y la corriente del rayo se inyectó en el suelo directamente por encima de los cables. Barker y Corto [B11], [B12] y [B13] reportaron los siguientes resultados del experimento con cables subterránea:

Después del impacto del rayo a tierra, el 15%-25% de la corriente total del rayo fluyó en el conductor neutro del cable (medido en el sistema cohete que indujo el rayo) siendo detectado 70 m en cualquier dirección desde el punto de impacto.

La mayor tensión medida entre el conductor central y el neutro del cable concéntrico era de 17 kV, que es inferior a la tensión nominal de aislamiento del cable (BIL).

Los voltajes medidos en el secundario del transformador se incrementaron a 4 kV. Estos podrían representar una amenaza para aparatos residenciales.

De acuerdo con Barker y Corto [B13], el rayo generado en el ensayo, se sintió atraído por el cable hasta a 10 m de cada lado del cable.

8.2 Corrientes inducidas y tensiones en los cables subterráneos

Paolone et al. [B84] midieron las corrientes inducidas en el orden de 100 A en cables subterráneos con blindaje, situados entre 50 y 200 m de distancia del impacto del rayo creado o inducido, lo que sugiere que blindaje-a-tierra se originó un impulso potencial de aproximadamente 30 kV, para corrientes de un rayo de 10-kA. Cálculo de las corrientes inducidas se ha confirmado por las mediciones de campo en Agrawal et al. modelo [B1] para la iluminación de campo magnético por debajo del nivel, consulte Petrache et al. [B85]. En la actualidad, el nivel de voltaje mínimo en cables para resistir sobretensiones inducidas por rayos cercanos debe ser de al menos 30 kV y el requisito puede exceder de 100 kV cuando todos los factores son considerados.