BUAP

BENEMÉRITA **U**NIVERSIDAD **A**UTÓNOMA **D**E **P**UEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaria de Investigación y Estudios de Posgrado

"ANÁLISIS DE LA CONFIABILIDAD DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN MULTICIRCUITO MAYORES A 115 KV EN ZONAS DE ALTA INCIDENCIA DE DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS"

TESIS

Para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA
CON OPCION TERMINAL EN
SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Presenta:

Alberto Braulio Alzate Duque

Director de Tesis

Dr. Carlos Ramírez Pacheco

Asesor de tesis:

Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez

Puebla, Puebla, Febrero de 2021

OFICIO APROBATORIO DE TEMA DE TESIS

ACTA RESOLUTIVA DE IMPRESIÓN DE TESIS

AGRADECIMIENTOS

Ante todo, a Dios y a las personas que él ha puesto en mi vida para sustentar esta y otras iniciativas, las cuales siempre han requerido de mi más consagrado amor y dedicación.

A Alejandra, Juan Martin y Zoe, por ser la principal fuente de motivación.

A Ofelia por fortalecer las alas diariamente y por enseñarme a cerrar círculos.

A Favio y a Alan por despertar la chispa del rayo dentro de mí y por enseñarme a valorar en la justa proporción el conocimiento y al ser humano.

A Jamer, Juan Carlos y Daniel por ser fuente inagotable de información

Al Dr. Carlos Ramírez por dirigir mi trabajo de forma paciente y generosa.

A todos los que han tocado mi vida y al mismo me han dado el honor de tocar la suya.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 8
CAPÍTULO 1 13
PARÁMETROS DE LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS 13
Nivel Ceráunico – NC 14
Densidad De Descargas A Tierra - DDT 15
Amplitud De La Corriente De Retorno Del Rayo – CR 18
Otros Parámetros Importantes 19
CAPÍTULO 2 21
CASO DE ESTUDIO 21
ACTIVIDAD DE DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS 23
Fuente De Información De Rayos 23
Manejo De La Información Obtenida De Los Sensores 24
Actividad de Rayos En México 25
Actividad De Rayos en torno al Recorrido de la Línea 28
Actividad De Rayos Multianual 32
CAPÍTULO 3 34
INCIDENCIA DE LA ACTIVIDAD ELÉCTRICA ATMOSFÉRICA SOBRE LA LÍNEA 34
Impactos Directos Sobre El Cable De Guarda 37
Medición Del Valor De Resistencia De Puesta A Tierra 38
Impactos Sobre El Cable De Fase 41
CAPÍTULO 4 49
MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO DE LAS LÍNEAS 49
Ubicación del Cable de Guarda 49
Puesta A Tierra Del Cable De Guarda 49
Aumento Del Aislamiento 49
Selección De Dispositivos De Protección Contra Sobretensiones Transitorias Dst´S 50
Tensión de Trabajo Continuo (Uc) 50
Tensión Asignada (Ur) 50
Selección De La Corriente Nominal De Descarga (In). 51
Niveles de Protección 52
CAPÍTULO 5 53

CONCLUSIONES 53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS. 54
TRABAJOS A FUTURO. 56

RESUMEN

La incidencia de descargas atmosféricas en líneas de transmisión es una de las causas más comunes de salidas de operación de la red, su impacto afecta la integridad física de las redes y la confiabilidad del suministro.

Este trabajo muestra un análisis de la confiabilidad de una línea multicircuito con datos reales de densidad de descargas a tierra medidos a partir de una red de sensores de campo magnético y presenta los resultados del cálculo de indicadores, planteando metodologías de intervención de la línea para incidir de forma positiva en dichos indicadores mejorando la confiabilidad. Se demuestra también basado en los resultados, que los datos existentes de largo plazo de actividad de descargas atmosféricas en territorio mexicano están desactualizados.

ABSTRACT

Lightning strokes on transmission lines are one of the most common causes of grid blackouts, which affects the stability and reliability of local and regional power networks causing also important loses to utilities located where seasonal high incidence of lightning activity is present.

This thesis shows an analysis of the reliability of an overhead multi-circuit transmission line with real data of cloud to ground flash density, measured from a network of magnetic field sensors. Results of parametric calculations are analyzed, based on the latter, methodologies for the intervention on the transmission overhead line design are proposed and compared upon the traditional data of lightning activity available in Mexico. It was demonstrated the positive influence of the methodology on the reliability of overhead multi-circuit transmission lines. It was also demonstrated that the existing long-term data regarding lightning activity in Mexican territory is outdated.

INTRODUCCIÓN

La alta incidencia de descargas atmosféricas en líneas de transmisión es una de las causas más comunes de salidas de operación de la red, su impacto afecta la integridad física de las redes y la confiabilidad del suministro. Uno de los parámetros que más relevancia tiene en el análisis del desempeño de las líneas de transmisión, es evidentemente la actividad atmosférica de la región en la cual se ubican. Esta tesis estudia el comportamiento de líneas de transmisión multicircuito mayores a 115 kV en zonas de alta incidencia de descargas eléctricas atmosféricas y las alternativas de mitigación de los daños que estas causan. Debido a limitaciones de derechos de vía, las líneas de transmisión multicircuito son más comunes en grandes centros de consumo y su afectación por descargas atmosféricas tiene mayor impacto al desconectar varios circuitos al mismo tiempo. Para este estudio se utilizará un caso real que permite validar los resultados obtenidos, además se incorporará en el análisis, el comportamiento espacio temporal real de los rayos en la zona de interés, medidos a través de la red de sensores de campo magnético.

El análisis del comportamiento estimado de las redes de transmisión ante descargas eléctricas atmosféricas, se incorpora en el procedimiento de diseño, tanto del sistema de puesta a tierra como de apantallamiento a través del cable de guarda de las líneas. El objetivo de este caso de estudio es evaluar el impacto en la tasa de salidas de la línea por causa de rayos y como mejorar el desempeño de la línea con la implementación de medidas técnicamente viables y científicamente justificadas. Generando un conjunto de herramientas para la toma de decisiones que adicionalmente permitan soportar técnico-económicamente las medidas correctivas que se implementen.

Durante más de 20 años el Programa de Investigación PAAS-UN de la Universidad Nacional de Colombia, ha desarrollado varios proyectos de investigación en el campo de las señales electromagnéticas y meteorológicas, entre los que se encuentran el de la “Caracterización Espacio-Temporal de las Descargas Eléctricas Atmosféricas”, el cual plantea varias hipótesis que son desarrolladas con alto rigor científico y que abren la posibilidad de ampliar los estudios del fenómeno del rayo en otras latitudes, con la premisa de encontrar resultados semejantes que demuestren con mayor amplitud la validez de sus conclusiones.

Las descargas eléctricas atmosféricas son las causantes de la mayoría de las salidas de las líneas de transmisión de 230 y 500 kV en países ubicados en la zona intertropical, estudios anteriores muestran que entre el 69% y el 75% de las fallas en los sistemas de transmisión de energía de la región peninsular de México son causadas por rayos [5], una de las razones es que la protección contra rayos de estas líneas, han incorporado procedimientos desarrollados en países que no

comparten las particularidades, que por la ubicación en la zona intertropical, se presentan, en lo referente a la actividad de rayos, en México y otros países de la región, en particular Colombia, ha presentado resultados importantes en esta área de estudio que serán mencionados adelante.

Este trabajo retoma una de las hipótesis del trabajo denominado “EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DEL RAYO CON MEDICIONES TERRESTRES Y SATELITALES PARA COLOMBIA” del INGENIERO CAMILO YOUNES VELOSA y la adapta al entorno mexicano, y aunque el ámbito de aplicación del trabajo desarrollado en la presente tesis está enfocado a las líneas de transmisión, las conclusiones permiten complementar los resultados obtenidos por el Ingeniero Younes sobre la hipótesis de que “Los parámetros del rayo varían espacial y temporalmente”

Dado el enfoque particular del presente trabajo en la confiabilidad de las líneas de transmisión multicircuito de 115 kV, se plantea una hipótesis adicional, que relaciona una estadística de fallas en las líneas de transmisión con una actividad inusualmente alta de descargas eléctricas atmosféricas en la región de análisis.

La medición de los parámetros del rayo se realiza principalmente mediante los Sistemas de Localización de Rayos – LLS (por sus siglas en inglés), aunque existen varias maneras de hacerlo.

La medición directa que se presenta en esta tesis se lleva a cabo en estaciones diseñadas para tal fin con la implementación de sensores de campos magnéticos.

Es importante señalar que los trabajos previos, en este campo particular de parametrización de las descargas eléctricas atmosféricas, han incorporado al menos 5 años de información, como en el caso de la Red Colombiana de Medición y Localización de Descargas Eléctricas Atmosféricas, mientras que los resultados presentados en la presente tesis, únicamente utilizan 2 años de información, por lo cual una vez se tengan resultados confiables de varios años de mediciones directas, se podrá seguir afirmando que el comportamiento de los parámetros del rayo es particular para zona tropical y especialmente para el territorio Mexicano, como ya se ha hecho, por ejemplo, para el caso Colombiano.

La validez de la información de la actividad de las descargas eléctricas atmosféricas se basa en la confiabilidad que ofrece la red de detección de rayos que proporciona dicha información, por tanto, es vital conocer los parámetros más significativos con los cuales se evalúan las redes de detección, los cuales son la Eficiencia en la Detección (DE) y la Exactitud en la Detección (LA), así como también es importante conocer los principios físicos en los cuales se fundamentan las mediciones.

La magnitud de los campos eléctricos y magnéticos producida por los rayos es proporcional a la corriente pico de la descarga de retorno, en particular en el caso de rayos nube a tierra, estos campos electromagnéticos son detectados a frecuencias VLF/LF.

La magnitud de los campos resultantes detectados por un determinado sensor está determinada por la atenuación de la magnitud del campo, debida a la propagación a través de un medio que tiene conductividad finita, y estos a su vez deben ser mayores que los valores mínimos que detecta el sensor, lo cual también tiene un límite que está en función de las características propias de los sensores que intervienen en la "solución" del evento, entendiéndose la "solución" como los parámetros de la descarga eléctrica atmosférica con sus estampas de tiempo y posición, una vez que en su determinación, han intervenido suficientes sensores que permitan validar la información y que en conjunto intervienen en la calidad de los datos y en la confiabilidad de la red, sin embargo la validación de los datos obtenidos con la red Mexicana no es para nada fácil, ya que los métodos de calibración de redes como ésta en todo el mundo no son unificados y no están normalizados.

Tanto la eficiencia de detección (DE) como la exactitud de la detección (LA) de la red mexicana no han sido determinados en sentido estricto, sin embargo, la red mexicana como parte de la red latinoamericana de detección de rayos, si ha sido comprobada en diferentes oportunidades mediante el desarrollo de trabajos de investigación en el interior de grupos de investigación de adquisición de señales de la Universidad Nacional de Colombia PAAS - UN, sin embargo es importante continuar con la evaluación de dichos parámetros y la determinación de (DE y LA), aprovechando equipos que instituciones mexicanas como la CFE tienen disponibles y que son complementarias con los equipos disponibles de algunas empresas privadas. Aprovechando así una función social de las instituciones del estado al servicio del avance de las investigaciones científicas y el bienestar de la comunidad.

Como parte del desarrollo del presente documento, el autor realizó un viaje a Colombia, a visitar las instalaciones de la empresa Keraunos SAS, administradora de la red de detección de rayos de Latinoamérica, de la cual es parte la red de detección de rayos de México, la cual es localmente administrada por la empresa Innovación tecnológica en Rayos SA de CV, la cual es a su vez dirigida por el autor, en dicha visita se realizó un intercambio de conocimiento sobre el procesamiento de la información suministrada por la red que permitió el desarrollo de los trabajos de parametrización que se presentan en este documento.

Este documento se divide en cinco (5) capítulos:

El primer capítulo presenta un marco teórico en relación con los parámetros del rayo y los puntos a tener en cuenta para su análisis en el territorio mexicano, así como la metodología seguida para la manipulación de los datos suministrados por la red de detección de rayos de México.

El segundo capítulo presenta un caso de estudio, en el que se incorpora la parametrización de los rayos al análisis de la confiabilidad de una red de transmisión de alta tensión multicircuito de 115 kV, propiedad de la CFE, ubicada en la ciudad de Puebla, la cual presenta un número alto de salidas, aparentemente causadas por la alta actividad atmosférica. Se presentan los resultados del análisis de la actividad de descargas eléctricas atmosféricas en una región de México, con una particular focalización en el área en la que se encuentra ubicada la línea de transmisión, y sobre esta actividad, se presentan los resultados que permiten correlacionar de forma complementaria las conclusiones de trabajos anteriores con la variación espacio-temporal de la actividad eléctrica atmosférica, al menos en forma parcial, lo cual al mismo tiempo constituye el primer paso para el análisis más detallado de la actividad de eléctrica atmosférica en territorio mexicano.

El tercer capítulo muestra la incidencia de rayos sobre la línea y como esta puede incorporarse metodológicamente en un análisis de confiablidad de desempeño, convirtiéndose así en una herramienta de toma de decisiones no solo para determinar las medidas de protección requeridas en la línea objeto de análisis, sino también para la proyección eficiente de trazados de líneas nuevas y la optimización de procesos como la asignación de recursos de mantenimiento preventivo y correctivo, así como la localización de fallas más efectiva y rápida.

El cuarto capítulo presenta las técnicas de mejoramiento del desempeño de las líneas de transmisión que incorporan la protección contra descargas eléctricas atmosféricas y para las cuales, los resultados de los capítulos tercero y cuarto son insumos que facilitan la toma de decisiones.

El quinto capítulo presenta las conclusiones que se generan como producto final del presente trabajo.

Como parte del trabajo que concluye con este documento, se desarrolló un artículo denominado “ANÁLISIS DE LA CONFIABILIDAD DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN MULTICIRCUITO MAYORES A 115 KV EN ZONAS DE ALTA INCIDENCIA DE DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS” “CARACTERIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD DE RAYOS EN TORNO DE LA LÍNEA COMO HERRAMIENTA DE ANÁLISIS PARA DETERMINAR PUNTOS DE MAYOR RIESGO” el cual fue presentado y aprobado en el XIV CONGRESO INTERNACIONAL DE ALTA

TENSIÓN Y AISLAMIENTO ELÉCTRICO, llevado a cabo en la ciudad de Guadalajara del 28 al 31 de Octubre de 2019.

CAPÍTULO 1

PARÁMETROS DE LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS

Son más de quince los parámetros medibles de las descargas eléctricas atmosféricas, que han sido establecidos por diversos investigadores que han estudiado la física del fenómeno.

El *WG 33.01 "Lightning" del Comité CIGRE*[1] en 1979, presentó los parámetros de las descargas eléctricas atmosféricas, requeridos para aplicaciones en ingeniería.

Estos parámetros fueron divididos en tres grupos:

a) Parámetros de Incidencia – Entre los cuales se tienen en cuenta la probabilidad de ocurrencia de las descargas a tierra, junto con la influencia de la altura de las estructuras y la incidencia de descargas múltiples:

- Densidad de Descargas a Tierra (Ground Flash Density GFD) DDT - Número de Rayos por kilómetro cuadrado – año.
- Nivel Ceráunico (Keraunic Level TD) NC - Número de días tormentosos al año, el cual se define como el número de días en los cuales se observa un relámpago o se oye un trueno y este parámetro es utilizado cuando no hay disponibilidad de mediciones directas de Densidad de Descargas a Tierra.
- Polaridad del Rayo (Flash Polarity) P - Positiva o negativa
- Multiplicidad (Multiple stroke flashes) M - número de descargas individuales (strokes) por cada descarga (flash).
- Duración de la descarga eléctrica atmosférica y del intervalo entre descargas individuales.

b) Amplitud de la Corriente de Retorno del Rayo (Lightning Peak Current Amplitude) - CR frecuentemente referenciada como el parámetro más importante para aplicaciones en ingeniería ya que es determinante en el fenómeno térmico desarrollado por el impacto y consecuentemente en la selección de materiales para soportarlo.

[1] La Conferencia Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos de Alta Tensión (CIGRE por sus siglas en Francés) es una organización de origen Europeo, con miembros institucionales en representación de más de 100 países del mundo y agrupa Investigadores en más de 30 Grupos de Trabajo. El WG 33.01 "Lightning" es un grupo de investigadores de diferentes países del mundo, divididos en 3 Task Forces, uno de los cuales tiene como tarea la actualización de los parámetros del Rayo.

c) Forma del Impulso de la Corriente de Rayo (Stroke current impulse shape) - en los cuales se tienen en cuenta las características dependientes del tiempo, entre los cuales se destaca la tasa de Ascenso de la Corriente del Rayo (Lightning Current Rate of Rise) RAI

Es importante decir que, para entonces, el comité no consideró las variaciones espacio - temporales de los valores de la descarga eléctrica atmosférica y actualmente aún se trabaja para que sean tenidos en cuenta.

Nivel Ceráunico – NC

Los primeros mapas, desarrollados hacia finales del siglo XX se comenzaron a elaborar usando líneas que conectaban sitios en los cuales el primer trueno de una tormenta era oído, estas líneas se llamaron líneas de igual número de truenos. El término Isoceráunico se comenzó entonces a usar hacia 1920 y se refería a una línea o isograma de igual frecuencia de días tormentosos [19].

Los datos de días tormentosos basados en observaciones humanas permitieron la primera comparación cuantitativa de ocurrencia de tormentas para regiones de un país, durante diferentes épocas del año y para diferentes sitios alrededor del mundo.

La principal dificultad que se tiene con datos de observadores es el de determinar si el número de días tormentosos registrados refleja la incidencia real de descargas eléctricas atmosféricas. Si los observadores usan “trueno oído” como la definición dada por la Organización Meteorológica Mundial (WMO[2]) de un día tormentoso, y si la variación de audibilidad del trueno respecto a la distancia es conocida, entonces puede ser posible calcular la respuesta del observador a una tormenta.

Los análisis de probabilidad de que un observador oiga una descarga, en relación con la distancia a la que ocurra el rayo muestran que con una relativa alta confiabilidad la incidencia real de descargas eléctricas atmosféricas en una localidad se relaciona directamente con los registros obtenidos del observador.

El Nivel Ceráunico es un parámetro que ha servido a nivel mundial, tanto para caracterizar la severidad de las tormentas de una región, como en el diseño de protección contra descargas de sistemas de transmisión de energía eléctrica. Este parámetro seguirá teniendo vigencia en aquellos países donde aún no se cuenta con tecnologías más avanzadas de medición de parámetros del Rayo, o como en el caso mexicano donde aun teniéndolas, falta validar sus resultados con trabajos que pueden suceder a este.

[2] World Meteorological Organization, antes International Meteorological Committee (IMC)

Densidad De Descargas A Tierra - DDT

El concepto de Nivel Ceráunico es muy rudimentario y no es capaz de dar una medida confiable de la severidad de las tormentas, ni de dar información sobre la existencia de áreas locales que son especialmente propensas a las descargas eléctricas atmosféricas. Es por eso que, acompañado del avance tecnológico en la medición del fenómeno, se incorporó un concepto más riguroso de actividad eléctrica atmosférica, el de Densidad de Descargas a Tierra por kilómetro cuadrado - año – DDT [19], Este parámetro ha sido determinado regularmente a través de mediciones directas con equipos contadores de Rayos o localizadores o mediante ecuaciones empíricas que relacionan la Densidad de Descargas a Tierra con el Nivel Ceráunico.

En el caso mexicano, la Norma Mexicana NMX-J-549-ANCE-2005 presenta un mapa de densidad de descargas a tierra (DDT), desarrollado por la Comisión Federal de Electricidad CFE y el Instituto de Investigaciones Eléctricas IIE entre 1983 y 1993, sin embargo, no existen trabajos previos a este, que muestren resultados comparables con los datos existentes para determinar su validez, toda vez que la red de detección de descargas eléctricas atmosféricas de México es relativamente reciente.

Históricamente las mediciones de la Densidad de Descargas a Tierra se iniciaron con la propuesta de Pierce en 1956 de un Contador de Descargas, el cual fue modificado diez años más tarde por Golde. El Contador de Descargas se basa en el conteo de cambios de campo eléctrico que excedan los 5 Voltios/metro. Este Contador fue transistorizado por Prentice y Mackerras en 1969 y finalmente se adoptaron dos modelos como estándar a nivel mundial por el Comité CIGRE en 1972: El de 500 Hz de antena vertical y el de 10 kHz. Este último, conocido como el RSA-10, es más sensible a descargas a tierra y se recomendó para uso en áreas de alta actividad eléctrica atmosférica.

Estudios previos [19] mostraron que, aunque sé puede establecerse una relación entre el nivel ceráunico y la densidad de descargas a tierra, esta no es generalizable a las diferentes regiones del mundo, ya que las ecuaciones empíricas muestran variaciones de más del 100% entre ellas, lo cual llevó a concluir que son ecuaciones válidas para los sitios donde fueron desarrolladas.

Para ilustrar este hecho se presenta en la siguiente Tabla, las ecuaciones de Densidad de Descargas a Tierra (DDT) en función del Nivel Ceráunico (NC), utilizadas en diversas partes del mundo y aplicadas a tres años de mediciones (1999, 2000, 2001) y comparadas con mediciones hechas con la red de rayos de Colombia (RECMA) para la ciudad de Bogotá.

Tabla 1 Ecuaciones de Densidad de Descargas a Tierra (DDT) en función del Nivel Ceráunico (NC).

Ecuación Propuesta	Autor	DDT, NC=64 (Descargas/km^2-año - 1999)	DDT, NC=28 (Descargas/km^2 año - 2000)	DDT, NC=29 (Descargas/km^2 -año - 2001)
DDT medido en Bogotá	-	**0.4**	**0.1**	**0.1**
$0.053*(NC)^{1.17}$	Eriksson/ Potgieter, Southafrica	6.9	2.6	2.7
$0.04*(NC)^{1.25}$	Anderson/ Eriksson, CIGRE	7.2	2.6	2.7
$0.0026*(NC)^{1.9}$	Stringfellow, U.K	7.0	1.5	1.6
$0.004*(NC)^{2}$	Muller/ Hillebrand, Sweden	16.4	2.0	2.1
0.15*(NC)	Brown/ Whitehead/ Golde. USA	9.6	4.2	4.3
$0{,}023*(NC)^{1,3}$	CIGRE	5.1	1.7	1.8
$0.036*(NC)^{1.3}$	Kolokolov/ Paulova/ Russia	8.0	2.7	2.8
0.1*(NC)	Aiya, India	6.4	2.8	2.9
0.14*(NC)	Anderson/ Jenner	9.0	3.9	4.0
0.11*(NC)	Horn/ Ramsey U.S.A	7.0	3.1	3.2
0.17*(NC)	Horn/ Ramsey U.S.A	10.9	4.8	4.9
0.19*(NC)	Brooks/ Temperate	12.2	5.3	5.5
0.13*(NC)	Brooks/ Tropical	8.3	3.6	3.7
0.01*(NC)	New Guinea	0.6	0.3	0.3
$0{,}024*(NC)^{1,12}$	de la Rosa Montaña México	2.5	1.0	1.0
$0.03*(NC)^{1.12}$	Dinitz/ M.G (Brasil)	3.2	1.2	1.3
(0.1+0.35*SIN?)* (0.4?0.2)*(NC)	C.C.I.T.T	1.6-4.8	0.7-2.11	0.7-2.2
$4.6x10^{-5}*(NC)^{2.2}$	Younes, C/ PAAS-UN (Colombia)	0.4	0.07	0.07
$5x10^{-5}*(LAT)^{0.6}*(NC)^{2}$	Younes, C/ PAAS-UN (Colombia)	0.5	0.09	0.1

Los resultados obtenidos por el Ingeniero Yunes [20] determinaron 4 ecuaciones empíricas (2 de montaña y 2 de costa) para el cálculo de la DDT a partir del Nivel Ceráunico, con lo cual se evidenció para entonces que efectivamente, las ecuaciones empíricas no podían generalizarse y que, en favor de su hipótesis, habría una diferencia entre la actividad eléctrica atmosférica para diferentes regiones que posteriormente darían como resultado, ecuaciones más precisas.

En el caso mexicano, no se han desarrollado aún estudios similares que permitan establecer tal relación, sin embargo, en el capítulo segundo se presentarán resultados concluyentes en relación con la actividad real de las descargas eléctricas atmosféricas a partir de mediciones directas.

Es importante anotar que, en el caso colombiano, el uso de ecuaciones empíricas que relacionan el NC con el DDT, desarrolladas en otras partes del mundo, conllevaría el sobredimensionamiento de las medidas de protección, lo cual se muestra en los resultados presentados por el Ingeniero Yunes [20] y es de esperarse que resultados similares fueran obtenidos en el caso mexicano, lo cual se describirá en el capítulo segundo de este documento.

La siguiente Tabla presenta la variación de la Densidad de Descargas a Tierra - DDT y el Nivel Ceráunico - NC con la Latitud, en algunas regiones del mundo [20].

Tabla 2 Valores de DDT y NC, estimados para diferentes Latitudes del mundo

Sitio	Latitud	NC (1)	DDT (2)
Brisbane	27° S	20	4.5 (c)
Gabarone	24° S	60	38.2 (b)
Minas Gerais	15° S	70	10 (e)
Darwin	12° S	80	5.5 (b)
Rabaul	4° S	90	2.7 (b)
Bogotá	5° N	90	1.5 (a)
Orlando	28° N	80	26.2 (b)
Tel Aviv	32° N	20	3.2 (c)
Toronto	43° N	20	3.3 (c)
Berlín	52° N	20	0.73 (c)
Tomsk	54° N	20	1.5 (d)
Uppsala	60° N	10	0.66 (c)

(a) Universidad Nacional de Colombia, Mediciones del PAAS
(b) E. Williams (Comunicación Personal profesor Torres)
(c) Mackerras and Darveniza, "Latitudinal variation of Lightning occurrence characteristics..." Journal of Geophysical Research. Vol. 99, 1994.
(d) V. A. Rakov, "Annual Ground Flash Density from Lightning flash counter records ". ICLP 90.
(e) Companhia Energetica de Minas Gerais - CEMIG. (Reporte Técnico)
(1) Días Tormentosos Año, estimados del World Map of Isoceraunic Level WMO.
(2) DDT , Descargas a Tierra / km^2 - Año

Los resultados muestran que podrían esperarse entonces en el trópico valores de DDT más bajos que en el subtrópico [20], y que esto es aceptable para análisis globales (con áreas de 100 x 100 km^2 o más). Sin embargo, para propósitos de aplicaciones en ingeniería (escala local), los fenómenos orográficos y posiblemente los geológicos locales, juegan un papel fundamental. Por ello es recomendable estimar valores de parámetros del Rayo, considerando áreas del orden de 3 x 3 km^2, de acuerdo con la exactitud en la localización de los sistemas comerciales detectores de descargas eléctricas atmosféricas utilizados. Si el área no es apropiadamente seleccionada para los propósitos requeridos, los valores pueden resultar falseados y esta es precisamente una de las premisas con las cuales se desarrolla la parametrización presentada en los capítulos segundo y tercero.

Amplitud De La Corriente De Retorno Del Rayo – CR

La Amplitud de la Corriente de Retorno de la descarga eléctrica atmosférica es sin duda uno de los parámetros más importantes del rayo, para aplicaciones en ingeniería. La descarga de retorno es la etapa del fenómeno que tiene mayor aplicación en la ingeniería del diseño y protección de sistemas eléctricos y electrónicos, ya que presenta las mayores magnitudes de corriente eléctrica entre el centro de carga de la nube y tierra. Además, es la responsable del fenómeno visual y audible de la descarga eléctrica atmosférica y es donde se produce el mayor calentamiento (aprox. 28.000°C), generando un fuerte gradiente térmico entre éste y el aire que lo circunda, produciendo la onda de choque que normalmente se escucha en una tormenta y que se conoce como trueno. Además, la descarga de retorno tiene un espectro electromagnético típico, el cual es usado en los sistemas de medición y localización.

Al igual que el parámetro DDT, la Amplitud de la Corriente de Retorno del Rayo puede ser estimada mediante modelos matemáticos en función del Campo Eléctrico o Magnético medido y la distancia, o mediante mediciones directas. Este parámetro se incorpora de forma directa en el análisis de la confiabilidad de las líneas de transmisión objeto del presente documento, en particular en el cálculo de las salidas de las líneas producto de los flameos inversos.

La determinación de este parámetro con el nivel de exactitud que se presenta en este documento es uno de los mayores aportes ya que es la primera vez que el parámetro es medido con una exactitud suficientemente alta y con suficientes datos como para generar análisis estadísticos confiables

Otros Parámetros Importantes

POLARIDAD

La polaridad de una descarga eléctrica atmosférica para un área considerada (aspecto espacial), puede también afectar la estrategia de una óptima protección contra Rayos. Desde las mediciones realizadas por Berger en las décadas del 50 al 70, en Monte San Salvatore (Italia - Suiza), se ha establecido que la distribución promedia de la polaridad de una descarga eléctrica atmosférica varía entre 90 y 95 % para polaridad negativa y entre 5 y 10 % para polaridad positiva.

Sin embargo, resultados de mediciones en diferentes redes de localización de Rayos, como por ejemplo la de los Estados Unidos, muestran que una considerable proporción de descargas en época de invierno, son de polaridad positiva. De los análisis de resultados con antenas de detección de Rayos, tipo DF, en la Costa Este de los Estados Unidos, Orville (1987), reportó un cambio de polaridad en las descargas, como función de la temporada, con dominio de la polaridad positiva en la temporada de invierno. Orville también reportó un incremento en la mediana de la Corriente pico de Retorno del Rayo para esta temporada [20] y es de esperarse que al menos en algunas regiones de México se obtuvieran resultados similares.

Sobre este parámetro no se ahonda en el presente documento, toda vez que la literatura consultada, en relación con los análisis de confiabilidad de las líneas de transmisión, no se incorpora este parámetro como factor de análisis determinante, sin embargo, este es un tópico que bien podría abordarse en trabajos siguientes al presente.

MULTIPLICIDAD Y DURACIÓN DEL INTERVALO ENTRE DESCARGAS INDIVIDUALES

Una descarga eléctrica atmosférica o rayo (Flash) puede tardar desde algunos milisegundos hasta medio segundo y está compuesto de descargas individuales (strokes), cada stroke tarda algunas decenas de milisegundos y entre strokes y stroke puede haber hasta cientos de milisegundos. El número de strokes que componen un rayo se conoce como multiplicidad.

Estos parámetros son muy importantes especialmente en el diseño de protecciones contra rayos de equipos eléctricos y electrónicos ya que, si dichas protecciones no actúan lo suficientemente rápido para descargar la energía de cada uno de los strokes subsecuentes de un rayo, seguramente el equipo en cuestión sufrirá daños.

CAPÍTULO 2

CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio corresponde a una línea aérea de 10 km de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), entre las subestaciones San Lorenzo Potencia-Poniente en la ciudad de Puebla, con las siguientes características:

- Nivel de tensión: 115 kV
- Nivel Básico de Aislamiento (NBI): 550 kV
- Altitud: Promedio de 2300 metros sobre el nivel del mar (msnm)
- Calibre del conductor: 477 y 795 ACSR
- Conductores por fase: 1
- Número de circuitos: 4 circuitos en postes troncocónicos.
- Estructuras: Auto-soportadas del tipo TAS y postes troncocónicos tipo PTS.

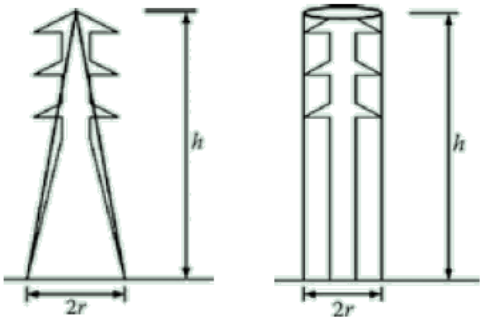


Figura 1 Estructuras que soportan la LT

Tabla 3 Ubicación de las estructuras de la línea de transmisión

Estructura	Ubicación		Tipo de estructura	Estructura	Ubicación		Tipo de estructura
1	19° 7'11.94"N	98°14'40.94"O	Poste	27	19° 7'21.92"N	98°15'35.28"O	Poste
2	19° 7'8.25"N	98°14'42.76"O	Poste	28	19° 7'24.66"N	98°15'38.76"O	Poste
3	19° 7'4.58"N	98°14'44.58"O	Poste	29	19° 7'24.96"N	98°15'39.58"O	Poste
4	19° 7'0.92"N	98°14'46.45"O	Poste	30	19° 7'15.53"N	98°15'39.35"O	Torre
5	19° 6'57.40"N	98°14'48.23"O	Poste	31	19° 7'6.02"N	98°15'39.19"O	Torre
6	19° 6'53.91"N	98°14'49.76"O	Poste	32	19° 6'56.88"N	98°15'39.06"O	Torre
7	19° 6'50.96"N	98°14'51.10"O	Poste	33	19° 6'47.42"N	98°15'38.88"O	Torre
8	19° 6'47.53"N	98°14'52.02"O	Poste	34	19° 6'38.22"N	98°15'38.71"O	Torre

9	19° 6'45.05"N	98°14'53.25"O	Poste	35	19° 6'29.49"N	98°15'38.57"O	Torre
10	19° 6'43.86"N	98°14'53.26"O	Poste	36	19° 6'18.50"N	98°15'38.39"O	Torre
11	19° 6'42.74"N	98°14'54.21"O	Poste	37	19° 6'8.67"N	98°15'38.24"O	Torre
12	19° 6'41.76"N	98°14'55.40"O	Poste	38	19° 5'58.90"N	98°15'38.05"O	Torre
13	19° 6'44.60"N	98°14'58.20"O	Poste	39	19° 5'49.22"N	98°15'37.89"O	Torre
14	19° 6'47.18"N	98°15'0.77"O	Poste	40	19° 5'39.48"N	98°15'37.71"O	Torre
15	19° 6'49.95"N	98°15'3.54"O	Poste	41	19° 5'29.71"N	98°15'37.56"O	Torre
16	19° 6'52.90"N	98°15'6.46"O	Poste	42	19° 5'19.77"N	98°15'37.31"O	Torre
17	19° 6'55.72"N	98°15'9.30"O	Poste	43	19° 5'8.38"N	98°15'37.20"O	Torre
18	19° 6'58.68"N	98°15'12.21"O	Poste	44	19° 4'57.87"N	98°15'36.99"O	Torre
19	19° 7'1.50"N	98°15'15.02"O	Poste	45	19° 4'48.41"N	98°15'36.85"O	Torre
20	19° 7'4.45"N	98°15'17.95"O	Poste	46	19° 4'36.59"N	98°15'36.63"O	Torre
21	19° 7'7.27"N	98°15'20.76"O	Poste	47	19° 4'29.00"N	98°15'39.50"O	Torre
22	19° 7'9.88"N	98°15'23.35"O	Poste	48	19° 4'18.51"N	98°15'43.46"O	Torre
23	19° 7'12.21"N	98°15'25.71"O	Poste	49	19° 4'9.56"N	98°15'46.86"O	Torre
24	19° 7'14.81"N	98°15'28.26"O	Poste	50	19° 3'59.02"N	98°15'50.88"O	Torre
25	19° 7'17.17"N	98°15'30.58"O	Poste	51	19° 3'51.49"N	98°15'55.59"O	Torre
26	19° 7'19.52"N	98°15'32.96"O	Poste	52	19° 3'39.15"N	98°16'3.33"O	Torre

Los parámetros que serán incorporados en el análisis son los siguientes:

- Resistividad aparente del terreno.
- Resistencia de puesta a tierra de cada estructura.
- Nivel Básico de Aislamiento.
- Altura sobre el nivel del mar.
- Densidad de descargas a tierra.
- Distribución física de los conductores sobre la estructura.
- Calibre de los conductores de fase y de guarda.
- Distancia entre estructuras.
- Cantidad y tipo de aisladores.
- Existencia de dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias.

ACTIVIDAD DE DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS

Fuente De Información De Rayos

Betz et al [1] presentaron en 2004 una nueva técnica de detección de rayos VLF / LF (muy baja frecuencia / baja frecuencia) llamada LINET. El procedimiento de ubicación se basa en el método conocido de Tiempo de Arribo (TOA) y el algoritmo de detección mejorado puede proporcionar no solo información de la posición horizontal (latitud, longitud) de los rayos, sino también de su posición vertical. Como se describe en [2], LINET es sensible a las señales VLF / LF de varios procesos involucrados en rayos intranube (IC) y nube a tierra (CG), que presentan fuertes corrientes que fluyen en canales relativamente largos. Para los rayos CG las emisiones se originan desde el punto de impacto en tierra, mientras para los rayos IC, se originan desde diferentes direcciones. Con esta tecnología, los rayos IC y CG se pueden discriminar cuando las distancias entre los sensores son menores a unos 250 km. Dependiendo del número de sensores, su separación en tierra y los umbrales de detección propios de la red; es posible detectar rayos muy débiles de hasta aproximadamente 2 kA.

La detección total ha permitido evolucionar hacia herramientas de identificación de tiempo severo, detección temprana y predicción de tormentas eléctricas y rayos.

En Colombia se instalaron 21 antenas de campo magnético VLF / LF entre finales de 2011 y principios de 2019, cubriendo más del 95% del territorio colombiano, en diciembre de 2016, se instaló una red similar en el sureste de México compuesta por 6 sensores ubicados en las ciudades de Oaxaca, Tehuantepec, Tuxtla, Carlos A Carrillo, Villahermosa y Coatzacoalcos, donde la actividad de rayos es alta, cubriendo cerca de 40 % del país. Con esta red se detectan rayos de nube a tierra (CG) e intranube (CI), con una discriminación confiable, con una modificación para obtener soluciones 3D [3]. Además, también se identifican rayos de magnitud baja, con corrientes máximas inferiores a 10 kA, lo que representa una gran mejora en la eficiencia de detección con respecto a tecnologías preexistentes.

Este nivel de avance tecnológico permite a través de redes de campo magnético obtener información con grados de exactitud y eficiencia que antaño no estaban disponibles, entre los que se destacan las siguientes características:

- Eficiencia de detección > 95%.
- Alta precisión de localización (errores inferiores a 250 m).

- Visualización 3D de rayos intra-nube, lo que permite hacer detección de tiempo severo.
- La identificación de celdas de tormenta y zonas libres de rayos es confiable gracias a la alta precisión en la localización.

En la zona que recorre la línea que será analizada, se han registrado y almacenado los datos de todas las descargas atmosféricas desde el 01 de enero de 2016, y se analizarán 2 periodos anuales que permiten definir ciclos de comportamiento del fenómeno.

Todos los sensores transmiten las señales detectadas hasta la Unidad de Procesamiento Central ubicada en Alemania y con espejo en Colombia, allí se obtienen las soluciones para cada descarga arrojando la siguiente información:

- Tiempo de ocurrencia (con precisión de 100 ns).
- Latitud.
- Longitud.
- Amplitud de la corriente de retorno.
- Polaridad.
- Discriminación (stroke intra-nube IC o nube-tierra CG).
- Altura de emisión.
- Forma de onda.

Manejo De La Información Obtenida De Los Sensores

Los sensores trabajan con información de strokes y no de flashes, por lo que es necesario crear una base de datos de flashes con la información necesaria tal como tiempo intrastrokes, distancia de impacto entre cada stroke subsecuente y el primer stroke, número del stroke subsecuente y numero de strokes por flash.

Para determinar qué stroke pertenecía a un determinado flash se estableció que en un flash se incluirán todos los strokes que:

a) Ocurran dentro de 500 ms a partir del stroke inmediatamente anterior, y
b) Estén dentro de un radio de 10 km a partir del punto de impacto del primer stroke.

Este criterio es el que se utilizan entre otros en NLDN[3] para determinar qué strokes pertenecen a un mismo flash.

[3] "National Lightning Detection Network" La red de localización de rayos de los Estados Unidos de América

Actividad de Rayos En México

La Densidad de Descargas a Tierra – DDT también conocida como Densidad de Rayos a Tierra – DRT se define como el número de rayos nube-tierra que se presentan en un área de 1 km^2 durante un año. Este parámetro es considerado como el primer indicador de la incidencia de rayos en una región. Típicamente la DDT es calculada a partir de las medidas de contadores de rayos, sistemas de localización de rayos y sistemas ópticos instalados en satélites [4]–[8].

Oficialmente, la Norma Mexicana NMX-J-549-ANCE-2005 presenta un mapa de densidad de descargas a tierra (DDT) para México, desarrollado por la Comisión Federal de Electricidad CFE y el Instituto de Investigaciones Eléctricas IIE entre 1983 y 1993, sin embargo, no se contaba entonces con una red de detección de rayos de alta precisión (conformada por una gran cantidad de sensores de rayos cercanos entre ellos).

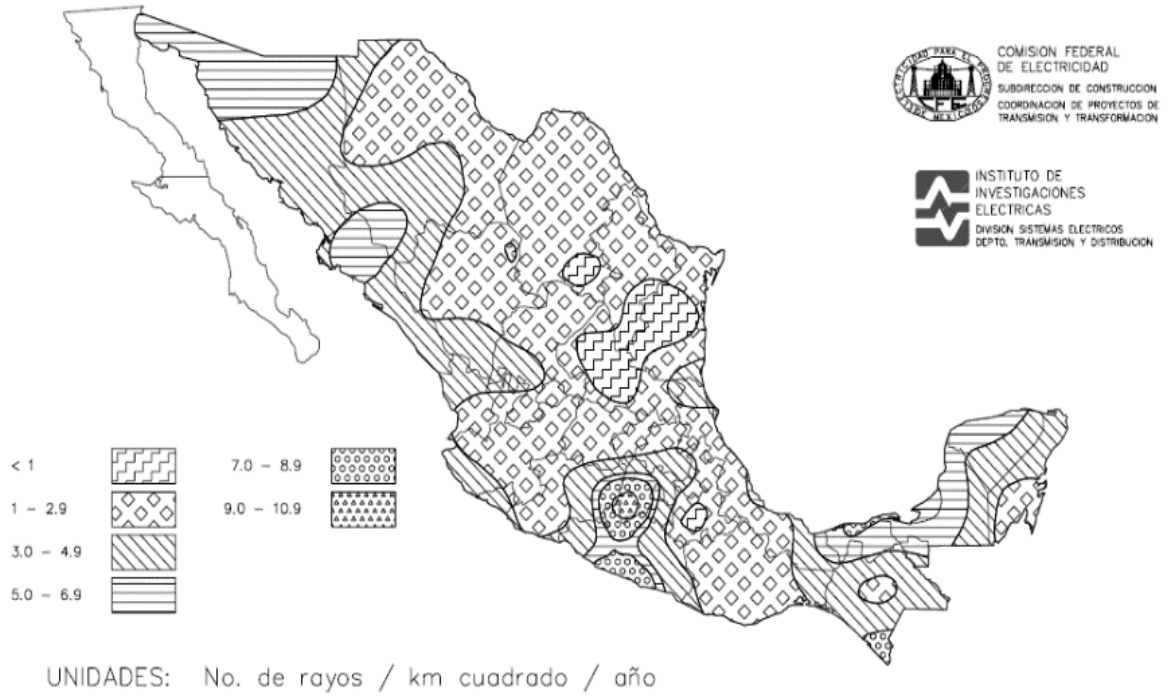


Figura 2 Mapa de la actividad atmosférica en la República Mexicana con la DDT.[4]

La CFE incorporó en el mapa anterior sus líneas de transmisión y el resultado se muestra en la siguiente Figura.

[4] Mapa de densidad de descargas a tierra, Apéndice C de la NMX-J-549-ANCE-2005.

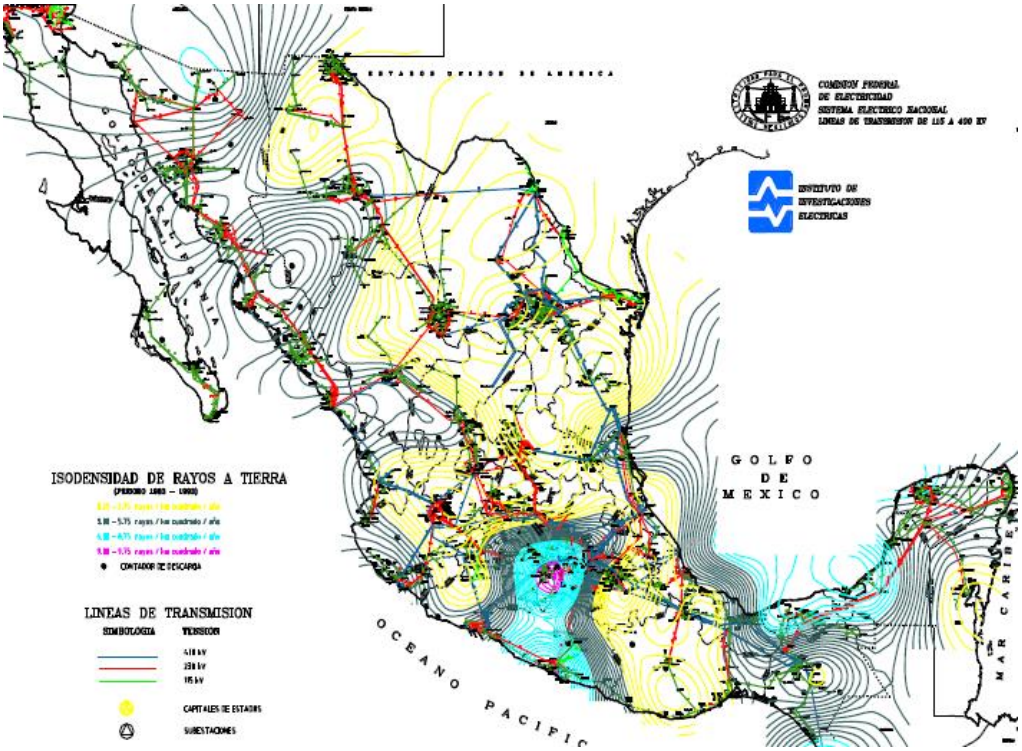


Figura 3 Mapa de la actividad atmosférica en la República Mexicana con la DDT[5].

Como ha sido reportado por varios estudios [6-12], el fenómeno del rayo tiene su máxima recurrencia en las regiones tropicales y sus parámetros físicos presentan variaciones en comparación con los que se observan típicamente en otras regiones del mundo.

Redes de antenas de campo magnético VLF / LF, muestran un aumento sustancial del DDT en comparación con otros valores reportados previamente por cualquier sistema de localización de rayos en los trópicos, como es el caso de México; el presente documento muestra los resultados similares para una zona de análisis en torno de una línea de transmisión tomada como caso de estudio, ubicada en Puebla, México.

Aranguren [13] presentó resultados estadísticos sobre los parámetros del rayo en Colombia basados en la red LINET; estos resultados muestran que las zonas de mayor altitud de las montañas de los Andes centrales y orientales coinciden con valores muy bajos de DDT, menos de 1 descarga / km^2-año, e incluso 0 en muchas partes. Por otro lado, los valores más altos de DDT se encuentran en las estribaciones. Las corrientes pico presentan variaciones con la temporada del año; noviembre, diciembre y enero expusieron las corrientes pico de retorno promedio más altas, las cuales varían de 37 a 41 kA. Los meses con mayor actividad de rayos

[5] Mapa de Densidad de descargas a tierra elaborado por el antiguo Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), actualmente Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) en conjunto con la CFE.

tienden a presentar corrientes de retorno promedio más bajas de aproximadamente 30 kA.

Aranguren [13] presentó resultados estadísticos adicionales sobre los parámetros del rayo en Colombia, que incluyen multiplicidades altas, de hasta 35 y presentó también algunos resultados sobre los efectos de la topografía en la incidencia de rayos que se estudiaron inicialmente en las regiones montañosas con altitudes de 300 a 4300 msnm. Muy pocos documentos están disponibles en el mundo que relacionen los efectos de la altitud con la actividad de rayos [3, 1] y ninguna investigación se ha llevado a cabo en un lugar con un rango tan amplio de altitudes. El presente documento muestra un acercamiento a este análisis, considerando una región limitada en torno de la línea de transmisión que fue tomada como caso de estudio por su registro de fallas y se demuestra la consistencia en los resultados de Aranguren [13] sobre la premisa de que los resultados de DDT obtenidos por la red de detección de alta eficiencia son mayores a los reportados por cualquier estudio previo, en particular los reportados en la NMX-J-549-ANCE-2005. Un paso siguiente en el estudio de los rayos en México puede incluir un análisis similar al realizado por Aranguren [13], que incluya el área total del territorio.

Desde el primero de enero de 2016 se empezó a medir la actividad de rayos en una región de México con la red de sensores de campo magnético LINET, y fue con esta información que se logró determinar con mayor precisión la Densidad de Descargas a Tierra – DDT en México. A continuación, se presenta el primer mapa de DDT creado por la compañía colombiana Keraunos SAS, con la red LINET de alta eficiencia en el año 2019.

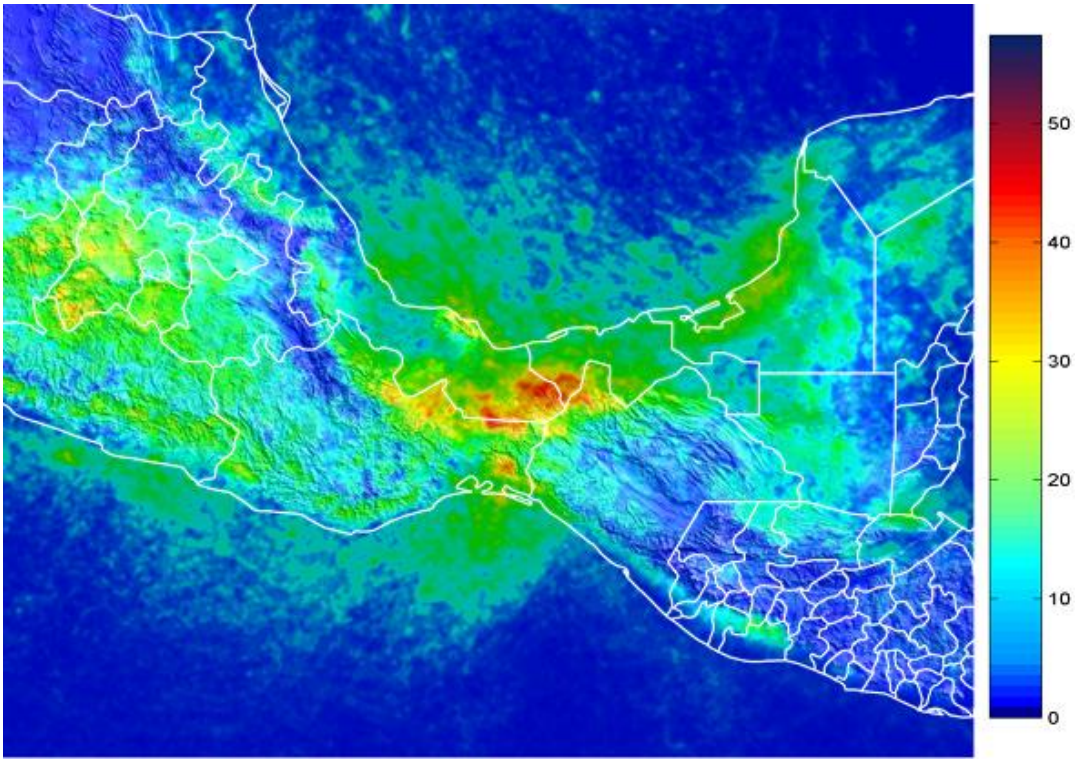


Figura 4 Densidad de Descargas a Tierra – DDT (rayos/km^{2}año)[6]

El comportamiento encontrado presenta diferencias sustanciales con los datos disponibles en el mapa mostrado en la Figuras 2, como era de esperarse basados en los resultados de análisis similares realizados por Aranguren [13] en zonas tropicales, particularmente en Colombia, en el que la actividad de rayos es semejante a la de México. Estas diferencias pueden observarse en comparación de las Figuras 2 y 4.

Actividad De Rayos en torno al Recorrido de la Línea

Para efectos de comparación se presenta la actividad de rayos en el recorrido de la línea a partir de la información disponible en el apéndice D de la NMX-J-549-ANCE-2005, en el cual se observa la DDT para todo el país y pormenorizado para cada estado y posteriormente el resultado del análisis realizado con base en la red de sensores de campo magnético LINET.

El recorrido de la línea se presenta a continuación:

[6] Mapa de densidad de densidad de descargas a tierra de elaboración propia, a partir de los datos de la red linet.

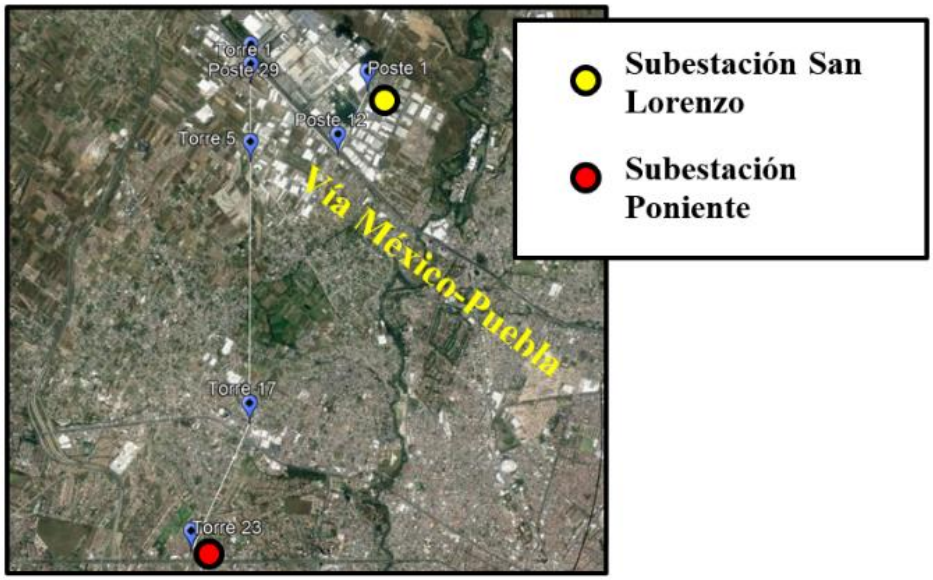
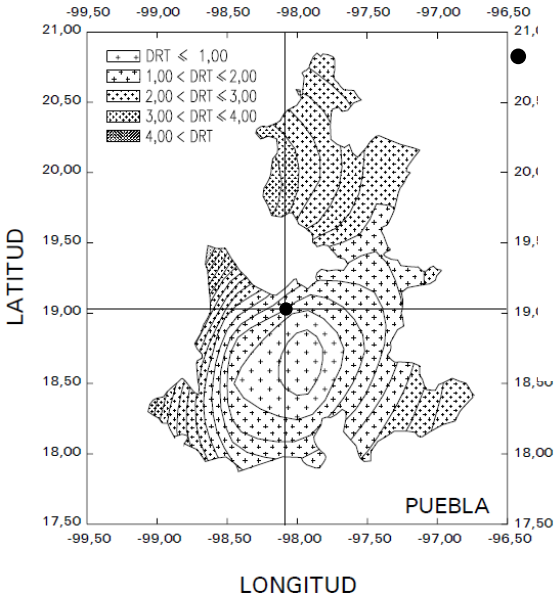


Figura 5 Recorrido de la Línea de transmisión



Ubicación de la línea de transmisión del caso de estudio:

Estructura inicial
19° 7'11.94"N
98°14'40.94"O

Estructura Final
19° 3'39.15"N
98°16'3.33"O

Figura 6 Mapa de isodensidad de rayos a tierra del estado de Puebla.

Se observa que el valor presentado en mapa anterior está entre 2 y 3 rayos/km^2-año, para la zona de interés en donde está ubicada la línea de transmisión.

Como resultado de los datos suministrados por la red de sensores de campo magnético se pudo establecer con exactitud el nivel ceráunico, definido como la cantidad de días de tormenta al año que se presentan en un periodo de un año.

Los datos registrados muestran que durante el año 2017 se presentaron 106 días con actividad de tormenta, mientras en el año 2018 se presentaron 103. Lo cual permite establecer un promedio de **105** días con actividad de tormenta al año.

En el periodo comprendido entre el 01-01-2017 y 31-12-2018 se registraron 4452 rayos en un área de 20 km x 20 km centrada en el eje de la línea de transmisión, la Figura 7 muestra el mapa de DDT de la zona, actualizado a diciembre de 2018,

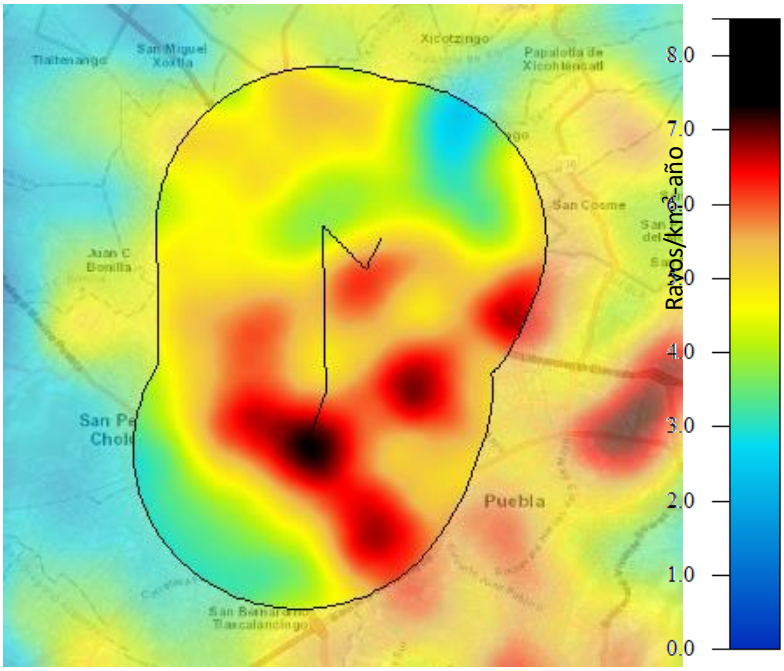


Figura 7 Mapa de DDT entorno a la línea analizada

La DDT calculada muestra un valor medio de 5,8 rayos/km^2-año y un valor máximo de 8,6 rayos/km^2-año, el cual es evidentemente superior al que se presenta en la Mapa de DDT mostrado en la Figura 6 anterior.

Con esta información se construyó el perfil de DDT de la línea, en el cual se pueden observar las estructuras en torno de las cuales se presentó mayor actividad de rayos.

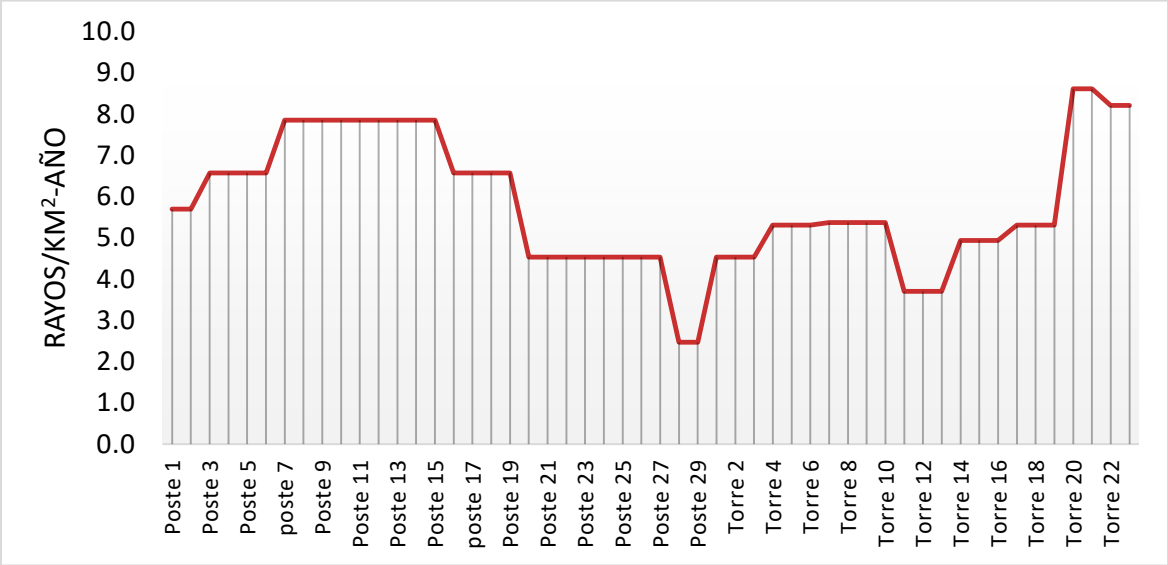


Figura 8 Perfil de DDT de la línea de transmisión

Las mediciones muestran un contraste con respecto a los resultados que se pueden obtener a través de las ecuaciones de Erikson [25], CIGRE y otros autores, lo cual se identificó como una premisa en el capítulo primero y al mismo tiempo coincide con observaciones hechas por Younes [20], en las que se plantea que las ecuaciones que relacionan el NC con el DDT solo son válidas para la región de análisis a partir de la cual fueron creadas.

Todas las ecuaciones que relacionan el NC con el DDT presentan una forma fundamental como sigue:

$DDT = K*NC^X$

Donde:

K: es un coeficiente definido por cada autor.
X: es un exponente definido por cada autor.
NC: es el Nivel Ceráunico.

Con el valor de NC = 105 días tormentosos (valor medido con la red de detección), el DDT es el que se presenta en la siguiente tabla para los autores consultados.

Tabla 4 DDT calculado en función del NC, para diferentes ecuaciones disponibles en la literatura[7]

Ecuación		Autor	DDT, NC=105
Coeficiente	Exponente		DDT medido 5.8 a 8.6 rayos/km2/año
0.053	1.17	Eriksson/Potgieter, Southafrica	12.3
0.04	1.25	Eriksson/Potgieter, CIGRE	13.4
0.0026	1.9	Stringfellow, U.K.	18.0
0.004	2	Muller/Hillebrand, Sweden	44.1
0.15	1	Brown/Whitehead/Golde. USA	15.8
0.023	1.3	CIGRE	9.8
0.14	1	Anderson/Jenner	14.7
0.11	1	Horn/Ramsey, USA	11.6
0.17	1	Horn/Ramsey, USA	17.9
0.19	1	Brooks/Temperate	20.0
0.13	1	Brooks/Tropical	13.7
0.01	1	New Guinea	1.1
0.024	1.12	De la Rosa Montaña México	4.4
0.03	1.12	Dinitz/M.G, (Brasil)	5.5
0.000046	2.2	Younes, C/PAAS-UN, Colombia	1.3
0.00005	2	Younes, C/PAAS-UN, Colombia*	3.2

* La ecuación de Younes [20], introduce un factor adicional que es la latitud de la ubicación, la cual es elevada a la potencia (0.6) y que multiplica a la ecuación fundamental.

Puede observarse que las ecuaciones que se acercan al rango de datos medidos (5.8 a 8.6 rayos/km^2/año) son las ecuaciones de Dinitz/M.G, Brasil (5.5 rayos/km^2/año) y la del CIGRE (9.8 rayos/km^2/año). Vale la pena anotar que estudios previos en México, llevado a cabo por De la Rosa, arrojan resultados ligeramente menores que los obtenidos a partir de la red de rayos.

Actividad De Rayos Multianual

Una herramienta importante en el análisis de riesgo consiste en conocer el comportamiento temporal de la actividad que genera la condición de riesgo por lo cual un análisis estadístico de la actividad de rayos resulta bastante útil para establecer con mayor asertividad estrategias de protección. Las Figuras 9 y 10 siguientes muestran el comportamiento temporal de la actividad de rayos registrada,

[7] Cálculo del nivel ceráunico en la zona de análisis, con diferentes ecuaciones de sendos autores, en comparación con los datos reales medidos con la red Linet.

tanto en cantidad de descargas como en magnitud de corriente pico promedio cada mes, para la zona analizada.

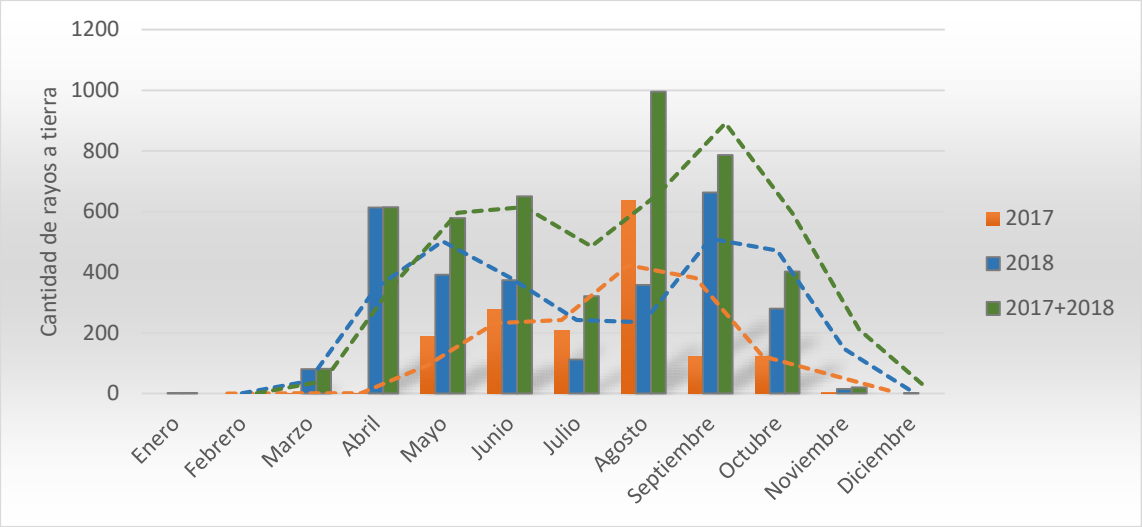


Figura 9 Comportamiento temporal de la actividad de rayos en la región de estudio

Durante el año 2017 se observó un comportamiento monomodal de la actividad de rayos con un pico de actividad en el mes de agosto, mientras en el año 2018 se observó un comportamiento bimodal con picos en los meses de abril y septiembre.

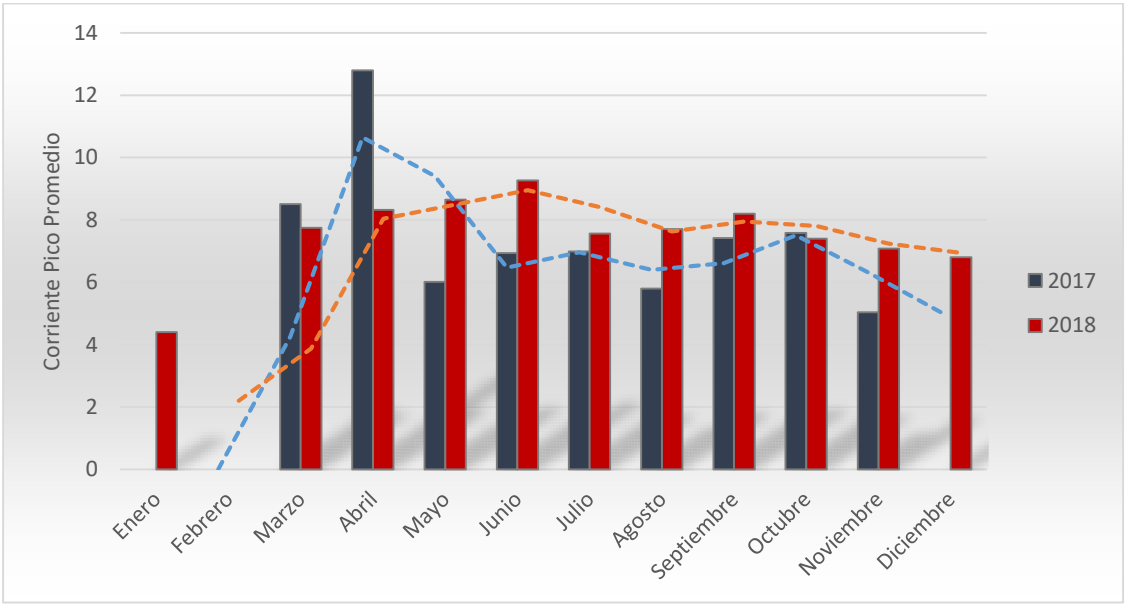


Figura 10 Comportamiento temporal de la actividad de rayos en la región de estudio

CAPÍTULO 3

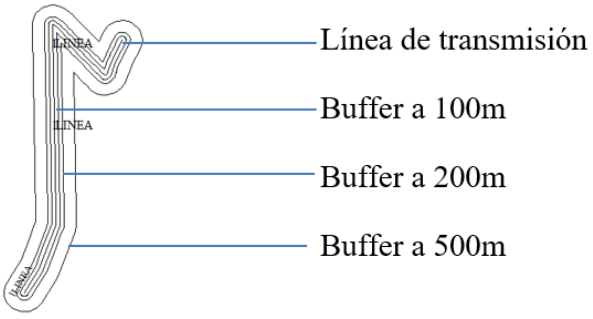
INCIDENCIA DE LA ACTIVIDAD ELÉCTRICA ATMOSFÉRICA SOBRE LA LÍNEA

Para estimar la confiabilidad de la línea ante la actividad de rayos, se deben considerar los siguientes aspectos principales.

- Densidad de descargas a tierra a lo largo de la línea.
- Parámetros de corriente de rayo (principalmente su distribución máxima)
- Rayos en la línea de transmisión y en sus componentes individuales.
- Estimación de la tensión de aislamiento cuando cae un rayo sobre la línea.
- Resistencia del aislamiento a la sobretensión generada por la descarga
- Tasa de fallas causadas por descargas directas y por flameo inverso

Dada la exactitud en la detección que ofrece la red y que ha sido demostrada en estudios anteriores, se puede establecer con gran precisión cuantos rayos podrían haber impactado en la línea de estudio y cuáles por su cercanía, podrían generar inducciones elevadas. Un rayo impactando a menos de 500 m genera afectaciones de forma directa sobre la línea de transmisión y los rayos registrados a menos de 200 m podrían considerarse como impactos directos.

En el periodo comprendido entre el 01-01-2017 y 31-12-2018, se registraron 256 rayos a distancias menores 500 m de la línea, de estos, 105 impactaron a menos de 200 m y 55 a menos de 100 m.



Distancia de la línea (m)	*Cantidad de descargas identificadas*
100	55
200	105
500	256

Figura 11 Impactos registrados en torno de la línea de transmisión.

Esta información permite determinar que, en promedio, el tramo de línea estudiada es afectado por 9,6 rayos por km de línea al año. Lo anterior es coherente con los reportes de CFE sobre las salidas por descarga atmosférica de esta línea, que por ser multicircuito afecta a múltiples clientes importantes.

La evaluación de incidencia permite determinar los eventos con mayor probabilidad de ocasionar fallas.

El número de rayos que impactan cerca de los circuitos está directamente relacionado con dos factores principalmente. El primero es la longitud de los circuitos; mientras más largo sea un circuito mayor será la posibilidad de registrar un número mayor de impactos cercanos que inciden en este. El segundo factor es la intensidad de la actividad eléctrica atmosférica en la región, medido a través del parámetro de DDT; entre mayor sea el valor de este parámetro, mayor será la probabilidad de ocurrencia de impactos cercanos a los circuitos.

En la Figura 12 se ilustra el número de rayos que impactaron a lo largo de la línea a distancias menores de 500, 200 y 100 m de la línea durante los 2 años registrados. A una distancia de 500 m han impactado más de 256 rayos, de los cuales 105 y 55 impactaron a menos de 200 y 100 m de la línea respectivamente. Se estima entonces que alrededor del 41% de los rayos cercanos (menores a 200 m) pueden considerarse como impactos directos en el sistema, disminuyendo la vida útil de los aislamientos o causando flameos y fallas de operación.

Las descargas eléctricas atmosféricas tienen un impacto importante en el desempeño de los sistemas de transmisión, ya sea por impactos directos o indirectos. Estudios anteriores muestran que entre el 69% y el 75% de las fallas en los sistemas de transmisión de energía de la región peninsular de México son causadas por rayos [5]; Además, se ha demostrado que los rayos son una de las causas más importantes de las perturbaciones de la calidad de la energía, en particular huecos de tensión [14]. Usualmente, los efectos del rayo son fallas temporales en el sistema, las cuales son despejadas por los reconectadores o la configuración de recierre en los relés. Existen otras fallas que son permanentes y que deben ser despejadas en el menor tiempo posible, aunque también se debe mejorar el desempeño de estas redes disminuyendo a un valor tolerable este tipo de fallas. Una de las alternativas para mejorar el desempeño de los circuitos es aumentando el nivel de aislamiento y colocando cables de guarda. Otra de las alternativas es implementar Descargadores de Sobretensión (DST) “Apartarrayos” en puntos intermedios de la línea.

El IEEE 1243 menciona que se han implementado sistemas de localización de rayos y redes de contadores de descargas en América del Norte [21], [22] similares a los disponibles en México y en otros lugares. Con suficiente experiencia, estas redes pueden proporcionar mapas detallados de densidad de descargas a tierra (DDT). Las características orográficas y geográficas, como la proximidad a grandes masas de agua o los cambios de elevación, afectan la densidad de descargas. Los mapas de densidad de descargas a tierra (ground flash density) proporcionan mucho más detalle y precisión que lo que estaba disponible anteriormente con datos de truenos (Nivel Ceráunico). En [23] se muestra un mapa DDT típico. Los mapas de DDT también pueden estar disponibles para mostrar dónde ocurren los rayos más

dañinos. Cuando se comparan dos rutas con características de suelo similares, la ruta a través de una región con menor densidad de descargas severas tendrá menos interrupciones, con lo cual la herramienta de monitoreo mostrada en este documento se constituye en una herramienta valiosa para optimizar los trazados de las líneas

Con mapas más detallados promediados durante un tiempo suficiente, el diseñador puede seleccionar una ruta con una exposición mínima a los rayos. A modo de orientación sobre el tiempo promedio requerido, MacGorman et al. [24] encontró que los datos de truenos promedio de un año tenían aproximadamente un 35-40% de desviaciones estándar, los promedios de cinco años tenían un 30% de desviación estándar, y los promedios de diez años tenían desviaciones estándar del 25%. Se esperaría una variación similar para el DDT, por lo tanto, es deseable un mínimo de 5 a 10 años de observaciones de DDT. La dispersión natural de la actividad de los rayos puede hacer que sea imposible estimar un valor medio con más precisión que la desviación estándar de diez años y es importante anotar que los datos contemplados en este documento contemplan únicamente 2 años, con lo cual la desviación estándar es aproximadamente del 35% y se invita a continuar recopilando información que mejore la exactitud de los análisis estadísticos.

El IEEE 1243 también establece la relación entre la altura de la estructura y la cantidad de descargas que pueden estimarse sobre ella, la cual está dada por la siguiente ecuación:

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

Donde:

h: es la altura de la tierra en metros (m)
b: es la distancia de separación en metros (m) de los cables de guarda;
Ng: es la densidad de descargas a tierra DDT dada en rayos/km^2/año);
Ns: es la cantidad de rayos cada 100 km/año.

Usando esta metodología de cálculo el resultado para las estructuras de la línea analizada es el siguiente:

h: 38 m
b: 8.4 m
Ng (DDT): 5.8 rayos/km^2/año

Ns = 148.9 rayos por cada 100 km/año

Este dato contrasta con los 9.6 rayos por km/año identificados por la red de detección, lo cual es **6,4** veces más

El impacto de los rayos sobre la línea bajo estudio se llevará a cabo realizando los siguientes análisis:

Impactos Directos Sobre El Cable De Guarda

Se revisará el apantallamiento existente de las estructuras con el fin de determinar si existen zonas desprotegidas de apantallamiento en las que pueden existir impactos sobre el cable de fase. Adicionalmente, se analizará si los impactos sobre el cable de fase pueden causar flameo en algún punto del circuito; además se analizará el porcentaje de impactos sobre el cable de guarda que causan flameos en la línea.

Cuando se produce un impacto sobre el cable de guarda o sobre la estructura como se representa en la siguiente figura

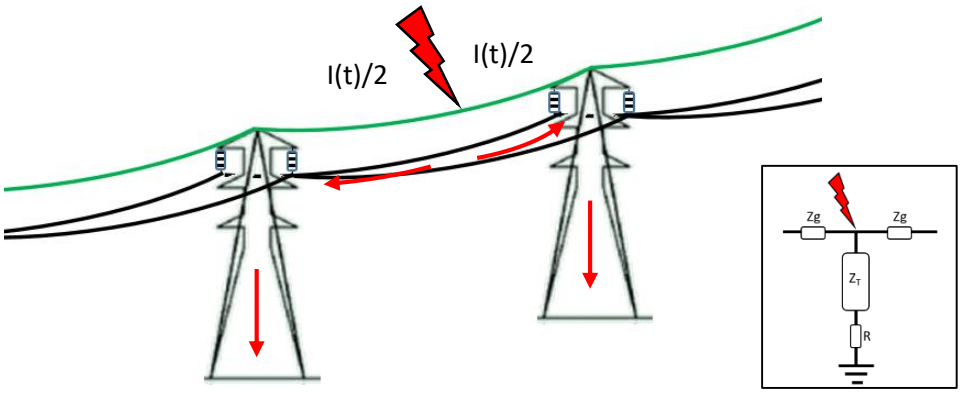


Figura 12 Impacto de rayo sobre cable de guarda

Se puede producir un flameo inverso (BFR – Back Flashover Rate). Su nombre se debe a que normalmente la torre debería estar a un potencial de cero, pero en este caso es en la torre donde aparece la mayor tensión y por tanto el flameo se produce entre la torre y el cable de fase [1]. De este modo la corriente se divide entre la impedancia de la torre y la impedancia característica del cable de guarda.

Si bien un impacto directo sobre el cable de fase puede causar flameo para corrientes muy pequeñas cuando los impactos son sobre el cable de guarda no siempre habrá flameo sobre la línea [1]. En esto ayuda, entre otras: la influencia que tienen las resistencias de puesta a tierra cercanas en la sobretensión y al efecto de la resistencia transitoria de la puesta tierra.

Para este análisis, el valor de resistencia de puesta a tierra tiene especial relevancia, por esta razón se presentan las mediciones de resistencia de puesta a tierra y la metodología utilizada para realizarla.

Medición Del Valor De Resistencia De Puesta A Tierra

Para las mediciones de resistencia de puesta a tierra se usa un telurómetro de alta frecuencia (25 kHz), a esta frecuencia, la reactancia inductiva del cable de guarda en un vano de extensión normal, es razonablemente alta y permite minimizar el efecto de las puestas a tierra de las torres adyacentes a la que se está midiendo. El instrumento mide sólo la resistencia de puesta a tierra de la torre considerada, incluyendo la cimentación de la misma, de manera que el valor leído representa el comportamiento frente a una onda de impulso, tal como una descarga eléctrica atmosférica.

La alta resistencia de entrada del circuito de tensión (100 kΩ) hace despreciable el efecto de la resistencia de puesta a tierra de la sonda. El equipo posee un banco de condensadores que permiten sintonizar la posible inductancia de la puesta a tierra, anulando su efecto.

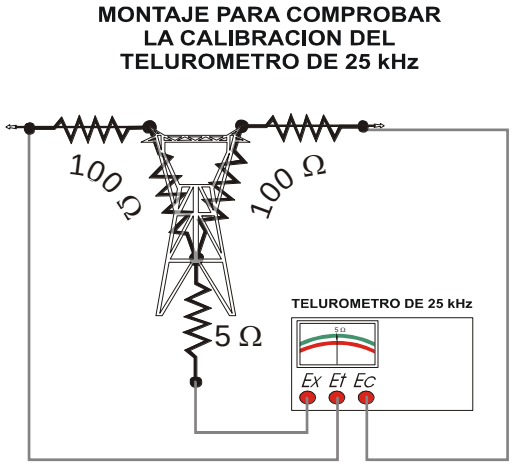


Figura 13 Montaje para medición del valor de resistencia de puesta a tierra.

Esta técnica se basa en el empleo de una corriente de medición de frecuencia relativamente alta (25 kHz), aprovechando que el cable de guarda se comporta como una inductancia de valor considerable. Típicamente, la inductancia del hilo de guarda es del orden de 1,8 μH/m, es decir, más de 300 μH considerando un vano normal. Ello representa, a 25 kHz, una reactancia inductiva de más de 100 Ω. Este valor es cinco veces superior al que se exige para una puesta a tierra de línea de

transmisión y ello permite asumir que para esa frecuencia el cable de guarda se aproxima a un circuito abierto, tal como si se lo hubiera desconectado.

Un método válido para obtener el valor correcto de resistencia de puesta a tierra, consiste en desconectar el cable de guarda, mantenerlo aislado, efectuar la medición y volverlo a conectar. Como esta operación debe hacerse, la mayoría de las veces, con la línea energizada, resulta una tarea compleja, costosa y de alto riesgo. Incluso con la línea fuera de servicio es un trabajo lento y tedioso.

El ensayo se realiza haciendo circular una corriente de valor conocido a través de la resistencia de dispersión y de un electrodo auxiliar, llamado electrodo de corriente, midiendo la tensión entre la puesta a tierra y el electrodo de tensión, clavado en el terreno en la zona plana del perfil de potencial creado por la corriente circulante.

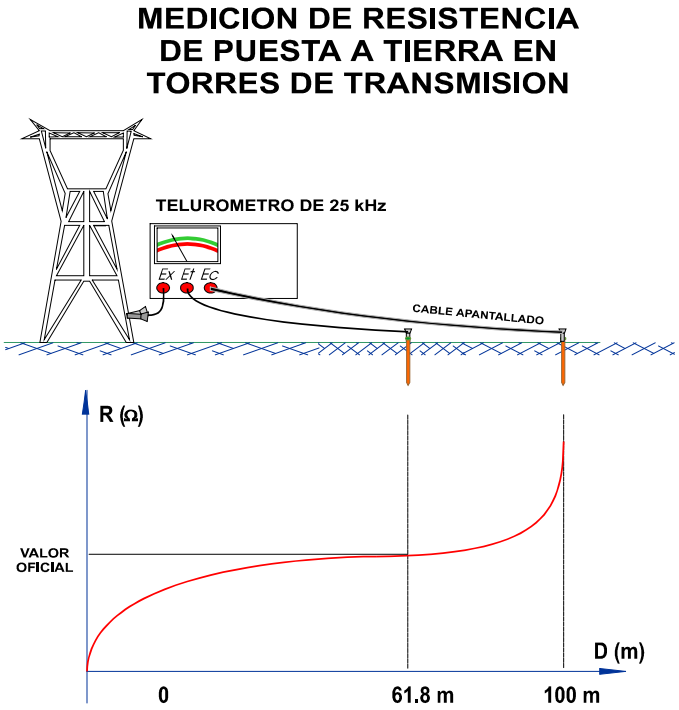


Figura 14 Montaje para medición de resistencia de puesta a tierra.

Filtros altamente selectivos, eliminan el efecto de las corrientes espurias de frecuencia industrial que suelen estar presentes en el terreno. La corriente que circula por el terreno se regula automáticamente al valor definido con una precisión de 1%. De esa manera, el instrumento indica directamente el valor de resistencia en la escala graduada en ohmios. La alta resistencia de entrada del circuito de tensión (100 kΩ) hace despreciable el efecto de la resistencia de puesta a tierra de la sonda.

Los registros de la red incluyen valores medidos de resistencia de puesta a tierra, sin embargo, estos no especifican si la medición se realizó con telurómetros de baja frecuencia utilizando el procedimiento de desconexión del cable de guarda, sin desconexión del cable de guarda o con alta frecuencia. Por esta razón se presentan los valores existentes en el registro y los valores medidos

Los resultados obtenidos en campo se presentan a continuación:

Tabla 5 Valores de resistencia de puesta a tierra

Estructura	Medición de resistencia existente en el registro [Ω]	Medición de resistencia de puesta a tierra a 25 kHz [Ω]	Estructura	Medición de resistencia existente en el registro [Ω]	Medición de resistencia de puesta a tierra a 25 kHz [Ω]
1	ND		27	3,24	
2	ND		28	3,84	
3	13,3	11,66	29	6,71*	
4	6,36		30	4,43*	
5	6,53	11,19	31	3,07*	9,72
6	4,37	11,68	32	4,315*	
7	3,57	11,27	33	2,8925*	
8	ND		34	3,7975*	
9	ND		35	4,19*	
10	ND		36	6,465*	
11	ND		37	3,4125*	
12	7,52		38	2,71*	
13	15,46		39	3,5*	
14	5,33		40	ND	
15	4,28		41	ND	11,11
16	5,64		42	ND	
17	6,74		43	ND	
18	3,16		44	ND	11,15
19	9,17		45	ND	11,47
20	4,23		46	ND	
21	5,7		47	ND	
22	4,29		48	ND	
23	8,09		49	ND	
24	14,27	11,47	50	ND	
25	5,33		51	ND	
26	5,87		52	ND	

Los datos medidos en campo son consistentes, sin embargo, los datos obtenidos del registro son sustancialmente menores que los medidos con la metodología de alta frecuencia, esta diferencia es un indicador de posibles errores en las mediciones previas, lo cual pueden significar que las mediciones fueron tomadas con un telurómetro de baja frecuencia sin desconectar el cable de guarda.

Impactos Sobre El Cable De Fase

Los impactos sobre las fases ocurren cuando el ángulo de protección del cable de guarda no permite la protección contra impacto directo, en estos casos la tensión que experimenta la cadena de aisladores está dada por la multiplicación de $I(t)/2$ por la impedancia característica de la línea Z_{surge}. De esta manera, la corriente mínima que causará flameo en la cadena de aisladores para cada tipo de estructura será

$$I_c = \frac{2 \cdot CFO}{Z_{surge}} \qquad Z_{surge} = 60\sqrt{\ln(2h/r)\ln(2h/R_c)}$$

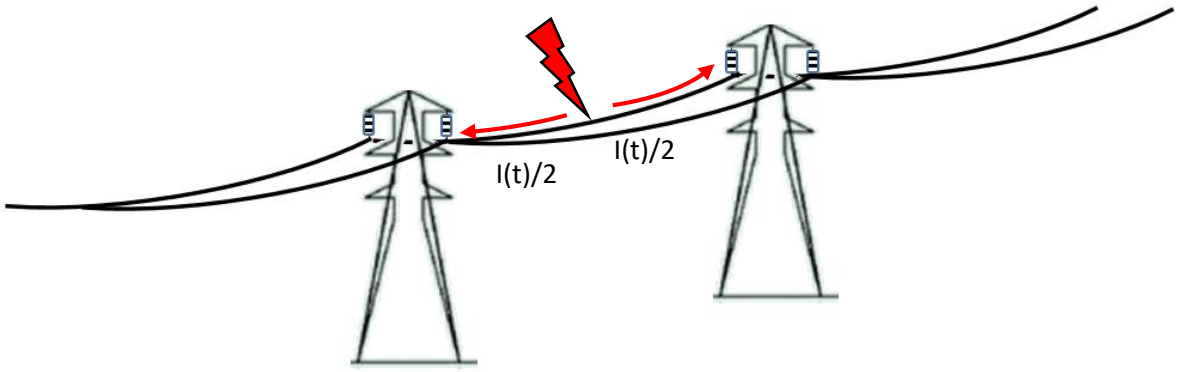


Figura 15 Impacto de rayo sobre fase

Dado que habrá un número de rayos que impactará directamente sobre el cable de fase se debe cuantificar el número de fallas por este tipo de impactos. Éste se conoce como la tasa de flameos por fallas de apantallamiento (SFFOR – Shielding Failure Flashover Rate) y se puede calcular mediante la siguiente expresión [3].

$$SFFOR = 2N_g L \int_{I-I_C}^{I-I_{máx}} D_C(I) f_I(I) dI$$

Donde N_g es la densidad de descargas a tierra, L es la longitud de la línea, I_c es la corriente crítica de flameo, I_{max} es la máxima corriente que causaría falla de apantallamiento, D_C es la distancia desprotegida y $f_I(I)$ es la distribución estadística de corriente. Normalmente, Ic se toma igual a la mínima corriente de la zona de estudio.

Para realizar el estudio del apantallamiento se determina inicialmente los valores de corriente de los rayos detectados sobre el área de estudio por la Red Mexicana de Detección Total de Rayos (Mexican Total Lightning Detection System – MTLDS) desde el 01/01/2016 hasta el 15/06/2019, generando la curva de probabilidad acumulada de corriente.

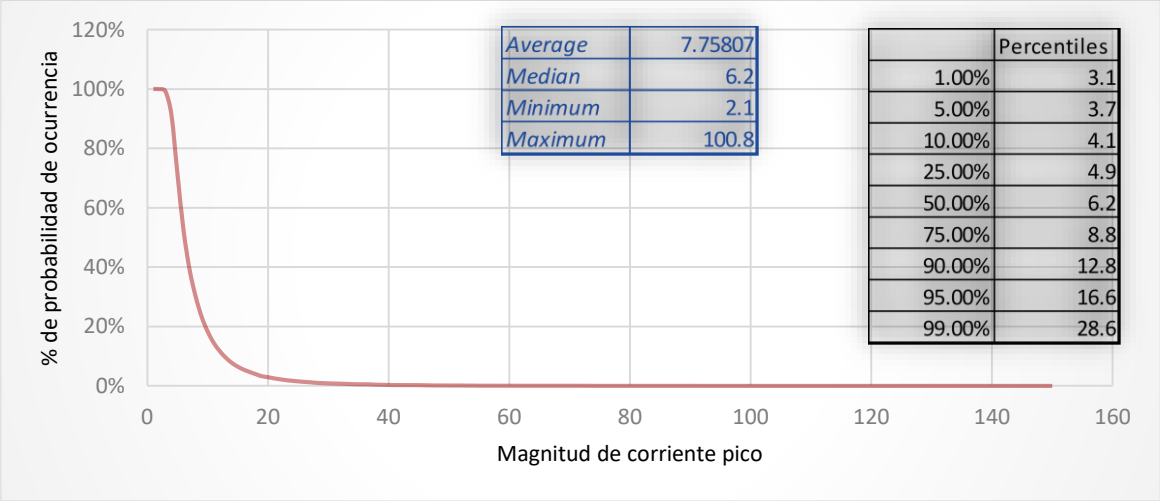


Figura 16 Probabilidad acumulada de corriente pico

Esto permite obtener la corriente mínima (percentil 1) la cual se utiliza para definir el radio de las circunferencias requerido en la aplicación del método electrogeométrico y de esta manera determinar las distancias de desprotección de las estructuras. El área que se utiliza para la consulta de la información de rayos fue de 400 km^2 alrededor de los circuitos, esto permite analizar un número suficiente de muestras para generar estadísticas confiables del fenómeno en el área de interés.
En la Figura anterior se presentan los valores estadísticos de los rayos que impactaron en el área definida. El promedio de la magnitud de la corriente en la zona es de 7,76 kA, la mediana de 6,2 kA y el valor máximo es de 100,8 kA. La corriente mínima detectada por la red LINET es de 2,1 kA. La magnitud de corriente que corresponde al percentil 1% es de 3,1 kA, la cual es utilizada para realizar los diseños de protección contra rayos.

En la Figura siguiente se muestra gráficamente el modelo electrogeométrico aplicado a la protección de líneas de energía eléctrica.

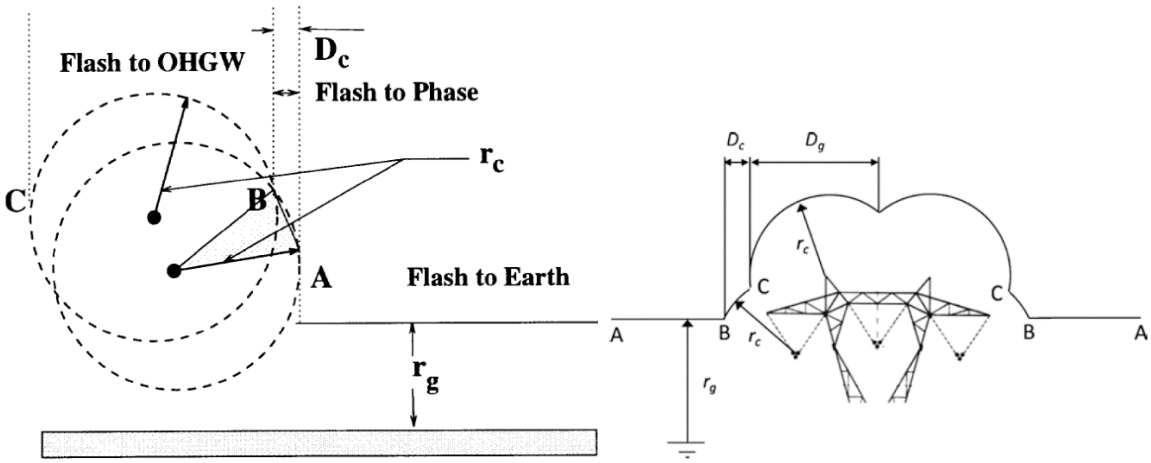


Figura 17 Método electrogeométrico aplicado a líneas de transmisión

Este modelo permite determinar la zona de protección y desprotección de las estructuras calculando los radios de impacto tanto para el conductor de guarda como para el conductor de fase y está descrito en la norma IEEE 1243.

Los rayos que impactan entre C y B señalados en la Figura anterior impactarán el cable de guarda; los que impacten entre B y A, lo harán sobre el cable de fase y aquellos que impacten a partir de A, lo harán en tierra. Por lo tanto, existe una zona de desprotección Dc donde hay probabilidad de que un rayo pueda impactar el cable de fase. En general, el diseño de apantallamiento buscará eliminar o reducir en la mayor medida el valor Dc a través de la reubicación del cable de guarda.

Estos radios de impacto son función de la corriente mínima de la descarga, por tanto, existe una diferencia entre los cálculos que se pueden obtener usando los parámetros de magnitud de corriente mínima dados en la norma IEC 62305-3, en la norma NMX-J-549-ANCE-2005 y los valores medidos con la red Linet, adicionalmente la NMX-J-549-ANCE-2005 considera una formulación particular para el radio de impacto sobre una terminal aérea, la cual puede usarse para el cable de guarda y la para la fase, pero no considera una formulación para el radio de impacto en tierra.

$$r_c = 10I^{0.65}$$

$$r_g = \begin{cases} [3.6 + 1.7\,ln\,(43 - y_c)]\,I^{0.65} & y_c < 40\text{ m} \\ 5.5I^{0.65} & y_c \geq 40\text{ m} \end{cases}$$

Donde *Yc* es la altura promedio del conductor en metros, dada por la altura en la torre menos dos tercios de la flecha media (19,2 m)

Para 2,9 kA, de acuerdo con el IEC 62305-3 el resultado es el siguiente:

$$r_c = 10\ x\ 2{,}9^{0{,}65} = 20m$$

$$r_g = [3{,}6 + 1{,}7\ln(43 + 19{,}2)]2{,}9^{0.65} \cong 18m$$

Para 16 kA de acuerdo con la NMX-J-549-ANCE-2005

$$r_c = 9{,}4\ x\ 16^{\frac{2}{3}} = 60m$$

La NMX-J-549-ANCE-2005 no cuenta con una fórmula para el radio de impacto en tierra por tanto se presenta el cálculo a partir de la fórmula del IEEE 1243, pero usando la magnitud de corriente mínima dada por la NMX-J-549-ANCE-2005 de 16 kA

$$r_g = [3{,}6 + 1{,}7\ln(43 + 19{,}2)]16^{0.65} \cong 54{,}5m$$

Para 3,1 kA de acuerdo con los datos medidos con la red Linet.

$$r_c = 10\ x\ I^{0{,}65} = 10\ x\ 3{,}1^{0{,}65} = 20{,}86m$$

$$r_g = [3{,}6 + 1{,}7\ln(43 + 19{,}2)]3{,}1^{0.65} \cong 19m$$

Para 3,1 kA de acuerdo con los datos medidos con la red Linet usando la formulación de la NMX-J-549-ANCE-2005.

$$r_c = 9{,}4\ x\ I^{\frac{2}{3}} = 9{,}4\ x\ 3{,}1^{\frac{2}{3}} = 20m$$

El modelo siguiente, corresponde a los radios más pequeños, los cuales describen físicamente la condición más crítica.

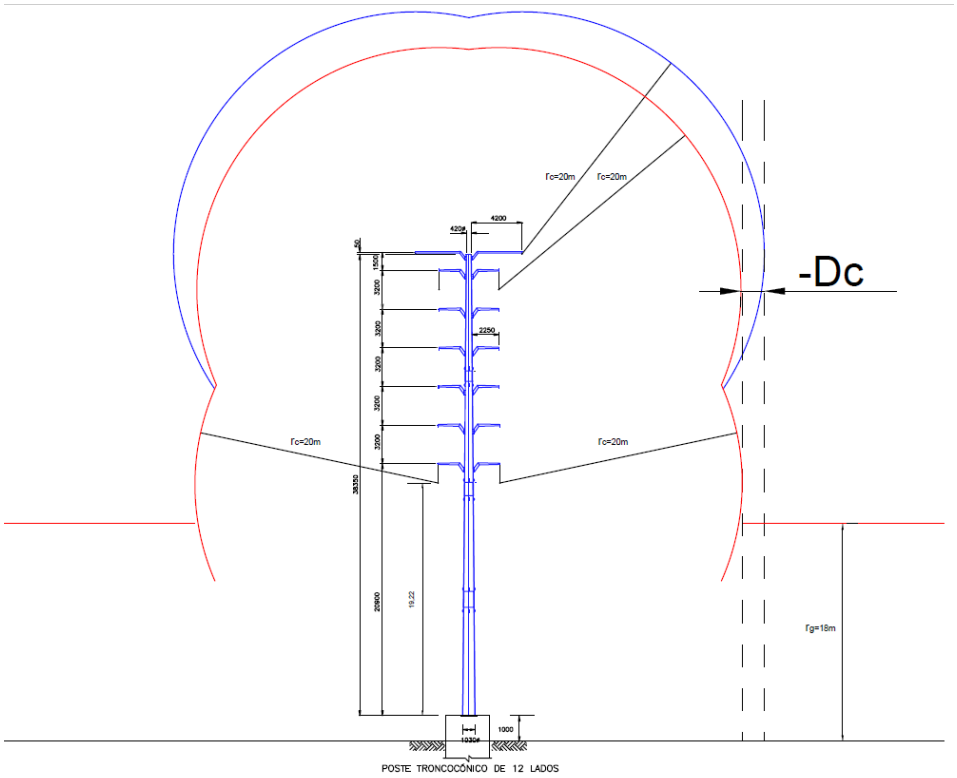


Figura 18 Método electrogeométrico aplicado a la línea de transmisión sobre poste troco-cónico

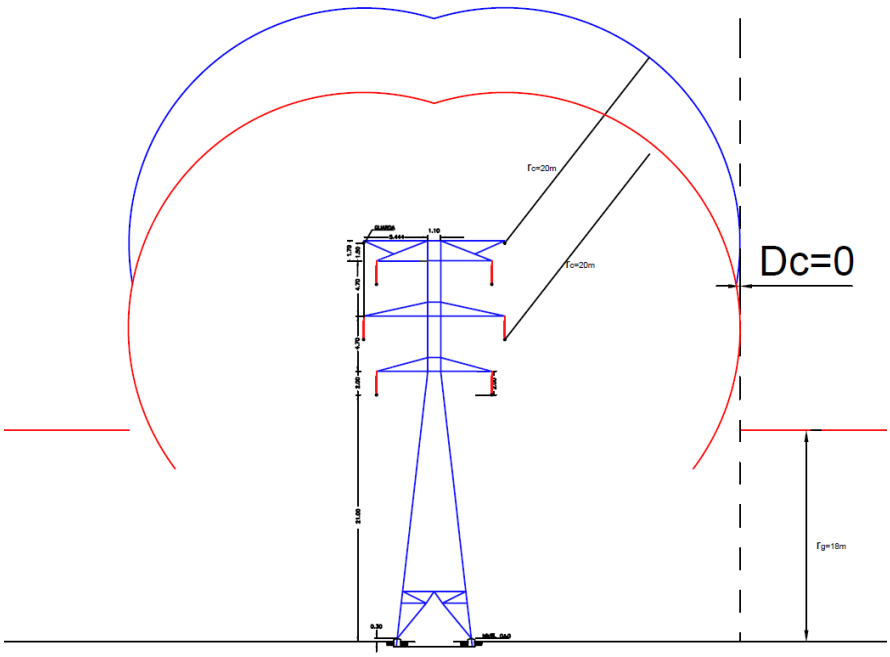


Figura 19 Método electrogeométrico aplicado a la línea de transmisión sobre Torre autosoportada

Como puede observarse, el apantallamiento de la línea es efectivo ya que el valor de Dc es menor o igual a cero (0) lo cual físicamente indica que no existe zona de desprotección y en consecuencia su aportación al SFFOR es cero (0) ya que la integral que está involucrada en el cálculo se acota a valores de Dc mayores a cero (>0).

La red analizada contempla un tramo de 4 circuitos y otro tramo de solo 2 circuitos. En el punto de transición de la línea, en el que pasa de 4 a 2 circuitos, también cambia la estructura de poste troncocónico a torres autosoportadas, por tanto, el análisis del SFFOR debería hacerse para cada tramo por separado, considerando que el resultado final de este indicador será la suma ponderada del resultado del cálculo hecho para cada tramo.

Figura 20 Estructuras de soporte de la línea de transmisión

El SFFOR para la línea, de acuerdo el tipo de estructura y montaje del cable de guarda, es cero (0), sin embargo, existe una zona de la red en la cual no existe cable de guarda con lo cual la probabilidad de impacto en alguna de las fases superiores es mayor y en consecuencia el análisis ya no se centra en el SFFOR sino en los flameos inversos que puedan llegar a causar los impactos directos sobre las fases, es decir el Back-Flashover Rate - tasa de fallas por flameo inverso (BFR)

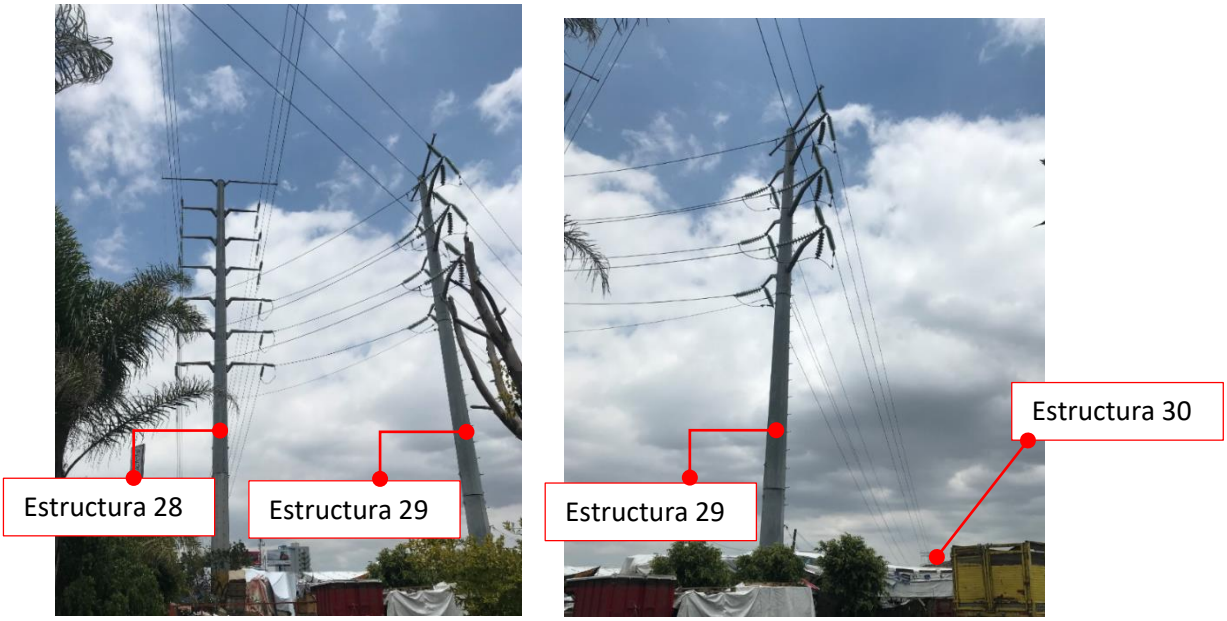


Figura 21 Vano sin cable de guarda

La siguiente tabla muestra el CFO para parte de la estructura que soporta los conductores de fase.

Tabla 6 Valores típicos de CFO para cada parte de la estructura[8]

CFO[1,2] of Primary Insulation			Added CFO of second component		Added CFO of third component
Description	**Type[3]**	***CFO*$_{ins}$ (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	105 120 140	Wood pole	235	
			Wood crossarm	250	
			Fiberglass pole	400	
			Fiberglass crossarm	250	
			Fiberglass standoff	315	
Vertical Ceramic Insulator String	1x102mm 2x102mm 3x102 mm (4")	75 165 250	Wood pole	90	
			Wood crossarm	160	
			Fiberglass crossarm	250	
			Fiberglass standoff	315	
Horizontal Ceramic Insulator String	1x102mm 2x102mm 3x102 mm (4")	75 165 250	Wood pole	90	
			Wood crossarm	295	
			Fiberglass crossarm	250	
			Fiberglass standoff	315	
Description	**Type**	***CFO*$_{ins}$ (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.

[8] Critical Flashover Voltage of Primary and CFO-Added Components, Tabla 2 del IEEE 1410.

El análisis para el poste troncocónico arroja los siguientes valores de CFO

Tabla 7 Resultado del CFO para cada parte de la estructura que soporta los conductores de fase

Poste troncocónico			
Origen	**Destino**	**Trayectoria de flameo**	**CFO Total**
Línea inferior	Línea inmediatamente superior	Aire (3,19 m)	1914 kV
Línea inferior circuito 1	Línea inferior circuito 2	Aire (5,1 m)	3060 kV
Línea superior	Cable de guarda	Aire (3,53 m).	2118 kV
Línea ABC	Brazo del poste	Cadena de 10 aisladores (1,46 m)	**876 kV**

Para cualquier ángulo de fase dado, se puede calcular la tensión instantánea a frecuencia industrial en cada fase y luego se pueden superponer las sobretensiones causadas por la descarga. Teniendo en cuenta todos los valores de tensión de frecuencia industrial, la tensión promedio agregado durante el tercio más alto de la onda de CA es el 83% de la tensión pico del sistema de línea a tierra para sistemas trifásicos y el 100% de la tensión de línea a tierra para sistemas de cd. Los cálculos multicircuitos son más complicados.

CAPÍTULO 4

MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO DE LAS LÍNEAS

El mejoramiento del desempeño de las líneas ante descargas eléctricas atmosféricas se puede alcanzar aplicando las siguientes acciones:

Ubicación del Cable de Guarda

El cable de guarda en una línea generalmente se utiliza como punto de impacto cuando se presenta un rayo directo a la red, de tal forma que la corriente sea conducida hacia los sistemas de puesta a tierra, evitando que los rayos incidan directamente a las fases. En el caso de estudio no es necesario reubicar el cable de guarda, sin embargo, si es necesario instalar cable de guarda en el tramo desprotegido de la transición de postes trococónicos a torres autosoportadas.

Puesta A Tierra Del Cable De Guarda

El cable de guarda, por un lado, permite tener un camino a tierra seguro del rayo ante un impacto directo, y por el otro, permite reducir la magnitud de las tensiones inducidas en la línea por impactos indirectos. Se debe tener en cuenta que el valor de puesta a tierra del cable de guarda influye en la capacidad de este para reducir la posibilidad de falla del sistema por flameo inverso.

Aumento Del Aislamiento

Para aumentar el aislamiento en las líneas de transmisión, se puede utilizar diferentes técnicas

- Cambiar aisladores.
- Combinar aislamientos.
- Aumentar el número de platos.

Selección De Dispositivos De Protección Contra Sobretensiones Transitorias DST´S

En esta sección se describe la metodología para la selección de los descargadores de sobretensión DST, para el nivel de tensión de 115 kV. La selección inicial de los DST´s en este nivel de tensión se lleva a cabo de acuerdo con los lineamientos descritos en [15], teniendo en cuenta que el tipo de descargadores a ser instalados en los diferentes puntos del sistema corresponden a los denominados Descargadores de sobretensión de óxido metálico sin espaciadores (Gappless Metal-Oxide Surge Arresters).

Tensión de Trabajo Continuo (Uc)

Es la tensión eficaz máxima admisible a frecuencia industrial que se puede aplicar de forma continua entre los terminales del descargador. Para este caso se asume que el sistema cuenta con despeje automático de fallas a tierra; por lo tanto, la tensión continua de operación seleccionada debe ser mayor o igual a la máxima tensión de operación del sistema tomando su valor fase-tierra.

$$U_c \geq 1.05 \frac{U_s}{\sqrt{3}} = 1.05 \times \frac{115}{\sqrt{3}} = 74{,}6\ [kV]$$

Tensión Asignada (Ur)

La tensión asignada se refiere al valor eficaz de la tensión máxima admisible a frecuencia industrial en los terminales del DST, el cual debe estar diseñado para operar correctamente bajo condiciones de sobretensiones temporales tal y como se establecen en las pruebas de operación respectivas [16]. La tensión asignada se selecciona con base en las sobretensiones temporales que ocurren en la ubicación del DST considerando sus amplitudes y duración. Las principales causas están relacionadas con fallas a tierra y desconexiones de carga.

El tiempo de duración de las sobretensiones temporales puede variar desde 0.02 hasta 3.600 segundos dependiendo de las condiciones del sistema. En este caso se asume una duración de 1 segundo, debido a que el sistema es de extensión moderada, tiene un sistema de puesta a tierra efectiva y el nivel de tensión de la línea es mayor a 100 kV.

La tensión asignada debe ser mayor o igual al valor equivalente de la tensión para una duración de 1 segundo. Debido a que la tensión asignada es un valor de prueba

a tensión asignada que dura 10 segundos, es necesario corregir el valor máximo de la tensión temporal asumida inicialmente con la siguiente expresión:

$$U_{equ} = U_t \left(\frac{T_t}{10}\right)^m$$

Donde U_t es la amplitud máxima de las sobretensiones temporales, T_t es la duración de las sobretensiones, U_{eq} es el valor de la amplitud equivalente para la prueba a tensión asignada con duración de 10 s y *m* es un exponente que varía según el diseño del descargador y va desde 0.022 y 0.018. En este caso, la duración máxima asumida de las sobretensiones temporales es de 1 s y m = 0.02.

$$Máx\{U_t\}\begin{cases} Sobretensión\ por\ falla\ a\ tierra \rightarrow U_t = k\dfrac{U_s}{\sqrt{3}} = 1.4\dfrac{115}{\sqrt{3}} = 92.9\ [kV] \\ Sobretensión\ por\ pérdida\ de\ carga \rightarrow U_t = k\dfrac{U_s}{\sqrt{3}} = 1.2\dfrac{115}{\sqrt{3}} = 79.7\ [kV] \end{cases}$$

$$U_{equ} = 92.9 \times \left(\frac{1}{10}\right)^{0.02} = 88.7\ [kV]$$

La tensión asignada debe ser igual o superior al valor normalizado de la Tabla 2 de [17]. Es posible también aplicar un factor de seguridad de entre el 5% en este punto para tener en cuenta posibles inexactitudes en la determinación de las sobretensiones.

$$U_r \geq 1.05 U_{equ} \rightarrow U_r \geq 93.2\ [kV] \qquad \text{Valor normalizado} \rightarrow 100\ [kV]$$

Con esta suposición, el valor final obtenido para la tensión asignada U_r es de 93.2 kV. De acuerdo con la Tabla 2 de [17] el valor normalizado para la tensión asignada es de 100 kV.

Selección De La Corriente Nominal De Descarga (In).

La mediana de la corriente de descargas atmosféricas en la zona donde se encuentra ubicado la zona es de 6,2 kA se deberían escoger descargadores con corrientes nominales de descarga de 15 kA o en su defecto de 10 kA.

Niveles de Protección

Los niveles de protección varían con el fabricante. El nivel de protección tipo maniobra U_{ps} se puede tomar como 2 veces el valor de U_r. El nivel de protección para impulsos tipo rayo es el valor de la tensión residual del DPS para la corriente nominal de descarga I_n, de onda 8/20 μs [18].

$$U_{ps} = 2 * 100 = 200\ [kV] \qquad U_{pl} = 261\ [kV]$$

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Basado en los resultados del análisis de los datos obtenidos de los sensores de campo magnéticos y el caso de estudio, se puede concluir lo siguiente:

- El nivel ceraunico de la zona analizada es de **105** (días/tormenta al año)
- La DDT calculada es en promedio de 5,8 rayos/ km^2-año, lo cual es casi el doble del valor reportado por la NMX-J-549-ANCE-2005.
- La corriente pico promedio registrada es de 7,75 kA.
- La corriente máxima registrada fue de 100,8 kA.
- El 99% de los rayos registrados tienen una corriente pico mayor a 3,1 A y menor a 28,6 kA mientras que la corriente con probabilidad del 50% de ocurrencia es de 6,2 kA.
- El tramo de línea estudiada es afectado por 9,6 descargas por km de línea al año.
- En dos años, 256 rayos cayeron cerca de la línea, pudiendo causar afectaciones directas.
- El valor calculado de impactos sobre la línea de acuerdo con la metodología del IEEE 1243 (Ns) es de 148.9 rayos por cada 100 km/año, este dato contrasta con el dato medido de 9.6 rayos por km/año medidos por la red de detección, lo cual es 6.44 veces más, esto significa que las medidas de protección pueden estar siendo subdimensionadas.
- Las estructuras más susceptibles de falla por causa de rayos son los Postes 7 a 15 y Torres 20 a 23.
- Para determinar las medidas de protección requeridas en la línea, estos resultados deben incorporarse en los cálculos de los indicadores de falla y deben ser tomados en cuenta en los estudios de coordinación de aislamiento, en el caso particular de la línea en estudio en donde un tramo de la línea se transportan hasta cuatro circuitos (multicircuito), el mejoramiento del blindaje y mejor análisis de las fallas por descargas atmosféricas evitará la afectación a un número importante de clientes al evitar una salida múltiple.
- El análisis de impactos de rayo cercanos a la línea puede también extenderse a líneas de tiempo con precisión de nanosegundos y graficarse en un histograma que coincida con el registro regular de fallas de la línea, con lo cual la detección de fallas en las líneas de transmisión puede ser mucho más asertivo, lo cual es mayormente útil en líneas de gran longitud o de difícil acceso.
- El monitoreo de la actividad de rayos puede ser usada como una herramienta poderosa que permita adquirir valiosa información del fenómeno y al mismo

tiempo tomar decisiones desde el punto de vista técnico y logístico, con un impacto significativo en el desempeño de las líneas de transmisión.

- La DDT obtenida con los datos de las antenas de campo magnético VLF / LF muestran un aumento con respecto a los valores reportados en el mapa de isodensidades de la NMX-J-549-ANCE-2005, y este aumento es consistente con los resultados mostrados por otros estudios en países de zona tropical, como es el caso de Colombia, lo cual permite intuir que la extrapolación de este aumento de la DDT, al resto del territorio mexicano muestre resultados similares.
- El análisis realizado en este trabajo de tesis demuestra que los datos de actividad de descargas atmosféricas en territorio mexicano de largo plazo requieren una revisión y actualización además de la inclusión de más parámetros de rayos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

[1] A. R. Hileman, *Insulation Coordination for Power Systems*. 1999.
[2] IEEE Power and Energy Society, *IEEE 1410-2010: Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines*, vol. IEEE Std 1, no. July. 2004.
[3] IEEE Power and Energy Society, *IEEE 1243-1997: Guide for Improving the lightning performance of Transmission Lines*. 1997.
[4] V. Rakov and M. Uman, *LIGHTNING Physics and Effects*. New York: Cambridge University Press, 2003.
[5] H. Torres, *El rayo: Mitos, leyendas, ciencia y tecnología*, 2da Ed. Bogotá D.C., 2002.
[6] H. Höller *et al.*, "Lightning characteristics observed by a VLF/LF lightning detection network (LINET) in Brazil, Australia, Africa and Germany," *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, vol. 9, no. 20, pp. 6061–6146, 2009.
[7] H. Hoeller, H. Betz, K. Schmidt, R. V Calheiros, P. May, and E. Houngninou, "LINET Lightning Characteristics Observed on 4 Different Continents," *Assembly*, vol. 11, no. Ic. p. 13610, 2009.
[8] K. Lagouvardos, V. Kotroni, H. D. Betz, and K. Schmidt, "A comparison of lightning data provided by ZEUS and LINET networks over Western Europe," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, no. October 2008, pp. 1713–1717, 2009.
[9] H. D. Betz, K. Schmidt, B. Fuchs, W. P. Oettinger, and H. Höller, "Cloud lightning: detection and utilization for total lightning measured in the VLF/LF regime," *J. Light. Res.*, vol. 2, pp. 1–17, 2007.
[10] H.-D. Betz, K. Schmidt, P. Oettinger, and M. Wirz, "Lightning detection with 3-D discrimination of intracloud and cloud-to-ground discharges," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 31, no. 11, 2004.
[12] D. R. MacGorman and D. Rust, *The electrical nature of storms*. New York: Oxford University Press, 1998.
[13] A. De Conti, E. Perez, E. Soto, F. H. Silveira, S. Visacro, and H. Torres, "Calculation of lightning-induced voltages on overhead distribution lines including insulation breakdown," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 4, pp. 3078–3084, 2010.
[14] J. C. Gómez and M. M. Morcos, "Voltage Sag and Recovery Time in Repetitive Events," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 22, no. 7, p. 62, 2002.
[15] International Electrotechnical Commission, *IEC 60099 Surge Arrester - Part 5: Selection and application recommendations*. 2013, pp. 1–316.
[16] International Electrotechnical Commission - IEC, "IEC 60099: Surge arresters Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems," vol. 50. pp. 1–354, 1992.
[17] International Electrotechnical Commission, *IEC 60071 Insulation coordination - Part 1: Definitions, principales and rules*. 2006, pp. 1–69.

[18] Power Transmission and Distribution - SIEMENS, “Descargador de sobretensión para media tensión 3EK7 con aislamiento de goma siliconada.” Alemania, pp. 1–12.
[19] Torres, H. “Espacio y Tiempo en los Parámetros del Rayo”. Ensayo sobre una Hipótesis de Investigación. Trabajo de promoción a la categoría de Profesor Titular. Bogotá, Colombia. 1998.
[20] Camilo Younes velosa, “Evaluación de parámetros del rayo con mediciones terrestres y satelitales para Colombia”, Trabajo presentado como requisito parcial para obtener el título de Magíster en Ingeniería Eléctrica con Énfasis en Alta Tensión.
[21] Chisholm, W. A., and Janischewskyj, W., ÒFinal Report for Contract 179 T 382, Lightning ground fash density Measurements in Canada,Ó Canadian Electrical Association, Aug. 1992.
[22] Orville, R. E., and Songster, H., ÒThe East Coast Lightning Detection Network, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 2, pp. 899Ð907, July 1987.
[23] Orville, R. E., ÒLightning ground ßash density in the Contiguous United States-1989, *Monthly Weather Review*, vol. 119, no. 2, pp. 573Ð577, Feb. 1991.
[24] MacGorman, D. R., Maier, M. W., and Rust, W. D., ÒLightning Strike Density for the Contiguous United States from Thunderstorm Duration Records,Ó *Report to U.S. Nuclear Regulatory Commission*, NUREG/CR-3759, 1984.
[25] Eriksson, A. J., ÒThe Incidence of Lightning Strikes to Power Lines,Ó *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 2, pp. 859Ð870, July 1987.

TRABAJOS A FUTURO.

Los datos de distribución estadística de corriente pico presentados en este documento son válidos únicamente para la zona analizada (400 km^2 en torno al eje de la línea) y no deben ser generalizados, Para otras regiones del país, es necesario construir esta misma curva de corriente en zonas donde se tengan eficiencias de detección similares, por tanto se invita a continuar con estos estudios encaminándose a desarrollar mapas de densidad de descargas a tierra para todo el país, evaluar el riesgo por rayos en el sistema eléctrico nacional con los parámetros resultantes y también evaluar el desempeño de las redes de transmisión de otras zonas así como desarrollar modelos económicos de inversión optimizada en LT basados en los resultados de tales análisis.

En el primer capítulo se presentan parámetros del rayo como la polaridad, entre otros, que si bien no son considerados como relevantes para el análisis de la confiabilidad de las líneas de transmisión objeto del presente documento, no puede descartarse una relación entre el parámetro y la confiabilidad y en cualquier caso, trabajos siguientes podrían abordar este tópico con mayor detalle y establecer eventualmente no solo una relación entre el parámetro y la confiabilidad de las líneas de transmisión, sino también en términos generales una caracterización amplia del parámetro para otros fines, y posiblemente los resultados puedan ser contrastados con la hipótesis planteada por estudios previos de la variación espacio-temporal de los parámetros del rayo.

Hay suficiente evidencia de una relación entre el NC y la DDT, sin embargo no existen estudios concluyentes sobre la ecuación que aplica para el caso mexicano, se sugiere realizar este análisis de forma multianual para todo el territorio mexicano.