

# BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería  
Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

**“Análisis de confiabilidad en estructuras multi circuitos de la DVMN con coordinación de Aislamiento Asimétrica, ante descargas atmosféricas”**

## **TESIS**

Que para obtener el grado de  
**MAESTRO EN INGENIERIA  
CON OPCIÓN TERMINAL EN  
SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA**

Presenta:

**Eduardo Delgado Trujillo**

Asesor(es) de tesis:

Director:

**Dr. Carlos Ramírez Pacheco**

Co-director:

**Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez**

Ciudad de México, CDMX. Mayo de 2023

# Índice

Dedicatoria.....	3
Agradecimientos .....	3
Índice de Figuras.....	4
Índice de Tablas .....	4
Resúmen.....	5
1 Capítulo I.....	6
1.1 Planteamiento del problema .....	6
1.2 Justificación.....	7
1.3 Objetivos de la investigación.....	7
1.3.1 Objetivo General .....	7
1.3.2 Objetivos Particulares.....	7
1.4 Hipótesis.....	8
1.4.1 Variables.....	8
2 Capítulo 2 Marco Teórico .....	9
2.1 Marco Histórico.....	9
2.2 Fundamentos Teóricos .....	11
2.2.1 Niveles de Aislamiento .....	13
2.3 Metodología .....	19
2.3.1 Protección Contra Descargas en el diseño de la línea .....	20
3 CAPÍTULO 3. Caso de Estudio.....	25
3.1 Características de las líneas para su análisis.....	25
3.2 Parámetros de la línea.....	25
3.3 Actividad de Descargas Atmosféricas en la Zona de Estudio .....	30
3.3.1 Actividad de Descargas Entorno a las líneas.....	30
3.4 Causas de Salidas de 85 kV.....	32
4 CAPÍTULO 4. Simulación del Caso de Estudio .....	33
4.1 Modelado de las fuentes de voltaje y corriente. ....	33
4.2 Modelado de la Torre multi circuitos. ....	34
4.3 Golpe de rayo y cadena de aisladores.....	35
4.4 Puesta a tierra .....	35
4.5 Simulación y Resultados. ....	36
4.5.1 Caso 1. Golpe en Hilos de Guarda con resistencia de puesta a tierra de 5 Ohms .....	37
4.5.2 Caso 4. Golpe directo en conductores de la Fase C del Circuito inferior de 85 kV.....	39
4.5.3 Caso 5. Golpe en Hilos de guarda con resistencia de puesta a tierra de 20 Ohms y 8 kA.....	41
4.5.4 Caso 6. Golpe en Hilos de guarda con resistencia de puesta a tierra de 100 Ohms y 8 kA.....	41
4.5.5 Caso 7. Golpe en Hilos de guarda con resistencia de puesta a tierra de 350 Ohms y 8 kA.....	42
4.5.6 Resumen de Resultados. ....	42
4.5.7 Coordinación de Aislamiento para estructura multi circuitos 230 y 85 kV. ....	43
4.5.8 Elección del aislamiento por las condiciones de contaminación. ....	46
5 Conclusiones y Recomendaciones.....	47
6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS. ....	49

## **Dedicatoria**

*Este trabajo es dedicado a mis padres y hermano, en especial a ti madre por todo tú amor y apoyo incondicional, sé que me cuidas desde el cielo, a ti padre por todas tus enseñanzas, consejos y comprensión, a ti hermano que siempre caminas junto a mí, a mis amigos y compañeros que siempre han creído en cada uno los proyectos que emprendo.*

## **Agradecimientos**

*A mis docentes y en especial a mi tutor por su ayuda, paciencia y dedicación.*

*Agradecerles también a mis compañeros de trabajo durante este proceso.*

## Índice de Figuras

Figura 1.	Torre asimétrica multi circuito.....	6
Figura 2.	Densidad de Rayos en México aplicación VAISALA.....	10
Figura 3.	Tipos de rayos predominantes.....	12
Figura 4.	Humedad Absoluta para Kh.....	16
Figura 5.	Factor de corrección por humedad (Kh).....	16
Figura 6.	Valor de Kr para la configuración de la estructura en análisis.....	17
Figura 7.	Curva característica de aisladores contaminados.....	18
Figura 8.	Arreglo de los conductores de guarda y fase, ángulo de blindaje.....	21
Figura 9.	Caída de rayo en el hilo de guarda y su trayecto a través de la estructura a tierra. ....	22
Figura 10.	Gráfica Voltaje Tiempo para formas de onda de rayo estándar.....	23
Figura 11.	Diagrama de bloques para cadena de aisladores (Model ATP).....	23
Figura 12.	Configuración geométrica de la estructura multi circuitos.....	27
Figura 13.	Puesta a tierra de las torres de transmisión.....	30
Figura 14.	Mapa de la actividad atmosférica por km <sup>2</sup> en la República Mexicana (DRT).....	30
Figura 15.	DRT en el estado de México.....	31
Figura 16.	Índice de salidas de línea por efecto atmosférico para 3 diferentes DRT.....	31
Figura 17.	Forma de onda Heidler (ATP).....	34
Figura 18.	Modelo de varios pisos de una torre de transmisión.....	35
Figura 19.	Figura Resistencia de pie de Torre.....	36
Figura 20.	Esquema de las líneas en ATP con fuente de corriente de 80 kA.....	36
Figura 21.	Transitorios de voltaje y corriente al golpear un rayo sobre los hilos de guarda.....	37
Figura 22.	Características de los aisladores de suspensión hechos de vidrio.....	44
Figura 23.	Tabla comparativa entre aisladores 25SVC111C y 28SVC111CC.....	46

## Índice de Tablas

Tabla 1.	Valores de sobre tensiones del sistema o respecto a un equipo.....	14
Tabla 2.	Niveles de aislamientos normalizados.....	14
Tabla 3.	Probabilidad de incidencia de las ondas de rayo.....	14
Tabla 4.	Factores de corrección por presión barométrica para diferentes altitudes.....	15
Tabla 5.	Distancia de Fuga para Distintos niveles de contaminación.....	18
Tabla 6.	Tipos de transitorios en un sistema de potencia y su duración.....	24
Tabla 7.	Características de las estructuras de las líneas de transmisión en campo.....	29
Tabla 8.	Índice de salidas por efecto de las descargas atmosféricas para DRT de 8.....	31
Tabla 9.	Salida de las Líneas CRG-73N50-ISC y VDM-73N80-ISC, año 2011 – 2022.....	32
Tabla 10.	Modelo de ATP elementos para simulación de cadena de aisladores.....	35
Tabla 11.	Voltajes de referencia para análisis de flameo en las cadenas de aisladores.....	36
Tabla 12.	Resultados de la simulación por golpe en hilos de guarda.....	39
Tabla 13.	NBAI y distancia mínima en aire.....	44

## **Resumen**

Las interrupciones de energía eléctrica pueden llegar a afectar a miles de usuarios. El objetivo general de este trabajo fue evaluar la confiabilidad de la coordinación de aislamiento ante la caída de rayos en las líneas de 85 kV con estructuras de tipo asimétricas, tomando como ejemplo el caso las líneas CRG-73N50-ISC y VDM-73N80-ISC.

Se evaluó la confiabilidad de la coordinación de aislamiento tomando como referencia principal la característica de contar con estructuras re condicionadas de tipo asimétricas, así mismo se determinaron los efectos ocasionados por las descargas atmosféricas al golpear los hilos de guarda y los conductores de fase con esta configuración geométrica de las torres, tomando las mediciones realizadas en campo de resistencia de puesta a tierra y resistividad del terreno.

La condición de asimetría provoca que los sistemas de 85 kV se encuentren en desventaja, el análisis se realizó mediante el uso del modelo multi pisos para torres de transmisión que permitió revisar esta característica y poder obtener los parámetros de línea que utilizaría el software ATP de análisis de transitorios.

**Palabras Claves. Asimetría, Transitorio Electromagnético, Descarga Atmosférica, NBAI, Distancia de fuga, ATP.**

# 1 Capítulo I

## 1.1 Planteamiento del problema

Con la extinción de la compañía de Luz y Fuerza del Centro (L y FC) en el año 2010, líneas de subtransmisión, circuitos de distribución, subestaciones, centros operativos y demás instalaciones que tenían a su cargo pasaron a ser operadas y administradas por Comisión Federal de Electricidad (CFE) encontrándose con la problemática de que en algunos casos se hallaron líneas con estructuras asimétricas estructuralmente.

En el caso particular de la configuración física de las torres auto soportadas (TAS) de las líneas trifásicas de 85 kV “CRG-73N40-JMX, JMX-73R60-VDF, CRG-73N50-ISC, VDM-73N80-ISC,” y 230 kV “VAE-93N30-CRG” es asimétrica respecto al centro de la estructura. Por asimetría nos referimos a tener distancias dieléctricas mayores de un lado respecto al otro, esto debido a una modificación en el diseño original que paso de ser una estructura doble circuito en un nivel de 230 kV a una estructura multi circuitos, manejando del lado derecho 1 circuito de 230 kV y del lado izquierdo 2 circuitos de 85 kV Figura 1. Ésta cambio estructural impacta directamente en los parámetros de las distancias dieléctricas de la coordinación de aislamiento, si tomamos en cuenta que una de las características físicas de la energía eléctrica es que el flujo de electrones viaja a través de materiales conductores como lo son los metales y en los malos conductores que poseen una mayor resistencia su paso es débil o nulo, el lado correspondiente a los circuitos de 85 kV al tener un nivel básico de aislamiento más bajo comparada con la línea de 230 kV sería la propensa a sufrir alguna falla en caso de presentarse una contingencia como es el caso de las descargas atmosféricas que originan transitorios electromagnéticos. Además del factor como la asimetría estructural, otros como la contaminación y la altura, influyen de manera negativa en los aislamientos de las líneas de transmisión eléctrica al presentarse altos gradientes de voltaje<sup>1</sup>.



Figura 1. Torre Multi circuito. Dos conductores de hilo de guarda, modificada para pasar de 2 circuitos de 230 kV a 3 circuitos: 1 de 230 kV doble conductor del lado izquierdo, 2 circuitos de 85 kV lado derecho un conductor, contiene cadenas de aisladores en V.

<sup>1</sup> Gradiente de Potencial Eléctrico. El gradiente de potencial es un vector que representa la relación de cambio del potencial eléctrico con respecto a la distancia en cada eje de un sistema de coordenadas cartesiano.

## 1.2 Justificación

En un sistema de potencia el objetivo principal es garantizar el suministro de energía eléctrica con calidad, de manera continua y eficaz, la continuidad del servicio eléctrico es esencial, para ello las líneas deben de ser construidas de forma segura y de acuerdo a la normatividad vigente, se deben de visualizar las posibles causas de falla que puedan afectar la operación, y tratar de evitarlas mediante el cumplimiento de la normatividad de diseño, construcción, operación y mantenimiento, así como la utilización de dispositivos de protección, una de las causas que contribuyen mayormente a las salidas de línea o desconexiones son los rayos. Las descargas eléctricas atmosféricas, son eventos que tienen un impacto considerable para la sociedad, pueden causar incendios, daños en los sistemas de telefonía y las telecomunicaciones, pudiendo incluso causar la muerte en los seres humanos y animales, dando origen a fenómenos con una corta duración del orden microsegundos como lo son los transitorios electromagnéticos que pueden causar grandes daños. Los transitorios que se pueden afectar las líneas de transmisión se presentan de tres maneras: sobrevoltajes temporales, sobrevoltajes por maniobras y sobrevoltajes causados por descargas atmosféricas, siendo este último caso el fenómeno más dañino por las características de asimetría de las líneas en estudio. La realización de este proyecto permitirá conocer si las estructuras asimétricas de las líneas de 85 kV “VDM-73N80-ISC, CRG-73N50-ISC, CRG-73N40-JMX”, cumplen con la debida protección ante descargas atmosféricas, lo cual es debido conocer ya que los variantes cambios en el clima y que y la trayectoria de las líneas se encuentran a una altitud promedio sobre el nivel del mar de 2,300 m, sabiendo que la altitud influye directamente sobre la presión atmosférica y la temperatura, esto hace que la probabilidad de caída de rayos de forma directa o indirecta aumente y ocasione fallas, por lo tanto, perdidas monetarias para la compañía suministradora como para los usuarios finales. Actualmente se deben cumplir con parámetros eléctricos nacionales e internacionales y lograr la satisfacción de clientes internos y externos, para cumplir con esta meta los programas de mantenimiento y operación deben de reducir al mínimo las salidas por año de las líneas.

## 1.3 Objetivos de la investigación

### 1.3.1 Objetivo General

El objetivo de este caso de estudio es evaluar la confiabilidad de la coordinación de aislamiento ante la caída de rayos en las líneas de 85 kV con estructuras de tipo asimétricas, tomando como ejemplo el caso las líneas CRG-73N50-ISC y VDM-73N80-ISC.

### 1.3.2 Objetivos Particulares

Analizar los efectos ocasionados en los aislamientos por impactos de descargas atmosféricas en las estructuras asimétricas de Líneas de Sub-Transmisión de 85 kV, mediante el software ATP.

Evaluar el riesgo por posible impacto de rayos a través de la densidad de descargas a tierra, en la zona de influencia de las líneas de Sub-Transmisión.

Establecer las recomendaciones si se requiere, para reforzar la coordinación de aislamiento en líneas de alta tensión con una configuración asimétrica, teniendo como objetivo la reducción de salida de líneas por incidencia de descargas atmosféricas, contaminación de aislamientos, basados en el mantenimiento predictivo y preventivo como se marca en el procedimiento Líneas de Alta Tensión de Distribución de 69 a 138 kV (CFE SOM 3533).

## 1.4 Hipótesis

Con el antecedente de estudios de coordinación de aislamiento que se han realizado en otras líneas pertenecientes a la División de Distribución Valle de México las cuales eran operadas por la extinta LyFC hasta el año 2010 y que dio por resultado que no cumplen con el nivel de aislamiento necesario para las condiciones de tensión, altura y contaminación que existen en la zona metropolitana de la Ciudad y Estado de México de acuerdo con la normatividad vigente de Comisión Federal de Electricidad. Se realiza el siguiente caso de estudio que añade una agravante; la condición de asimetría en las estructuras TAS (Torre Auto Soportada) las cuales cuentan con 2 Niveles Básicos de Aislamiento al Impulso (NBAI) y se cree que ante una eventualidad como lo son las descargas atmosféricas podrían presentar un flameo en las líneas de 85 kV las cuales cuentan con NBAI menor ocasionando la salida de la línea o líneas. El presente estudio permitirá establecer el correcto nivel de aislamiento que se requiere de acuerdo con la normatividad vigente.

### 1.4.1 Variables

Para poder realizar los análisis correspondientes se requieren los datos en condiciones ideales, por lo que a continuación se muestran las Condiciones Atmosféricas de Referencia Normalizadas:

- Temperatura  $t_0 = 20^\circ\text{C}$
- Presión  $b_0 = 101.3 \text{ kPa}$  (1,013 mbar, 760 mm Hg)
- Humedad Absoluta  $h_0 = 11 \text{ g/m}$
- Altitud sobre el nivel del mar (msnm)

#### Parámetros de Incidencia.

- Densidad de Descargas a Tierra (Ground Flash Density GFD) DDT. Número de Rayos por kilómetro cuadrado al año.
- Nivel Cerámico (Keraunic Level TD) NC. Número de días tormentas 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). Positiva o negativa.
- Duración de la descarga eléctrica atmosférica (tiempo de frente y de cola).
- Ts. Tasa de salidas de línea.

#### Parámetros del Modelado.

- Niveles de tensión
- Nivel Básico de Aislamiento (NBAI)
- Calibre y resistencia de conductores de fase y guarda.
- Número de Conductores por fase.
- Número de circuitos.
- Resistencia de puesta a tierra de la estructura y resistividad aparente del terreno.
- Tensión Crítica de Flameo
  - Factor de Corrección por presión atmosférica [Kda]
  - Factor de Corrección por humedad [Kh]
  - Distancia de la configuración entre-hierro [Kr]
  - Factor de Corrección por humedad y por densidad de aire.

$$Kco = Kr \left( \frac{Kda}{Kh} \right) \quad (1)$$

## 2 Capítulo 2 Marco Teórico

### 2.1 Marco Histórico

En el mundo más de 2,000 tormentas se presentan en algún instante dado, produciendo aproximadamente 100 descargas por segundo, los rayos son los causantes de la mayoría de las salidas en líneas de transmisión de 230 y 500 kV en Colombia y en los países ubicados en la zona intertropical [1], entre el 69% y el 75% de las fallas en la región peninsular de México son causadas por rayos. De acuerdo con la base de datos del Centro Nacional de Novedades de CFE (CNN) nos muestra que, del año 2016 a la fecha, se han tenido un total de 290 salidas de líneas de transmisión a causa de descargas atmosféricas, son una de las principales causas de fallas en las líneas aéreas, Se cree que entre el 5% y el 10% de las fallas causadas por rayos resultan en daños permanentes al equipo del sistema de potencia, por lo que se hace de vital importancia poder minimizar los efectos ocasionados por la caída de rayos en líneas de transmisión y mantener su confiabilidad.

La medición y localización de la caída de rayos es una de las opciones que se tienen en la actualidad para poder ubicar las zonas con mayor Densidad de Descargas a Tierra y poder realizar los diseños adecuados de blindaje de líneas. 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 realiza un conteo de las variaciones que tiene un campo eléctrico en un rango que exceda los 5 Volts/metro. Para 1969 se actualizó su tecnología mediante el uso de transistores, y para el año 1972 en el comité del Consejo Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos (CIGRE)<sup>2</sup> se adoptaron los dos modelos estándar a nivel mundial. 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. En 1997 la Universidad Nacional en Colombia instaló una red de detección de rayos, detectaba los rayos nube-tierra y Cloud to Ground (CG) por sus siglas en inglés. Para 1997 y el 2001 se tenía en ese país la red conocida como RECMA, la cual estaba compuesta por 6 sensores del tipo LS7001 los cuales tienen receptores GPS que pueden proporcionar información de la posición horizontal y vertical de rayo. Durante los últimos años se ha desarrollado una nueva tecnología de observación y detección de rayos VLF/LF (muy baja frecuencia/baja frecuencia) en la que se llega a tener un error de exactitud del orden de 100 m. En México el Instituto de investigaciones eléctricas (IIE) en conjunto con la CFE, se dieron a la tarea de realizar los estudios correspondientes al número de descargas incidentes en el territorio nacional en los años de 1983 a 1993, la información recabada sirvió para elaborar un mapa con el promedio anual de densidad de rayos a tierra por km<sup>2</sup> al año [2], nos muestra que la parte norte de la Ciudad de México y el Noreste del Estado de México presentó un rango de 5 a 9 rayos por Km<sup>2</sup> al año, considerando que el mapa fue creado en el año de 1993 tiene una antigüedad de casi 30 años, por lo que a consecuencia de los cambios climáticos que se están presentando en todo el mundo, se requieren tener datos actuales para poder tener un mejor resultado en las aplicaciones que se utilice, en nuestro caso el blindaje de las líneas aéreas de Transmisión ante las caídas de descargas atmosféricas. En la figura 1.2 se muestra un mapa con el promedio por año de la caída de descargas atmosféricas por km<sup>2</sup> en México a mayo de 2022, las cuales van desde 1 caída en la zona de Baja California Norte, hasta 64 en la zona del golfo de México, en el centro del país nos muestra un promedio de 36 eventos

---

<sup>2</sup> Consejo 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.

al año, esta probabilidad de caída de rayos se comparará con lo mostrado en la norma NMX-J549 para obtener la información correspondiente al nivel iso cerámico descrito anteriormente.

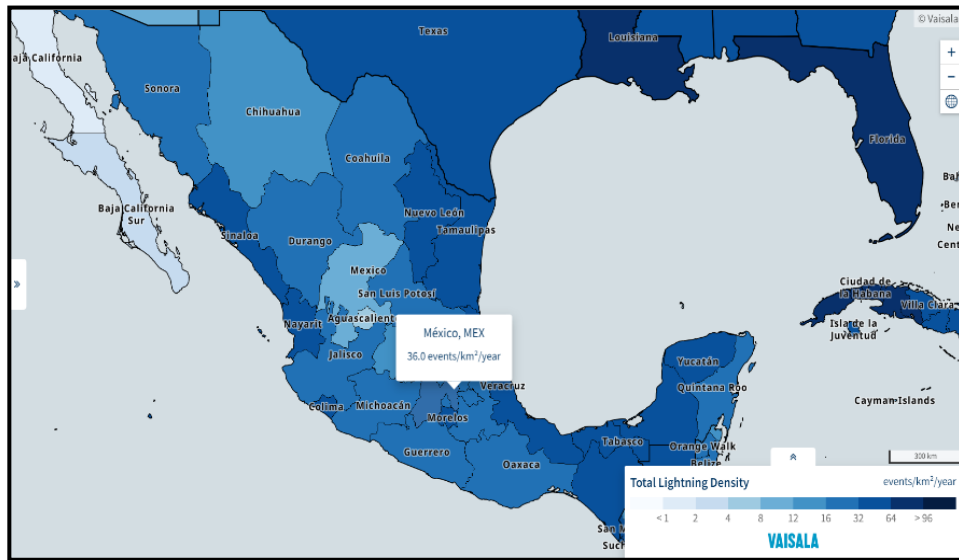


Figura 2. Densidad de Rayos en México, tomada el día 24/05/2022 de acuerdo con la aplicación VAISALA, teniendo un promedio para el Estado de México de 36 eventos por  $\text{km}^2$  al año.

Las líneas de transmisión se han hecho cada vez más largas con la creciente demanda de transportar energía eléctrica a los grandes centros de consumo desde los puntos de generación y teniendo en cuenta que es más complicado establecer los derechos de vía para las líneas, una de las formas con las que se ha solventado esa necesidad es el uso de estructuras multi circuito, las cuales son más altas y cuentan con un área más grande para ser golpeadas directamente por un rayo a lo largo de su trayectoria, el tipo de diseño en las estructuras multi circuito contempla poder llevar distintos niveles de tensión en varios circuitos por una estructura compartida, dando lugar a tener distintos niveles de aislamiento a la vez lo que se conoce como coordinación de aislamiento asimétrico. En estudios realizados a principios de la década de 1960, por parte de M. Kawai y H. Azuma, realizaron un diseño con un circuito en un nivel de aislamiento más alto y otro con un nivel de aislamiento más bajo. Cuando la línea de doble circuito fue alcanzada por un rayo, el circuito de aislamiento inferior se producía una descarga disruptiva primero y parte de la corriente del rayo fluiría hacia el suelo a través de este circuito, que sería un blindaje del aislamiento superior. Los sistemas de transmisión de energía eléctrica además de conductores y estructuras de soporte como lo son las torres o postes, cuentan con aislamientos que son parte fundamental y en los cuales se propician la mayor parte de fallas dado que se encuentran en constante estrés eléctrico, en condiciones normales de operación siempre existe una tensión eléctrica a la cual están sometidos, y por ende cuando existen cambios en el sistema por ejemplo en caso de fallas, ese estrés puede aumentar, por lo que es necesario tener acciones que ayuden a la prevención de fallas, aunado a esto existen diferentes factores como: excremento de aves, contaminación por polvo y por lluvia ácida que agravan los posibilidad de crear caminos arcos eléctricos. El flameo en aisladores contaminados se produce por la acción de tres factores: humedad, contaminación y tensión eléctrica. La lluvia ayuda a la limpieza de la atmósfera, remueve los gases, aerosoles, partículas compuestas naturales o producidas por las actividades humanas, sin embargo, la lluvia en algunos casos se vuelve ácida, ésta tiene su origen en los centros urbanos e industriales como los que se tienen en el centro del país, siendo los principales compuestos químicos: bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno. La lluvia ácida acelera el deterioro de materiales como lo son los de construcción y pinturas, las aguas con alto grado de acidez pueden llegar a

disolver materiales, los flameos por contaminación ocurren en condiciones de niebla o lluvia salina, aunque también por acumulación por humos o polvos en los aisladores que forman una capa contaminante sobre él, al humedecerse y después secarse forman bandas secas por las cuales pasa la descarga eléctrica hasta llegar a una descarga total por los aisladores.

La contaminación en aislamientos externos es una de las 5 principales causas de salidas de líneas en México, por lo que en estudios anteriores se realiza su análisis e impacto como complemento a la coordinación de aislamiento de acuerdo con el grado de contaminación de la zona en la que se encuentre. Las zonas urbanas del valle de México a lo largo del año muestran altos niveles de contaminación en el aire, suelo y subsuelo, la concentración de población e industria propician que los derechos de vía de las líneas ocupen estas áreas con índices de contaminación altos para llevar el suministro de energía en la red del Valle de México.

## 2.2 Fundamentos Teóricos

Los sistemas de transmisión eléctrica son de naturaleza no lineal y dinámica, se rigen por el comportamiento y las condiciones que prevalecen en el sistema eléctrico, por ejemplo; la generación varía en respuesta a la demanda de carga y la potencia de los sistemas están sujetas a perturbaciones atmosféricas como los rayos o a las condiciones del medio ambiente como viento, lluvia, calor o nieve que modifican la operación normal y en algunos casos pueden provocar fallas transitorias o permanentes, al presentarse estas anomalías los equipos de protección intervienen, los relevadores mandan una señal de apertura a los interruptores los cuales abren sus contactos liberando las fallas y los cierran permitiendo que se siga con la continuidad del servicio, ante una perturbación el sistema debe de regresar a un estado estable en una corta duración de tiempo tratando de afectar lo menos posible a los usuarios y a los equipos, uno de los elementos que se someten a diferentes condiciones de esfuerzo en sus materiales son los aislamientos, en estos materiales la energía eléctrica y electromecánica se redistribuye constantemente en ellos, ya sea por las condiciones propias del voltaje nominal al que siempre están expuestos o a los intercambios de energías que provoca el estado transitorio, en el cual la energía y la frecuencia en que se presenta puede cambiar de valores abruptamente [3]. Los transitorios electromagnéticos se presentan debido a los fenómenos internos ocurridos en los dispositivos, fallas o de origen atmosférico, es decir, se pueden tener tres tipos de origen; el atmosférico, el de la conmutación que sucede cuando se abren o cierran interruptores y los temporales debido a fallas en el sistema. En el estudio transitorio se ve involucrada la frecuencia en diferentes rangos, la frecuencia del sistema en México es de 60 Hz. Para rangos de frecuencia por arriba de la nominal del sistema se involucran fenómenos electromagnéticos llegando a tener valores desde los 10 kHz hasta los 3 MHz, existen otros tipos de transitorios de frente muy rápido (VFT) por su siglas en inglés que representan el rango más alto en los sistemas de potencia, “ Según IEC 60071-2, la forma de un transitorio muy rápido suele ser unidireccional con tiempo hasta el pico inferior de  $0.1\mu s$ , con una duración total menor a 3 ms y con una oscilación a una frecuencia de  $30\text{ kHz} < f > 100\text{ MHz}$ ” (J. C. Das. 2010, pág. 1).

En 1729 el inglés Stephen Gray descubrió que la electricidad puede ser transportada a grandes distancias, por medio de contacto, descubrió la conductividad de los materiales y estableció que había materiales conductores y no conductores. Este mismo principio es utilizado en la actualidad en las líneas de transmisión de energía eléctrica, los conductores al estar hechos de materiales con poca resistencia al paso de la corriente son los encargados de llevar esa carga eléctrica desde los centros de generación hasta los de consumo y los materiales no conductores con una alta resistencia al paso de la corriente en este caso los aislamientos evitan el paso de la corriente a través de ellos y se oponen en la trayectoria a tierra, esa condición de paso de la corriente por los aislamientos se puede suscitar al sobre pasar la capacidad de rigidez dieléctrica del material con que están hechos

propiciando el paso de la corriente por o a través de él. El rayo por ser un fenómeno electromagnético buscará un camino efectivo y de menor resistencia para drenarse a tierra. Benjamín Franklin en sus experimentos eléctricos entre los años 1740 y 1750 logró identificar el rayo como la electricidad estática de su tiempo. A pesar de estos experimentos, se aprendió poco hasta hace 35 años. Uno de los objetivos esenciales en tratar de conocer y comprender la naturaleza del rayo se ha debido a la necesidad de la industria eléctrica para protegerse contra sus efectos y sus posibles consecuencias, sin olvidar el objetivo más importante, la seguridad para el personal llevando la energía a tierra de una forma segura. Las descargas atmosféricas o rayos se presentan cuando se forman grandes concentraciones de carga eléctrica en las capas de la atmósfera inferiores a la estratosfera (alturas entre 5 y 12 Km) se forman en nubes de tormenta del tipo “**cumulonimbus**”. Estas se caracterizan por estar formadas por columnas de aire caliente que ascienden por convección (donde corrientes de aire caliente y húmedo asciende a partes más frías de la nube), cuando la atmósfera se hace inestable, debido a grandes gradientes de temperatura. El interior de esas nubes es recorrido por rápidas corrientes de aire ascendentes y descendentes de velocidades, al aumentar la carga se forman potenciales de hasta 300 MV entre nubes y tierra. La mitad de estos rayos ocurren en el interior de la nube, y la otra mitad entre nube y tierra.

Teniendo las condiciones ambientales necesarias dentro de las nubes, la carga eléctrica se forma al separar estas fuertes corrientes de aire, las partículas de agua y hielo se convierten en partículas ionizadas, cargadas positiva o negativamente. La carga se concentra en un diámetro de 10 Km. y con una altura aproximada de 5 km. Esta carga es en la mayoría de los casos predominantemente negativa. A medida que se empieza a incrementar la carga y el voltaje en las cercanías de las nubes cargadas, se empieza a rebasar el gradiente crítico, (30 kV en aire seco, 10 kV en las condiciones de presión y presencia de gotas de agua existentes en las nubes). Se empieza a presentar ionización del aire y, por lo tanto, se van formando caminos para la conducción de la carga hacia el punto de potencial cero que es la tierra. Cuando las condiciones anteriores se cumplen se inicia la descarga a tierra causada por la gran diferencia de potencial que se manifiesta entre la nube y tierra, se presenta como una falla eléctrica en la nube llamada falla primaria. Esto crea una columna de carga llamada “líder escalonado” que viaja desde la nube al suelo de una manera escalonada. En su camino al suelo, puede dar lugar a varias ramas. Periódicamente, la ramificación se aleja demasiado de la carga en la nube, y el campo eléctrico en la punta es demasiado débil para propagarlo más hacia el suelo, este ligero retraso de tiempo permite transferir más carga desde la nube a la punta de la ramificación, y se mueve más hacia el suelo, de ahí el nombre líder escalonado. La propagación de cada paso es aleatoria, así como la densidad de carga en la punta de la ramificación depende de las condiciones locales. Por lo tanto, la mayoría de los líderes escalonados siguen un camino bastante aleatorio al suelo. La Figura 3 muestra los principales tipos de descarga que se presentan entre la parte positiva y negativa de la nube, así como su camino a tierra [4].

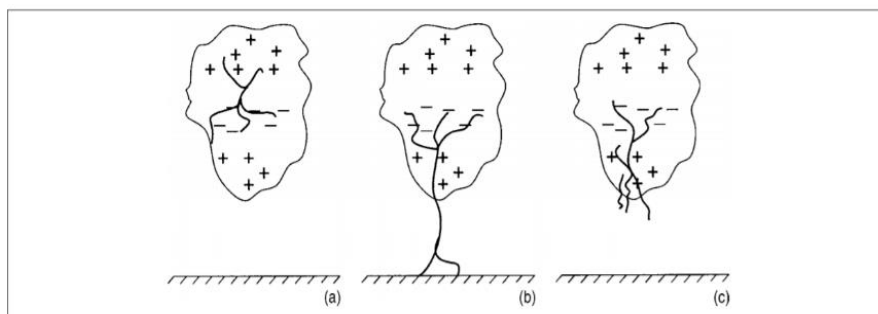


Figura 3. Tipos de rayos predominantemente: (a) Entre nubes; (b) De nube a tierra; (c) En el aire, no toca tierra.

En los diferentes tipos de descarga se presenta un incremento del campo eléctrico. Las descargas de nube a tierra presentan un líder escalonado cuya trayectoria es aleatoria hacia el suelo, esta condición origina que se formen líderes secundarios los cuales no necesariamente llegan hasta a tierra, sin embargo, al acercarse uno de los líderes a tierra el campo eléctrico que se genera aumenta, haciendo que objetos elevados como estructuras, edificios, líneas eléctricas o árboles sean más vulnerables. 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<sup>2</sup> 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. Si consideramos que pueden llegar a caer 36 rayos por cada kilómetro cuadrado durante un año en el centro del país según el sistema VAISALA, la probabilidad que alcance alguna estructura o edificio es grande y si consideramos los daños que pudieran llegar a ocasionar el golpe directo o indirecto podrían ser muy costosos e inclusive provocar la muerte a personas. En la actualidad los Sistemas de detección de descargas atmosféricas se han incrementado a nivel mundial y existen principalmente tres métodos distintos para la detección de tormentas:

- Detección por ionización del aire o efecto corona
- Detección por radiofrecuencia.
- Detección por medición de campo electrostático

De los métodos anteriores el de medición del campo electrostático es el que más se adecua para la toma de decisiones en casos prácticos, se compone de un sensor y una consola de operaciones, este método permite mitigar el riesgo y posible daño por descargas atmosféricas, ya que es capaz de avisar de forma automática la evolución del campo electrostático que se encuentre a una gran distancia o incluso si se existe una variación por encima del sensor.

### 2.2.1 Niveles de Aislamiento

Un aislamiento eléctrico es un material o fluido capaz de impedir o disminuir el flujo de la corriente eléctrica, así para diferentes niveles de tensión existe un aislamiento correspondiente. El valor eficaz de tensión o de corriente es aquel que produce el mismo efecto de disipación de calor que una corriente continua de la misma magnitud. Tomando de referencia la norma L0000-06 Coordinación de Aislamiento de Comisión Federal de Electricidad que define los niveles de tensión nominal y máximas de diseño de acuerdo con lo siguiente:

**Tensión nominal de un sistema trifásico (V<sub>n</sub>):** Es el valor eficaz de la tensión entre fases que designa el sistema y al que están referidas ciertas características de operación de este.

**Tensión máxima de un sistema trifásico (V<sub>m</sub>).** Es el valor eficaz de la tensión de operación entre fases más alto, el cual ocurre bajo condiciones normales de operación, a cualquier tiempo y en cualquier punto del sistema.

**Tensión máxima del diseño del Equipo (V<sub>d</sub>).** Es el valor eficaz de tensión entre fases más alto para el cual está diseñado el equipo con respecto a su aislamiento y otras características asociadas con esta tensión, en las normas relativas al equipo.

**Sobre tensión (para un sistema o para equipo):** Es cualquier valor de tensión pico o cresta que excede la que existe a través de las terminales del aislamiento, cuando todas las terminales de fase del equipo a la cual pertenece dicho aislamiento están energizadas con las tensiones de fase a tierra,

que corresponden a una tensión de referencia dada de fase a fase. Para un sistema la tensión de referencia se considera como la tensión más alta del sistema, mientras que para un equipo se considera como la tensión más alta del equipo, esto de acuerdo con la tabla número 1, donde Vm es el valor de tensión máxima del sistema y Vd es la tensión máxima de diseño del equipo multiplicadas por el factor de sobre tensión.

Tipo de sobretensión	Valor de cresta de la sobretensión	
	Sistema	Equipo
Fase a tierra	$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_m$	$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_d$
Fase a fase	$\sqrt{2} V_m$	$\sqrt{2} V_d$

Tabla 1. Valores de sobre tensiones del sistema o respecto a un equipo.

El valor de referencia de los aislamientos es el Nivel Básico de Aislamiento al Impulso (NBAI ó BIL). De acuerdo a la especificación L0000-06 se tienen los siguientes valores de la tabla 2.

Tensión nominal del sistema Vn Kv (eficaz)	Tensión máxima de diseño del equipo Vd-kV (eficaz)	Tensión de aguante nominal a 60 Hz de fase a tierra kV (eficaz)	Tensión de aguante nominal de impulso por rayo (NBAI) de fase a tierra (5) kV (cresta)
4.4 (1)	5.5	19	45 60 75
6.9 (1)	7.2	20	40 60
13.8 (2)	15.5	35	75 95 110
23 (2)	27	50 60	95 125 150
34.5 (2)	38	70	125 150 200
44 (1)	52	95	250
69 (2)	72.5	140	325 350
85 (3), 115 (2)	123	185 230	450 550
138 (3)	145	230 275	550 650
150 (1), 161 (3)	170	275 325	650 750
230 (2)	245	360 395 460	850 900 950 1 050

Tabla 2. Niveles de aislamientos normalizados, en rojo se muestran los valores de NBAI para 85 kV y 230 kV.

De acuerdo con la norma NMX-J-549-ANCE la probabilidad y magnitud de los rayos que se presentan en la tabla 5.

1 %	de los rayos exceden los	200 kA
10 %	de los rayos exceden los	80 kA
50 %	de los rayos exceden los	28 kA
90 %	de los rayos exceden los	8 kA
98 %	de los rayos exceden los	3 kA

Tabla 3. Probabilidad de incidencia de las ondas de rayo.

La tabla 3 se refiere a que el 1% de los rayos pueden llegar a tener un valor de 200 kA, el 50% un valor de 28 kA y el 98% un valor de 3 kA, por lo que según la IEC 61-1 recomienda un valor de 40

kA para realizar estudios relacionados con golpes por rayo, este valor se encontraría entre los valores con una probabilidad de más del 50%.

**Tensión Crítica de Flameo.** El voltaje de flameo al impulso crítico  $V_c$  ó Tensión Crítica de Flameo (TCF) de un aislador se define como el valor de cresta de la onda que causa flameo del aislador en la cola de la onda el 50% de las veces que se aplica una onda normalizada de dicha magnitud, por lo que es un valor probabilístico de la distribución normal de Gauss; el nivel de aislamiento al impulso  $V_i$  (BIL) de un aislador es el valor de cresta de la onda de mayor magnitud que soporta el aislador sin flamearse.

$$V_{c50\%} = \frac{NBAI}{(1-1.3\sigma)} \quad (2)$$

Donde  $\sigma$  = Desviación estándar para descargas atmosféricas y se considera del 3% de acuerdo con el IEEE std4-1995. Tomando los valores de la tabla número 2.

NBAI 85 kV= 550 kV para impulso por rayo  
 NBAI 230 kV= 950 kV para impulso por rayo  
 De la ecuación (1):

$$V_{c50\%} = \frac{550}{(1-1.3(0.003))} = \frac{550}{(0.961)} = 572.32 [kV]$$

$$V_{c50\%} = \frac{950}{(1-1.3(0.003))} = \frac{950}{(0.961)} = 988.55 [kV]$$

**Corrección por altitud.** México se caracteriza por condiciones geográficas de gran altitud por encima de los 1000 msnm que son las condiciones normales de operación definidas por los estándares de construcción IEC y ANSI, el incremento de la altura afecta las propiedades dieléctricas de los aislamientos dado que la rigidez dieléctrica del aire disminuye a medida que se incrementa la altitud debido a la disminución de la densidad del aire, esto se debe a que el aire está compuesto por moléculas que a mayor altura tendrán una menor presión y una mayor separación entre ellas ocasionando que la tensión de ruptura en los aislamientos eléctricos externos sea menor, lo que influye en la reducción de las características eléctricas del aislamiento de acuerdo con la siguiente expresión.

$$K_d = e^{-H/8150} \quad (3)$$

Donde H es la altura sobre el nivel del mar, por lo que tomando los datos obtenidos de la trayectoria de la línea donde se tiene una altura promedio de 2,300 m. utilizando la ecuación 2 para obtener el factor de corrección.

$$K_d = e^{-2,300/8150} = 0.754$$

<b>RANGOS DE ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR (M)</b>	<b>0 a 500</b>	<b>501 a 1000</b>	<b>1001 a 1500</b>	<b>1501 a 2000</b>	<b>2001 a 2500</b>	<b>2501 a 3000</b>
<b>FACTOR DE CORRECCIÓN</b>	<b>0.942</b>	<b>0.885</b>	<b>0.834</b>	<b>0.775</b>	<b>0.732</b>	<b>0.688</b>

Tabla 4. Factores de corrección por presión barométrica para diferentes altitudes con respecto a 0 m.s.n.m. en rojo se muestra la corrección para alturas entre 2,001 a 2,500 m que coincide con lo calculado en la expresión (2).

A partir del  $V_{C50\%}$  ó TCF, se puede obtener la distancia en aire de acuerdo con la siguiente expresión.

$$d = \frac{TCF}{K_{C0}} \quad (4)$$

donde:

d= distancia en aire

TCF= Tensión Crítica de Flameo

$K_{C0}$ = Factor de corrección por humedad y por densidad de aire.

Por lo que la tensión crítica de flameo con la consecuente corrección por altura es dada por la expresión (2):

$V_{C50\%} = 572.32 \text{ kV} * 0.75 = 432.6 \text{ kV}$  para los sistemas de 85 kV.

$V_{C50\%} = 988.55 \text{ kV} * 0.75 = 747.3 \text{ kV}$  para el sistema de 230 kV.

Además de la corrección por altura se requiere del cálculo de otros parámetros para obtener una aproximación del valor corregido de la tensión crítica de flameo dadas las características atmosféricas de la trayectoria de la línea dadas por la expresión (1). Para 85 kV. El factor de corrección por humedad ( $K_h$ ) [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]. se obtiene de la gráfica 13 de acuerdo con los valores de  $22^\circ\text{C}$  para bulbo seco y una humedad relativa del 20% que se tienen en la trayectoria de la línea.

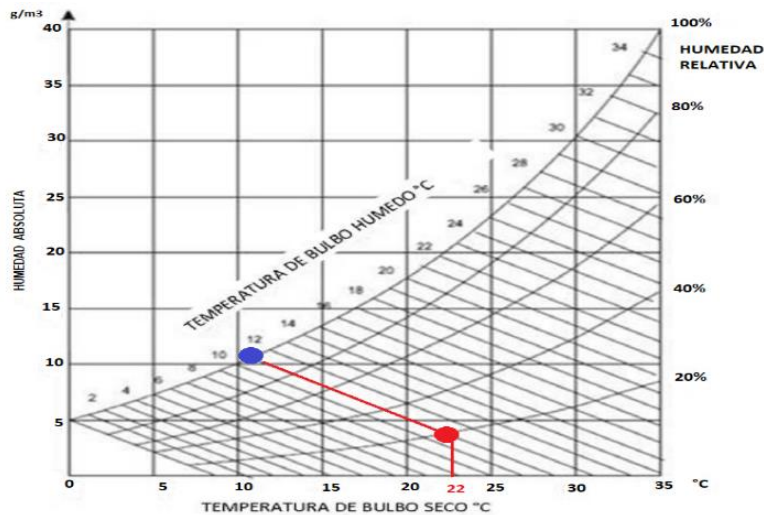


Figura 4. Humedad Absoluta para  $K_h$ .

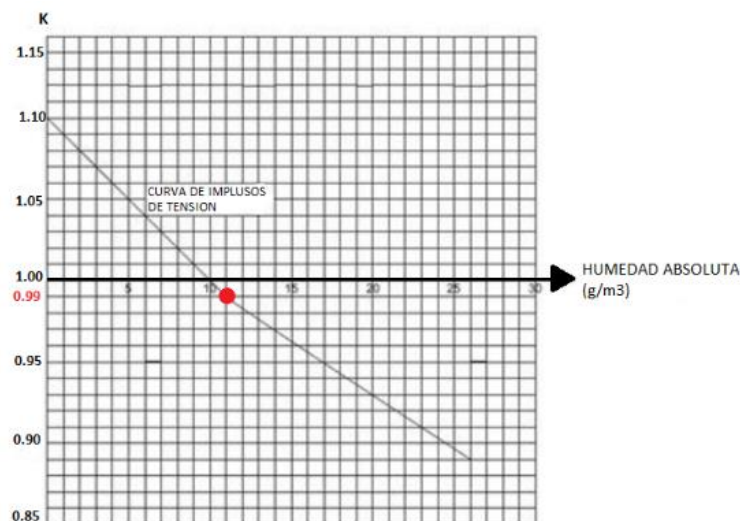


Figura 5. Factor de corrección por humedad ( $K_h$ )

Obteniéndose de la figura 13 y 14 un valor de 11 [g/m<sup>3</sup>] de humedad absoluta dando como resultado 0.99 para Kh.

Factor de corrección por presión atmosférica (Kda). De la ecuación (3) obtuvimos un factor de corrección de 0.754 para 2,300 m.s.n.m

Distancia de la configuración entre hierro (Kr). De la figura 6 tenemos:

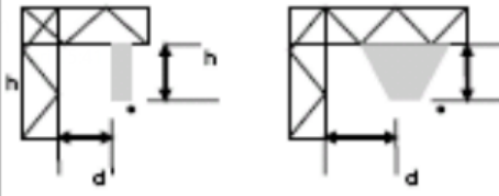
CONFIGURACIÓN DE ENTRE - HIERRO	DIAGRAMA	Kn	Km	Kr
FASE - TORRE		140	125	550

Figura 6. Valor de Kr para la configuración de la estructura en análisis

Dándonos un valor de 550 para el tipo de estructura.

Por lo que mediante la expresión (1) obtenemos el factor de corrección por humedad y por densidad de aire.

$$K_{CO} = Kr \left( \frac{Kda}{Kh} \right) = 550 \left( \frac{0.756}{0.99} \right) = 420$$

Ahora podemos obtener que para una altitud de 2,300 m.s.n.m se tiene un  $K_{CO}$  de:

$$K_{CO} \text{ para } 85 \text{ kV} = 420$$

$$K_{CO} \text{ para } 230 \text{ kV} = 420$$

Por lo que las respectivas distancias en aire son:

$$d_{85 \text{ kV}} = \frac{436.9}{420} = 1.04 \text{ [m]}$$

$$d_{230 \text{ kV}} = \frac{754.65}{420} = 1.796 \text{ [m]}$$

**Contaminación.** Otro de los aspectos que afectan a los aislamientos y pueden ocasionar que se produzca un flameo es de los efectos Ambientales. Existen dos tipos de aislamientos, externos e internos, los aislamientos externos como lo son los aisladores con los que cuentan los conductores de las líneas de transmisión se ven afectados por la contaminación existente en el ambiente, particularmente el CO<sub>2</sub> influyendo directamente en la rigidez dieléctrica del material y la distancia de fuga<sup>3</sup>. En los sistemas eléctricos a la intemperie se presentan tres tipos de contaminación: Salina, Industrial, Desértica. Presentando diferentes niveles de contaminación: Ligera, Media, Alta y Muy Alta [5]. El flameo por contaminación sobre un aislador se presenta cuando la mayor parte de la superficie está cubierta por una capa de baja resistividad. Para el caso de estudio, la contaminación que se presenta es de tipo Industrial con un nivel de contaminación alta dado que se encuentra en un área con alta densidad de industrias y suburbios del estado de México que producen diferentes tipos de contaminantes los cuales se depositan sobre los aisladores y forman un polvo grasiento en forma de película, que se va transformando con el tiempo en una capa adherente. Existen diferentes pruebas normalizadas para determinar el voltaje crítico de flameo de acuerdo con el grado de

<sup>3</sup> Distancia de fuga: es la distancia más corta entre dos partes conductoras sobre la superficie de un material aislante.

contaminación, la curva característica que se obtiene de la tensión de aguante en función del nivel de contaminación expresada como la DESD (Densidad Equivalente de Sal Depositada en miligramos de NaCl) es la forma como se indica en la figura [6].

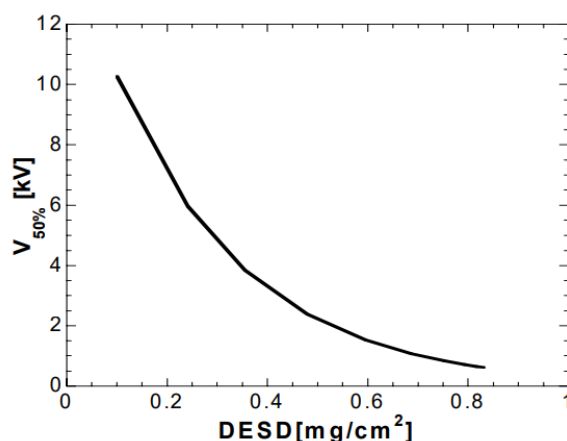


Figura 7. Curva característica de aisladores contaminados, el voltaje crítico de flamao disminuye al aumentar el DESD en las superficies de los aisladores.

Una forma de prevenir el flamao en el aislamiento en zonas que presentan altos niveles de contaminación consiste en aumentar la distancia de fuga sobre la superficie del aislador. La siguiente tabla utilizada por IEC 60071-1 recomienda los valores de distancia de fuga por KV de voltaje nominal del sistema para las cuatro diferentes categorías o grados de contaminación.

Nivel de contaminación	Ejemplo de entornos ambientales típicos Según IEC-60071 -2	Mínima distancia de fuga nominal mm/kV <sup>1</sup>
<b>I Ligera</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Áreas libre de industria y con baja densidad de casas equipadas con plantas de calefacción</li> <li>• Áreas de baja densidad de industrias o de casas pero sujeta a vientos frecuentes y/o lluvia.</li> <li>• Áreas agrícolas<sup>2</sup></li> <li>• Áreas montañosas</li> <li>• Todas estas áreas deberán estar situadas por lo menos de 10 km a 20 km del mar y no estar expuestas en forma directa a brisas marinas</li> </ul>	<b>16</b>
<b>II Media</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Áreas con industrias sin producción de humo contaminante y/o con una densidad media de casas equipadas de plantas de calefacción</li> <li>• Áreas de alta densidad de casas y/o industrias pero con vientos y/o lluvias frecuentes</li> <li>• Áreas expuestas a brisas marinas pero no tan cercanas a las costa (al menos a varios kilómetros de distancia)<sup>3</sup></li> </ul>	<b>20</b>
<b>III Fuerte</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Áreas con alta densidad de industrias y suburbios de grandes ciudades con alta densidad de plantas de calefacción que produzcan contaminación</li> <li>• Áreas cercanas al mar o expuestas a fuertes vientos marinos</li> </ul>	<b>25</b>
<b>IV Muy fuerte</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Áreas de extensión moderada, expuestas a polvo de características conductivas y a humo industrial con presencia de partículas conductivas gruesas</li> <li>• Áreas de extensión moderada, muy cercanas a la costa, expuesta a la espuma de mar o a vientos marinos excesivamente fuertes</li> <li>• Áreas desérticas, caracterizadas por carencia de lluvia durante largos periodos de tiempo, expuestos a vientos fuertes que acarrear arenas y sal, y sujetadas a la condensación regular</li> </ul>	<b>31</b>

Tabla 5. Distancia de Fuga para Distintos niveles de contaminación.

Nota: Esta tabla aplica únicamente para revestimiento de vidrio o porcelana y no incluye algunas condiciones ambientales tales como: Nieve y hielo con alto grado de contaminación, lluvias fuertes, zonas desérticas, entre otras.

<sup>1</sup> De acuerdo a norma IEC 815, la distancia mínima en aisladores entre fase y tierra se relacionan con el voltaje fase – fase más alto del sistema

<sup>2</sup> Uso de fertilizantes en forma de aerosoles, o la quema de residuos de la cosecha puede llevar a un mayor nivel de contaminación debido a dispersión por el viento

<sup>3</sup> Las distancias al mar depende de la topología dl área costera y de las condiciones extremas del viento

## 2.3 Metodología

El rayo es más propenso a tener una mayor presencia en las regiones tropicales y boscosas, ya que en ellas se presenta una mayor evaporación de agua, además sus parámetros presentan diferencias en comparación con los que se observan típicamente en otras regiones del mundo. La caída de rayos en líneas de alta tensión se puede presentar de 2 formas: directa o indirecta, siendo la primera el principal factor causante de perturbaciones en el sistema, anteriormente se creía que los rayos que caían en la cercanía de las líneas no eran tan importantes por lo que la teoría se basaba principalmente en los golpes directos y sus efectos, sobre todo los daños que pueden ocasionar en los aislamientos, en el caso de los rayos a tierra, un líder descendente crece paso a paso en una serie de escalones (de manera escalonada) desde la nube hacia la tierra, cuando el líder se ha acercado a la tierra a unos pocos cientos de metros, se excede la fuerza de aislamiento eléctrico del aire cerca del suelo. Una descarga adicional de “líder” similar al líder descendente comienza a crecer hacia la cabeza del líder descendente: el líder ascendente. El líder ascendente se lanzará en los puntos de mayor intensidad de campo eléctrico y puede moverse en cualquier dirección hacia el líder descendente que se aproxima. Es por esta razón que los rayos pueden caer en el costado de estructuras altas en lugar de en su punto más alto. La distancia del último paso de un líder descendente se denomina distancia de disruptiva y está determinada por la amplitud de la corriente del rayo. Esta distancia se puede representar mediante una esfera de radio  $r$  y generalmente se acepta que este radio está dado por:  $r = 10 * I^{0.65}$ , donde  $I$  es la corriente pico del rayo. Las mediciones que se realizan a lo largo del mundo nos aportan una mayor información de los lugares y magnitudes con la que estos fenómenos se presentan, según los estudios la magnitud de los rayos puede ir desde unos 3 kA hasta 100 kA de descarga, por lo que se deben de estudiar más a fondo los efectos que se pueden originar la caída de rayos cercanos a las líneas.

Para poder estudiar el rayo el grupo de trabajo 33.01 “Lightning” del Comité CIGRE 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: Cuando se presenta la corriente de retorno en el canal ionizado formado entre la nube y la tierra, se producen tensiones inducidas al punto 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.
- 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, se refiere al valor pico que puede llegar a alcanzar la onda de corriente, por lo que será el valor que inducirá la sobre tensión y deberán de soportar los elementos como los aisladores.
- 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, teniendo un tiempo de elevación de 1.2  $\mu$ s, llegando a un valor del 50% de su valor a los 50  $\mu$ s.

Los parámetros de rayos son las variables que se utilizan para realizar los procedimientos de estimación de rayos a tierra y que pudieran llegar a golpear las líneas de transmisión. Los parámetros que normalmente se obtienen de los Sistemas de Ubicación del Rayo (LLS - Lightning Location System) por sus siglas en inglés son la densidad de destellos a tierra (GFD), la densidad de golpes en el suelo (GSD), la distribución de corriente máxima, la multiplicidad de destellos y la polaridad. Uno de los métodos que utilizan estos sistemas para el análisis de las descargas de nube a tierra es el que opera con señales de VLF/VL propagadas durante los cambios del campo electromagnético.

### 2.3.1 Protección Contra Descargas en el diseño de la línea

Las líneas de transmisión se deben de proteger ante la caída de rayos, los golpes se pueden dar de manera directa o indirecta, es decir dentro de vecindad de su trayecto. Cuando se habla de protección contra golpes directos se hace referencia a la caída de rayos sobre los conductores, para evitar esto se diseña un sistema de blindaje o escudo para evitar que el rayo golpee los conductores de fase directamente. El sistema de blindaje se complementa con un sistema de tierra, entre los dos deben de cumplir la función de en primera instancia atraer al rayo antes de que golpee a los conductores y como segunda de poder drenar a tierra esa sobre tensiones y sobre corrientes sin que cause daños. El escudo que se forma evita que se establezca un camino desde el conductor de línea hacia las partes no conductoras de la estructura. El aislamiento que requieren las líneas de Transmisión es determinado por las sobre tensiones que originan maniobras en interruptores o las ocasionadas por caída directa o indirecta de rayos que se presentan en algún punto del sistema. Las principales causantes de disturbios en las líneas de transmisión son los golpes directos de rayos, el primer exponente de la teoría fue el Dr. C. L. Fortescue en 1930 [7].

Factores de diseño. La consideración principal es cómo obtener un nivel de protección para una operación óptima, dentro de estos factores se encuentran los siguientes elementos:

- Cables de guarda: estos cables conducen las sobre tensiones a tierra, deben de contar con una suficiente resistencia mecánica, deben estar ubicados en la parte superior de las estructuras para blindar los conductores de línea adecuadamente de golpes directos. El ángulo formado por los hilos de guarda respecto a la posición de los conductores de fase debe de ser de al menos  $30^\circ$  para lograr una protección efectiva. (Otros factores ambientales como la aguanieve pueden influir en su selección, al incrementarse el peso en los conductores).
- Distancias Dieléctricas: deberá haber un espacio suficiente entre el conductor de línea a la torre (partes metálicas) y al suelo, para evitar descargas disruptivas a los conductores, en especial en los aisladores, esto debe de ser de acuerdo con el nivel de voltaje de operación utilizado para el diseño de la línea.
- Las resistencias de pie de torre: se deben asegurar los valores más bajos que estén económicamente justificados, así la energía producida por el rayo se podrá disipar de mejor manera.

Aislamiento. En las líneas aéreas estos elementos que pueden ser de distintos materiales como el vidrio, porcelana o materiales sintéticos están expuestos a todas las inclemencias del ambiente exterior, los efectos de la lluvia, niebla, humedad y la contaminación se vuelven importantes, algún daño en el aislamiento puede causar una falla y daño permanente, las tensiones mecánicas también impactan en el aislamiento y la degradación del aislamiento tiende a aumentar con el tiempo así como la combinación de los factores mencionados, cualquier flameo es indeseable e inaceptable pues puede llevar a causar la salida de la línea y la afectación de usuarios y pérdidas económicas [8]. La posición que guardan los conductores respecto a la estructura va a depender del arreglo de

aisladores utilizados, estos pueden tener algún grado de libertad en su movimiento por lo que estas distancias también deben ser consideradas en el ángulo de blindaje, tal es el caso de las cadenas simples de suspensión que tienen un grado de libertad transversal al conductor, y giran libremente alrededor del punto de amarre a la torre. Cuando en el diseño de la línea se requiere impedir este movimiento se utilizan cadenas de suspensión en V. Las cadenas de suspensión V permiten reducir el derecho de vía en la trayectoria de la línea en la disposición perpendicular a la trayectoria, para las fases laterales la cadena en V incide en la menor servidumbre.

En la Figura 2.5 se muestra el diseño de una torre de transmisión, en la parte superior en color azul se muestra la disposición de dos hilos de guarda, en color verde la disposición de los conductores de fase y en línea punteada el ángulo de protección imaginario que forma el hilo de guarda respecto a los conductores de fase, así como las cadenas de aisladores entre el conductor de fase y la cruceta, esa distancia es la que considera el modelo para su simulación.

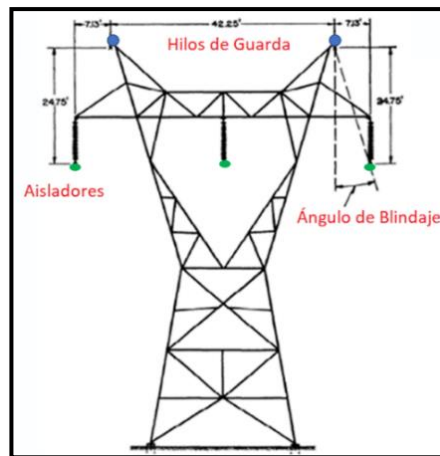


Figura 8. Se muestra el arreglo de los conductores de guarda en color azul y fase en verde para una línea de 230 kV, así como el ángulo de blindaje en donde el conductor de fase se encuentra teóricamente protegido.

**Puesta a Tierra.** La resistencia de puesta a tierra es la dificultad que encuentra la corriente para circular a través de un electrodo enterrado hacia el terreno, idealmente una puesta a tierra debería de tener una resistencia de cero ohms, pero en la práctica el estándar CFE 00J00-52 recomienda un valor menor a 10 [ $\Omega$ ] para torres de transmisión en operación. Para el caso de la resistencia durante la caída de un rayo se puede obtener mediante la expresión

$$R_T = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}} \quad (5)$$

Donde:

- Ro= la resistencia al pie de torre medida a baja corriente y baja frecuencia ( $\Omega$ ).
- RT= es la resistencia de puesta a tierra aparente en el momento de la descarga ( $\Omega$ ).
- Ig= es la corriente limitante para inicializar una ionización suficiente del suelo (A).
- I= es la corriente de la descarga atmosférica a través de la resistencia de pie de torre (kA). La corriente limitante es función de la ionización del suelo y está dada por la ecuación:

$$I_g = \frac{E_0 * P}{2\pi R^2 \rho} \quad (6)$$

- $\rho$ = es la resistividad del suelo ( $\Omega/m$ ).
- $E_0$ = es el gradiente de ionización del suelo (300 kV/m).

**Flameo Inverso.** Si la descarga atmosférica cae en el cable de guarda o directamente en la torre, ésta se desplazará a través de la estructura y si al llegar a la base de la torre que se encuentra inmersa en el suelo encuentra una alta resistencia (resistencia de puesta a tierra de la torre) provocará una onda de corriente reflejada, la cual origina un aumento de potencial eléctrico entre el brazo de la torre y el conductor de fase (se encontrarán a diferentes magnitudes de potencial) en algún momento dado se puede llegar al punto en que se supera el nivel de aislamiento proporcionado por el aire exterior a la cadena de aisladores y se presenta un flameo desde el brazo de la torre (que se encuentra a un mayor potencial) hacia el conductor de fase, fenómeno conocido como flameo inverso, en la figura 8 se considera la caída de un rayo directamente sobre el hilo de guarda, la onda viaja a través del cable en ambos sentidos, si existe una alta resistencia de puesta a tierra provocará una tensión inducida en los aisladores, además se muestra la representación eléctrica de los componentes de la estructura, resistencias e inductancias.

- Caída de rayo sobre el hilo de guarda teniendo una alta resistencia en la base de la torre.
- Representación de la onda hacia la base de la torre en un tiempo  $t_1$  y la onda que se refleja en  $t_2$ .
- Representación eléctrica de la torre.

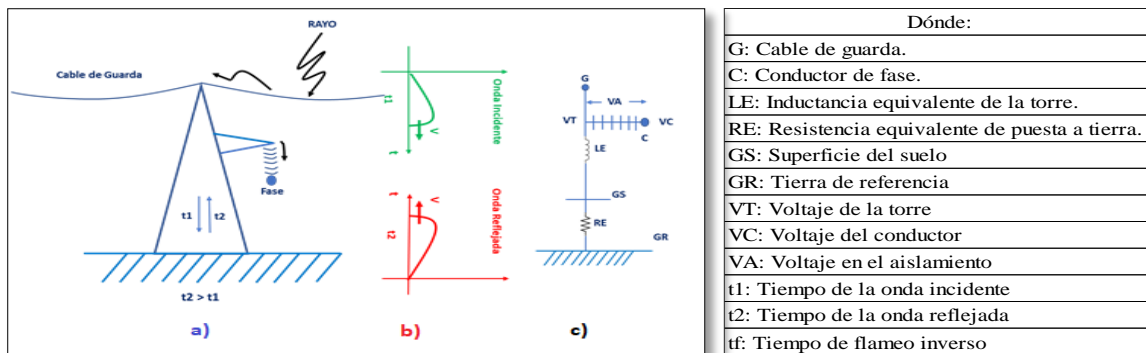


Figura 9. Representación de la caída de rayo en el hilo de guarda y su trayecto a través de la estructura a tierra, al presentarse una gran resistencia de puesta a tierra se presenta el fenómeno de onda reflejada que puede provocar el flameo inverso hacia los conductores de fase.

Los flameos en líneas de transmisión se dividen en dos grupos.

- Golpe en el hilo de guarda el cual produce un potencial lo suficientemente grande para ocasionar un flameo entre la estructura y el conductor.
- Falla en el blindaje en el cual el golpe es directo en los conductores de fase.

En el caso donde un rayo llegara a golpear el conductor hilo de guarda, el campo eléctrico que se generará puede llegar hasta el orden de Mega Volts en un rango de micro segundos, un tiempo muy corto en el que el sistema de tierra lo debe drenar, esta energía generada si se logra sostener lo bastante que llegue a rebasar la capacidad disruptiva de los aislamientos y causar un flameo entre la estructura y los conductores de fase, el flameo dependerá del tipo y la longitud del aislamiento entre ambos, las condiciones físicas y ambientales en las que se encuentran los aislamientos también influirá pues pueden llegar a estar rotos o contaminados, la contaminación sobre el aislamiento se produce por la acción de tres factores: humedad, contaminación y tensión eléctrica. Dadas las diferentes condiciones estructurales en la norma IEC 60071-4 “Guía computacional para la coordinación y modelado de aislamiento de redes eléctricas” se mencionan 3 métodos para realizar el modelado de las cadenas de aisladores: la curva voltaje tiempo, el método de integración y los métodos de propagación de líder. El método de la curva voltaje tiempo está relacionada básicamente a la respuesta de descarga de un dieléctrico en este caso la cadena de aisladores ante un voltaje de impulso de manera estándar, En la Figura 2.3 se puede observar que el eje horizontal es el tiempo de duración de la descarga, el eje vertical es el voltaje y normalmente cuando un impulso sobrepasa esta curva se considera que ocurre un flashover a través de la cadena de aislamiento.

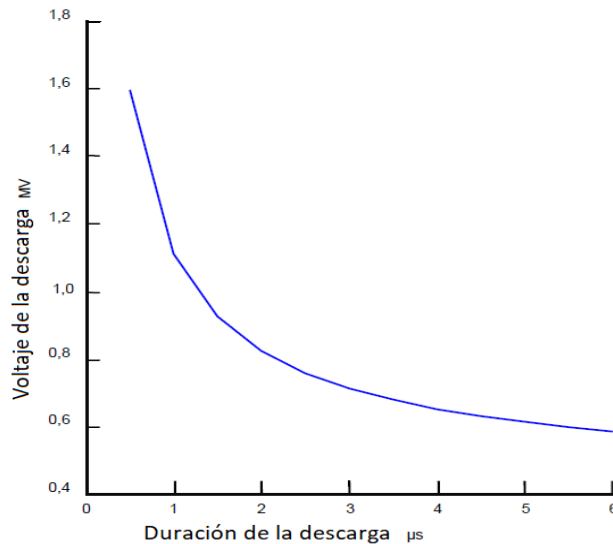


Figura 10. Gráfica Voltaje Tiempo para formas de onda de rayo estándar.

El modelo Voltaje Tiempo se puede utilizar bajo ciertas condiciones, tiene algunas limitaciones, una es que no es suficiente para predecir la respuesta o cómo se comportan los aislamientos especialmente con impulsos que no son estándares. Se puede usar para estudiar flashover, cadenas de aisladores y también usarlo en la parte de apantallamiento en la coordinación aislamiento. En ATP se emplea un modelo que utiliza esta técnica para simular las cadenas de aisladores representadas por un capacitor y la condición de apertura o cierre por interruptores controlados por voltaje, los cuales simularán la descarga de rayo, cerrando el interruptor si el voltaje entre la cruceta y el conductor de fase supera un valor especificado correspondiente al nivel de aislamiento de la cadena, se representa por 2 constantes C1 de voltaje de entrada y C2 para voltaje de salida, el tiempo elevado a la 0.75, C1 y C2 están en dimensiones que el resultado da en mega voltios y el tiempo tiene que estar en microsegundos y D para la longitud de la cadena de aisladores. Así la curva de descarga se ve afectada por la distancia de la cadena de aisladores. En la figura 2.4 se muestra el esquema de bloques del modelo para la simulación de la cadena de aisladores.

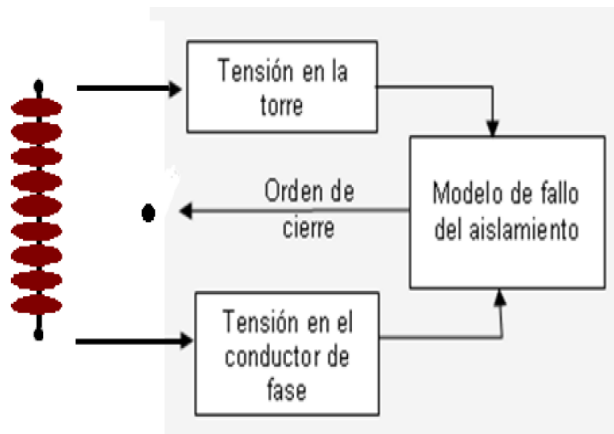


Figura 11. Diagrama de bloques para cadena de aisladores (Model ATP)

La probabilidad de tener una salida disminuye con el aumento del blindaje de la línea, la disminución de la resistencia a pie de torre y el aumento en el número de aisladores pueden incrementar el nivel de protección de las líneas ante descargas atmosféricas, sin embargo hay un límite para este aumento de protección y está determinado por el incremento económico, pues se necesitará mayor cantidad de material, ya sea en el sistema de puesta a tierra o en el aislamiento, por lo que se debe de tener un cálculo adecuado que permita la protección adecuada al mejor costo, sin dejar de lado que el número de salidas a evitar va ir directamente relacionado al número de tormentas que se tengan al año en el área involucrada. Para minimizar los probables efectos causados por un flameo inverso se

utilizan dispositivos de protección como el apartarrayos, que en conjunto al sistema de tierra juegan un papel muy importante y complementa el poder drenar la energía sin causar ningún daño a la línea o al personal que pudiera estar en las cercanías a la estructura. El apartarrayos es un dispositivo que se instalan en las líneas y permiten recortar la onda de voltaje disminuyendo así su magnitud y enviar a tierra la sobre corriente ocasionada por el golpe de un rayo sobre los conductores de guarda o directamente en la torre, esto antes de que los valores de voltaje sobrepasen el nivel básico de aislamiento de la cadena de aisladores y pueda surgir un flameo hacia los conductores de fase, la selección de apartarrayos se realiza con un valor de inicio de funcionamiento del 30% por debajo del valor crítico del aislamiento por impulso como margen de protección. Una de las principales características de los apartarrayos para protección contra rayos es que funcionan como una alta impedancia durante la operación normal de la línea e incluso con la conmutación o sobretensiones de baja frecuencia. Por ejemplo, las sobretensiones que ocurren debido a fallas de fase a tierra, ferresonancia o acoplamiento casi resonante. Así se debe de tener un diseño efectivo que permita el funcionamiento de todos los componentes que se encuentren expuestos a altas tensiones durante cualquier condición de funcionamiento ya sea en estado estable o transitorio. Debemos tener en consideración que los tiempos en los que suceden estos hechos es del orden microsegundos.

<b>Tiempo de Duración de los Fenómenos en los Sistemas Eléctricos</b>	
<b>Naturaleza de los Fenómenos Transitorios</b>	<b>Tiempo de Duración</b>
Rayo	0.1 $\mu$ s - 1.0 ms
Switcheo o Conmutación	10 $\mu$ a menos de 1 s
Resonancia Sub Sincrónica	0.1 ms - 5 s
Estabilidad Transitoria	1 ms - 10 s

Tabla 6. Tipos de transitorios en un sistema de potencia y su tiempo de duración en segundos.

De acuerdo con los datos presentados en la tabla 5 los tiempos de duración para un rayo se da desde los 0.1  $\mu$ s a 1.0 ms es el fenómeno eléctrico con un rango de menor corta duración, el rango en el que se presenta son tiempos demasiados pequeños en los que se libera un gran cantidad de energía de ahí que los aislamientos tengan que ser diseñados para poder soportar estos tipos de golpes de energía, si tomamos en comparación que los equipos de protección eléctrica por ejemplo el conjunto relevador – interruptor liberan una falla en aproximadamente 3 ciclos para sistemas de 60 Hz lo que corresponde a 50 ms tiempo que pasa desde que él relé detecta la anomalía en su zona de protección, realiza la lógica de acuerdo a sus ajustes y manda la señal de energización de bobina de disparo en el interruptor que se encuentra en las bahías de transformación y éste realiza la liberación de la falla, para el ser humano este tiempo se da en un parpadeo, aun así, la duración en la que se presenta un rayo no tiene comparación. Para que la onda de rayo pueda vencer la barrera que le presenta el aislamiento debe ser más elevado al voltaje crítico de flameo que de acuerdo con la ecuación 1 debe ser para los sistemas de 85 y 230 kV: 432.6 kV para el sistema de 85 kV y 747.3 kV para 230 kV en condiciones normales de temperatura y altura sobre el nivel del mar.

### 3 CAPÍTULO 3. Caso de Estudio

#### 3.1 Características de las líneas para su análisis

El caso de estudio corresponde a la evaluación de confiabilidad ante la caída de descargas atmosféricas directas sobre estructuras de líneas de transmisión aérea a cargo para su mantenimiento de la División Valle de México Norte, la condición particular del análisis se debe a la asimetría de las torres lo que se manifiesta en una coordinación de aislamiento para cada uno de los dos niveles de tensión existente. Las líneas son multi circuito y cuentan con una longitud de 11.5 km durante la trayectoria entre las subestaciones CERRO GORDO-VALLE DE MÉXICO en el estado de México, constan de 3 circuitos trifásicos uno de 230 kV y dos de 85 kV soportados en torres que originalmente fueron diseñadas para cumplir con las distancias dieléctricas de 230 kV las cuales fueron modificadas y cuentan con las siguientes características:

- Nivel de tensión: 230 y 85 kV
- Número de circuitos: 3, dos en 85 kV y uno en 230 kV.
- Nivel Básico de Aislamiento (NBAI): 900 kV para 230 kV y 400 kV para 85 kV.
- Altitud: Promedio de 2,250 metros sobre el nivel del mar (msnm)
- Calibre del conductor: ACSR 1113 kcm- Bluejay - 230 kV, ACSR 795 kcm Drake - 85 kV
- 2 cables de guarda: Acero galvanizado de alta resistencia AG8, 9.53 mm.
- Conductores por fase: 1 para 85 kV, 2 para el circuito de 230 kV.
- Estructuras: Auto Soportadas de Suspensión del tipo TAS - Auto Soportada de Remate TAR.
- Cadenas de Aisladores de vidrio en V con una dimensión de 0.146 m. por disco.
  - 7 discos para 85 [kV]
  - 17 discos para 230 [kV]

La trayectoria de las líneas se encuentra dentro de corredores industriales en los municipios del Estado de México, estas condiciones ambientales se hacen presente en forma de contaminación y polvo sobre los aislamientos, herrajes, puntos de conexión o en el fierro estructural de las torres de las líneas de transmisión, provocando corrosión en los elementos metálicos y por lo tanto una alta resistencia al paso de la electricidad en los mismos, la resistencia de puesta a tierra de la torre se ve afectada por la resistencia que se manifiesta en las conexiones y la resistividad del suelo, por lo que ante una alta resistencia será más difícil drenar una sobretensión aun teniendo dispositivos de protección como lo son los apartarrayos, ya que estos elementos se complementan de un buen sistema de tierra para que su funcionamiento sea el adecuado. En los aislamientos contaminados se pueden crear bandas secas que pueden llegar a ocasionar que se rompa (acorte) la distancia dieléctrica entre las partes no conductoras con las conductoras.

#### 3.2 Parámetros de la línea.

Los parámetros de las líneas de transmisión se definen a través de las características de los conductores, la configuración geométrica de la estructura y la longitud de la línea, ya que son las que determinan como se distribuye el campo electromagnético y sus características. Sirven para definirlos eléctricamente y analizar su comportamiento, se consideran parámetros distribuidos uniformemente a lo largo de la línea, siendo los siguientes: Resistencia, Inductancia, Capacitancia y Conductancia.

La resistencia R. Depende del calibre de los conductores, de su área de sección transversal y la longitud de la línea.

La inductancia  $L$ . Depende de la frecuencia, la interacción mutua entre conductores (configuración geométrica y disposición) y de la variación de la corriente en los mismos, pues cambia el número de líneas de flujo.

La capacitancia  $C$ . Existe debido a la diferencia de potencial entre conductores o el suelo, es una constante que depende del tamaño, espaciamiento entre ellos (permitividad del espacio). Su efecto es pequeño o despreciable para líneas cortas de menos de 50 km de largo.

La conductancia  $G$ . Se presenta en las corrientes de fuga de los aisladores de las líneas aéreas, normalmente no se considera este parámetro por considerar la fuga en aisladores despreciable.

Para poder obtener los parámetros mencionados se debe de conocer:

- Configuración física de los conductores sobre la estructura.
- Con la información de la distribución geométrica se obtienen los datos de Inductancia ( $L$ ) y capacitancia ( $C$ ).
- Calibre de los conductores de fase y de guarda.  
Con la información del área de conductores se obtiene la información de la resistencia ( $R$ ).
- Longitud de la línea.  
Con este dato se complementa el valor de la resistencia por unidad de longitud.
- Resistencia de puesta a tierra de cada estructura.  
El valor se obtiene de las mediciones realizadas en campo.
- La corriente limitante de ionización del suelo que se obtiene a través de la resistividad del suelo, su gradiente de ionización y la resistencia medida en campo.
- El valor de corriente de rayo
- Resistividad aparente del terreno.
- Dato de las mediciones realizadas en campo.
- Densidad de descargas a tierra.
- Datos por normatividad NMX-J-549-ANCE-2005
- Altura sobre el nivel del mar.  
Los datos son obtenidos del perfil de alturas de las trayectorias de las líneas analizadas.
- Cantidad y tipo de aisladores.  
De acuerdo con el nivel de tensión de las líneas y aisladores de vidrio que se encuentran instalados.
- Nivel Básico de Aislamiento. Se define a partir del nivel de tensión de las líneas analizadas.
- Dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias



referencia a tierra de los conductores de fase (tomando como referencia la estructura aterrizada) los conductores de hilo de guarda en la parte superior, del modelo se observan las diferencias en distancias si se comparan los dos niveles de tensión en que se transmite la energía. En la tabla N.2 se muestran los valores de los parámetros de resistividad aparente del suelo y resistencia de puesta a tierra, mediciones obtenidas en campo. La ubicación de las estructuras con un total de 57 estructuras partiendo de la subestación Valle de México hasta la subestación Cerro gordo y una longitud de 12 km y su altura sobre el nivel del mar a la que se encuentran.

N. Estructura	Ubicación [Latitud, Longitud]		Tipo de	Altura sobre nivel del mar [m]	Medición de Resistividad [ $\Omega$ *m]		Resistencia de Puesta a Tierra [ $\Omega$ ]
			Estructura		1.6 [m]	3.2 [m]	
S.E	19°37'12	98°58'50	REMATE S.E. VDM	2,253	36.5	11	1
1	19°37'11	98°58'54	TAR	2,250	26.9	9.8	1.01
2	19°37'08	98°59'01	TAS	2,257	12.4	17.4	1.03
3	19°37'05	98°59'08	TAR	2,256	7.9	18.4	1.18
4	19°37'02	98°59'15	TAR	2,253	17.1	32.8	1.23
5	19°36'59	98°59'22	TAS	2,252	19.3	42	1.15
6	19°36'55	98°59'29	TAS	2,252	10.7	15.6	1.15
7	19°36'52	98°59'36	TAS	2,252	34.2	27	1.21
8	19°36'49	98°59'43	TAS	2,250	54.4	38.6	1.25
9	19°36'46	98°59'50	TAS	2,249	15	8.4	1.05
10	19°36'43	98°59'57	TAS	2,250	13.2	8.2	1.09
11	19°36'40	99°00'04	TAS	2,251	57.1	50.2	2.77
12	19°36'36	99°00'04	TAS	2,252	24.1	24.6	1.18
13	19°36'33	99°00'20	TAS	2,251	28.3	12	1.02
14	19°36'30	99°00'28	TAS	2,318	46.4	10.4	1.63
15	19°36'26	99°00'36	TAS	2,246	13.9	13.2	1.08
16	19°36'23	99°00'42	TAR	2,247	7.1	7.2	1.08
17	19°36'20	99°00'48	TAR	2,249	18.8	17.4	1.11
18	19°36'15	99°00'54	TAR	2,247	72.4	62	1.51
19	19°36'11	99°00'59	TAR	2,245	142	36.6	1.26
20	19°36'05	99°01'04	TAS	2,246	35.2	17.8	1.63
21	19°36'00	99°01'08	TAR	2,247	46.4	10.4	1.08
22	19°36'00	99°01'08	TAS	2,247	60.7	19.4	1.16
23	19°35'48	99°01'16	TAS	2,245	12.9	7	1.23
24	19°35'43	99°01'21	TAS	2,243	11.2	8.6	1.32
25	19°35'37	99°01'25	TAS	2,243	12.4	9.2	1.3
26	19°35'32	99°01'29	TAS	2,244	16.4	11	1.29
27	19°35'26	99°01'33	TAR	2,247	17.4	10.4	1.26
28	19°35'22	99°01'37	TAR	2,248	104	12.2	1.19
29	19°35'18	99°01'40	TAS	2,247	32.4	16.2	1.06
30	19°35'13	99°01'43	TAR	2,245	32.2	2.8	0.62

N. Estructura	Ubicación [Latitud] [Longitud]		Tipo de	Altura sobre	Medición de Resistividad [Ω*m]		Resistencia de Puesta a Tierra [Ω]
			Estructura	nivel del mar [m]	1.6 [m]	3.2 [m]	
31	19°35'08	99°01'47	TAR	2,246	11.9	2.6	0.58
32	19°35'04	99°01'50	TAR	2,247	20.3	16	1.03
33	19°34'59	99°01'54	TAS	2,247	2.5	4.4	1.64
34	19°34'54	99°01'58	TAS	2,247	6.4	5.2	1.19
35	19°34'49	99°02'01	TAR ISC	2,246	15.1	15.2	1.25
36	19°34'42	99°01'06	TAR	2,246	11.7	7.8	1.33
37	19°34'37	99°01'10	TAS	2,246	8.4	10.2	1.29
38	19°34'31	99°01'15	TAS	2,246	23.3	10.6	1.31
39	19°34'25	99°01'19	TAS	2,247	30.3	9	1.23
40	19°34'19	99°01'24	TAR	2,248	20.9	6.6	1.21
41	19°34'13	99°02'28	TAR	2,248	9.3	8.6	1.2
42	19°34'07	99°02'33	TAS	2,247	39.1	17.2	1.24
43	19°34'02	99°02'37	TAS	2,241	43.2	31.4	1.23
44	19°33'56	99°02'41	TAR LA COSTEÑA	2,240	68	26	1.16
45	19°33'49	99°02'46	TAR	2,242	111	85.6	1.15
46	19°33'45	99°02'49	TAR	2,242	21.6	28.8	1.12
47	19°33'40	99°02'54	TAR	2,244	63	28.8	1.13
48	19°33'35	99°03'00	TAR	2,245	26	22	1.09
49	19°33'31	99°03'07	TAR	2,245	58.8	20.8	1.1
50	19°33'27	99°03'12	TAS	2,244	41.8	20	1.24
51	19°33'24	99°03'18	TAS	2,244	41.8	50.4	1.12
52	19°33'20	99°03'24	TAR	2,244	36.5	11	1.01
53	19°33'22	99°03'27	TAS	2,243	26.9	9.8	1.03
54	19°33'24	99°03'30	TAR	2,244	12.4	17.4	1.18
55	19°33'22	99°03'33	TAR	2,244	7.9	18.4	1.23
56	19°33'19	99°03'36	TAR	2,244	17.1	32.8	1.15
57	19°33'17	99°03'34	TAR	2,245	19.3	42	1.15
S.E	19°33'17	99°03'32	REMATE S.E. CRG	2,243	10.7	15.6	1.21

Tabla 7. Geo referencias, tipo de estructura, altura sobre el nivel del mar, medición de resistividad del suelo y resistencia de puesta a tierra de las estructuras de la línea de transmisión en campo.

Los perfiles de resistividad del suelo nos representan la resistencia que tendrá al paso de la energía eléctrica, si la resistividad es baja la disipación de energía se logrará de una mejor manera. Las mediciones se realizan a 1.6 y 3.2 m. según el método Wenner que se compone de 4 electrodos, dos de corriente y dos de potencial, este método es el que se especifica en el SOM 3533 de CFE, analizando las mediciones se observa que en la estructura 45 es donde se presenta una mayor resistividad con valores de: 111 [Ω\*m] a los 1.6 m y 85.6 [Ω\*m] a los 3.2 m. En la tabla 7 el promedio de las mediciones de puesta a tierra está por debajo de los 3 ohms, por lo que se concluye que se tiene una puesta a tierra muy buena y adecuada para el paso de la corriente hacia el terreno, esto se debe a que la puesta a tierra de las estructuras que pertenecían a la extinta Luz y Fuerza del Centro se componen de un bajante de tierra a través de la torre conectada por medio de un cable (cola de rata)

a los hilos de guarda, en la parte inferior se conectan cada una de las patas de la torre por medio de un cable a un electrodo central, como se muestra en la figura 13.

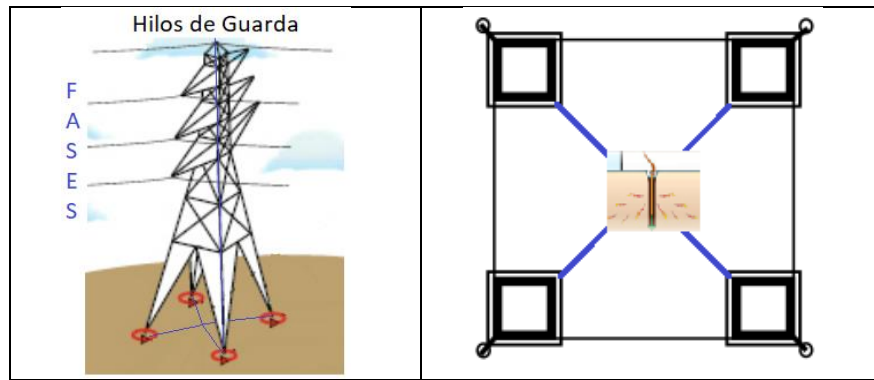


Figura 13. Puesta a tierra de las torres de transmisión, cuentan con una bajante desde el hilo de guarda y una conexión a un electrodo central de cada pata.

### 3.3 Actividad de Descargas Atmosféricas en la Zona de Estudio

Para realizar el análisis de confiabilidad de las líneas ante descargas atmosféricas se requiere tener el número de caídas de rayos a tierra en la zona de la trayectoria que presenta la línea de una subestación a otra. Actualmente existen sistemas de acceso gratuito que muestran información de las zonas con incidencia de descargas en el mundo, a partir de esta información podemos visualizar la cantidad de probables descargas atmosféricas a las que estarán expuestas las estructuras y elementos de las líneas.

Oficialmente, la Norma Mexicana NMX-J-549-ANCE-2005 [9] 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 figura 10. Al realizar la comparación entre la información proporcionada por la norma J-549 y la mostrada por VAISALA [10].

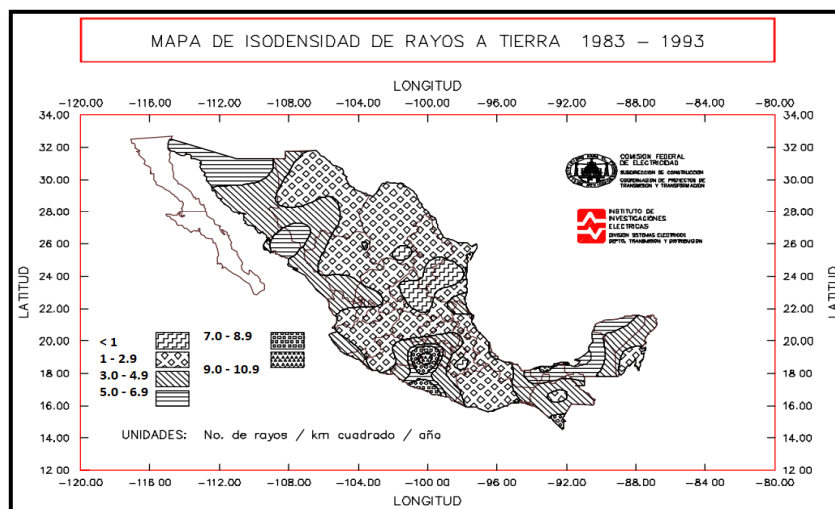


Figura 14. Mapa de la actividad atmosférica por km<sup>2</sup> por año en la República Mexicana (DDT<sup>4</sup>) con un valor en el centro del país entre 7 y 8.9.

#### 3.3.1 Actividad de Descargas Entorno a las líneas.

En la figura 11 se presenta la actividad de rayos que tendrían incidencia en el entorno de las líneas, la información corresponde a lo disponible en el apéndice D de la NMX-J-549-ANCE-2005 en el cual se observa la DRT para cada estado, se revisa la información referente al estado de México.

<sup>4</sup> DDT Densidad de Descargas a Tierra según la NMX-J-549-ANCE-2005.

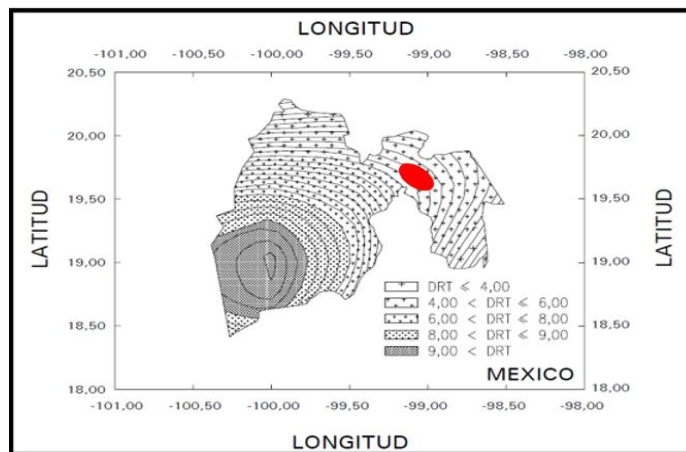


Figura 15. DRT en el estado de México con un valor entre 6 y 8 rayos a tierra por km<sup>2</sup> por año, en el círculo rojo se muestra el área de la trayectoria de las líneas con una longitud de 12 km.

Las líneas CRG-73N40-JMX, JMX-73R60-VDF, CRG-73N50-ISC, VDM-73N80-ISC en 85 kV y en 230 kV la línea VAE-93N30-CRG llevan una trayectoria por la que se tendría un probable número de caídas de descargas al año en un kilómetro cuadrado de entre 6 y 8, cifra mucho menor a la recabada de acuerdo con la información que se proporciona VAISALA donde nos indica que el número probable es de 36, aumento de 400% respecto a la proyectada por el mapa de CFE en el año 2005.

RT	Flameo Inverso	Falla por Blindaje	Total
(ohms)	(FI)	(FB)	FI+FB
	Salidas/año	Salidas/año	Salidas/año
5	0.001715396	0.004604376	0.006319772
10	0.009912182	0.026605756	0.036517938
20	0.046785577	0.125579374	0.172364951
50	0.140463669	0.377025163	0.517488832
100	0.169251295	0.454295389	0.623546684
350	0.176105697	0.472693614	0.648799311

Tabla 8. Índice de salidas por efecto de las descargas atmosféricas para DRT de 8.

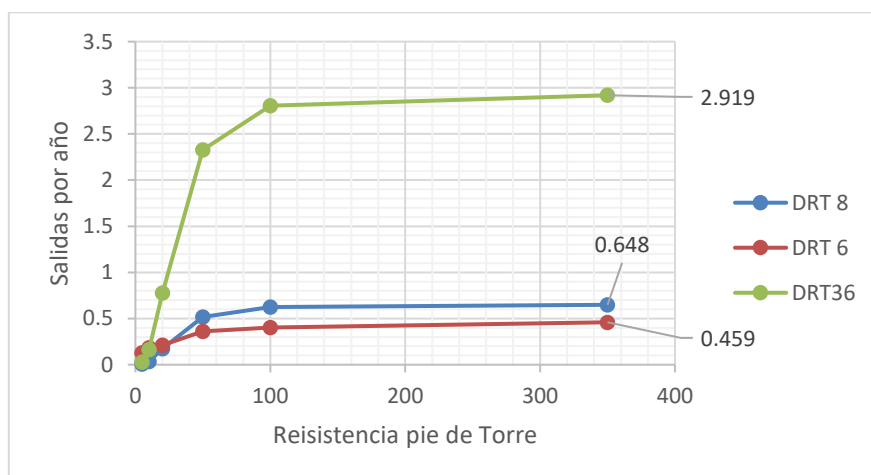


Figura 16. Índice de salidas de línea por efecto atmosférico para 3 diferentes DRT.

En la figura 16 se muestra la tendencia del índice de salidas o disparos de la línea por efecto atmosférico en función de la resistencia al pie de torre, en un rango de valores que va desde los 10 hasta los 350 ohms. En la gráfica se compara el aumento del índice de salidas cuando la DDT es de

6, cuando esta aumenta a 8 y si se llegará a tener un valor de 36 caídas de descargas sobre la línea, lo cual indica la actividad del rayo en la zona por donde cruzan las líneas [11].

### 3.4 Causas de Salidas de 85 kV.

N.	AÑO	LÍNEA	CAUSA
1	2011	73N50	CONTAMINACIÓN
2	2013	73N50	MANIOBRA ERRÓNEA
3	2013	73N80	MANIOBRA ERRÓNEA
4	2018	73N50	AISLADORES
5	2018	73N80	FALLA APARTARRAYOS
6	2019	73N50	FALLAN HERRAJES Y ACCESORIOS

Tabla 9. Salida de las Líneas CRG-73N50-ISC y VDM-73N80-ISC, año 2011 – 2022

La tabla 7 nos muestra las salidas registradas en las líneas de 85 kV del año 2011 al 2022 a cargo de la División Valle de México Norte registradas por el departamento de mantenimiento, se aprecia que las causas que han ocasionado fallas en las líneas de subtransmisión están directamente relacionadas a los elementos que conforman una correcta coordinación de aislamiento como los son los aisladores, apartarrayos, la contaminación, así como los elementos como herrajes y accesorios metálicos, dada la condición de asimetría se ven reflejados en factores que afectan los aislamientos y una correcta disipación de la energía de rayo al incrementar la resistencia que presenta idealmente la estructura.

## 4 CAPÍTULO 4. Simulación del Caso de Estudio

Las líneas transmisión normalmente trabajan en condiciones de régimen permanente lo que se conoce como estado estable o condiciones normales de operación, aunque a veces las circunstancias pueden llegar a ser desfavorables como las que se presentan durante los sobre voltajes ocasionados por causas externas como la caída de descargas atmosféricas, que por cortos periodos de tiempo del orden de micro segundos las afectan (transitorios), por lo que las instalaciones se deben diseñar para soportar o minimizar estas situaciones extraordinarias y puedan no lleguen a sufrir algún tipo de daño que evite continuar con su operación normal. Los sobre voltajes transitorios suceden cuando se excede el nivel de voltaje nominal de operación de la línea o el nivel básico del aislamiento entre una fase y tierra o entre dos fases, después de un corto tiempo el fenómeno desaparece, para estos fenómenos el nivel de amplitud de energía o frente de onda que se manifiesta es muy grande por lo que puede llegar a afectar o deteriorar considerablemente a los elementos como lo son los aislamientos. Se considera la caída de una descarga atmosférica sobre una línea de transmisión, provocando los efectos transitorios propios del fenómeno, se tomarán diferentes magnitudes de rayo para observar el comportamiento del aislamiento. Al tener la particularidad de estar construida con estructuras rediseñadas para alojar multi circuitos con dos niveles diferentes de tensión eléctrica y por lo cual, se cuenta con una coordinación de aislamiento asimétrica, la evaluación de la confiabilidad de estos puntos mencionados, asimetría y niveles de tensión serán los principales puntos de análisis ante descargas atmosféricas y sus efectos. Los fenómenos transitorios ocasionados por rayos se pueden analizar con el método de parámetros distribuidos, esto según la IEC 60071-4.

El modelo de parámetros distribuidos cuyas características son:

- Si importa la distancia entre un elemento y otro
- Si interesa el tiempo en el que se desplaza la energía
- El modelado en el software de los elementos se realiza mediante ecuaciones diferenciales parciales (Tiempo, Distancia).

La utilización de parámetros distribuidos propone segmentar la línea de transmisión y así poder analizar la propagación de la energía a través de ella para diferentes valores de tiempo y en distintos segmentos, el modelo J Martí se basa en la propagación de ondas sin pérdidas, líneas balanceadas y con parámetros de L (inductancia) y C (capacitancia) constantes distribuidos a lo largo de la línea, al tratarse de fenómenos dependientes de la frecuencia el software ATP (Alternative Transients Program) mejor conocido como EMTP ((ElectroMagnetic Transients Program) nos ofrece opciones como éste modelo para realizar nuestro análisis, contempla los siguientes elementos representados por componentes ATP que se encuentran involucrados en los sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas:

- Descarga atmosférica, Hilos de guarda.
- Línea de transmisión, Torre de transmisión, Cadena de aisladores.
- Resistencia de pie de torre

Él software requiere para realizar la simulación diferentes parámetros relacionados a la configuración física y eléctrica.

### 4.1 Modelado de las fuentes de voltaje y corriente.

En el software ATP se modelan tres fuentes trifásicas de voltaje, 1 de 230 kV y 2 de 85 kV con una frecuencia fundamental del sistema de 60 Hz que es la que se maneja en nuestro país, para representar cada una de las tensiones de las líneas en las estructuras multi circuitos en estudio.

Para representar la descarga atmosférica que se caracteriza por la presencia de una onda de corriente de alta magnitud, pero de corta duración, se representa por una fuente de corriente. La fuente de corriente que se puede utilizar en ATP es la Heidler, pues, es la fuente que se ajusta con mayor

exactitud a la forma de onda de corriente propuesta por la norma IEC 61-1, está dada por las magnitudes de corriente pico o máxima con un valor de 40 kA, constantes de tiempo Tau de frente de onda, Tau1 tiempo de cola en donde la duración de la descarga decae hasta a un 37% de su valor pico y su representación se muestra en la figura 12.

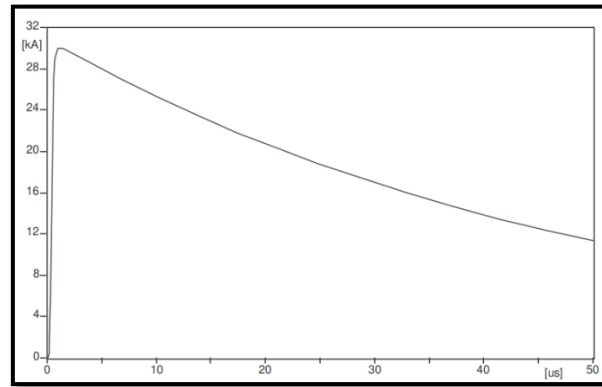


Figura 17. Forma de onda Heidler valor máximo (cresta) en 1.2  $\mu$ s y decae a un 37% de su valor total a los 50  $\mu$ s.

Los valores de acuerdo con IEC 61-1 [12] para la onda de corriente que se utilizarán:

- $T=1.2 \mu$ s y  $4.2 \mu$ s
- $T2= 50 \mu$ s
- Valor pico o de cresta= 8, 28, 80, 100 y 200 kA.

Una vez que la descarga golpea la torre o el hilo de guarda se requiere simular un cortocircuito (o descarga disruptiva) provocado por el rayo, la norma IEC 60071-4 “Guía computacional para la coordinación y modelado de aislamiento de redes eléctricas” menciona que se puede modelar mediante un cortocircuito con un interruptor de cierre controlado por voltaje.

#### 4.2 Modelado de la Torre multi circuitos.

En el modelado de la línea se realiza mediante la subrutina LCC (Line Constants) este elemento nos proporciona los parámetros de las líneas de transmisión y cables, para obtenerlos se toman los datos característicos de los conductores de fase y guarda de los estudios preliminares, los cuales deben de ser colocados en la pestaña data de la subrutina, los datos que se piden son: diámetro interior y exterior, resistencia eléctrica en corriente directa por unidad de longitud, número de conductores por fase, distancias horizontales y verticales que guardan cada uno de los conductores respecto al eje vertical del centro de la estructura, en este punto es donde se reflejará la asimetría al tener los circuitos diferentes voltajes entre ellos, respecto a los conductores del hilo de guarda en ATP se deben de considerar como una fase más para realizar el estudio.

Se simula el impacto directo de una descarga atmosférica en una de las torres, el modelado se procede a realizar mediante la técnica de estructura tipo multi pisos, los pisos representan cada una de las diferentes secciones de la torre por las que se propagará la descarga representada por las crucetas que soportan los conductores de fase, así como las crucetas de los hilos de guarda. Cada sección consiste en una impedancia de sobre tensión en serie con un circuito en paralelo R-L, para obtener los valores de Z, R y L se utilizan los radios de las diferentes partes de la torre figura 4.2 Modelo Multi pisos [12] tomando en cuenta las constantes de atenuación y amortiguación, multi piso se basa en el modelo cónico sin pérdidas el cual nos proporciona una impedancia constante de acuerdo con la geometría obteniéndose una impedancia característica de la torre de  $Z=199.25$  Ohms. Tomando la altura total de la estructura y cada una de las posiciones de las crucetas de los conductores tanto de fase como de guarda, obtenemos como resultado 9 pisos para nuestro modelo en los que queda representado la asimetría geométrica de los circuitos motivo de este estudio.

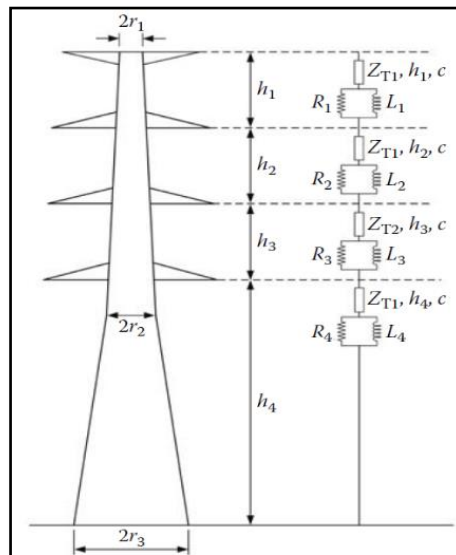


Figura 18. Modelo de varios pisos de una torre de transmisión. (De Ishii, M. et al., IEEE Trans. Power Deliv., 6, 1327, julio de 1991; Yamada, T. y col., IEEE Trans. Power Deliv., 10, 393, enero de 1995.)

### 4.3 Golpe de rayo y cadena de aisladores.

Para simular el golpe de un rayo en ATP se modela mediante un interruptor ideal controlado por tiempo, esto es, se crea un corto circuito (una descarga disruptiva) al pasar el interruptor de una condición de contactos abiertos lo cual simula una resistencia infinita a una condición de conducción o interruptor con contactos cerrados, se coloca el voltaje de flameo ( $V_{fl}$ ) para nuestro caso de estudio de 230 kV de 754.65 kV y para 85 kV de 368 kV. Al considerar la posibilidad de que una descarga pase a través de los aisladores en ATP se puede utilizar un modelo como el de la figura 2.4 para modelar la cadena de aisladores en base a su longitud, en base a la gráfica 2.3 de descarga Voltaje - Tiempo en base a “a simplified method for estimating lightning performance of transmission lines de la IEEE”, la curva representa la Resistencia del aislamiento ante un impulso por rayo estandar de 1.2/50 micro segundos hasta el flashover para una cadena de aisladores menor a 3 m, el cual es nuestro caso, ya que la cadena de aisladores para la línea de 230 en su lado más largo mide 2.48 m. y para las cadenas de 85 kV es de 1.5 m.

	<p><b>Interruptor ideal controlado por voltaje.</b></p> <p>La distancia en aire, una vez que se ha verificado la condición de flameo, se puede representar mediante un interruptor ideal que se cierra en un paso de tiempo de acuerdo a un voltaje crítico.</p>
--	--

Tabla 10. Modelo de ATP elementos para simulación de cadena de aisladores.

### 4.4 Puesta a tierra

De acuerdo con las pruebas realizadas en campo por medio del método wenner y caída de potencial donde se obtuvieron los datos de resistividad y resistencia de puesta a tierra que se muestran en la tabla 6, se utilizan los valores más altos para considerar la escena más crítica en donde la resistencia y resistividad puedan influir en la no disipación de la corriente en el terreno y por lo tanto ocasionar un regreso por medio de las estructuras pudiendo ocasionar un daño en los aislamientos por la elevada tensión y flujo de corriente.

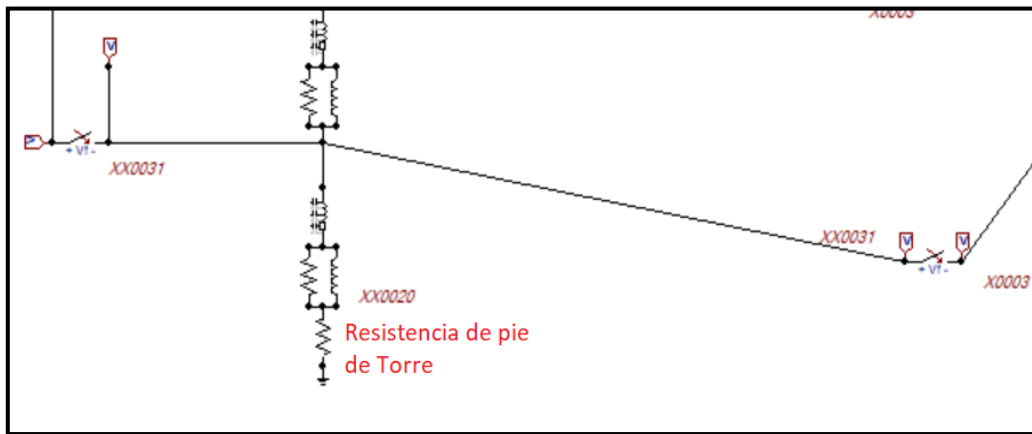


Figura 19. Figura Resistencia de pie de Torre.

#### 4.5 Simulación y Resultados.

Se realizaron las simulaciones para diferentes escenarios por posible riesgo de golpe de rayo en los hilos de guarda dada la probabilidad de caída que se presenta en la zona, teniendo como objetivo el análisis de los diferentes niveles de aislamiento y su comportamiento ante las sobretensiones que se presentan sobre ellos y así poder establecer recomendaciones en caso de requerirse, además de tener la referencia para éste tipo de casos y poder generalizarlos en cualquier línea o sistema al que pueda ser aplicable a este tipo de configuraciones particulares. En la figura 16 se muestra el esquema general en ATP de las líneas de transmisión dada la configuración geométrica y su modelado multi piso de la torre.

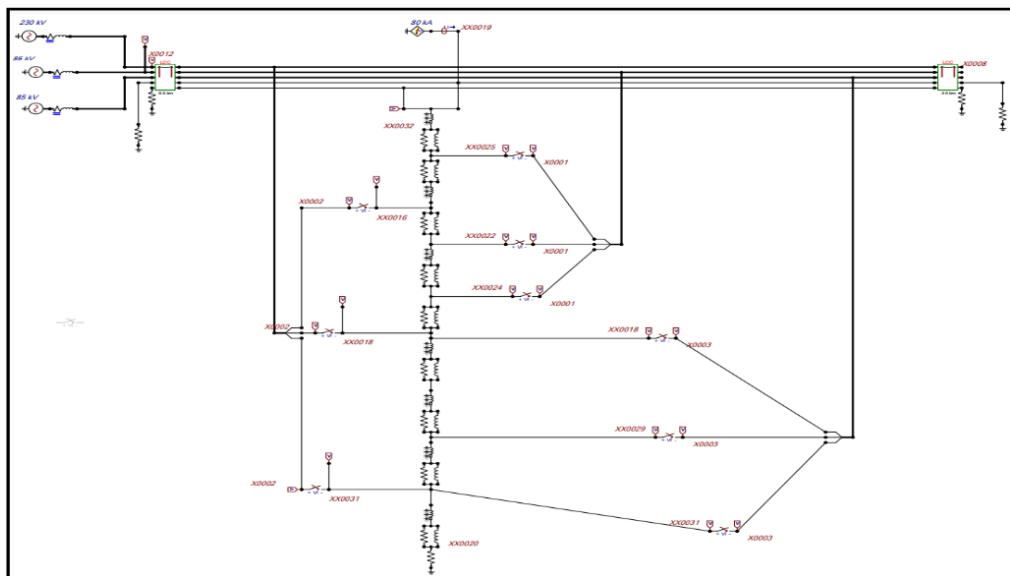


Figura 20. Esquema de las líneas en ATP con fuente de corriente de 80 kA.

CIRCUITOS	C 1 85 [kV]	C 2 230 [kV]	C 3 85 [kV]
BIL	550	950	550
d [m] Distancia en aire	1.022	2.48	1.022
TCF	429.24	907.2	429.24

Tabla 11. Voltajes de referencia para análisis de flameo en las cadenas de aisladores.

En la tabla 10 se muestran los valores corregidos por altura para el voltaje o tensión crítica de flameo (TCF) de acuerdo con las distancias en aire y condiciones atmosféricas existentes en la trayectoria de las líneas de acuerdo con la expresión (1) tomando en consideración que para los circuitos de 85 [kV] se tienen 7 aisladores de vidrio y para el circuito de 230 [kV] 17 aisladores.

#### 4.5.1 Caso 1. Golpe en Hilos de Guarda con resistencia de puesta a tierra de 5 Ohms

##### 4.5.1.1 Corriente de rayo de 8 kA.

Las siguientes gráficas muestran que tras ocurrir un golpe de rayo sobre los hilos de guarda de la estructura con una magnitud de corriente de 8 kA y una resistencia de puesta a tierra de 5 Ohms, se tiene la presencia de transitorios los cuales producen sobretensiones que no son lo suficientemente grandes para ocasionar una falla en el aislamiento, los efectos sobre los circuitos se minimizan respecto al paso del tiempo, se estima que dicho efecto tiene una duración de 1 [ms] para esta simulación y después de este lapso el aislamiento muestra una recuperación, la figura 20 muestra los efectos del voltaje sobre los circuitos de 85 kV en estudio, se indica la fase con mayor aumento de potencial.

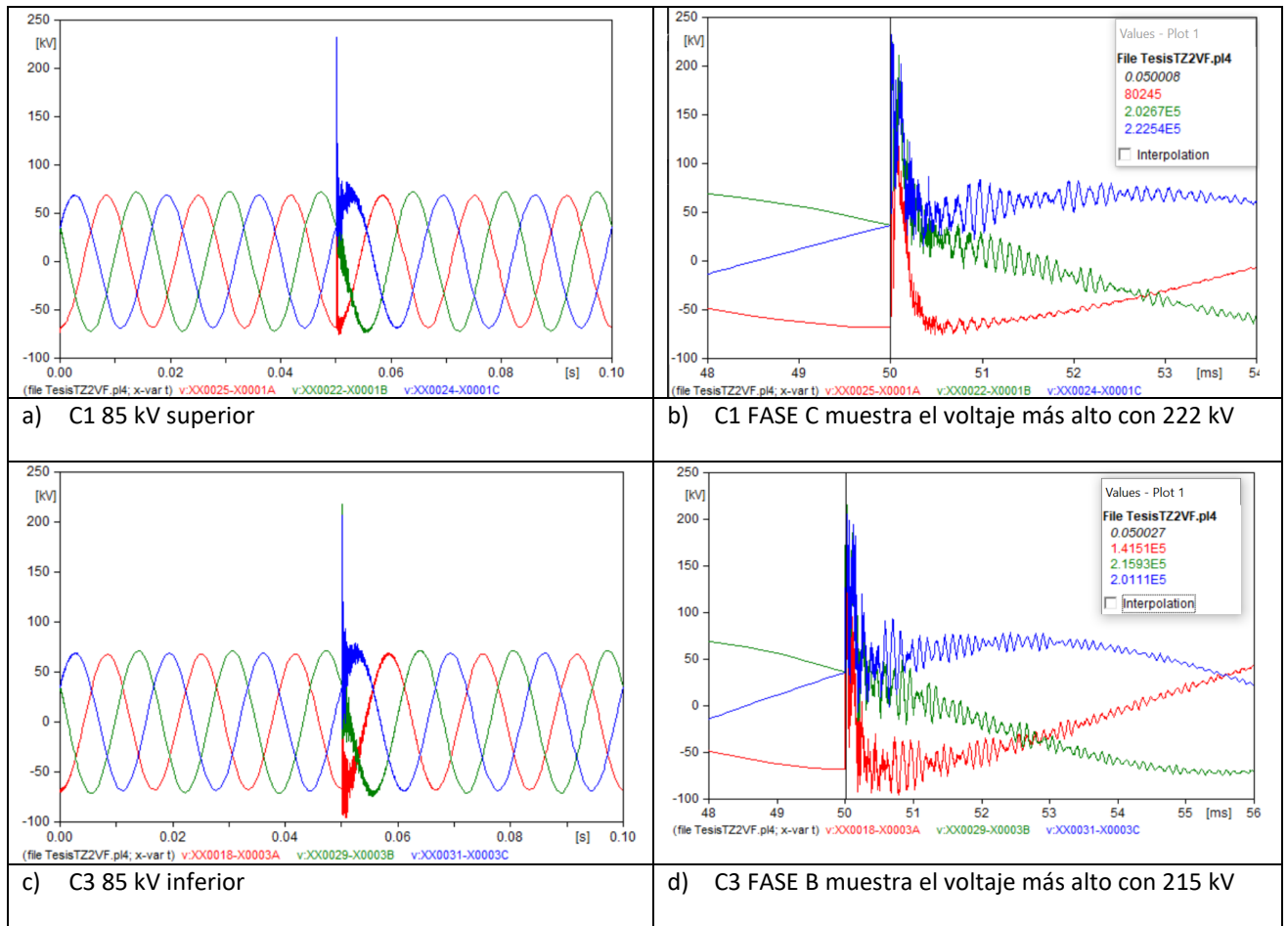
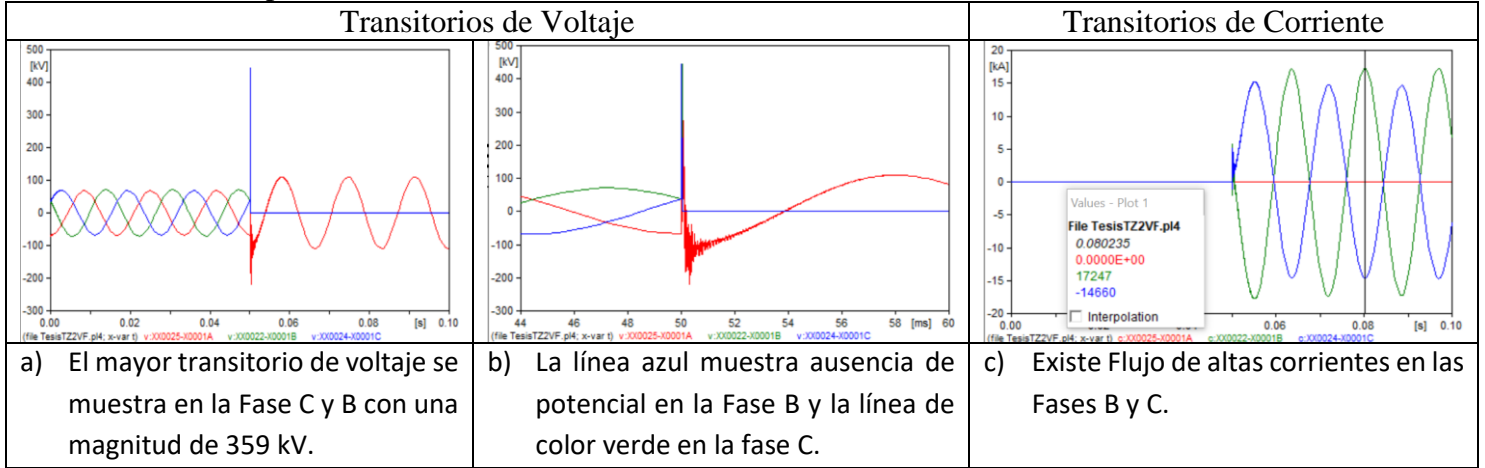


Figura 21. Transitorios de voltaje y corriente al golpear un rayo sobre los hilos de guarda, a) Circuito Superior de 85 kV, b) Fase con mayor aumento de potencial en circuito superior, c) Circuito inferior de 85 kV d) Fase con mayor aumento de potencial en circuito inferior.

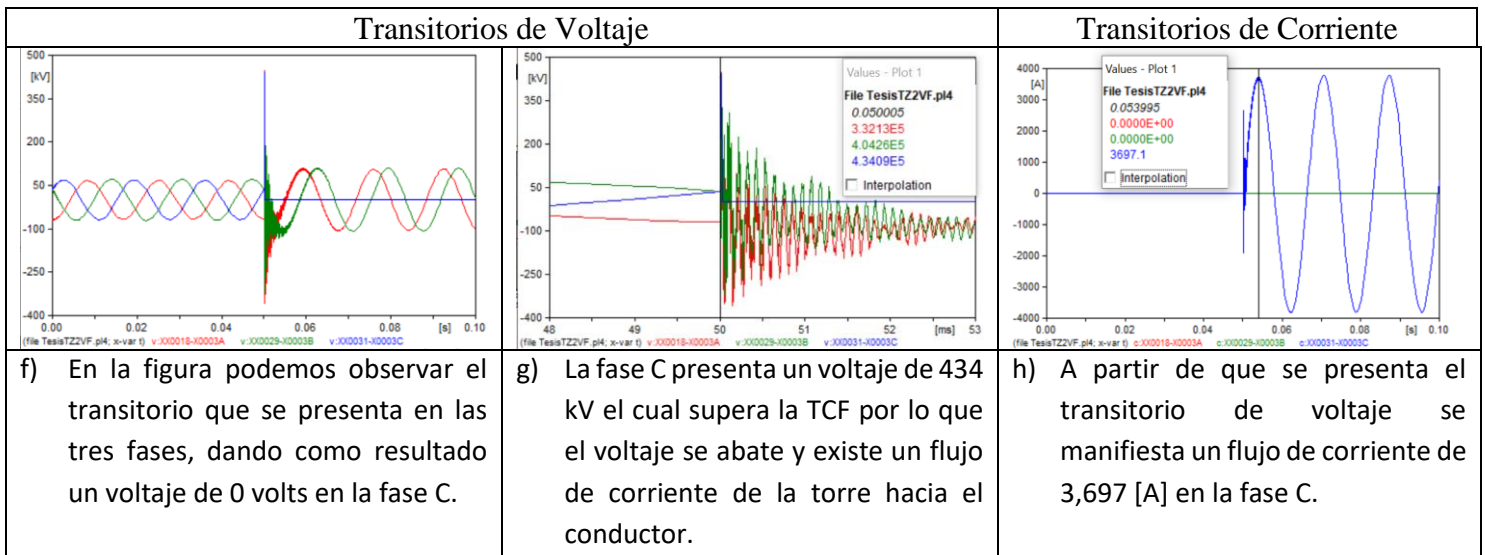
En la figura a) se muestra el circuito superior C1 de 85kV el cual presenta un pico de voltaje positivo en color azul correspondiente a la fase C, en la figura b) indica el valor de la sobre tensión sobre la fase C con un valor de 222 kV, lo que indica que se encuentra 51% por debajo del valor crítico de flameo, el mismo caso tenemos en el circuito inferior en donde la fase B de la figura c) se observa una sobre tensión de 215 kV, con este nivel de voltaje no existe una corriente que ocasione el flameo en las cadenas de aisladores en los dos circuitos de 85 kV que tienen un nivel más bajo de aislamiento.

4.5.1.2 Caso 2. Corriente de rayo de 28 kA

Circuito Superior de 85 kV.

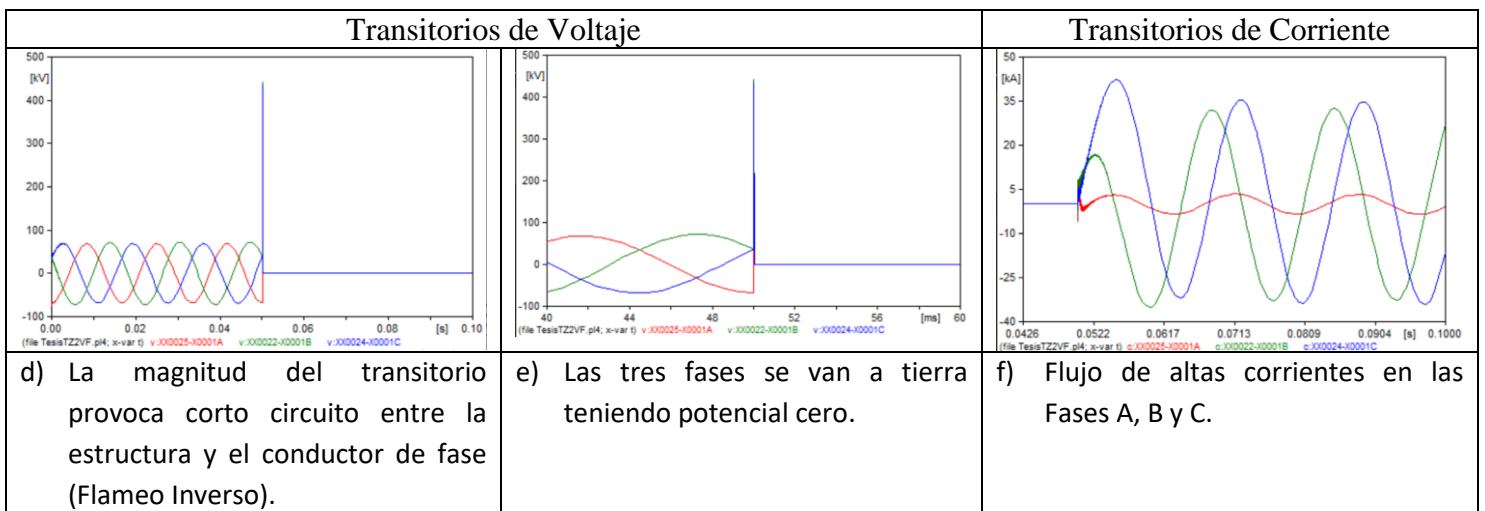


Circuito Inferior de 85 kV.

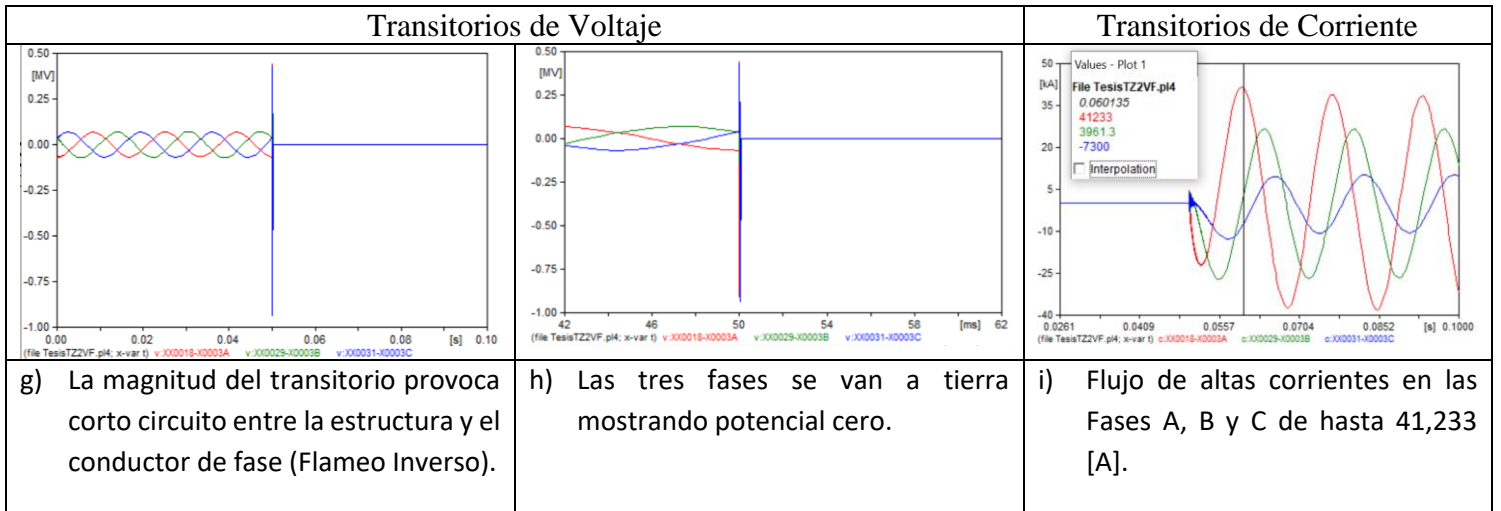


4.5.1.3 Caso 3. Corriente de rayo de 80 kA

Circuito Superior de 85 kV.



Circuito Inferior de 85 kV.



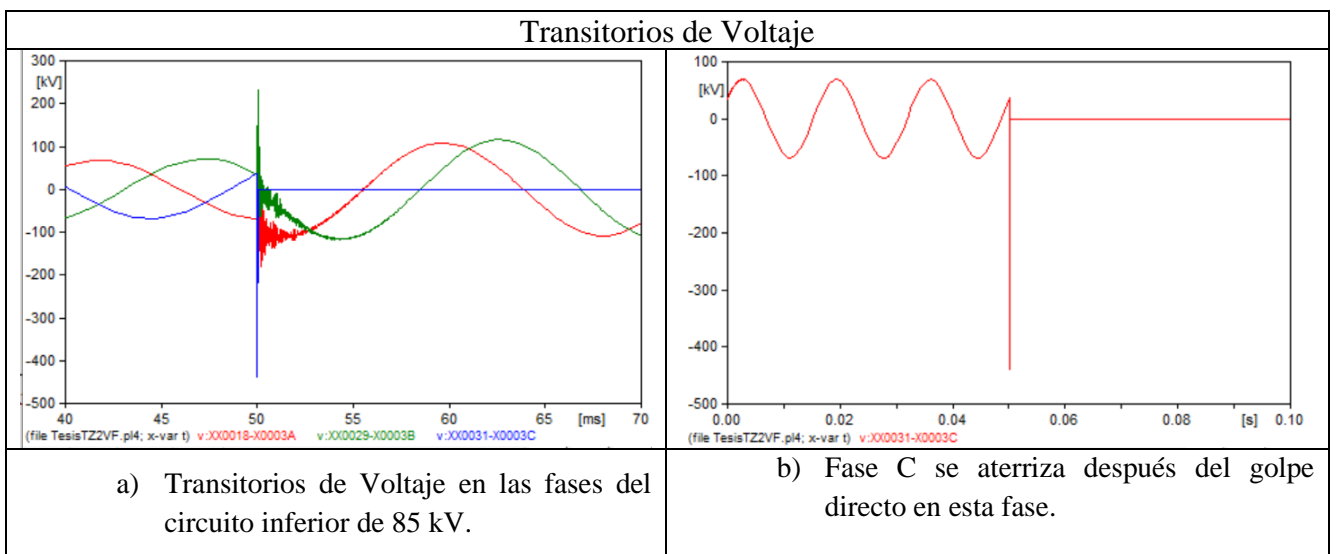
Caso N.	Rayo	Circuito Superior 85	Circuito Inferior 85	Flujo de Corriente
	Magnitud de Corriente [kA]	Voltaje más alto presente [kV]	Voltaje más alto presente [kV]	Circuito en el que se presenta flujo de corriente
1	8	222	215	No presenta
2	28	359	434	En al menos una fase de los 2 circuitos de 85 kV
3	80	450	-900	Flameo en las 3 fases de los dos circuitos

Tabla 12. Resultados de la simulación por golpe en hilos de guarda para diferentes magnitudes de rayo.

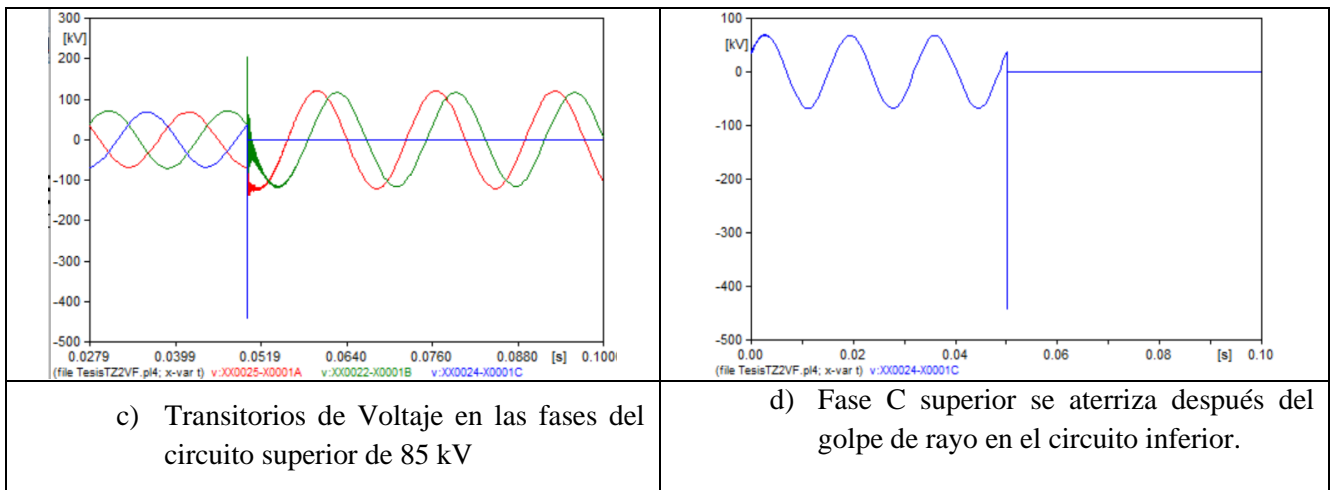
4.5.2 Caso 4. Golpe directo en conductores de la Fase C del Circuito inferior de 85 kV.

4.5.2.1 Corriente de rayo de 8 kA.

Se considera el golpe directo en la fase C del circuito inferior de 85 kV, ya que, en la simulación anterior era el más propenso a presentar flameo ante una descarga en los hilos de guarda.

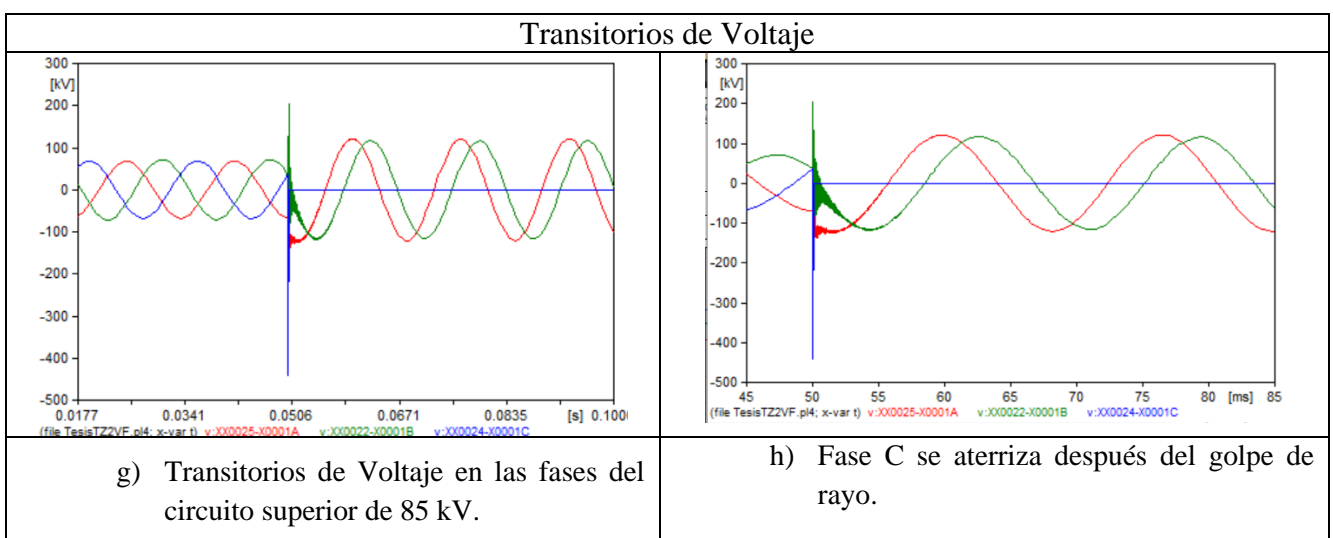
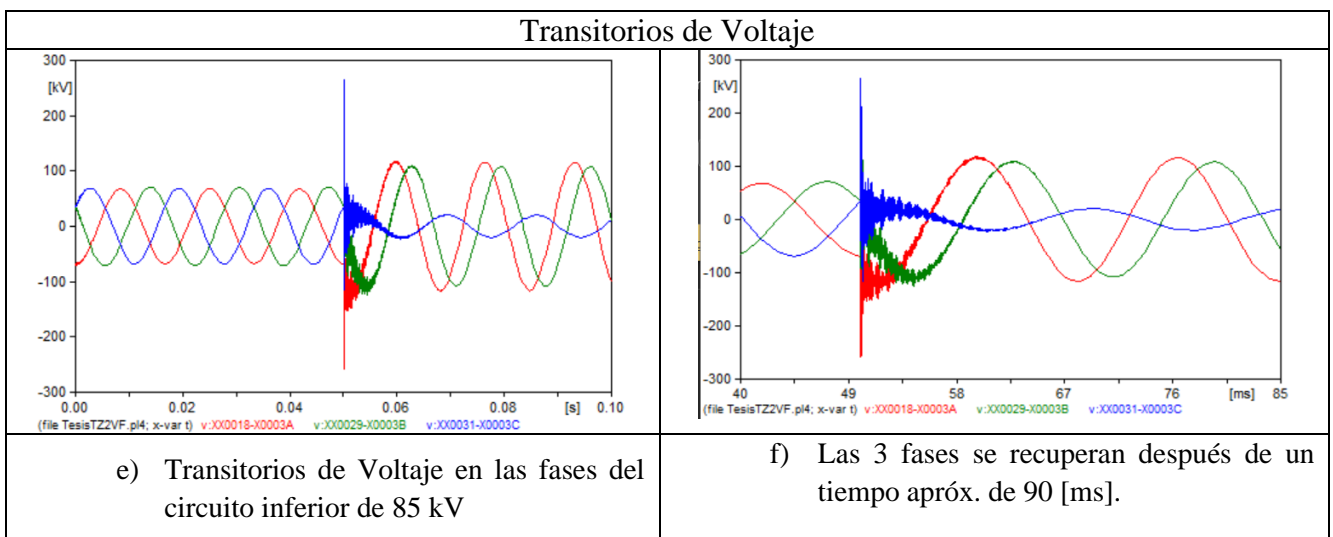


Transitorios de Voltaje

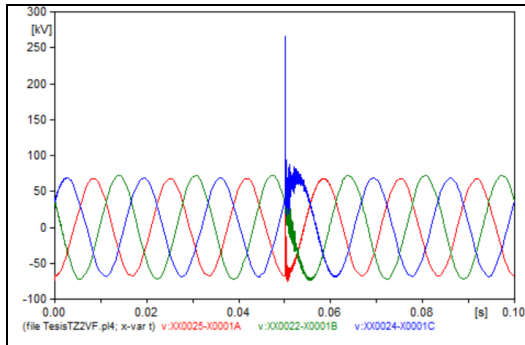


#### 4.5.2.2 Golpe en Circuito Superior fase C con una corriente de rayo de 8 kA.

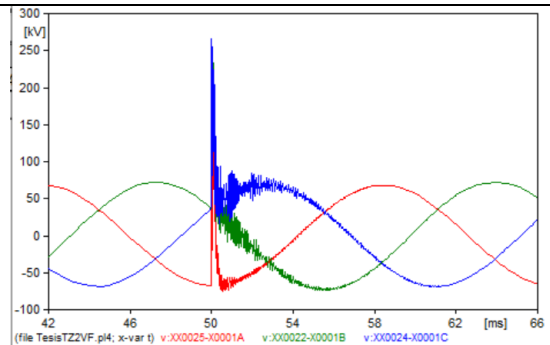
Se considera el golpe directo en la fase C del circuito superior de 85 kV, ya que, en la simulación anterior era el más propenso a presentar flameo ante una descarga en los hilos de guarda.



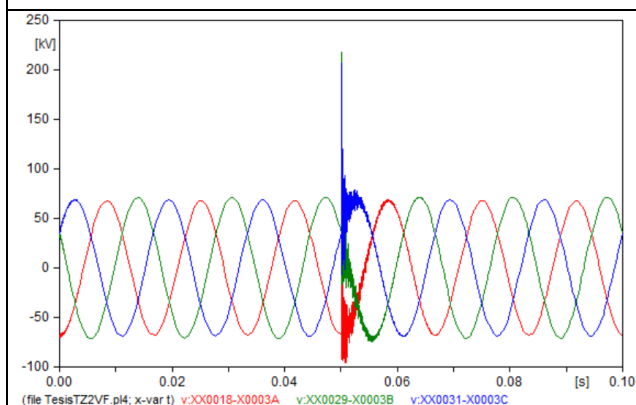
4.5.3 Caso 5. Golpe en Hilos de guarda con resistencia de puesta a tierra de 20 Ohms y 8 kA de corriente de rayo.



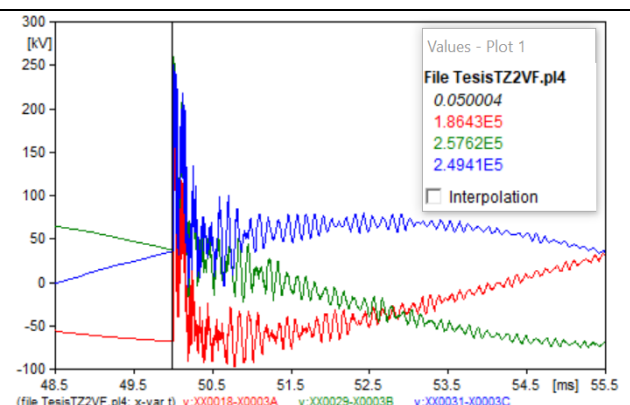
a) Transitorios de voltaje en el Circuito inferior 85 kV.



b) La Fase C muestra el voltaje más alto con 264 kV, aunque el aislamiento de las 3 fases se logra recuperar.

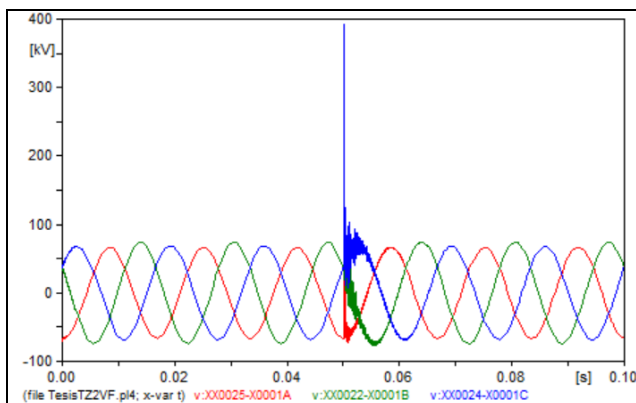


c) Transitorios de voltaje en el Circuito superior 85 kV.

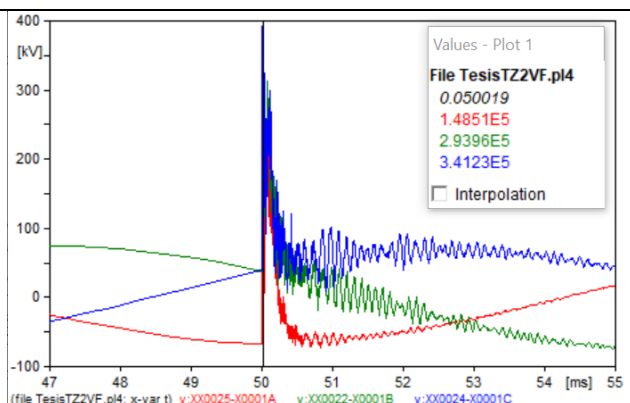


d) La Fase B muestra el voltaje más alto con 257 kV, los aislamientos logran recuperarse en las 3 fases.

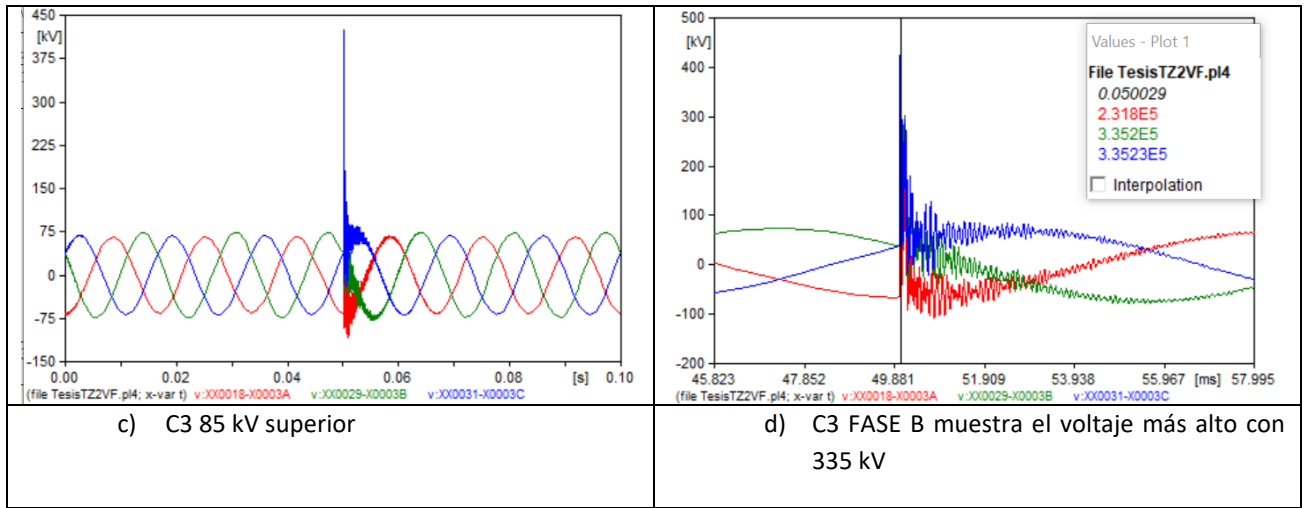
4.5.4 Caso 6. Golpe en Hilos de guarda con resistencia de puesta a tierra de 100 Ohms y 8 kA de corriente de rayo..



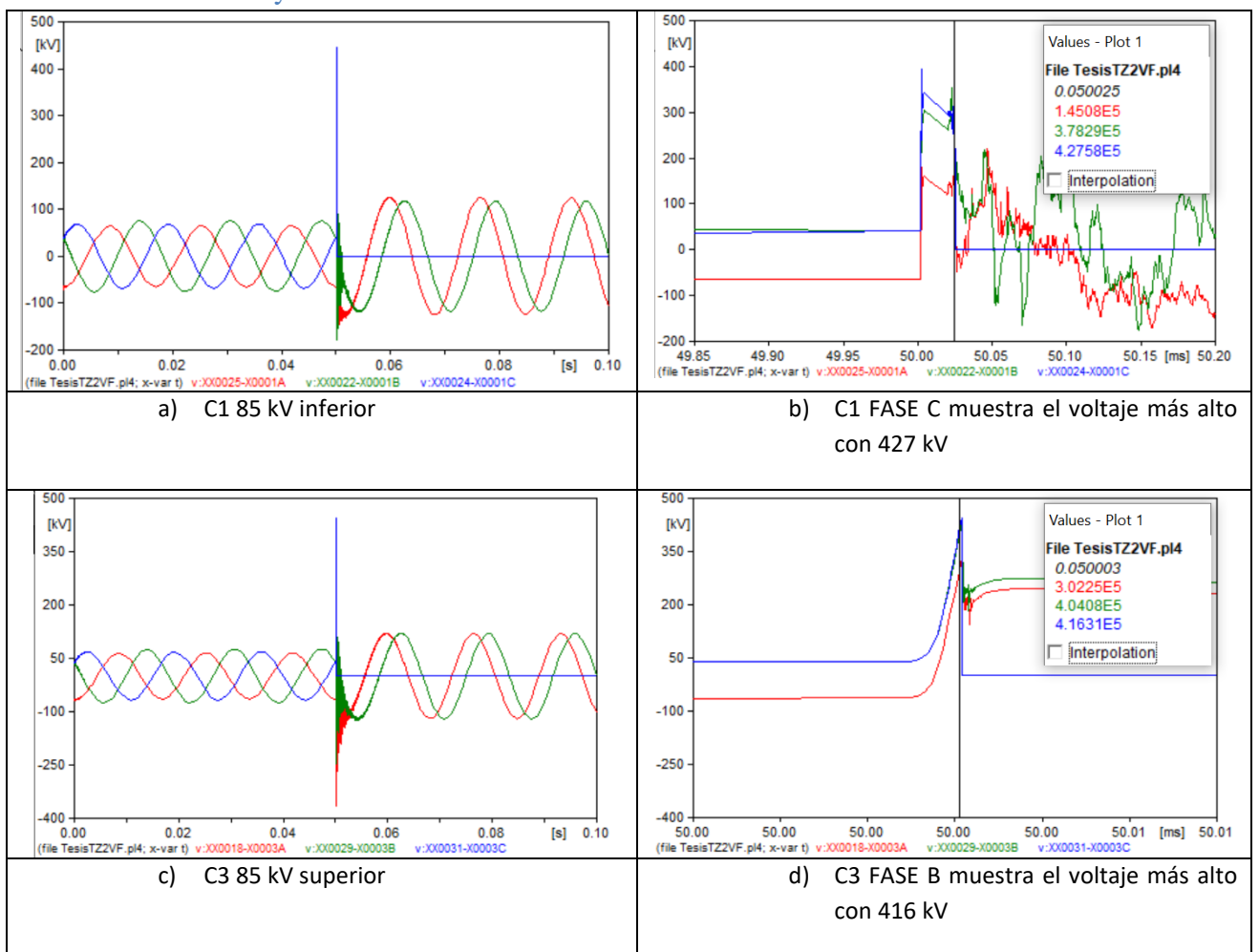
a) Transitorios de voltaje en el Circuito inferior 85 kV.



b) C1 FASE C muestra el voltaje más alto con 341 kV



4.5.5 Caso 7. Golpe en Hilos de guarda con resistencia de puesta a tierra de 350 Ohms y 8 kA de corriente de rayo.



4.5.6 Resumen de Resultados.

Golpe en Hilos de Guarda			
Resistencia [Ω]	Corriente de Rayo [kA]	Flameo C1 Superior 85 kV	Flameo C2 Inferior 85 kV
5	8	NO	NO
5	28	Fase B y C	Fase C
5	80	Las 3 fases se aterrizan	Las 3 fases se aterrizan

Para resistencias de puesta a tierra bajas como lo son 5 ohms, con una corriente de rayo de 28 kA que impacte sobre el hilo de guarda las cadenas de aislamiento presentarán flameo.

<b>Golpe directo en conductores de la Fase C del Circuito inferior de 85 kV</b>			
Resistencia [Ω]	Corriente de Rayo [kA]	Flameo C1 Superior 85 kV	Flameo C2 Inferior 85 kV
5	8	FASE C	FASE C

Si el blindaje de las estructuras falla y golpea la fase del circuito inferior, aún con resistencias bajas y una corriente de 8 kA las fases inferiores de los dos circuitos presentarán falla. La fase inferior es la más alejada del radio de atracción del hilo de guarda.

<b>Golpe directo en conductores de la Fase C del Circuito superior de 85 kV</b>			
Resistencia [Ω]	Corriente de Rayo [kA]	Flameo C1 Superior 85 kV	Flameo C2 Inferior 85 kV
5	8	Fase C	No presenta

Para el caso de falla de blindaje y golpe en la Fase C del circuito superior este presentará falla, aunque el circuito inferior no presenta flameo.

<b>Golpe en Hilos de Guarda</b>			
Resistencia [Ω]	Corriente de Rayo [kA]	Flameo C1 Superior 85 kV	Flameo C2 Inferior 85 kV
20	8	NO	NO
100	8	NO	NO
350	8	Fase C	Fase C

Se observa que se deben de tener altas resistencias de puesta a tierra para que con una magnitud de rayo de 8 kA pueda existir algún flameo en los circuitos de 85 kV.

#### 4.5.7 Coordinación de Aislamiento para estructura multi circuitos 230 y 85 kV.

La coordinación de aislamiento para líneas aéreas por incidencia de rayos depende principalmente de los factores [13]:

- Densidad de los rayos a tierra
- La altura de las líneas aéreas
- La protección con hilos de guarda
- La resistencia a tierra de la torre
- La rigidez dieléctrica del aislamiento

La siguiente tabla de la CFE L0000-41 nos muestra la relación que tiene la Tensión de Aguante Nominal de Impulso por rayo con la distancia en aire que se debe cada uno de los sistemas de 85 y 230 kV, de esta manera se tiene una referencia para comparar los resultados obtenidos en los siguientes cálculos de coordinación de aislamiento para las dos tensiones en las estructuras asimétricas.

Relación entre las tensiones de aguante nominales de impulso por rayo (NBAI) kV fase-tierra y fase-fase con las distancias mínimas en aire

Tensión de aguante nominal de impulso por rayo (NBAI) (KV)	Distancia mínima en aire (m)
20	0.060
40	0.060
60	0.090
75	0.120
95	0.160
110	0.167
125	0.220
150	0.300
200	0.380
250	0.480
325	0.630
350	0.680
450	0.900
550	1.100
650	1.300
750	1.500
850	1.700
900	1.800
950	1.900
1 050	2.100
1 175	2.350
1 300	2.600
1 425	2.850

Tabla 13. NBAI y distancia mínima en aire, en rojo para el sistema en 85 kV y en verde para 230 kV.

En las líneas en estudio se tienen aisladores de vidrio 25SVC111C con una distancia mínima de fuga de 320 mm y las siguientes características [14].



Figura 22. Características de los aisladores de vidrio. 25–Diámetro del disco, S–Suspensión, V–Material vidrio, C–Acoplamiento calavera, 111–Resistencia mecánica, C–Corrosión.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la coordinación de aislamiento para la estructura asimétrica en estudio en el sistema de 85 kV [15].

Incidencia de Rayos a Tierra			
a.	Radio Crítico de Atracción	Rcr=	43.37 metros
b.	Densidad de Rayos a Tierra	Ng=	2.02
c. Número de descargas que inciden en una línea de alta tensión		Nt=	19.04
d. Impedancia Transitoria de Cables de Blindaje, Conductores, Torres y Puestas a Tierra		Zt=	508.37 Ω
Cálculo de Ángulo de Blindaje			
e.	Valor del claro del hilo de guarda	fg=	2 metros
f.	Valor del claro del conductor de la fase superior	fc=	3.00 metros
g.	Altura del cable de guarda en el punto medio	H=	36.91 metros
h.	Altura del conductor de fase en el punto medio	hm=	33.4 metros
i.	Distancia Vertical de guarda a fase a medio claro	b=	3.51 metros
j.	Ángulo de blindaje del hilo de guarda	α=	31.75 grados
Determinación de la cadena de aisladores			
k.	Tensión Crítica de Flameo TCF (U <sub>50%</sub> ) - sin factor por herrajes	TCF=	572.32 kV
l.	Tensión Crítica de Flameo TCF (U <sub>50%</sub> ) - CON factor por herrajes	TCF=	600.94 kV
m.	Distancia mínima requerida de fase a tierra	D=	1.09 metros
n.	Corrección de la TCF por presión atmosférica	TCFc=	796.88 kV
ñ.	Distancia mínima requerida de fase a tierra Corregida por la presión atmosférica	Dc=	1.45 metros
o.	Cantidad de Aisladores Propuestos	#ais=	8 aisladores

<b>Selección de Apartarrayos de Línea</b>			
p.	Tensión máxima de Operación Continua (MCOV) - Calculada	Vc=	71.01 kV
q.	Tensión máxima de Operación Continua (MCOV) - Obtenida por especificación CFE-VA410	Vcnorma=	70 kV
r.	Tensión nominal del apartarrayos - Calculada	Vnappt=	68.70 kV
s.	Tensión nominal del apartarrayos - Obtenida por especificación CFE-VA410-17	Ur=	90 kV
t.	Tensión Residual Máxima del Apartarrayos - Obtenida por especificación CFE-VA410-17	Ures=	222 kV
u.	Distancia de fuga mínima del apartarrayos	Dfuga=	1226.87 mm
<b>Instalación de Contraantenas</b>			
v.	Longitud de contraantenas (4 piezas)	longitud=	3 metros
w.	Número de electrodos por contraantenas	# electro=	1 piezas

La elección del aislamiento de acuerdo a las condiciones de contaminación alta, la tabla 5 nos indica una distancia de fuga de 25 mm / kV por lo que para 85 kV se requiere una distancia de:

$$\frac{25 \text{ mm}}{\text{kV}} \times 85 \text{ kV} = 2,125 [\text{mm}]$$

Por lo que se requieren un total de aisladores 25SVC111C

$$\frac{2,125 \text{ mm}}{320 \text{ mm}} = 6.64 \text{ aisladores}$$

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la coordinación de aislamiento para la estructura asimétrica en estudio en el sistema de 230 kV.

<b>Incidencia de Rayos a Tierra</b>			
a.	Radio Crítico de Atracción	Rcr=	43.37 metros
b.	Densidad de Rayos a Tierra	Ng=	2.02
c.	Número de descargas que inciden en una línea de alta tensión	Nl=	19.04
d.	Impedancia Transitoria de Cables de Blindaje, Conductores, Torres y Puestas a Tierra	Zt=	508.37 Ω
<b>Cálculo de Ángulo de Blindaje</b>			
e.	Valor del claro del hilo de guarda	fg=	2 metros
f.	Valor del claro del conductor de la fase superior	fc=	3.00 metros
g.	Altura del cable de guarda en el punto medio	H=	36.91 metros
h.	Altura del conductor de fase en el punto medio	hm=	33.4 metros
i.	Distancia Vertical de guarda a fase a medio claro	b=	3.51 metros
j.	Ángulo de blindaje del hilo de guarda	α=	53.27 grados
<b>Determinación de la cadena de aisladores</b>			
k.	Tensión Crítica de Flameo TCF (U <sub>50%</sub> ) - sin factor por herrajes	TCF=	988.55 kV
l.	Tensión Crítica de Flameo TCF (U <sub>50%</sub> ) - CON factor por herrajes	TCF=	1037.98 kV
m.	Distancia mínima requerida de fase a tierra	D=	1.89 metros
n.	Corrección de la TCF por presión atmosférica	TCFc=	1376.42 kV
ñ.	Distancia mínima requerida de fase a tierra Corregida por la presión atmosférica	Dc=	2.50 metros
o.	Cantidad de Aisladores Propuestos	#ais=	15 aisladores

<b>Selección de Apartarrayos de Línea</b>			
p.	Tensión máxima de Operación Continua (MCOV) - Calculada	Vc=	141.45 kV
q.	Tensión máxima de Operación Continua (MCOV) - Obtenida por especificación CFE-52100-	Vcnorma=	154 kV
r.	Tensión nominal del apartarrayos - Calculada	Vnappt=	185.91 kV
s.	Tensión nominal del apartarrayos - Obtenida por especificación CFE-53100-93	Ur=	192 kV
t.	Tensión Residual Máxima del Apartarrayos - Obtenida por especificación CFE-52100-93	Ures=	535 kV
u.	Distancia de fuga mínima del apartarrayos	Dfuga=	3319.76 mm
<b>Instalación de Contraantenas</b>			
v.	Longitud de contraantenas (4 piezas)	longitud=	3 metros
w.	Número de electrodos por contraantenas	# electro=	1 piezas

De los cálculos anteriores se tienen obtuvieron los valores para la especificación de apartarrayos para las líneas de 85 kV y 230 kV, esto con la finalidad de poder cumplir con una correcta coordinación de aislamiento y poder reducir las ondas de voltaje que se lleguen a presentar por la caída de descargas atmosféricas y evitar las salidas por estas condiciones.

#### 4.5.8 Elección del aislamiento por las condiciones de contaminación.

De acuerdo con la tabla 5 tenemos una distancia de fuga de 25 [mm/kV] para alta contaminación por lo que para 230 kV se requiere una distancia de:

$$\frac{25 \text{ mm}}{\text{kV}} \times 230 \text{ kV} = 5,750 \text{ [mm]}$$

Por lo que se requieren un total de aisladores 25SVC111C

$$\frac{5,750 \text{ mm}}{320 \text{ mm}} = 17.9 \text{ aisladores}$$

Dado que el número de aisladores por la característica de contaminación requeridos es mayor al calculado por la distancia en aire se propone utilizar otro tipo de aislador con una distancia de fuga mayor, por ejemplo, el aislador 28SVC111CC con una distancia de fuga de 445 mm y una característica CC que además de resistencia a la corrosión se utiliza para zonas de alta contaminación.

Descripción corta		25SVC111C	28SVC111CC
Tensión de flameo a 60 Hz	En seco (kV)	85	100
	En húmedo (kV)	50	60
Tensión crítica de flameo al impulso polaridad	Positivo (kV)	125	146
	Negativo (kV)	130	152
Tensión de radio interferencia	Tensión de prueba a 60 Hz (kV)	10	10
	Tensión máxima a 1 MHz (µV)	26	8
Resistencia mecánica (kN)		120	147
Resistencia al impacto (N-m)		10	10
Carga mecánica de rutina 3 segundos (kN)		55.5	55.5
Diámetro nominal (mm)		254	280
Espaciamento		146	146
Distancia mínima de fuga (mm)		320	445

Figura 23. Tabla comparativa entre aisladores 25SVC111C y 28SVC111CC

Por lo que el número de discos para 85 [kV] y 230 [kV] serían respectivamente:

Sistemas de 85 [kV]

$$\frac{2,125 \text{ mm}}{445 \text{ mm}} = 4.7 \text{ aisladores}$$

Sistema de 230 [kV]

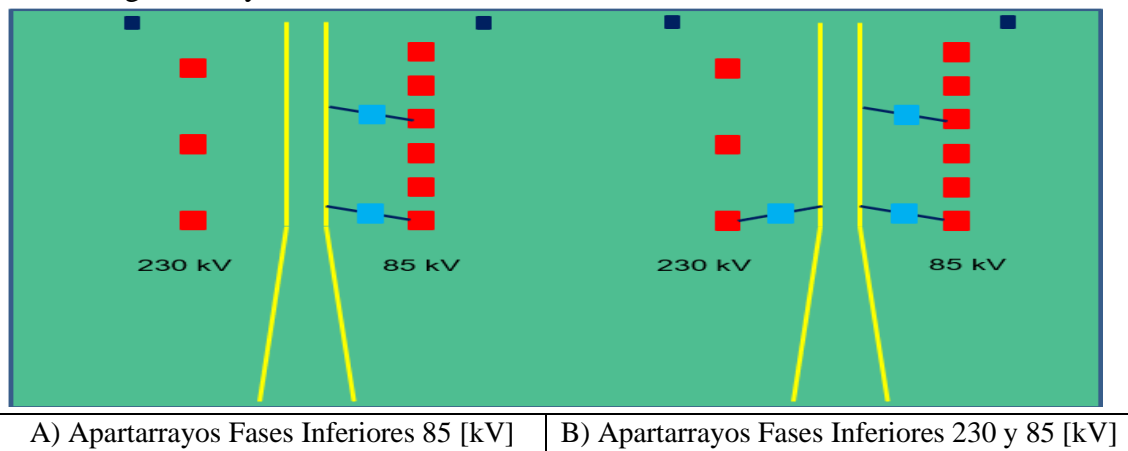
$$\frac{5,750 \text{ mm}}{445 \text{ mm}} = 12.9 \text{ aisladores}$$

Utilizando aisladores 28SVC111CC se reduce el número de aisladores que requieren las cadenas de aisladores al tener una distancia de fuga mayor aunado a tener la característica de ser utilizados para zonas de alta contaminación.

## 5 Conclusiones y Recomendaciones.

En este trabajo se evaluó la confiabilidad de la coordinación de aislamiento ante la caída de rayos en las líneas de 85 kV con estructuras de tipo asimétricas, tomando como ejemplo el caso las líneas CRG-73N50-ISC y VDM-73N80-ISC. Lo más importante de la evaluación de la confiabilidad fue determinar los efectos ocasionados por las descargas atmosféricas sobre las líneas de subtransmisión de 85 kV a partir de la condición de asimetría de las estructuras. Porque se encontró mediante el análisis teórico y del ATP que la condición de asimetría provoca que los sistemas de 85 kV en especial las fases inferiores de los dos circuitos se encuentren en desventaja ante la posible caída de alguna descarga atmosférica, cuya probabilidad es alta de ocurrir y provocar alguna salida, aun teniendo las condiciones idóneas en campo de aterrizamiento de las estructuras con valores de 10 ohms. Además, se confirmó la hipótesis durante la realización del estudio al encontrarse una deficiencia en la coordinación de aislamiento, teniendo en las cadenas de aislamiento un número menor de aisladores con los que se deberían de contar de acuerdo con la normatividad vigente según las condiciones de operación, ambientales y atmosféricas actuales. Lo que más ayudó a generar esta evaluación fue utilizar el modelo multi pisos el cual me permitió analizar la asimetría al generar un modelo teórico y poder obtener los parámetros de línea que utilizaría el software de análisis de transitorios. Lo más difícil de realizar la evaluación fue encontrar algún modelo similar en los que la asimetría fuera una de las principales causas de evaluación porque se encontraron modelos de análisis en los que la simetría predomina en el diseño de estructuras sobre todo nuevas y en nuestro caso se tienen torres rediseñadas para el transporte de energía eléctrica por la extinta LyFC, ahora a cargo de CFE.

Así mismo se encontraron áreas de oportunidad las cuales permitirán reforzar la coordinación de aislamiento. El número de aisladores es menor al requerido por lo que se deberá realizar un análisis posterior tanto mecánico como eléctrico para ver la posibilidad de agregar los discos faltantes o poder integrar otro tipo de aislador como muestran los resultados por contaminación. La colocación de apartarrayos en especial en las fases inferiores de los circuitos de 85 kV que son las más vulnerables según los datos obtenidos en las simulaciones, este dispositivo nos ayudarán a poder recortar la onda de energía hasta un nivel en el que no se ocasione alguna falla de acuerdo al nivel de tensión de operación máxima del sistema y aprovechando que se tienen valores correctos de puesta a tierra de acuerdo al SOM 3533 para el mantenimiento de líneas de alta tensión de 69 a 138 kV para la disipación a tierra de la energía del rayo.



Al colocar apartarrayos en las fases inferiores de los circuitos de 85 kV A) se encontró que aún en las condiciones más adversas de puesta a tierra con valores de hasta 350 ohms y de corriente de rayo de más de 200 kA las fases no presentan flameos para golpes en los hilos de guarda de acuerdo con las

simulaciones en ATP. En el apartado B) se colocó un apartarrayos en la fase inferior del circuito de 230 kV además de los colocados en 85 kV como método de prevención y así evitar que los aislamientos se sometieran a un estrés innecesario ante los golpes de las posibles descargas. En la simulación se usaron diferentes valores de corriente de rayo de 8, 20, 28, 50, 100 y 200 kA para los valores de 5, 10, 20, 50, 100 y 350 ohms obteniendo como resultados 0 flameos en las cadenas de aislamiento.

<b>Apartarrayos Colocados en Fases Inferiores de los circuitos de 85 [kV] para I Rayo: 8, 28, 50, 100 [kA]</b>	
RPT [Ohms]	N. de Flameo en Fases
5	0
10	0
20	0
50	0
100	0
350	0

No obstante, se encontró durante el análisis de confiabilidad el uso de buenas prácticas en la coordinación de aislamiento, tal es el caso de utilizar cadenas de aislamiento en V lo que permite disminuir el movimiento de los conductores de fase ante condiciones atmosféricas adversas como los son los vientos fuertes, además de reducir el tamaño del derecho de vía que se requiere, otra buena práctica es tener puestas a tierra de las estructuras con valores menores a los 5 [ohms], lo que permite una correcta disipación de la energía, el cumplimiento del valor del ángulo de blindaje para la protección de los conductores y evitar en lo posible un golpe directo en los conductores de fase.

Teniendo en cuenta estos puntos será necesario investigar más a fondo las condiciones asimétricas que se lleguen a presentar en otras líneas ante la caída de descargas atmosféricas, en especial en aquellas que se localicen en áreas urbanas donde el derecho de vía se ve comprometido por la reducción del mismo y el constante incremento de la necesidad de energía eléctrica en los grandes centros de consumo, lo que ocasiona el reacondicionamiento de estructuras existentes y esté basado en el análisis costo beneficio de factibilidad estructural y eléctrica, así mismo se deberá contemplar el análisis en el que se tome en cuenta la afectación que se podría añadir por causa de la corrosión estructural y por lo tanto el posible incremento de la impedancia de la torre, esto no sin dejar de lado la seguridad del personal y población en general dando cumplimiento a la normatividad vigente.

### **Recomendaciones.**

Se debe procurar mantener los valores de resistencia a pie de torre por debajo del valor de 10 ohms; ya que como se observa en el análisis esto ayudaría a mantener los índices por debajo de las 3 salidas/100 km/año, valor recomendado para líneas con nivel de tensión de hasta 115 [kV].

Es recomendable también la instalación de apartarrayos en las fases inferiores de los circuitos de las torres asimétricas para evitar que se puedan presentar fallas de salidas de líneas múltiples, lo anterior para evitar flameos de los aislamientos no involucrados en la fase fallada por efecto de acoplamiento. Los apartarrayos utilizados en este análisis tienen las siguientes características: Apartarrayos permanentes con tensión nominal 90 kV clase II para los sistemas de 85 kV y apartarrayos permanentes con tensión nominal 192 kV clase II para el sistema de 230 kV. Se recomiendan apartarrayos Clase II si los claros entre torres son inferiores a los 300 m y clase III para claros superiores a 300 m.

## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] H. Torres, *El rayo: Mitos, leyendas, ciencia y tecnología*, 2da Ed. Bogotá D.C., 2002. Página 115.
- [2] Mapa de densidad de descargas a tierra, Apéndice C de la NMX-J-549-ANCE-2005
- [3] J. C. Das. (2010). *Transients in Electrical Systems Analysis, Recognition, and Mitigation*. United States of America: MC GRAW HILL. Pág 1.
- [4] J. C. Das. (2010). *Transients in Electrical Systems Analysis, Recognition, and Mitigation*. United States of America: MC GRAW HILL. Pág 93.
- [5] Comisión Federal de Electricidad. (1991). *Coordinación de Aislamiento*. México: Especificación L0000-06.
- [6] BAATZ, H.; BOLL, G. New field experience with outdoor insulators in pollution areas and methods of assessing the performance of insulation under conditions of pollution, CIGRE, 1964, report 212
- [7] ABB Electrical System Technology Institute. (1997). *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*. United States of America: ABB Power T&D Company Inc. Chapter 17, page 578
- [8] ABB Electrical System Technology Institute. (1997). *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*. United States of America: ABB Power T&D Company Inc. Chapter 17, page 579.
- [9] Mexicana Ance, N. (s/f). VISTA PREVIA DE LA NORMA ANCE NORMA. Org.mx. Recuperado el 2 de diciembre de 2022, de <https://www.ance.org.mx/NormalizacionOnLine/DocsOnn/DoctosFinales/NMX-J-549-ANCE-20053.pdf>
- [10] Vaisala Digital. (2022). National Lightning Detection Network. Mayo 2022, de Vaisala Sitio web: <https://www.vaisala.com/en/products/national-lightning-detection-network-nldn>
- [11] Recomendaciones de diseño de líneas de transmisión aéreas para evitar fallas por descargas atmosféricas. (2021, 12 febrero). E’Kabel. <https://ekabel.net/es/recomendaciones-de-diseno-de-lineas-de-transmision-aereas-para-evitar-fallas-por-descargas-atmosfericas/>
- [12] Transients Parameter Determination. (2010). [CRC Press Web site]. Juan A. Martinez-Velasco. <https://taylorandfrancis.com/search-results/?query=Power+System+Transients&pg=&sort=&tab=>
- [13] Ferrari, C. (n.d.). NORMA CEI INTERNACIONAL IEC 60071-1. Wwww.academia.edu. Retrieved November 29, 2022, from: [https://www.academia.edu/39368113/NORMA\\_CEI\\_INTERNACIONAL\\_IEC\\_60071\\_1](https://www.academia.edu/39368113/NORMA_CEI_INTERNACIONAL_IEC_60071_1)
- [14] (S/f). Relsamex.com. Recuperado el 22 de marzo de 2023, de [https://www.relsamex.com/wp-content/uploads/2018/11/IUSA-Cat\\_Energia.pdf](https://www.relsamex.com/wp-content/uploads/2018/11/IUSA-Cat_Energia.pdf)
- [15] Guía de aplicación de la especificación de coordinación de aislamiento. (2019, agosto). Recuperado 13 de febrero de 2023, de <https://lapem.cfe.gob.mx/normas/pdfs/u/L0000-41.pdf>