

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS COMPONENTES DE TORRES
DE TRASMISIÓN ELÉCTRICA FRENTE A SOBRETENSIONES
TRANSITORIAS PRODUCIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS COMPONENTES DE TORRES
DE TRASMISIÓN ELÉCTRICA FRENTE A SOBRETENSIONES
TRANSITORIAS PRODUCIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

**AUTOR:
HENRI BLADIMIR PRADO SANTAMARIA**

**TUTOR:
DIEGO FRANCISCO CARRIÓN GALARZA**

Quito D.M., agosto 2021

Henri Bladimir Prado Santamaria

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS COMPONENTES DE TORRES DE TRASMISIÓN ELÉCTRICA FRENTE A SOBRETENSIONES TRANSITORIAS PRODUCIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2021

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Henri Bladimir Prado Santamaria (Y'1995). Realizó sus estudios secundarios en el colegio “Unidad Educativa Luciano Andrade Marín”, se graduó de Bachiller especialidad Físico Matemático. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo de investigación se basa en análisis del comportamiento de los elementos que conforman las torres de transmisión eléctrica frente a transitorios provocados por descargas atmosféricas.

hprado@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Diego Francisco Carrión Galarza (Y'1981). Se graduó como Ingeniero Eléctrico en la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador en el año 2010 y en la actualidad está trabajando para lograr su título de doctor en ingeniería de la Universidad Politécnica Bolivariana – Medellín, Colombia. Es profesor e investigador de la Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador. En la actualidad es miembro del grupo de investigación GIREI (Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes – Smart Grid Research Group).

dcarrion@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2021 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Diego Francisco Carrión Galarza declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS COMPONENTES DE TORRES DE TRASMISIÓN ELÉCTRICA FRENTE A SOBRETENSIONES TRANSITORIAS PRODUCIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS* realizado por Henri Bladimir Prado Santamaria, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito D.M., agosto de 2021



.....
Diego Francisco Carrión Galarza
C.C.: 1713703062

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Henri Bladimir Prado Santamaria, con documento de identificación N° 1723791610, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS COMPONENTES DE TORRES DE TRASMISIÓN ELÉCTRICA FRENTE A SOBRETENSIONES TRANSITORIAS PRODUCIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniera Eléctrica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, D.M., agosto de 2021



.....

Henri Bladimir Prado Santamaria

C.C.: 1723791610

ÍNDICE GENERAL

1 INTRODUCCIÓN	4
2 COORDINACIÓN DEL ASILAMIENTO.....	5
2.1 Descargas atmosféricas	6
2.1.2 Descargas atmosféricas sobre el cable de guarda	6
2.1.3 Voltaje en el cable de guarda	7
2.1.4 Onda viajera	7
3 MODELAMIENTO DE TORRES DE TRANSMISIÓN.....	7
3.1 Cadena de aisladores	8
3.2 Resistencia de pie de torre	8
4. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	10
4.1 Modelamiento de vanos en líneas de transmisión.....	10
5 ANÁLISIS DE RESULTADOS	10
5.1 Modelo del sistema de 138 kV	12
5.2 Modelo del sistema de 230 kV	16
5.3 Modelo del sistema de 500 kV	20
6 CONCLUSIONES	24
7 TRABAJOS FUTUROS Y RECOMENDACIONES.....	24
ANEXOS	25
9.1 Matriz de Estado del Arte.....	28
9.2 Resumen de Indicadores.....	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Representación esquemática de la onda viajera.....	7
Figura 2. Modelo torre 138 kV	9
Figura 3. Modelo torre 230 kV	9
Figura 4. Modelo torre 500 kV	9
Figura 5 Modelo de ATP para la cadena de aisladores.....	10
Figura 6 Modelamiento sistema 138 kV.....	10
Figura 7 Modelamiento sistema 230 kV.....	11
Figura 8 Modelamiento sistema 500 kV.	11
Figura 9 Sobretensión inicial vista en el cable de guarda sistema 138 kV.	12
Figura 10 Sobretensión detallada en el cable de guarda sistema de 138 kV.....	12
Figura 11 Corriente en el cable de guarda sistema 138 kV.....	12
Figura 12 Corriente en el cable de guarda y lugar de impacto sistema 138 kV.....	13
Figura 13 Sobretensión vista en la cadena de aisladores sistema 138 kV..	13
Figura 14 Corriente vista en las cadenas de aisladores sistema 138 kV.....	13
Figura 15 Sobretensión vista en la estructura de la torre sistema 138 kV..	14
Figura 16 Sobretensión detallada vista en la estructura sistema de 138 kV.	14
Figura 17 Corriente vista en las estructura de la torre sistema 138 kV.....	14
Figura 18 Corriente vista en la estructura y el cable de guarda sistema 138 kV..	15
Figura 19 Sobretensión vista en la puesta tierra de la torre sistema 138 kV..	15
Figura 20 Corriente vista en el sistema de puesta a tierra sistema 138 kV.....	15
Figura 21 Sobretensión vista en los conductores de fase sistema 138 kV.....	15
Figura 22 Sobretensión detallada vista en los conductores de fase sistema 138 kV.....	16
Figura 23 Sobretensión vista en el cable de guarda sistema 230 kV.	16
Figura 24 Corriente vista en el lugar de impacto y el cable de guarda 230 kV.	16
Figura 25 Sobretensión detallada vista en el cable de guarda sistema de 230 kV.	17
Figura 26 Sobretensión vista en la cadena de aisladores sistema 230 kV.	17
Figura 27 Corriente vista en las cadenas de aisladores sistema 230 kV.	17
Figura 28 Sobretensión vista en la estructura de la torre sistema 230 kV.	18
Figura 29 Sobretensión detallada vista en la estructura sistema de 230 kV.	18
Figura 30 Corriente vista en el cable de guarda y la estructura sistema 230 kV.	18
Figura 31 Sobretensión vista en la puesta tierra de la torre sistema 230 kV.	18
Figura 32 Corriente vista en el cable de guarda y la estructura sistema 230 kV.	19
Figura 33 Sobretensión vista en los conductores de fase sistema 230 kV.....	19

Figura 34 Sobretensión detallada vista en los conductores de fase sistema 230 kV.....	19
Figura 35 Sobretensión vista en el cable de guarda sistema de 500 kV.	20
Figura 36 Sobretensión detallada vista en el cable de guarda sistema de 500 kV.....	21
Figura 37 Corriente vista en el cable de guarda sistema 500 kV.....	20
Figura 38 Sobretensión vista en la cadena de aisladores sistema 500 kV.	21
Figura 39 Corriente vista en las cadenas de aisladores sistema 500 kV..	21
Figura 40 Sobretensión vista en la estructura de la torre sistema 500 kV.	22
Figura 41 Sobretensión detallada vista en la estructura sistema de 230 kV.	22
Figura 42 Corriente vista en las estructura de la torre sistema 500 kV.....	22
Figura 43 Sobretensión vista en la puesta tierra de la torre sistema 500 kV.	23
Figura 44 Corriente vista en la puesta tierra de la torre sistema 500 kV.	23
Figura 45 Sobretensión vista en los conductores de fase sistema 500 kV.....	23
Figura 46 Sobretensión detallada vista en los conductores de fase sistema 500 kV.....	23

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS COMPONENTES DE TORRES DE TRASMISIÓN ELÉCTRICA FRENTE A SOBRETENSIONES TRANSITORIAS PRODUCIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Resumen

Las líneas de transmisión son una parte fundamental y físicamente la parte más extensa del sistema eléctrico de potencia. Es de suma importancia mantener la confiabilidad en las líneas independientemente de las condiciones ambientales del sector por el cual atraviesan las mismas. El estudio de la coordinación del aislamiento y el análisis de los transitorios ocasionados por las descargas atmosféricas en líneas de transmisión, son de mucha importancia para el correcto funcionamiento del sistema, para de esa manera cumplir con los requerimientos de la demanda. Para el estudio del comportamiento que tienen los elementos que conforman las líneas de transmisión frente a descargas atmosféricas, se realizó el modelamiento de torres de transmisión de 138, 230 y 500 kV en base a la representación de sus estructuras por medio de impedancias de cono y cilindro. Para este estudio se realizó el modelamiento de una descarga atmosférica cuando esta impacta directamente en el cable de guarda. Finalmente se realizó el análisis de las sobretensiones y las formas de onda de corriente reflejadas en cada uno de los elementos verificando que para este caso de estudio no existen fallas en el aislamiento de las torres de transmisión.

Palabras Clave: Coordinación de aislamiento, descarga atmosférica, sobretensión transitoria, aislador.

Abstract

Transmission lines are a fundamental part and physically the most extensive part of the electrical power system. It is very important to maintain the reliability of the lines regardless of the environmental conditions of the sector which they pass. The study of the coordination of the isolation and the analysis of the transients caused by the atmospheric lightning in transmission lines are of most important for the correct operation of the system in order to comply with the demand requirements. For the study of the behavior of the elements that make up the transmission lines against atmospheric lightning, the transmission towers of 138, 230 and 500 kV were modeled based on the representation of their structures by means of cone and cylinder impedances. For this study, the modeling of an atmospheric lightning was carried out when it impacts directly on the guard wire. Finally, the analysis of the overvoltage and the current waveforms reflected in each of the elements was carried out, verifying that for this case study there are no faults in the insulation of the transmission towers.

Keywords: insulation coordination, lightning transient, overvoltage, insulator.

1 Introducción

Las líneas de transmisión son una parte fundamental y físicamente la parte más extensa del sistema eléctrico de potencia. Es de suma importancia mantener la confiabilidad en las líneas independientemente de las condiciones ambientales del sector por el cual atraviesan las mismas. El estudio y coordinación del aislamiento en líneas de transmisión es de mucha importancia para el correcto funcionamiento del sistema y cumplir con los requerimientos de la demanda [1]–[6].

Durante las etapas de planeamiento y diseño de los sistemas de transmisión el cálculo del aislamiento se considera tomando en cuenta el valor pico de los sobre voltajes transitorios. Los métodos modernos consideran modelos probabilísticos a la hora de realizar la coordinación del aislamiento, en especial a sistemas de extra alto voltaje [4], [7]–[9].

La coordinación del aislamiento es la selección de la parte dieléctrica que evita el contacto de los conductores de fase con la estructura de la torre, esta coordinación se realiza en base a los niveles de voltaje de la línea teniendo en cuenta el entorno de las condiciones ambientales y las características de los materiales que se utilizaran para la coordinación [10], [11]. En [12], se considera que los tipos de conductores y las características de los aisladores son factores muy importantes a considerar en los modelos de simulación así mismo como los tipos de torres y sus características.

Existen diferentes tipos de sobretensiones, las cuales suceden en intervalos de tiempo limitado sin embargo pueden producir fallas en el aislamiento lo cual conlleva a la ocurrencia de fallas en el sistema. El propósito de la coordinación de aislamiento es dar la

capacidad a la línea de soportar estas sobretensiones. Existen diferentes causas por las cuales se producen los tipos de sobretensiones como lo son: por maniobra, atmosféricas. para la coordinación del aislamiento se consideran más la contaminación y las del tipo atmosféricas [1], [13], [14].

Las descargas atmosféricas son el fenómeno natural de más importancia que podría alterar el funcionamiento de las líneas. Es por ello, que dentro de la coordinación de aislamiento se debe considerar el diseño del cable de guarda para evitar que las descargas caigan directamente sobre el conductor de fase lo cual contribuye a mejorar la confiabilidad del sistema [3], [12], [15], [16].

Las sobretensiones producidas por descargas atmosféricas pueden ser de frente lento o frente rápido. Las sobretensiones de frente lento desempeñan un papel vital en la determinación del servicio de energía de los pararrayos y en la selección de distancias de aislamiento mientras que las sobretensiones de frente rápido se estudian para determinar los niveles de resistencia requeridos del equipo, para evaluar el rendimiento posterior del sistema y el riesgo de falla debido a transitorios ocasionados por las descargas [17], [18].

Para evaluar la probabilidad de descargas atmosféricas en un lugar determinado es necesario tomar en cuenta el nivel isocerámico del lugar. La densidad de las descargas a tierra se mide por el número de descargas al año por unidad de superficie en km^2 al año. En [12], se toma en cuenta un rango de 9 km a cada lado de la línea debido a que distancias más alejadas no influyen en el comportamiento de la línea.

Las descargas atmosféricas comúnmente golpean las líneas de transmisión por eso se coloca los pararrayos entre un neutro y

fase, los conductores de las líneas propias como en los llamados puntos débiles de la línea tales como conexión de cables y transformadores, la función es limitar los voltajes de tensión con el fin de proteger los equipos [19]–[26].

Las sobretensiones atmosféricas se producen cuando el rayo cae cerca de la línea de transmisión, esto resulta de la interacción de las líneas eléctricas con los campos electromagnéticos de rayo cuando golpea el suelo. O a su vez, por el impacto directo sobre la línea. Cuando esto ocurre las corrientes de rayos se inyectan directamente en una de los conductores de línea [27]–[29].

Las descargas de rayos incluyen descargas en forma de luz entre una nube cargada hacia la tierra, o entre otras nubes. También se puede definir como la ruptura del aislamiento de aire entre dos superficies cargadas de polaridad contrarias. El proceso finaliza con una descarga o rayo que puede transportar hasta 200 kA, pero la oscilación promedio es entre los 20 y 30 kA [30].

Los parámetros que determinan la forma de onda de la corriente que se produce cuando existe una descarga atmosférica son de características aleatorias. Se determinó que la amplitud del voltaje y corriente, el frente de onda de la descarga, el tiempo de duración del rayo, son valores de referencia que corresponden a una función de distribución logarítmica normal como se muestra en [31]–[35].

En [36] nos dice que el diseño de líneas de transmisión con aislamiento mínimo debe efectuarse bajo el criterio que, la tensión de impulso que cause el flameo de la cadena de los aisladores debe ser igual o exceder el nivel básico de aislamiento de los equipos situados en las subestaciones además que el nivel de aislamiento debe estar entre el 25 y 30 por ciento mayores del nivel de aislamiento

del equipo que se encuentra conectado en sus terminales.

Para el presente artículo se presenta un modelamiento de las estructuras de las torres de transmisión en base a impedancias calculadas por la disposición geométrica de la torre y el modelamiento de una parte de la línea de transmisión, donde se modelará el impacto de una descarga atmosférica en el cable de guarda para el posterior análisis de sobretensiones en cada uno de los elementos que conforman las torres de transmisión.

La investigación de aquí en adelante se dividirá de la siguiente manera:

Se revisará conceptos que influyen en el análisis de transitorios por sobretensiones atmosféricas (2. Coordinación de aislamiento), como las características de las descargas atmosféricas (3. Modelamiento de torres de transmisión) (4. Formulación del problema (5. Análisis de resultados) seguido por la conclusión (6. Conclusiones).

2 Coordinación de aislamiento

Las descargas atmosféricas son uno de los factores dominantes al momento de realizar el diseño de la coordinación del aislamiento de las líneas de transmisión y subestaciones del sistema eléctrico de potencia. Al existir una descarga atmosférica existe un voltaje inducido sobre la cadena de aisladores de la línea de transmisión [37].

Según la norma IEEE Std C62.82.1-2010 se debe tomar en cuenta que, para los equipos con voltajes nominales mayores a 242 kV entre línea y línea nivel de resistencia al aislamiento estándar viene dado por el nivel básico de aislamiento del impulso de maniobra (BSL), el nivel

básico de aislamiento del impulso de la descarga atmosférica (BIL).

El nivel básico de aislamiento (BIL) para las líneas de transmisión de 500 kV es de 550 kV ya que se considera un coeficiente de sobretensión del 10%.

El procedimiento para la coordinación de aislamiento consiste en:

- Determinar las perturbaciones en el voltaje.
- Seleccionar el aislamiento correcto para reducir la probabilidad de fallo para las perturbaciones de voltaje mencionadas anteriormente.

Para la determinación de las perturbaciones del voltaje de debe tomar en cuenta que la amplitud, la forma de onda y la duración de las perturbaciones de voltaje se determinan típicamente por medio de análisis transitorios del sistema que incluyen las características de los dispositivos limitadores de sobretensión en ubicaciones seleccionadas.

Las descargas atmosféricas pueden ser positivas y negativas. Según estudios anteriores se indica que el 80 a 90% de las descargas atmosféricas son de polaridad negativa y el 10% son de polaridad positiva [38], las descargas de polaridad positiva están formadas por una sola descarga en la cual el frente de onda dura de 20 a 50 microsegundos, por lo general estas descargas se dan en zonas montañosas, polaridad negativa es producida por varias descargas atmosféricas sucesivas, donde la primera descarga está asociada a un frente de onda de 10 a 15 microsegundos [38]–[41].

2.1 Descargas atmosféricas

2.1.1 Descarga atmosférica sobre el cable de guarda

Cuando un rayo impacta sobre el cable de guarda, la corriente producida por la descarga se divide, una parte viaja a través

del cable hacia las torres continuas y la otra parte viaja a través de la torre, produciendo sobrevoltajes tanto en la estructura como en la base de la torre, esto ocurre debido a la resistencia de pie de torre [42].

En [30], se muestran los parámetros a considerar para una descarga atmosférica y su forma de onda reflejado en el tope de torre.

La descarga atmosférica produce también sobrevoltajes en cada una de las fases. Estos sobrevoltajes pueden provocar descargas o ruptura en el aislamiento desde la torre al conductor de fase las cuales se conocen como “backflashover” si el voltaje entre la estructura de la torre y el conductor de fase superan el nivel para el cual están diseñadas las cadenas de aisladores. Los voltajes provocados son más altos en la torre en la que impacta el rayo y van disminuyendo a medida que viajan a lo largo de la línea hasta que las anomalías producidas por la descarga desaparece después de cierta distancia [43]–[47].

2.1.2 Voltaje en el conductor de fase

Una descarga atmosférica puede impactar sobre un conductor de fase en la línea de transmisión por un fallo en el apantallamiento o por un error en el diseño del cable de guarda de la línea de transmisión. Si la descarga atmosférica llega a impactar sobre el cable de fase se produce una sobretensión que viaja hacia ambos lados del conductor en lugar de impacto.

$$V_{COND} = \frac{1}{2} I(t) * Z_c \quad (1)$$

$I(t)$: magnitud de la corriente de la descarga (kA)

Z_c : la impedancia propia del conductor (Ω)

Si el voltaje (V_{COND}) es muy alto, produce un voltaje que puede conllevar a la ruptura del aislamiento, el cual puede producir un contorneo en los aisladores y una falla en el circuito de las líneas de transmisión.

2.1.3 Voltaje en el cable de guarda

Cuando el rayo impacta sobre el cable de guarda también producen dos ondas de corriente con valores iguales a la mitad de la corriente producida por el rayo y se dirigen en la dirección opuesta al lugar donde impacta la descarga atmosférica.

$$V_G = I(t) * Z_G \quad (2)$$

$I(t)$: Magnitud de la corriente de la descarga (kA)

Z_g : La impedancia propia del conductor de guarda (Ω)

Z_g : Se determina mediante (3):

$$Z_g = 60 * \ln \frac{H_g}{R_g} \quad (3)$$

H_g : altura del cable de guarda (m)

R_g : radio del cable de guarda (m)

Cuando la descarga atmosférica impacta en el cable de guarda, una parte de la corriente se descarga en la torre, por lo tanto, si V_g es mayor que el nivel de aislamiento del circuito, se presenta una ruptura en el aislamiento de la torre de transmisión.

2.1.4 Onda viajera

Cuando se realiza el análisis de una descarga atmosférica se ha comprobado que luego de la acción de las protecciones,

en las líneas de transmisión se presentan ondas viajeras con un frente de onda del tipo escarpado, sin embargo, para el análisis se definen formas de onda estandarizadas.

En la figura 1 se muestra el modelo de onda viajera. En el cual se observa que, al impactar sobre un conductor, la descarga atmosférica se divide en dos partes hacia ambos lados del conductor produciendo sobretensiones de similares características, las cuales dependen de los parámetros propios de cada línea de transmisión y de la impedancia del conductor donde impacta la descarga.

En el anexo 1 se muestran las formas de onda de las sobretensiones de frente lento y frente rápido reales y la forma de onda que se utiliza para su análisis.

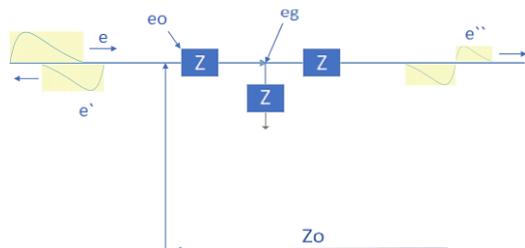


Figura 1: representación esquemática de la onda viajera.

Esta teoría está basada sobre un circuito de un solo conductor y dice que la línea de transmisión será ideal. Es decir, la línea puede ser representada con una impedancia característica[48][49].

3 Modelación de Torres de transmisión

Cuando existe una descarga atmosférica la torre de transmisión debe considerarse como una impedancia que varía a lo largo de la torre en donde su base se encuentra conectada a la resistencia de pie de torre o la malla de puesta a tierra que fue diseñada para la línea de transmisión. La torre puede ser representada como una

línea de transmisión monofásica de parámetros distribuidos en donde la impedancia que se calcula para el modelamiento y la velocidad a la que se propagan las descargas atmosféricas serán parámetros que toman la velocidad de la luz como referencia [26].

Uno de los modelos propuestos es el Z_{cono} y $Z_{cilindro}$ que determina una impedancia constante para la torre de transmisión. La impedancia que se toma en cuenta para las partes verticales de la estructura de la torre de transmisión esta dado por:

$$Z_{cilindro} = 60 \left(\ln \left(\frac{2 * h + \sqrt{r}}{r} \right) - 1 \right) \quad (4)$$

h: la altura de la torre

r: radio o distancia desde la base de la torre

Y la impedancia que considera las partes horizontales de la torre de transmisión esta dado por:

$$Z_{cono} = 30 \ln \left(\frac{2 * (h^2 + r^2)}{r^2} \right) \quad (5)$$

En base a las ecuaciones (4) y (5) se modelan las torres de transmisión de 138 kV, 230 kV y 500 kV de forma que estas sean representadas por impedancias constantes.

3.1 Cadena de aisladores

En una torre de transmisión eléctrica de alta tensión, las cadenas aisladoras son los elementos que cumplen la función de sujetar a la torre a los conductores de fase de las líneas a través de todo el tramo que las conforma, manteniéndolos aislados de tierra y de otros conductores que conforman el circuito de transmisión.

La cadena de aisladores es representada por interruptores normalmente abiertos controlados por voltaje, los cuales simularán el fallo en el aislamiento, cerrando el interruptor, si el voltaje que se produce entre la estructura de la torre y el conductor de fase supera un valor especificado, correspondiente al nivel de aislamiento de la cadena.

El valor del voltaje que hará cerrar el interruptor simulando el fallo en la cadena de aisladores será el voltaje que se obtiene a través de las hojas de datos de los fabricantes. En los catálogos de aisladores y las hojas de datos que nos proporcionan los fabricantes podemos encontrar los valores del CFO (Critical Flash Overvoltage), que corresponde al voltaje al cual a un equipo produce fallo o circulación de corriente a través de él.

Para calcular el número de aisladores que necesita una línea de transmisión se necesita saber si se va a utilizar el aislador tipo FOG o ESTANDAR.

Para saber el nivel de voltaje que no produzca falla de aislamiento con mayor probabilidad, se utiliza lo determinado en la norma CEI 71-1

3.2 Resistencia de pie de torre

La sobretensión máxima que aparece en la torre de transmisión está determinada principalmente por la impedancia en la parte inferior de la torre durante la descarga. El efecto de la resistencia del pie de la torre sobre el voltaje en la parte superior de la torre depende de la respuesta de la estructura de la torre de transmisión frente a una descarga atmosférica, que depende de la corriente y el tiempo. El tiempo es importante solo si la estructura de la torre de transmisión es superior a los 30 metros de altura tiempo. El tiempo se suele ignorar, y la impedancia depende de la corriente [30].

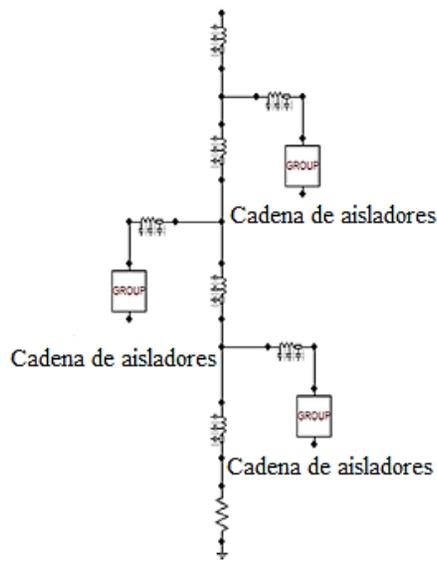


Figura 2: modelo torre de 138 kV

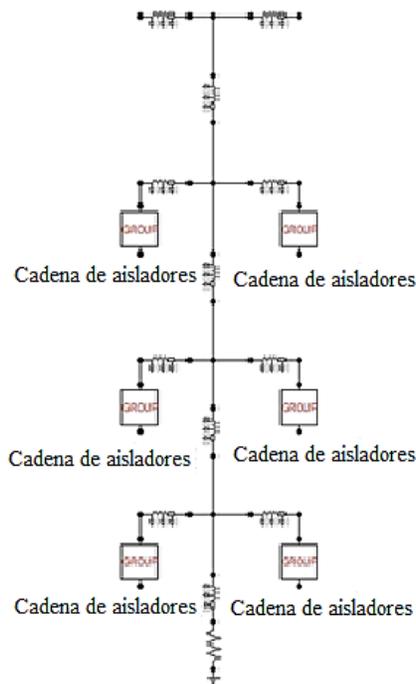


Figura 3: modelo torre de 230 kV

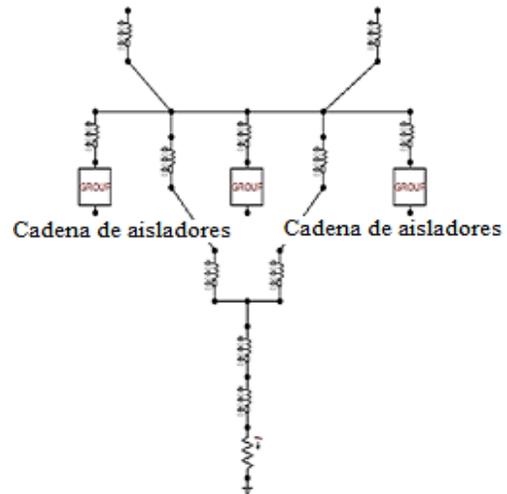


Figura 4: modelo torre de 500 kV

4 Formulación del problema

Para el análisis de los diferentes sistemas de transmisión basta con realizar el modelamiento de 4 torres de transmisión junto con el resto de elementos que conforman el sistema, lo cual nos permitirá realizar un análisis detallado de la sobretensión reflejada en los diferentes componentes.

Para el análisis dentro del programa se representará a la cadena de aisladores como un interruptor controlado por voltaje dentro de un model de ATP, donde el CFO será el voltaje de referencia al cual se activará el interruptor, lo cual indicaría que existe un flameo en la cadena de aisladores.

Para cada uno de los casos de estudio se utiliza el mismo modelo de cadena de aisladores, el único parámetro que varía es el voltaje de referencia al cual se produce ruptura en el aislamiento y está dado por el número de aisladores de cada línea de transmisión y el voltaje especificado en la hoja de datos del fabricante.

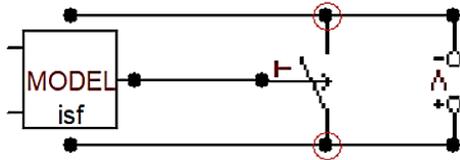


Figura 5: Modelo de ATP para la cadena de aisladores

En la figura 5 se observa el modelo de ATP utilizado para simular las cadenas de aisladores, donde intervienen un interruptor controlado por tacs dentro del model y un interruptor controlado por voltaje conectado en paralelo, el cual se cerrará en el voltaje de referencia al cual se produce contorneo en la cadena de aisladores.

4.1 Modelamiento de vanos en líneas de transmisión

Para cada uno de los vanos de la línea de transmisión se tomará en cuenta una distancia de 400 metros entre las torres de transmisión. Para el modelamiento de las sobretensiones se genera dentro del programa una descarga atmosférica por medio de una fuente Heidler de corriente de 10 kA y un tiempo de falla de $1.2e-6$ s, la cual impacta sobre el cable de guarda. Al impactar sobre el cable de guarda se genera una sobretensión transitoria de frente rápido la cual se verá reflejada en los diferentes elementos que conforman las torres de transmisión

Para el modelamiento del sistema se ubicarán puntas de prueba de voltaje y corriente en la posición de cada elemento y sección de las torres de trasmisión para el posterior análisis de las formas de onda de voltaje y corriente generadas por la descarga atmosférica.

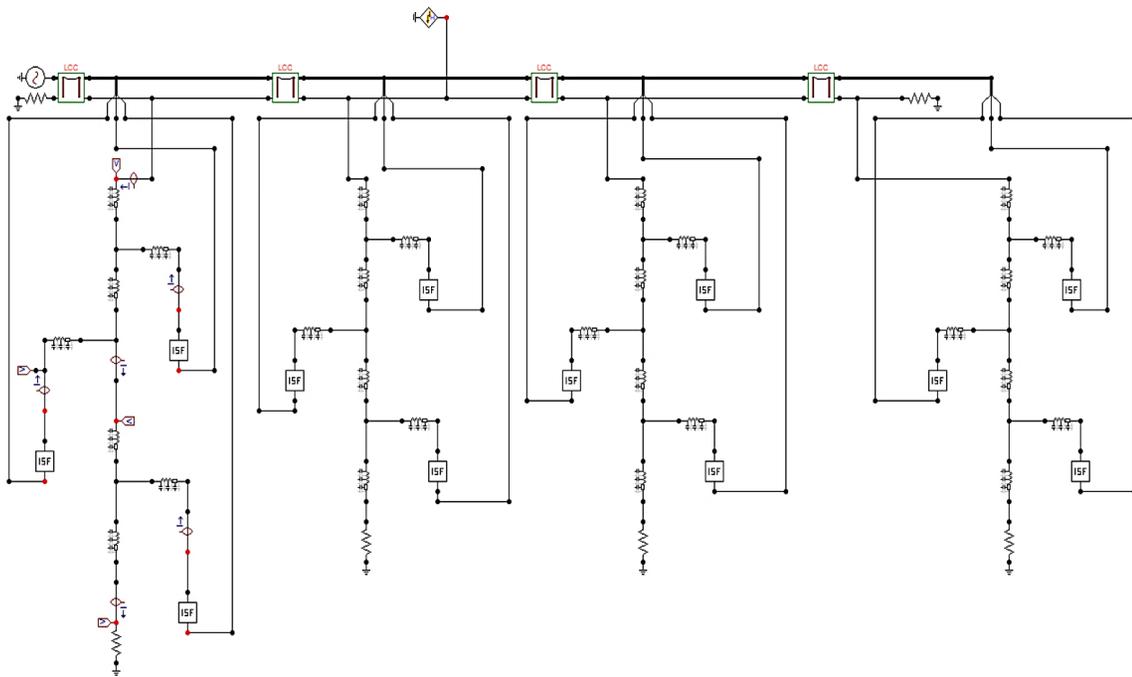


Figura 6: Modelamiento de sistema de 138 kV

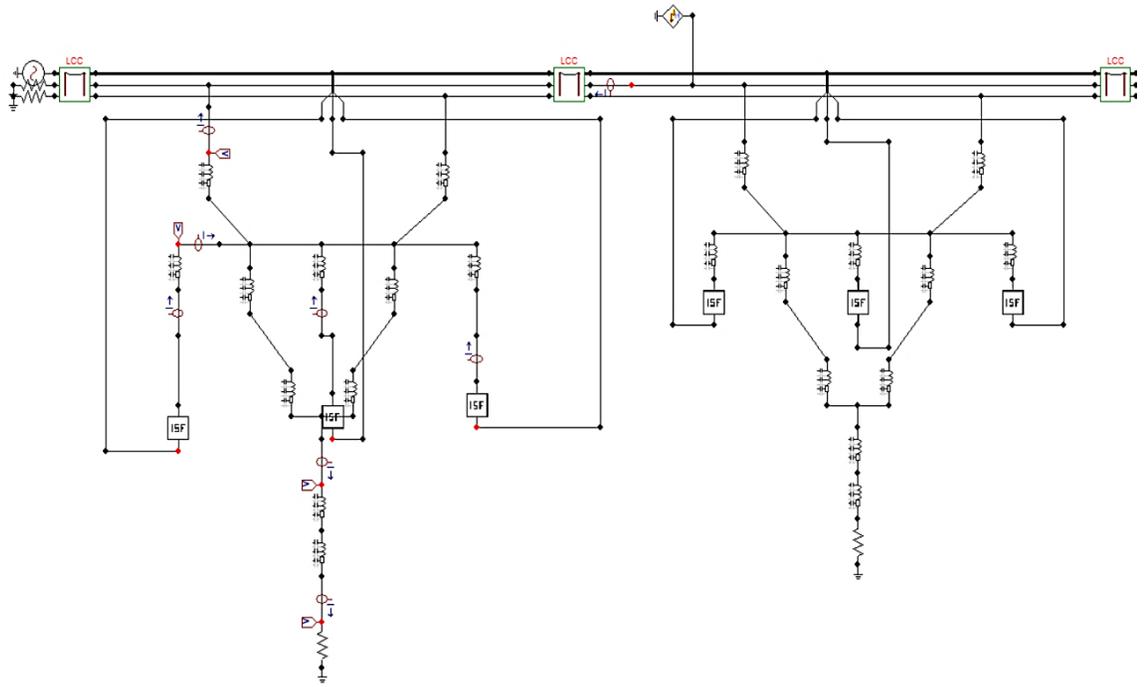


Figura 8: Modelamiento de sistema de 500 kV

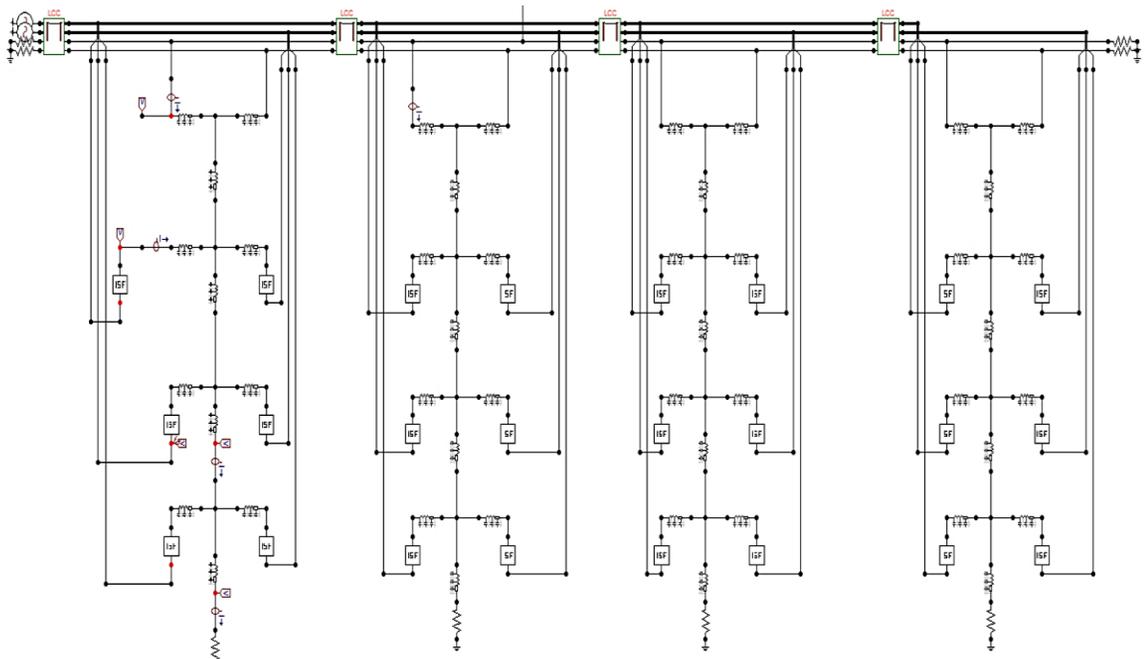


Figura 7: Modelamiento de sistema de 230 kV

5 Análisis resultados

5.1 Modelo de sistema de 138 kV

En la figura 9 se muestra los resultados de la sobretensión reflejada en el cable de guarda.

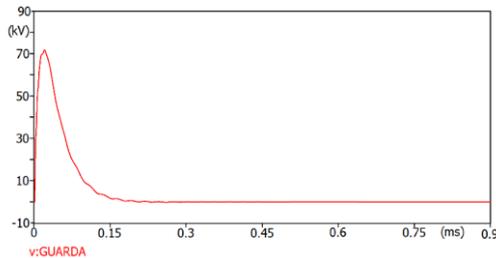


Figura 9: Sobretensión inicial vista en el cable de guarda sistema 138 kV

Como se observa en la figura 9, para los parámetros de la descarga atmosférica se muestra una sobretensión inicial superior a los 70 kV. Además de presentarse más picos de sobretensión a lo largo del tiempo los cuales se observan con más detalle en la figura 10.

Como se observa en la figura 10 durante los primeros 10 ms de análisis se presentan 4 picos de sobretensión, en los cuales la forma de onda se presenta de manera más escarpada a medida que transcurre el tiempo mientras el transitorio se atenúa hasta volverse 0, esto debido a que el cable de guarda no está conectado a una carga por ende no existe circulación de corriente mientras no se presente ningún transitorio que altere su estado inicial.

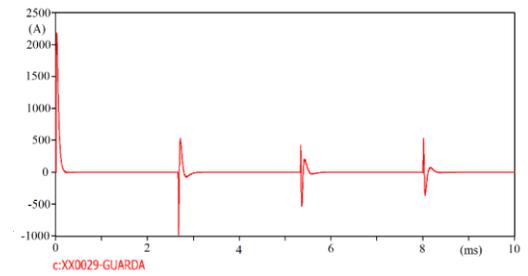


Figura 11: corriente en el cable de guarda sistema 138 kV

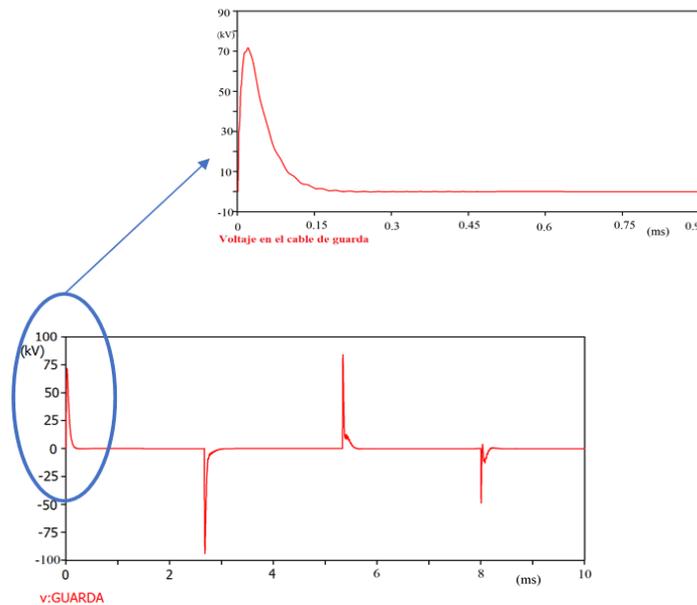


Figura 10: sobretensión detallada en el cable de guarda sistema de 138 kV

En la figura 11 se observa que la corriente en el cable de guarda se presenta un pico máximo inicial de 2.2 kA, sin embargo, se observa picos de corriente a lo largo del tiempo. Este tipo de onda se presenta de manera similar en diferentes puntos de análisis en el cable de guarda con variaciones leves en sus valores como se observa en la figura 12 esto se debe que la onda viaja hacia ambos lados del conductor, lo que produce que dependiendo del punto en el cual se realice el análisis se tendrá una onda similar en forma con variaciones en sus valores, esto se da debido al modelo de onda viajera con el cual se comprueba que al ser mayor la impedancia del conductor por la distancia la onda se atenúa hasta volverse 0.

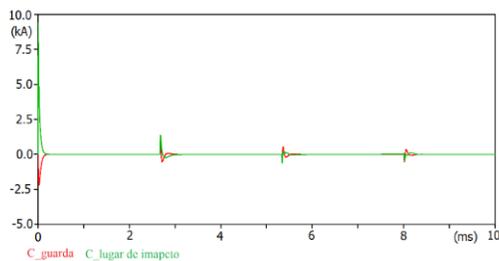


Figura 12: corriente en el cable de guarda y lugar de impacto sistema 138 kV

En la figura 13 se muestra la sobretensión que se genera en la cadena de aisladores, en este caso se observa que se produce un transitorio de frente rápido con un pico de voltaje de 60 kV. Sin embargo, se observa que la sobretensión desaparece inmediatamente y nivel de voltaje vuelve a ser 0, lo cual indica que la cadena de aisladores solo refleja la sobretensión por un intervalo de tiempo muy pequeño. Esto se da de la misma manera en las tres cadenas de aisladores.

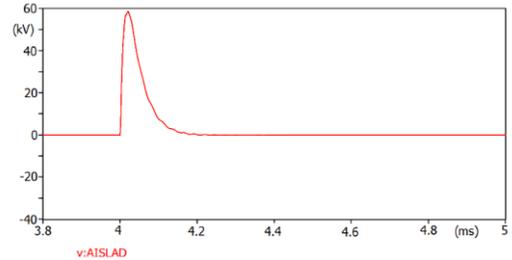


Figura 13: sobretensión vista en la cadena de aisladores sistema 138 kV

Como se observa en la figura 12 los niveles de corriente y sus picos máximos reflejados no superan 1 mA, por lo cual se confirma que no existe circulación representativa de corriente a través de ninguna de las cadenas de aisladores, por ende, no se produce una falla en el aislamiento para los niveles de corriente de la descarga atmosférica considerada para los casos de estudio.

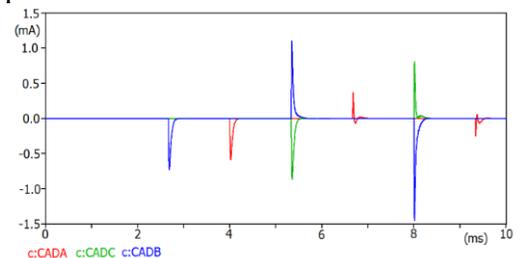


Figura 14: Corriente vista en las cadenas de aisladores sistema 138 kV.

Como se observa en la figura 14 al contrario de lo que sucede en el cable de guarda, la corriente que se observa través de la cadena de aisladores coincide en el mismo punto con formas de onda distinta luego de un instante esto se produce debido a que ninguna de las cadenas de aisladores está conectada entre sí por un conductor, por ende, el modelo de onda viajera no aplica en el caso de análisis de la cadena de aisladores.

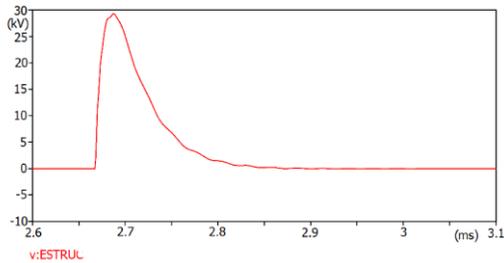


Figura 15: sobretensión vista en la estructura de la torre sistema 138 k

Al ser la estructura un elemento pasivo en el sistema de transmisión y estar conectada directamente al cable de guarda y el sistema de puesta a tierra de la torre de transmisión, se produce una sobretensión de frente rápido con un pico máximo de 30 kV como se muestra en la figura 15, el cual se observa más a detalle en la figura 16.

Al igual que el voltaje, la corriente a través de la estructura se muestra con una forma de onda similar con un pico máximo de 1800 A el cual se atenúa con el tiempo

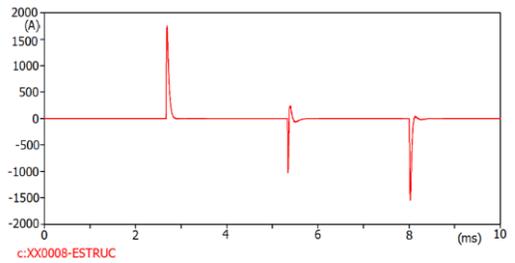


Figura 17: Corriente vista en las estructura de la torre sistema 138 kV

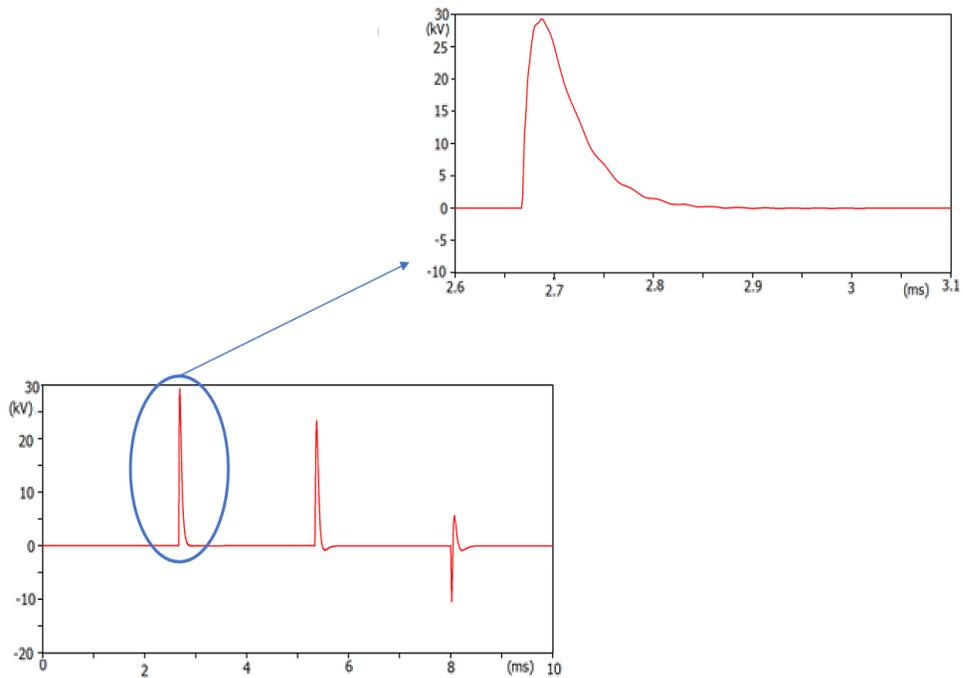


Figura 16: sobretensión detallada vista en la estructura de la torre sistema de 138 kV

En este caso de análisis se observa que al existir una descarga atmosférica en cable de guarda, la corriente que se ve reflejada en la estructura de la torre de transmisión tiene una forma de onda con picos que coinciden con los que se muestran en el cable de guarda lo cual indica que al existir un transitorio la corriente también viaja por la estructura como si fuese un conductor luego de un instante de haberse presentado el primer pico de corriente en el cable de guarda como se muestra en la figura 18.

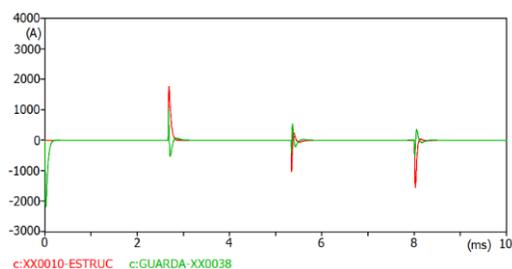


Figura 18: corriente vista en la estructura y el cable de guarda sistema 138 kV

Como se observa en la figura 19 la sobretensión reflejada en la malla a tierra, es de frente rápido con un pico máximo de 6.7 kV

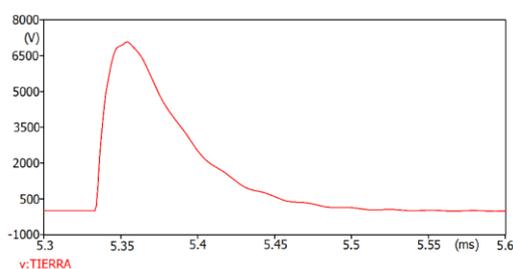


Figura 19: sobretensión vista en la puesta a tierra de la torre sistema 138 kV

Al estar directamente conectado al cable de guarda, el sistema de puesta a tierra de las torres de transmisión es uno de los elementos que más soportan niveles altos de corriente con picos elevados a lo largo del tiempo como se observa en la figura 20.

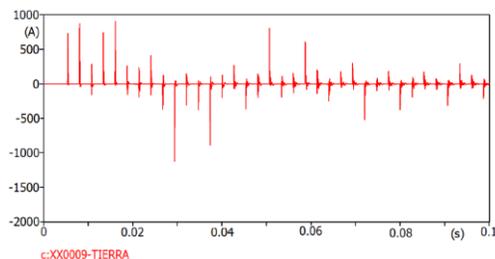


Figura 20: corriente vista en el sistema de puesta a tierra sistema 138 kV

En la figura 21 se observa que en el instante que se produce la descarga atmosférica se produce una sobretensión de frente rápido en los tres conductores al mismo instante de tiempo, sin embargo, los niveles de voltaje son algo distintos. Las formas de onda ampliadas se ven de manera detallada en la figura 22.

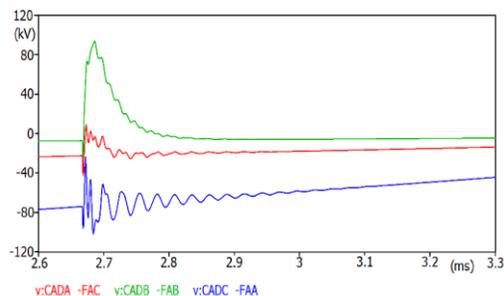


Figura 21: sobretensión vista en los conductores de fase sistema 138 kV

En la figura 22 se observa que las formas de onda presentan distintos niveles de voltaje, sin embargo, los picos de sobretensión que se presentan a lo largo del tiempo ocurren al mismo instante de tiempo, pero con valores y formas de onda algo diferentes y como se observa una de las fases presenta una onda más escarpada que las otras.

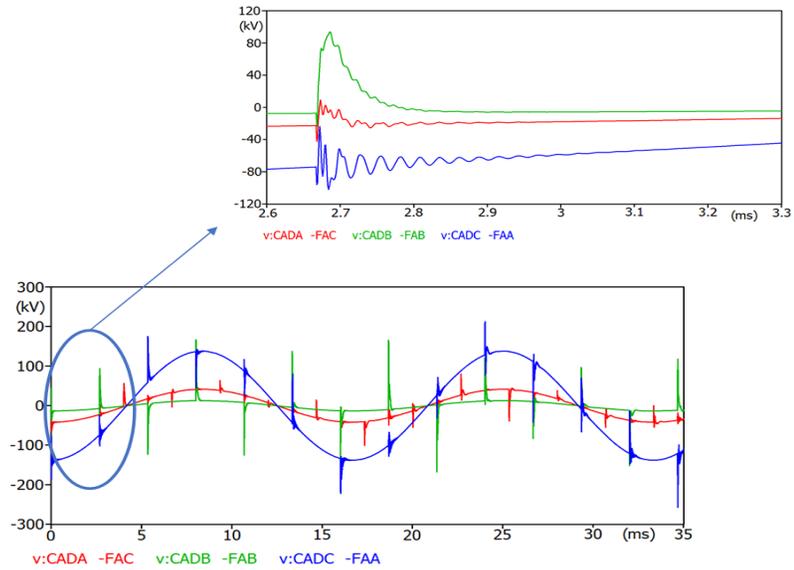


Figura 22: sobretensión detallada vista en los conductores de fase sistema 138 kV

5.2 Modelo de sistema de 230 kV

En la figura 23 se muestra los niveles de sobretensión reflejada en el cable de guarda en el sistema de 230 kV, en la cual se observa una forma de onda de frente rápido con un pico de voltaje de 140 kV. Al igual que en el sistema de 138 kV se muestran varios picos en la onda de voltaje a lo largo del tiempo los cuales se observarán detalladamente en la figura 25.

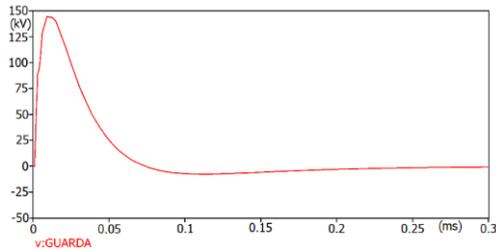


Figura 23: sobretensión vista en el cable de guarda sistema 230 kV

En el sistema de 230 kV se observa que se presentan picos de corriente a lo largo de toda la onda con un pico máximo inicial de 3.5 kA. Al igual que el sistema de 138 kV a lo largo del cable de guarda se produce la misma forma de onda en distintos puntos de análisis por el modelo de onda viajera debido a que la descarga se dirige hacia ambos lados del conductor como se muestra en la figura 24.

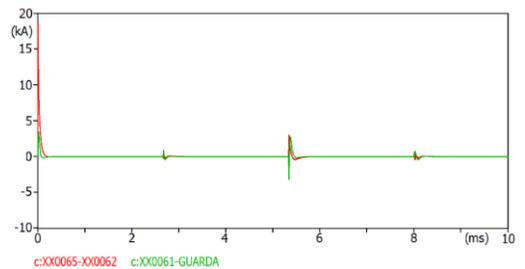


Figura 24: corriente vista en el lugar de impacto y el cable de guarda sistema 230 kV

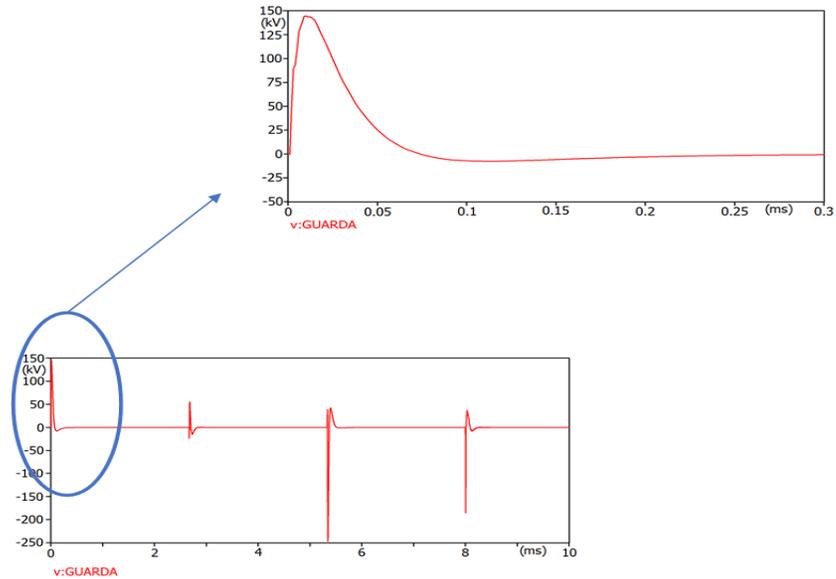


Figura 25: sobretensión detallada vista en el cable de guarda sistema de 230 kV

En la figura 24 se puede observar de mejor manera que ambas formas de onda de corriente son similares y se observa de manera más evidente la variación en los niveles iniciales.

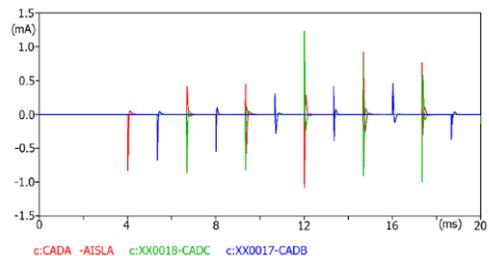


Figura 27: Corriente vista en las cadenas de aisladores sistema 230 kV

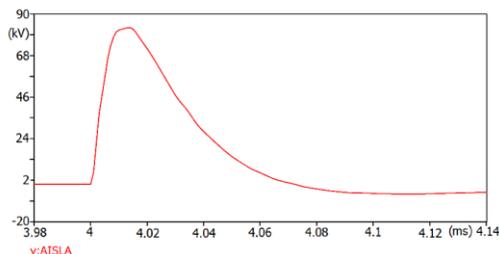


Figura 26: sobretensión vista en la cadena de aisladores sistema 230 kV

En la figura 26 se observa una sobretensión de frente rápido la cual tarda más en desaparecer que en el sistema de 138 kV, sin embargo, vuelve a ser 0. Esto sucede en todas las cadenas de aisladores en ambos circuitos de la línea.

Como se observa en la figura 27 los picos de corriente que se generan por la descarga atmosférica son de niveles muy bajos de máximo 1.5 mA lo cual indica que a través de la cadena de aisladores no existe circulación de corriente por lo cual se puede concluir que no se produce fallo en el aislamiento de la línea de transmisión, esto sucede de la misma manera en ambos circuitos de la línea de transmisión y en todas las cadenas aisladores.

La sobretensión que se genera en la estructura de la torre de trasmisión tiene la diferencia que el pico máximo de voltaje no se observa inicialmente, esta sobretensión de 80 kV se observa de forma más detallada en la figura 29.

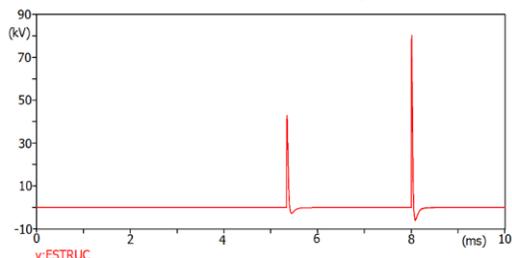


Figura 28: sobretensión vista en la estructura de la torre sistema 230 kV

La corriente que se ve reflejada en la estructura de la torre, muestra al igual que el voltaje; el pico máximo de corriente luego de producirse la descarga atmosférica se observa un nivel de corriente de 3 kA que luego de observarse su pico máximo empieza a atenuarse con el tiempo.

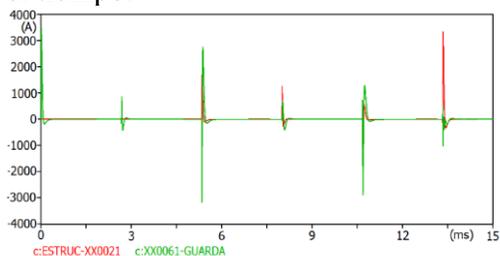


Figura 30: Corriente vista en el cable de guarda y la estructura sistema 230 kV

Al igual que en el caso anterior la estructura refleja picos de corriente en el mismo punto y con la misma forma de onda con variaciones en los niveles de corriente, es decir en este caso la estructura también actúa como un conductor, luego de un instante de haberse presentado los primeros picos de corriente en el cable de guarda como se muestra en la figura 30.

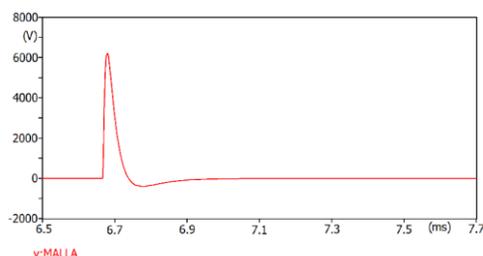


Figura 31: sobretensión vista en la puesta tierra de la torre sistema 230 kV

La sobretensión que se observa reflejada en la malla a tierra se observa en la figura 31, presenta un nivel pico de voltaje de 6 kV.

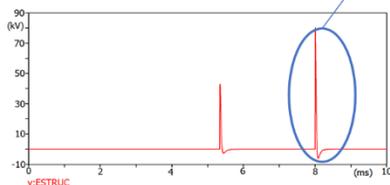
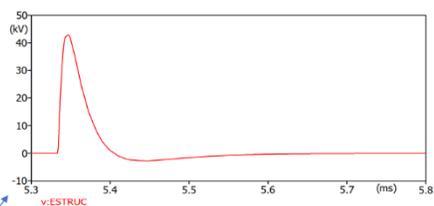


Figura 29: sobretensión detallada vista en la estructura de la torre sistema de 230 kV

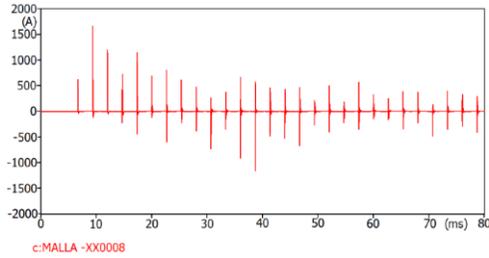


Figura 32: Corriente vista en la malla a tierra sistema 230 kV

En la figura 32 se observa la corriente que soporta la malla a tierra y al estar conectada directamente con el cable de guarda se observan más picos en la onda la cual se atenúa en el tiempo.

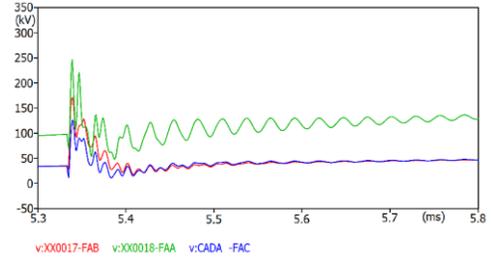


Figura 33: sobretensión vista en los conductores de fase sistema 230 kV

Como se observa en la figura 33 la forma de onda de la sobretensión vista desde los conductores de fase presenta un transitorio con una forma muy escarpada que tarda más en recuperarse en especial en la fase B, sin embargo, estos niveles de tensión son soportados por la cadena de aisladores lo que ayuda a que no exista una circulación de corriente, las formas de onda de los conductores de fase se verán de manera detallada en el la figura 34.

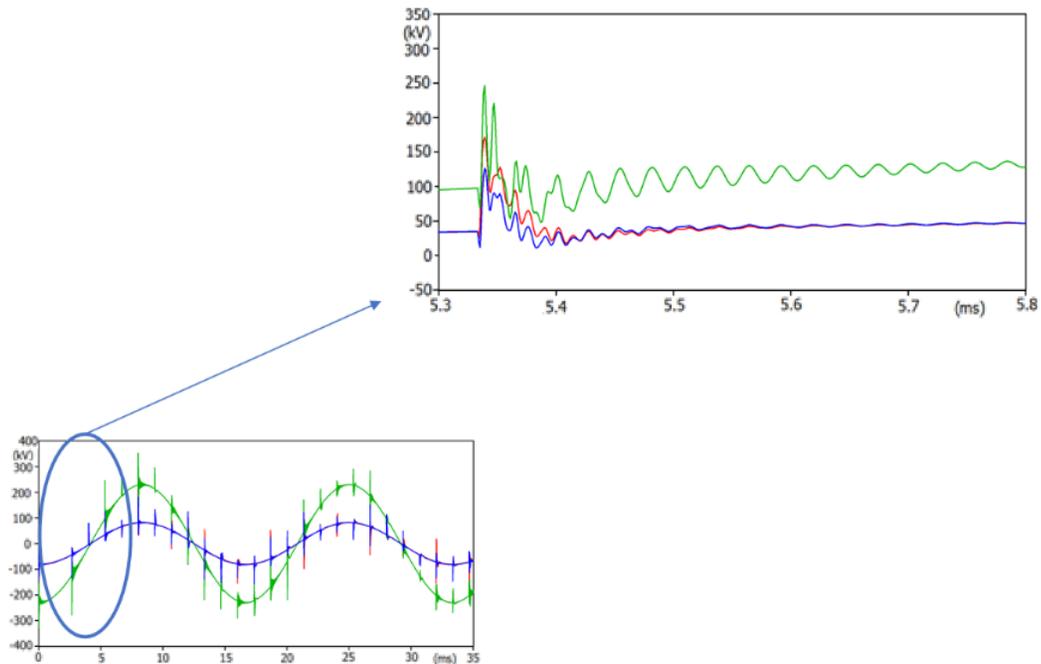


Figura 34: Sobretensión detallada vista en los conductores de fase sistema 230 kV

En la figura 34 se observa que las formas de onda presentan distintos niveles de voltaje, sin embargo, los picos de sobretensión que se presentan a lo largo del tiempo ocurren al mismo instante de tiempo, pero con valores y formas de onda algo diferentes y como se observa una de las fases presenta una onda más escarpada que las otras.

La presencia de voltaje en las fases y la nula circulación de corriente a través de las cadenas de aisladores, indica que no existe falla en el aislamiento de las líneas de transmisión, sin embargo, al igual que el caso anterior cada uno de los elementos que se analizaron presentan un nivel de sobretensión reflejado en sí mismo producto de la descarga atmosférica.

En el caso de los conductores de fase se presenta una sobretensión de frente rápido con forma de onda muy escarpada en cada una de las fases del circuito, como se observa en la figura 34 al ser una forma de onda alterna los picos de sobretensión son propios de un impulso atmosférico y se ven reflejados en el mismo punto a lo largo de la onda de las 3 fases, en el caso de las todas las fases del sistema se observa que la sobretensión es escarpada de frente rápido como se observa en el modelo del anexo 1.

5.3 Modelo de sistema de 500 kV

En la figura 35 se muestra los resultados de la sobretensión reflejada en el cable de guarda en el sistema de 500 kV, en la cual se observa una forma de onda de frente rápido con un pico de voltaje de 50 kV.

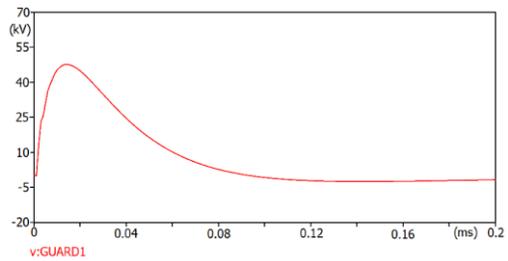


Figura 35: sobretensión vista en el cable de guarda sistema de 500 kV

Al igual que en los sistemas analizados previamente se muestran varios picos en la onda de voltaje a lo largo del tiempo los cuales se observarán detalladamente en la figura 36.

A diferencia de los casos analizados con anterioridad, el pico de voltaje inicial no es el nivel más alto de sobretensión, pero como se muestra en la figura 36 se atenúa con el tiempo luego de su pico máximo de voltaje.

En el sistema de 500 kV se observa que se presentan picos de corriente a lo largo de toda la onda con un pico máximo inicial de corriente inversa de 1.6 kA. Al igual que los sistemas previos a lo largo del cable de guarda se produce la misma forma de onda en distintos puntos de análisis por el modelo de onda viajera, debido a que la descarga se dirige hacia ambos lados del conductor como se observa en la figura 37.

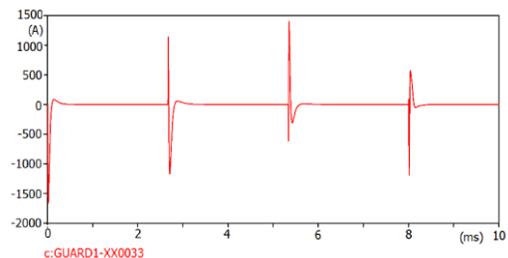


Figura 37: corriente vista en el cable de guarda sistema 500 kV

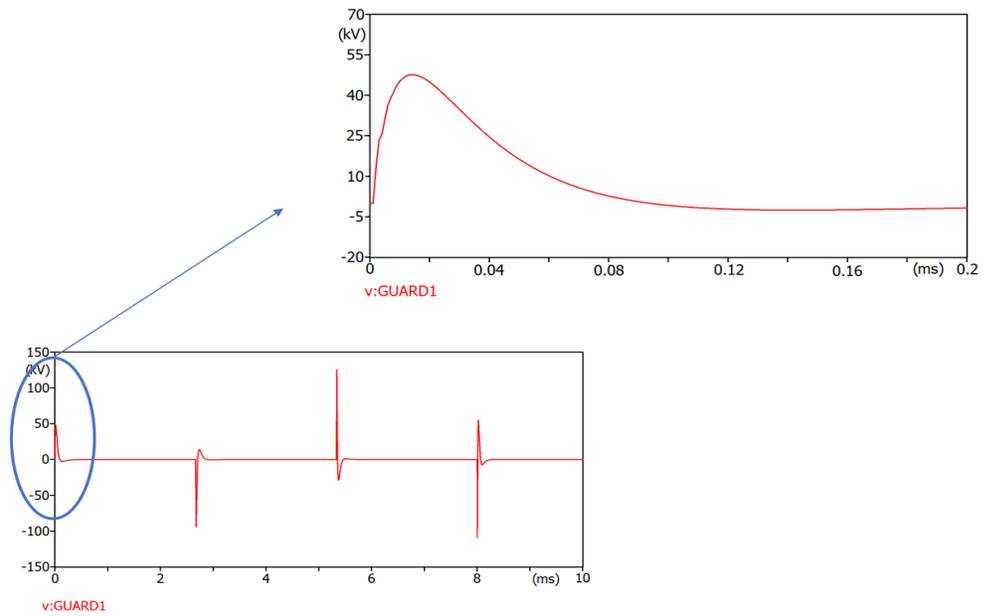


Figura 36: sobretensión detallada vista en el cable de guarda sistema de 500 kV

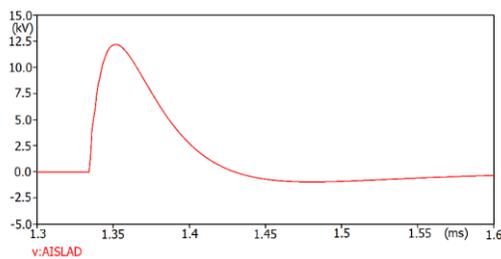


Figura 38: sobretensión vista en la cadena de aisladores sistema 500 kV

En la figura 38 se observa una sobretensión de frente rápido la cual tarda más en desaparecer, sin embargo, vuelve a ser 0. Esto sucede en todas las cadenas de aisladores en las tres fases del circuito.

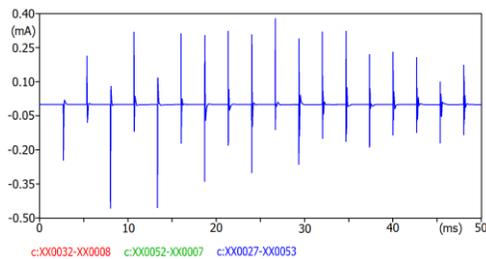


Figura 39: Corriente vista en las cadenas de aisladores sistema 500 kV.

En las cadenas de aisladores del sistema de 500 kV se observa que, la forma de onda de corriente que circula a través de cada una de las cadenas es idéntica y la circulación de corriente que se da en dichas cadenas nunca supera los 0.5 mA, por ende, no existe una circulación representativa de corriente lo cual indica que para este caso de estudio y para los sistemas analizados previamente en este artículo no existe fallo en el aislamiento de las torres de transmisión.

La sobretensión que se genera en la estructura de la torre de transmisión tiene un pico máximo de voltaje de 28 kV como se observa en la figura 40, y al igual que en los casos anteriores se presentan más picos de corriente a lo largo del tiempo, lo cual se vera de forma detallada en la figura 41.

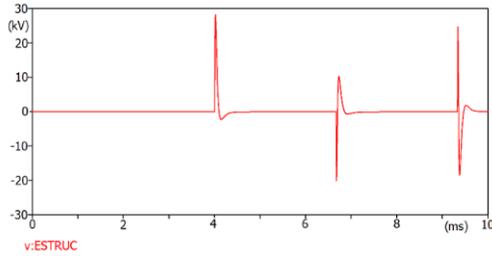


Figura 40: sobretensión vista en la estructura de la torre sistema 500 kV

Para este caso como se muestra en la figura 40 el pico máximo de voltaje se genera luego de un instante de tiempo, luego presenta varios picos de menor nivel y empieza a atenuarse con el tiempo. Como se observa en todos los casos anteriores la sobretensión que se ve en la estructura de la torre se da de manera similar en los tres casos estudiados

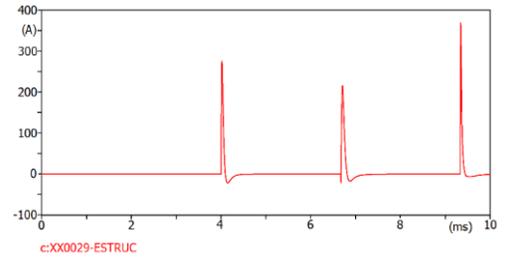


Figura 42: Corriente vista en las estructura de la torre sistema 500 kV.

En el caso del sistema de 500 kV el voltaje y la corriente se encuentran en fase y muestran formas de onda similares, en el caso de la corriente muestra un pico máximo de corriente de 3.5 kA. Al igual que los sistemas previos a lo largo del cable de guarda se produce la misma forma de onda en distintos puntos de análisis por el modelo de onda viajera.

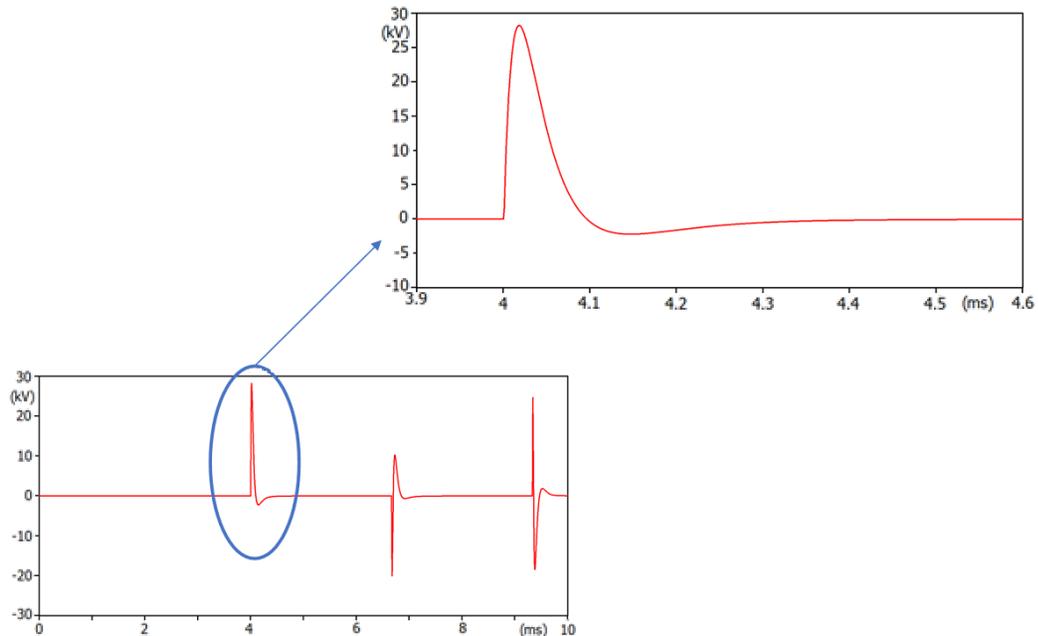


Figura 41: sobretensión detallada vista en la estructura de la torre sistema de 230 kV

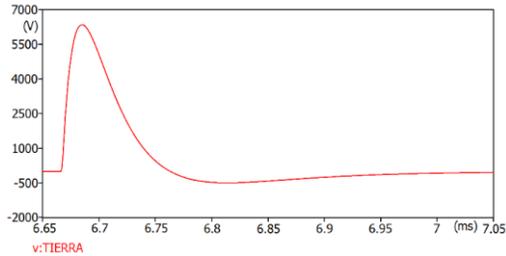


Figura 43: sobretensión vista en la puesta tierra de la torre sistema 500 kV

La sobretensión que se observa reflejada en la malla a tierra se observa en la figura 43, presenta un nivel pico de voltaje de 6 kV.

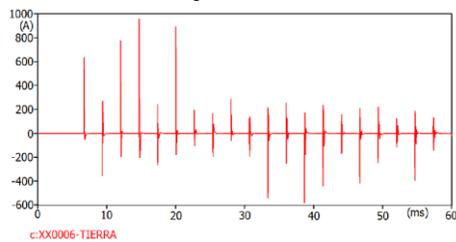


Figura 44: corriente vista en la puesta tierra de la torre sistema 500 kV

En la figura 44 se observa la corriente que soporta la malla a tierra y al estar conectada directamente con el cable de guarda por ende soporta niveles más elevados de corriente se observan más picos en la onda la cual se atenúa en el tiempo

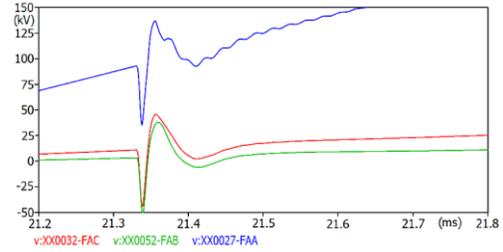


Figura 45: sobretensión vista en los conductores de fase sistema 500 kV

Como se observa en la figura 45 la forma de onda de la sobretensión vista desde los conductores de fase presenta un transitorio con un frente de onda rápido menos escarpado que en los casos anteriores, y al igual que en los sistemas previos estos niveles de tensión son soportados por la cadena de aisladores lo que ayuda a que no exista circulación de corriente, las formas de onda de los conductores de fase se verán de manera detallada en la figura 46.

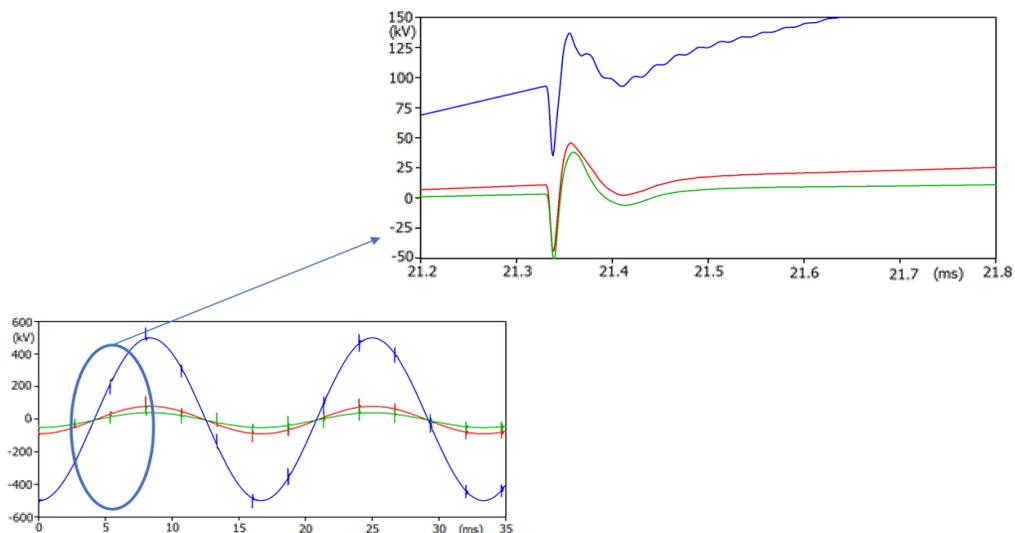


Figura 46: sobretensión detallada vista en los conductores de fase sistema 500 kV

6 Conclusiones

Mediante el análisis y modelamiento de las descargas atmosféricas, cuando estas impactan sobre el cable de guarda, se determinó que en cada uno de los elementos de la torre de transmisión se produce una sobretensión de frente rápido, con la cual tomando como referencia el estado inicial del elemento se pudo determinar los niveles de voltaje y corriente que se ven repartidos a lo largo de cada elemento, lo cual permite determinar cuál de estos componentes soporta más niveles de voltaje y corriente luego del impacto de la descarga atmosférica. En el presente trabajo se determinó que en base al análisis de niveles de voltaje y corriente los elementos en donde el transitorio se evidencia en mayor cantidad son: las cadenas de aisladores, la estructura de la torre y el sistema de puesta a tierra, esto debido a que dichos elementos están directamente conectados al cable de guarda.

Como se puede evidenciar en las figuras: 11, 20 y 29 la corriente que circula a través de las cadenas de aisladores para este caso de estudio indica que no es lo suficientemente representativa ni tiene los niveles necesarios para generar fallos en aislamiento de las torres de transmisión, sin embargo al elevar los niveles de corriente y el tiempo de falla producidos por la descarga atmosférica se podría determinar el nivel de voltaje al cual se producen fallas en el aislamiento, esto se determina mediante el nivel de corriente que circula a través de los aisladores y el voltaje que se ve en los conductores de fase. Al existir una falla en la cadena de aisladores la corriente que circula a través de la fase con fallo se eleva de forma instantánea mientras que el voltaje en la fase tiende a 0 durante el tiempo que dure el transitorio.

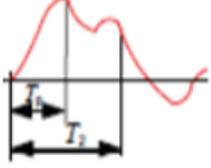
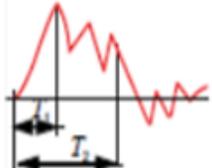
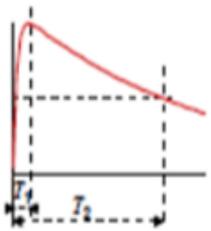
Es de suma importancia analizar los niveles de corriente que soportan las mallas de tierra de las torres de transmisión, como se observa en las figuras 15, 24 y 33. La malla a tierra es el elemento que más picos de corriente presenta en el tiempo, por lo cual se convierte en el elemento en donde se evidencia de mayor frecuencia el transitorio producido por las descargas atmosféricas

7 Trabajos futuros y recomendaciones

En el estudio de sobretensiones y transitorios producidos por descargas atmosféricas se tiene estudios limitados a ciertos casos específicos, lo cual nos permitiría abarcar diferentes análisis de los elementos y comportamientos en presencia de transitorios, así también como determinar niveles a los que se produzcan fallas en aislamiento y el apantallamiento de las torres de transmisión.

8 Anexos

Anexo 1

Frente de onda	Frente lento	Frente Rápido
Forma de onda real		
Rangos de voltaje	$20\mu s < T_p \leq 500\mu s$ $T_2 \leq 20\ ms$	$0.1\mu s < T_1 \leq 20\mu s$ $T_2 \leq 300\ ms$
Forma de análisis		
Rangos de tiempo	$T_p = 250\ \mu s$ $T_2 = 2500\ \mu s$	$T_1 = 1.2\ \mu s$ $T_2 = 50\ \mu s$

9 Referencias

- [1] R. P. Portero Calderon and D. F. Carrion Galarza, "Coordinación óptima de aislamiento en líneas de transmisión de alto voltaje considerando restricciones de contaminación. 1," 2019.
- [2] R. R. Nunes and W. Boaventura, "Insulation coordination considering the switching overvoltage waveshape - Part I: Methodology," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 4, pp. 2434–2440, 2009.
- [3] S. T. Mobarakei, T. Sami, and B. Porkar, "Back Flashover phenomenon analysis in power transmission substation for insulation coordination," *2012 11th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. IEEEIC 2012 - Conf. Proc.*, pp. 170–174, 2012.
- [4] A. H. Hamza, S. M. Ghania, A. M. Emam, and A. S. Shafy, "Statistical analysis of switching overvoltages and insulation coordination for a 500 kV transmission line," *2016 18th Int. Middle-East Power Syst. Conf. MEPCON 2016 - Proc.*, pp. 683–686, 2017.
- [5] D. Carrión, A. Ayo, and J. W. González, "Alternative Under Frequency Load Disconnection Methodology Based on Semi-Adaptative Model," *Enfoque UTE*, vol. 11, no. 1, pp. 96–107, 2020.
- [6] P. Masache, D. Carrión, and J. Cárdenas, "Optimal Transmission Line Switching to Improve the Reliability of the Power System Considering AC Power Flows," *Energies 2021, Vol. 14, Page 3281*, vol. 14, no. 11, p. 3281, Jun. 2021.
- [7] D. Salazar, Jair; García, Edwin; Carrión, "Recarga de vehículos eléctricos mediante una optimización entera mixta con participación de respuesta de la demanda," *I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, pp. 0–6, 2020.
- [8] D. Carrión, "Energy saving model through lighting management systems for residences," in *2013 Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, 2013, pp. 0–5.
- [9] F. Mosquera, "Localización óptima de plantas virtuales de generación en sistemas eléctricos de potencia basados en flujos óptimos de potencia," *I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, 2020.
- [10] M. Moghavvemi and C. Y. Chiang, "Insulation coordination associated with distributed generation connected at distribution level," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 33, no. 4, pp. 1077–1091, 2011.
- [11] S. Bedoui, L. Ben, M. H. Universiy, and O. El, "Insulation Coordination Study of 400 kV High Voltage Substation Etude de la coordination des isolements du poste de transformation haute tension 400 kV," *2019 Alger. Large Electr. Netw. Conf.*, pp. 1–6, 2019.
- [12] I. M. Rawi, M. Z. A. A. Kadir, and N. Azis, "Lightning study and experience on the first 500kV transmission line arrester in Malaysia," *2014 Int. Conf. Light. Prot. ICLP 2014*, pp. 1106–1109, 2014.
- [13] A. Sánchez and D. Carrión, "Modeling of the Behavior Power Flow on Transmission Lines Based on Voltage and Current Synchronopasors," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 4, pp. 1142–1149, 2017.

- [14] A. Aguila, D. Carrión, and L. Ortiz, "Analysis of power losses in the asymmetric construction of electric distribution systems," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 7, pp. 2190–2194, 2015.
- [15] V. F. Couto, S. H. L. Cabral, T. I. A. H. Mustafa, and L. H. B. Puchale, "Study of occurrence of overvoltage along power transmission lines with acceptable end voltage," *33rd Electr. Insul. Conf. EIC 2015*, no. June, pp. 29–32, 2014.
- [16] R. Shariatinasab and J. Gholinezhad, "The effect of grounding system modeling on lightning-related studies of transmission lines," *J. Appl. Res. Technol.*, vol. 15, no. 6, pp. 545–554, 2017.
- [17] Z. G. Datsios and P. N. Mikropoulos, "Modeling of lightning impulse behavior of long air gaps and insulators including predischage current: Implications on insulation coordination of overhead transmission lines and substations," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 139, pp. 37–46, 2016.
- [18] P. Sarajcev, D. Jakus, and D. Jolevski, "Transformer insulation coordination using volt–time curve and limit–state surface formulation," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 90, pp. 256–266, 2017.
- [19] K. C. Dimiduk, C. Q. Ness, and J. K. Foley, "Characteristics of lightning surges measured at metal oxide distribution arresters," vol. 8, no. 6, pp. 4010–4015, 1993.
- [20] J. Schoene *et al.*, "Direct lightning strikes to test power distribution lines - Part I: Experiment and overall results," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 4, pp. 2236–2244, 2007.
- [21] H. Motoyama, K. Shinjo, Y. Matsumoto, and N. Itamoto, "Observation and analysis of multiphase back flashover on the Okushishiku test transmission line caused by winter lightning," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 13, no. 4, pp. 1391–1398, 1998.
- [22] Y. Matsumoto *et al.*, "Measurement of lightning surges on test transmission line equipped with arresters struck by natural and triggered lightning," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 11, no. 2, pp. 996–1002, 1996.
- [23] C. T. Mata, V. A. Rakov, K. J. Rambo, P. Diaz, R. Rey, and M. A. Uman, "Measurement of the division of lightning return stroke current among the multiple arresters and grounds of a power distribution line," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 18, no. 4, pp. 1203–1208, 2003.
- [24] D. Carrión, J. W. Gonzalez, I. A. Isaac, G. J. Lopez, and H. A. Cardona, "Load Characterization Based on Voltage and Current Phasorial Measurements in Micro-Grids," *2017 Int. Conf. Inf. Syst. Comput. Sci.*, pp. 1–6, 2017.
- [25] D. Carrión, E. García, J. W. González, I. A. Isaac, G. J. López, and R. Hincapié, "Método Heurístico de Ubicación Óptima de Centros de Transformación y Enrutamiento de Redes Eléctricas de Distribución.," *Rev. T.*, vol. 13, no. 1, 2017.
- [26] J. Palacios and D. F. Carrión Galarza, "Estado del arte de la planeación de expansión de sistemas de transmisión," *I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, pp. 1–8, 2020.
- [27] J. A. Vique, X. H. Iturralde, and A.

- S. Mullo, "Analysis of the incidence of grounding with high resistivity against atmospheric discharges in the sub - transmission line of 69KV San Rafael - Análisis de la incidencia de las puestas a tierra con alta resistividad frente a descargas atmosféricas en la l," no. 1, pp. 5–9.
- [28] M. Bernardi *et al.*, "Lightning-correlated faults in power distribution networks," *2007 IEEE Lausanne POWERTECH, Proc.*, pp. 585–591, 2007.
- [29] T. Dalglish *et al.*, "Sobretensiones transitorias de origen atmosférico," *J. Exp. Psychol. Gen.*, vol. 136, no. 1, pp. 23–42, 2007.
- [30] V. O. K. S and R. C. Luis, "Cálculo de sobrevoltajes originados por descargas atmosféricas en líneas de transmisión utilizando el ATP (Alternative Transients Program) aplicado a la línea de transmisión Santa Rosa," vol. 19, no. February, pp. 182–191, 2005.
- [31] D. Carrion, A. Ayo, and J. W. Gonzalez, "Under Frequency Load Disconnection Scheme Based on Improvement to Semi-Adaptative Model," *Proc. - 2019 Int. Conf. Inf. Syst. Comput. Sci. INCISCOS 2019*, pp. 361–365, 2019.
- [32] D. Carrión, J. W. González, I. A. Isaac, and G. J. López, "Optimal Fault Location in Transmission Lines Using Hybrid Method," in *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference*, 2017, p. 6.
- [33] L. Cruz, D. Carrión, and A. Riofrío, "Localización de fallas mediante la transformada de wavelet en líneas de transmisión," *Rev. Técnica "Energía,"* vol. 13, no. 1, p. 11, 2017.
- [34] D. Carrión, J. W. González, G. J. López, and I. A. Isaac, "Alternative fault detection method in electrical power systems based on ARMA model," *2019 FISE-IEEE/CIGRE Conf. - Living Energy Transition, FISE/CIGRE 2019*, 2019.
- [35] A. F. Imece and D. W. Durbak, "Modeling guidelines for fast front transients," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 16, no. 1, p. 67, 1996.
- [36] V. H. Orejuela, "Selección y coordinación del aislamiento para el sistema de transmisión paute-Guayaquil," Escuela Politecnica Nacional, 1972.
- [37] A. A. Kusuma, P. A. A. Pramana, B. S. Munir, and S. Rica Ayu, "Studying of lightning surge transient effect on 500 kV quadruple circuit transmission line," *Proc. - 2016 6th Int. Annu. Eng. Semin. Ina. 2016*, pp. 276–279, 2017.
- [38] V. G. Karla, "contribucion para la implementacion de una red de detccion de rayos en ecuador."
- [39] D. Carrión, J. Palacios, M. Espinel, and J. W. Gonzalez, "Transmission Expansion Planning Considering Grid Topology Changes and N-1 Contingencies Criteria," in *Recent Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, Springer, Ed. Springer, 2021, pp. 266–279.
- [40] D. Carrión and J. W. González, "Ubicación óptima de PMU considerando restricciones de contingencias N-1 en sistemas eléctricos de potencia," *Enfoque UTE*, vol. 10, no. 1, pp. 1–12, 2019.
- [41] J. Toctaquiza and D. Carrión, "Estado del arte modelo óptimo de operación posterior a ataques intencionales considerando conmutación de los sistemas de

- transmisión,” *ITECKNE Innovación e Investig. en Ing.*, vol. 18, no. 2, p. 17, 2021.
- [42] J. A. M. Velasco, “líneas aéreas de transporte . Parte I: Cálculo de sobretensiones,” *Rev. Iberoam. del ATP*, pp. 1–36.
- [43] J. A. Martínez Velasco and F. C. Aranda, “Análisis de sobretensiones de origen atmosférico en líneas aéreas de transporte. Parte 2: Cálculo estadístico de sobretensiones,” *Rev. Iberoam. del ATP*, vol. 4, no. January, pp. 1–36, 2002.
- [44] J. Ramirez, D. Carrión, and E. Inga, “Compensación reactiva en redes eléctricas de transmisión basado en programación no lineal considerando ubicación óptima de SVC,” *Rev. I+D Tecnológico*, vol. 17, no. February, 2021.
- [45] S. Pinzón, D. Carrión, and E. Inga, “Optimal Transmission Switching Considering N-1 Contingencies on Power Transmission Lines,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 19, no. 4, pp. 534–541, 2021.
- [46] D. Carrion and J. W. Gonzalez, “Optimal PMU Location in Electrical Power Systems Under N-1 Contingency,” in *2018 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS)*, 2018, no. 1, pp. 165–170.
- [47] D. Carrión, J. Francisco, and M. Paul, “Revisión para la restauración óptima de la operación del sistema eléctrico basado en criterios de calidad de energía y estabilidad,” *Rev. I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 1, p. 9, 2021.
- [48] F. Ricardo and V. Quezada, “Modelación matemática de ondas viajeras generadas por descargas atmosféricas en sistemas de distribución Desarrollado en el laboratorio de alta tensión de la ups- sede guayaquil.”
- [49] H. L. RORDEN, “Solution of Circuits Subjected to Traveling Waves,” *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 51, no. 3, pp. 824–836, 1932.

9.2 Resumen de Indicadores

