

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

Análisis de los sobre voltajes en sistemas de transmisión con discontinuidades determinadas por líneas aéreas, cables y subestaciones aisladas en SF6, usando ATP-EMTP

Análisis de los sobre voltajes por impulso atmosférico en subestaciones aisladas en SF6, alimentadas por líneas aéreas y las implicaciones en la protección del transformador, usando ATP-EMTP

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

RICARDO FABIAN LOZADA ORQUERA

ricardo.lozada@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ing. Luis Edmundo Rúaes Corrales

luis.ruales@epn.edu.ec

DMQ, Abril 2023

CERTIFICACIONES

Yo, Ricardo Fabian Lozada Orquera declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Ricardo Fabian Lozada Orquera

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Ricardo Fabian Lozada Orquera, bajo mi supervisión.

Ing. Luis Edmundo Ruales Corrales

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Ricardo Fabian Lozada Orquera

Ing. Luis Edmundo Ruales Corrales

AGRADECIMIENTO

Quiero ofrecer mis más sinceros agradecimientos a mis padres Faustina y Fabián por su apoyo incondicional durante toda mi etapa estudiantil, brindándome todo el apoyo para superar los obstáculos que se me han presentado a lo largo de mi vida, sin su apoyo nada de esto sería posible. Agradezco a mis hermanas Alejandra y Marcela por siempre ser un ejemplo a seguir con su dedicación y disciplina todos mis logros no serían posibles sin mi familia apoyándome.

Agradezco el apoyo del Ing. Luis Rurales que siempre ha sabido guiarme e instruirme a lo largo de la realización de este trabajo, brindándome su tiempo y apoyo en la realización del mismo, al igual que a mis compañeros Luis, Jordín, Josua y Pablo por su gran amistad y apoyo incondicional durante estos años de formación profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
AGRADECIMIENTO.....	III
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	IV
1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	8
1.1 Objetivo general.....	8
1.2 Objetivos específicos.....	8
1.3 Alcance.....	9
1.4 Marco teórico.....	9
1.4.1 Sobre voltajes en sistemas eléctricos.....	9
1.4.2 Ondas viajeras.....	11
1.4.3 Reflexión y refracción de ondas viajeras.....	15
1.4.4 Descargas atmosféricas.....	18
1.4.5 Apantallamiento de líneas aéreas y subestaciones.....	22
1.4.6 Subestaciones aisladas en SF6.....	24
1.4.7 Descargadores de sobrevoltaje ZnO (Oxido de Zinc).....	25
1.4.8 ATPDraw.....	26
2. METODOLOGÍA.....	26
2.1 Modelo de torre.....	27
2.2 Modelo de línea de transmisión.....	30
2.3 Modelo de pararrayos.....	33
2.4 Cadena de aisladores.....	36
2.5 Modelo de la subestación.....	37
2.6 Fuente de corriente de impulso atmosférico.....	41
2.7 Fuente sinusoidal de voltaje de 230 kV.....	43
3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
3.1 Resultados.....	44
3.1.1 CASO BASE DE ANALISIS.....	44
3.1.2 Voltaje incidente en el ingreso de la subestación con y sin los pararrayos.....	48
3.1.3 Descargas inversas para magnitudes de corriente de rayo de 100,200 y 250 kA, manteniendo constantes la torre en la que se produce la descarga y la resistencia de pie de torre.	49

3.1.4 Simulación de casos más favorables y menos favorables al considerar una fuente de 60 Hz.....	53
3.1.5. Comparación de los voltajes al varias la ubicación de la descarga	57
3.1.6 Variación de resistencia de pie de torre	59
3.1.7 Descargas atmosféricas en el conductor de fase	60
3.2 Conclusiones.....	62
3.3 Recomendaciones.....	63
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA.....	63

RESUMEN

El presente Trabajo de Integración Curricular (TIC) se enmarca en la teoría de ondas viajeras en sistemas eléctricos con discontinuidades, descargas atmosféricas, modelos de líneas y torres, aislamiento en gases, pararrayos y sub-estaciones aisladas en SF6 (hexafluoruro de azufre).

Para estudiar el efecto de los transitorios electromagnéticos en sistemas con discontinuidades se propone un modelo que representa una línea de transmisión de 7 vanos con una discontinuidad, el cual consiste en una sub estación aislada en SF6, que permite estudiar el comportamiento de los sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas, ya sean en las torres o cables de guardia y conductores de fase, de esta manera se podrá comprender su comportamiento como ondas viajeras a través del sistema eléctrico, todo esto con el objetivo de determinar las magnitudes de voltaje en los terminales de un transformador y evaluar la utilidad de colocar pararrayos para protegerlo de sobrevoltajes.

El análisis es efectuado usando el software especializado en transitorios electromagnéticos ATP (Alternative Transient Program), haciendo uso de los modelados predeterminados con los que cuenta esta herramienta de simulación, estos modelos se los integrará al sistema base de estudio para este trabajo, por lo cual en este TIC se presenta la metodología propuesta para determinar los distintos parámetros de cada modelo.

Finalmente, este TIC presenta la simulación del sistema con discontinuidad propuesto para diversos casos de estudio, en los cuales, se analizan los resultados obtenidos y en base a estos se obtienen conclusiones relevantes en torno al comportamiento de este sistema frente a descargas atmosféricas.

PALABRAS CLAVE: Onda viajera, GIS, descarga atmosférica, discontinuidades, líneas de transmisión.

ABSTRACT

This Curricular Integration Work (TIC) is framed in the theory of traveling waves in electrical systems with discontinuities, atmospheric discharges, line and tower models, gas insulation, lightning rods, and SF6 (sulfur hexafluoride) insulated substations.

To study the effect of electromagnetic transients in systems with discontinuities, a model representing a 7-span transmission line with a discontinuity is proposed, which consists of an SF6 insulated substation, which allows studying the behavior of overvoltages due to atmospheric discharges; this allows to study the behavior of overvoltages due to atmospheric discharges, either in the towers or guard cables and phase conductors, in this way it will be possible to understand their behavior as traveling waves through the electrical system, all this to determine the voltage magnitudes at the terminals of a transformer and evaluate the usefulness of placing lightning arresters to protect it from overvoltages.

The analysis is carried out using the software specialized in electromagnetic transients ATP (Alternative Transient Program), making use of the predetermined models that this simulation tool has, these models will be integrated into the base system of study for this work, so this TIC presents the proposed methodology to determine the various parameters of each model.

Finally, this TIC presents the simulation of the system with discontinuity proposed for different cases of study, in which the obtained results are analyzed, and based on these, relevant conclusions are obtained about the system's behavior in front of atmospheric discharges.

KEYWORDS: Traveling wave, GIS, atmospheric discharge, discontinuities, transmission lines.

1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Conforme a la teoría de ondas viajeras al conectar componentes de un sistema eléctrico con diferentes valores de impedancia característica, se producen discontinuidades que producen cambios en las magnitudes de voltaje y corriente que viajan a través de esa discontinuidad. Este fenómeno sucede cuando una subestación aislada en SF6 se conecta en el extremo de una línea de transmisión aérea (línea de transmisión y barras aisladas en SF6 con valores diferentes de impedancia característica). Si a las barras aisladas en SF6 se conecta un transformador de potencia, como usualmente sucede, esta configuración influirá en las magnitudes de sobrevoltajes que llegan hasta el transformador.

En el presente trabajo de integración curricular, haciendo uso del software ATP (Alternative Transient Program) se modelará un sistema eléctrico, para efectos de pruebas, un sistema de transmisión de líneas aéreas y una subestación aislada en SF6 a la cual se conectará un transformador de potencia, donde se determinarán los sobrevoltajes originados por descargas atmosféricas que impactan en la línea de transmisión. En este contexto se evaluará la necesidad o no de usar descargadores de sobrevoltajes para controlar los sobrevoltajes producidos en el transformador.

Considerando que el SF6 presenta una gran resistencia frente a perturbaciones de voltaje de frente lento, usualmente producidos por maniobras, estas no serán consideradas en el presente trabajo.

1.1 Objetivo general

Usando el software ATP, determinar la magnitud de los sobrevoltajes en transformadores de potencia, producidos por descargas atmosféricas en la línea de transmisión conectadas a subestaciones aisladas en SF6 y evaluar la necesidad de utilizar o no descargadores de sobretensión.

1.2 Objetivos específicos

1. Realizar una investigación bibliográfica sobre la teoría de ondas viajeras, impulsos transitorios generados por descargas atmosféricas en líneas de transmisión aéreas y su comportamiento ante discontinuidades.

2. Determinar los modelos para cada uno de los componentes del sistema de transmisión de prueba y sus parámetros asociados, incluyendo las características del impulso atmosférico incidente.
3. Familiarizarse con la operación de la herramienta digital ATP y realizar las simulaciones correspondientes en el sistema de transmisión de prueba, para determinar los sobrevoltajes en los componentes del sistema, particularmente en el transformador de potencia
4. Realizar el análisis de los resultados obtenidos, en base a los cuales se establecerán las conclusiones.

1.3 Alcance

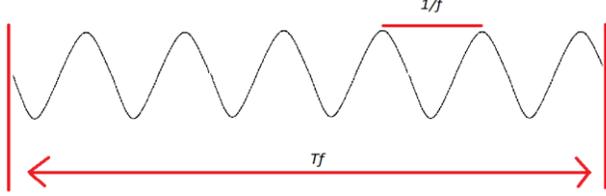
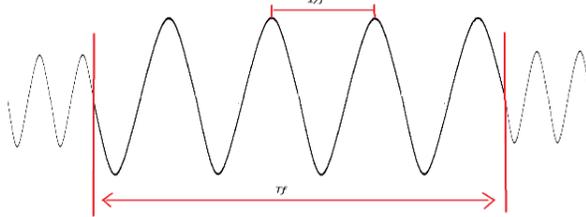
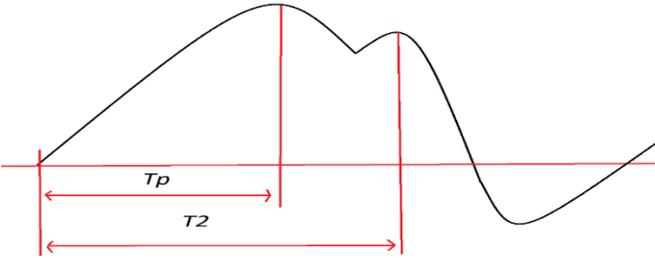
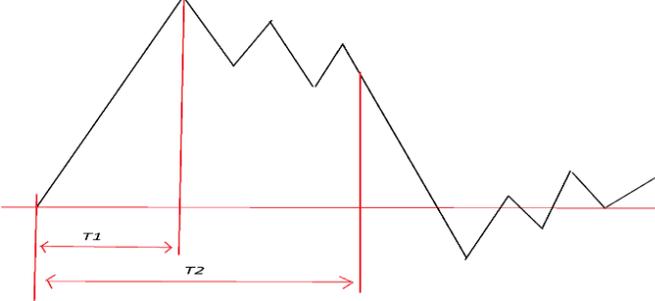
Partiendo de una investigación bibliográfica sobre ondas viajeras, impulsos transitorios atmosféricos en las líneas de transmisión y la caracterización de la onda incidente en las subestaciones en aisladas en SF6. Considerando que el análisis será efectuado haciendo uso del ATP (Alternative Transient Program), se analizarán las prestaciones, modelos de componentes, modos de simulación y su operación. En un sistema de transmisión de prueba, se determinarán los modelos de los componentes teniendo en consideración la frecuencia del impulso atmosférico. Se ejecutarán las simulaciones de los diferentes casos, con el análisis correspondiente de los resultados obtenidos. Se dará especial atención a la necesidad o no de utilizar descargadores de sobrevoltajes para controlar los sobrevoltajes obtenidos en el transformador de potencia. Finalmente, se procederá a la redacción del documento en el que se presentarán las conclusiones, recomendaciones y bibliografía utilizada.

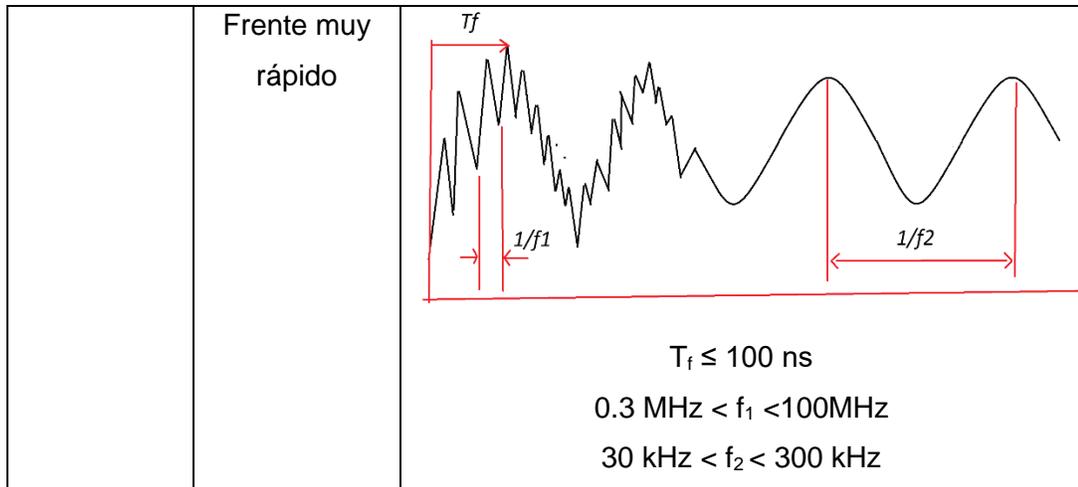
1.4 Marco teórico

1.4.1 Sobre voltajes en sistemas eléctricos

Según el estándar IEC 60071-1 los sobrevoltajes en sistemas eléctricos se dividen en dos grupos, de baja frecuencia y transitorios [1] como se muestra en la Tabla 1.1

Tabla 1.1. Formas de onda IEC 60071-1 [1].

Clase		Forma de onda
Baja frecuencia	Permanentes	 <p data-bbox="938 464 1170 548"> $f = 50 \text{ Hz o } 60 \text{ Hz}$ $T_i \geq 3600 \text{ s}$ </p>
	Temporarios	 <p data-bbox="927 863 1182 947"> $10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0.02 \text{ s} \leq T_i \leq 3600 \text{ s}$ </p>
Transitorios	Frente lento	 <p data-bbox="932 1251 1177 1335"> $20 \mu\text{s} < T_p < 5000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$ </p>
	Frente rápido	 <p data-bbox="911 1703 1154 1787"> $0.1 \mu\text{s} < T_f \leq 20 \mu\text{s}$ $0.2 T_2 \leq 300 \mu\text{s}$ </p>



Los sobre voltajes de frecuencia industrial corresponden a fallas fase tierra, rechazo de carga, ferresonancia. Los sobrevoltajes transitorios de frente lento corresponden a los producidos como consecuencia de la acción de una maniobra, como energización de líneas de transmisión, energización de bancos de capacitores, energización de transformadores, etc

Los sobrevoltajes de frente rápido se producen, esencialmente por la presencia de descargas atmosféricas, mientras los sobrevoltajes de frente muy rápido son consecuencia de operación, entre otros, de seccionadores en subestaciones aisladas en SF6 [1].

1.4.2 Ondas viajeras

Un cambio súbito del nivel de voltaje o corriente en un punto del sistema no se siente de manera instantánea en todo el sistema, transcurre un tiempo finito para que la perturbación viaje por el sistema, a esto se le conoce como ondas viajeras [2]. El objetivo principal del estudio de las ondas viajeras es establecer un método de protección del sistema frente a perturbaciones de voltaje que viajan por este dañando a los equipos y causando interrupciones en el servicio eléctrico [3].

Para el estudio de sobre voltajes por descargas atmosféricas el modelo de una línea sin pérdidas es una simplificación para entender algunos fenómenos. Como se puede ver en la Figura 1.1, considerando líneas largas con parámetros distribuidos, siendo Δx el elemento diferencial de longitud, el voltaje v y la corriente i son funciones de ambas x y t

para lo cual se debe usar derivadas parciales para determinar la ecuación de la onda, siendo la Ecuación 1.1 la caída de voltaje en la línea [4].

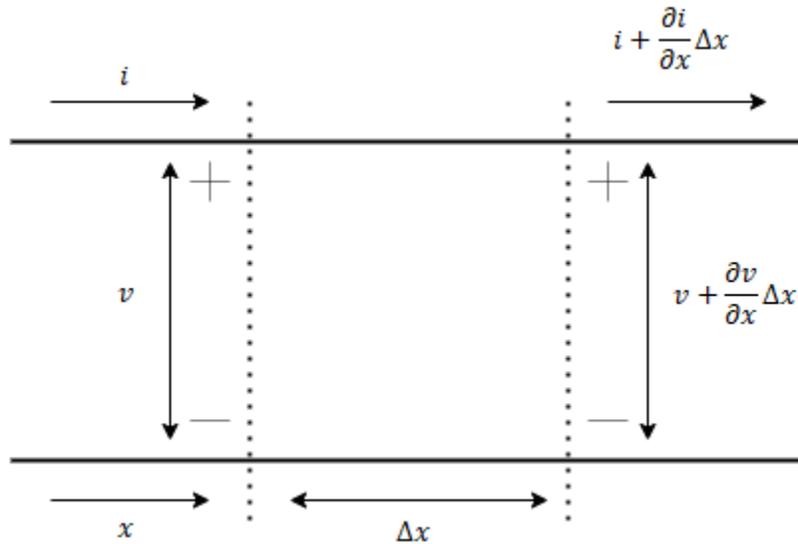


Figura 1.1. Diagrama de una sección elemental de una línea de transmisión que muestra la fase y el neutro de retorno

$$\Delta v = i(R * \Delta x) + (L * \Delta x) \frac{\partial i}{\partial x}$$

Ecuación 1.2. Caída de voltaje

La cual se puede agrupar como se muestra en la Ecuación 1.3 considerando el signo negativo ya que $v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x$ debe ser menor a 'v' cuando 'i' y $\frac{\partial i}{\partial x}$ son positivos

$$\frac{\partial v}{\partial x} \Delta x = - \left(R * i + L \frac{\partial i}{\partial x} \right) \Delta x$$

Ecuación 1.3. Caída de voltaje

Escribiendo al Ecuación 1.4 de forma algebraica obtiene la siguiente Ecuación.

$$\frac{\partial i}{\partial x} \Delta x = - \left(G * i + C \frac{\partial v}{\partial t} \right) \Delta x$$

Ecuación 1.4. Caída de voltaje forma algebraica

Dividiendo las ecuaciones 1.3. y 1.4. para Δx y debido a la superposición de una línea ideal donde R y G serán cero, se obtienen las siguientes expresiones

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -L \frac{\partial i}{\partial t}$$

Ecuación 1.5. derivada parcial

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -C \frac{\partial v}{\partial t}$$

Ecuación 1.6. derivada parcial

Realizando las derivadas parciales en ambos términos de las ecuaciones anteriores se obtiene la ecuación 1.7. la cual representa a la ecuación de la onda viajera por una línea de transmisión ideal [4]

$$\frac{1}{LC} * \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$$

Ecuación 1.7. Ecuación de la onda viajera para líneas ideales

Teniendo como solución de la ecuación 1.8. a la siguiente expresión

$$v = f(x - vt)$$

Ecuación 1.8. Solución ecuación de la onda

La ecuación 1.8. es una solución de la ecuación 1.7. si

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Ecuación 1.9 Solución de la ecuación de la onda [4]

Donde v representa la velocidad de propagación de la onda por la línea medida en m/s. Como se puede ver en la ecuación 1.9. Esta velocidad depende tanto de la inductancia como de la capacitancia de la línea [4].

De igual forma la ecuación 1.10 y 1.11 son soluciones generales para la ecuación de la onda

$$v = e_f(x - c_0t) + e_b(x + c_0t)$$

Ecuación 1.10 Solución general de la ecuación de la onda

$$i = Y_0[e_f(x - c_0t) - e_b(x + c_0t)]$$

Ecuación 1.11. Solución general de la ecuación de la onda

Realizando la conversión de la dirección de viaje, su puede reescribir las Ecuaciones 1.10 y 1.11 como se muestra en la Ecuación 1.12 y 1.13

$$v = e_f + e_b$$

Ecuación 1.12. Solución general de la ecuación de voltaje

$$i = Y_0(e_f - e_b) = i_f - i_b$$

Ecuación 1.13. Solución general de la ecuación de corriente

Donde:

e_f, e_b son los valores de voltaje de las ondas viajeras

i_f, i_b son los valores de corriente de las ondas viajeras

A partir de las Ecuaciones 1.12 y 1.13 se realizará el análisis de ondas viajeras.

La impedancia característica para una línea aérea con parámetros distribuidos se representa por medio de la inductancia y capacitancia, las mismas que se calculan por medio de la Ecuación 1.14 y 1.15

$$C = \frac{2\pi * \epsilon_0}{\ln\left(\frac{d}{r}\right)} \left[\frac{F}{m}\right]$$

Ecuación 1.14. Capacitancia para una línea aérea [4]

$$L = 2 \times 10^{-7} * \ln\left(\frac{d}{r}\right) \left[\frac{H}{m}\right]$$

Ecuación 1.15. inductancia para una línea aérea [4]

Donde "r" representa el radio del conductor y "d" representa la distancia entre fases al igual que ϵ_0 es la permeabilidad del vacío y es igual a $8.85 \times 10^{-12} \left[\frac{F}{m}\right]$

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Ecuación 1.16. Impedancia característica [4]

1.4.3 Reflexión y refracción de ondas viajeras

Las Ecuaciones 1.12 y 1.13 establecen una clara relación entre las ondas de voltaje y las ondas de corriente en líneas de transmisión, la cual es determinada por la impedancia característica de la línea como se muestra en la Ecuación 1.9. Lo que significa que cuando se presenta una interrupción en la red debido a un cambio en la impedancia característica, como puede ocurrir en la conexión de una línea aérea a una subestación aislada en SF6, se produce un fenómeno que garantiza que la proporción entre las ondas de voltaje y corriente se mantenga constante. Este fenómeno produce la aparición de dos nuevas ondas: la onda reflejada de voltaje que regresa a lo largo de la línea y se superpone a la onda incidente, y la onda transmitida de voltaje que continúa a través de la discontinuidad. Ambas ondas de voltaje viajan con sus respectivas ondas de corriente, y sus magnitudes son tales que mantienen la proporcionalidad entre el voltaje y la corriente establecida por las impedancias características del medio en el que se encuentran las ondas. Además, el voltaje y la corriente en la discontinuidad de la línea son continuos y la energía se mantiene constante.

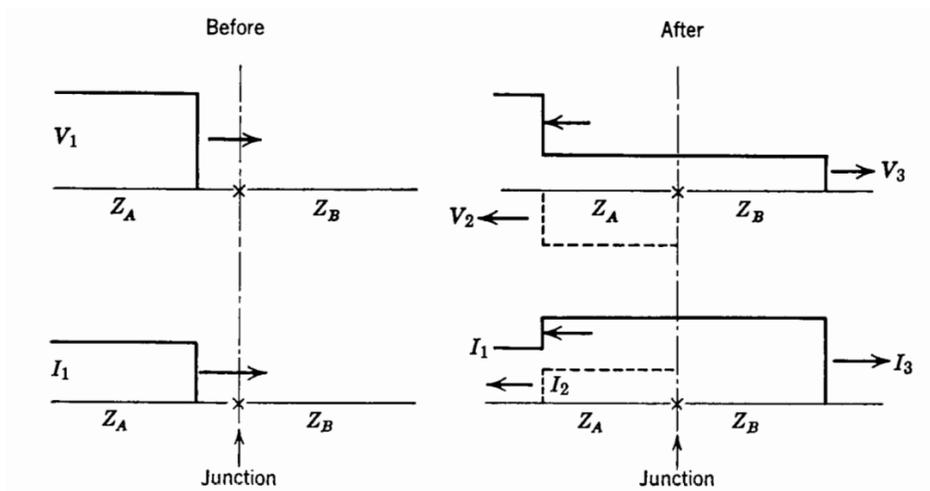


Figura 1.2. Diagrama de ondas de voltaje y corriente transmitidas y reflejadas en discontinuidades

Considerando dos impedancias características Z_a y Z_b las cuales corresponden a un tramo de línea y una subestación donde $Z_a > Z_b$, suponiendo una onda de voltaje con una función paso y amplitud V_1 como se muestra en la Figura 1.2, cuando se aproxima a la subestación, la onda de corriente tendrá la misma forma que la función paso y con una amplitud como se muestra en la Ecuación 1.17.

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_A}$$

Ecuación 1.17. Onda de corriente

Se define la onda reflejada de voltaje V_2 y la onda transmitida de voltaje V_3 , así como sus respectivas corrientes mostradas en las Ecuación 1.18. y 1.19.

$$I_2 = -\frac{V_2}{Z_A}$$

Ecuación 1.18. Onda de corriente reflejada

$$I_3 = \frac{V_3}{Z_B}$$

Ecuación 1.19. Onda de corriente transmitida

Para facilitar los cálculos, se establece que la dirección positiva del eje x es la misma que la dirección de viaje de la onda incidente. En consecuencia, se observa que la corriente I_2 se está moviendo en dirección opuesta al voltaje V_2 , en dirección $-x$. Como se ha señalado previamente, tanto la corriente como el voltaje en la intersección deben ser continuos, lo que conduce a la afirmación de que:

$$V_3 = V_1 + V_2$$

Ecuación 1.20. Continuidad de voltaje

$$I_3 = I_1 + I_2$$

Ecuación 1.21. Continuidad de corriente

Remplazando las Ecuaciones 1.17, 1.18 y 1.19 en la Ecuación 1.21. Se tiene como resultado la Ecuación 1.19

$$\frac{V_1}{Z_A} - \frac{V_2}{Z_A} = \frac{V_3}{Z_B}$$

Ecuación 1.22. Ondas de voltaje

Las ecuaciones de ondas reflejadas y transmitidas de voltaje en función de la onda incidente se muestran en las Ecuaciones 1.23 y 1.24 las cuales se obtienen a partir de las Ecuaciones 1.20 y 1.22

$$V_2 \left(\frac{Z_B + Z_A}{Z_B Z_A} \right) = V_1 \left(\frac{Z_B - Z_A}{Z_A Z_B} \right)$$

Ecuación 1.23. Ecuación de onda de voltaje reflejada y transmitida

$$V_3 = \left(\frac{Z_B - Z_A}{Z_A + Z_B} \right) V_1$$

Ecuación 1.24. Ecuación de onda de voltaje reflejada y transmitida

Las Ecuaciones 1.23 y 1.24 incluyen un valor entre paréntesis que se conoce como coeficiente de reflexión, que se suele representar por la letra "a". Es evidente que el valor de "a" puede ser positivo o negativo según las magnitudes de Z_a y Z_b , y su valor se sitúa entre -1 y 1. En el caso presente, se ha establecido que $Z_a > Z_b$, lo que significa que el valor de "a" es negativo.

De esta forma despejando V_2 de las Ecuaciones 1.20 y 1.22 se obtiene el coeficiente de transmisión dentro de los paréntesis en las Ecuaciones 1.25. y 1.26. el cual se denota con la letra 'b' este tiene un valor entre 0 y 2 desentendiendo el valor de las impedancias características.

$$V_3 \left(\frac{Z_B + Z_A}{Z_B Z_A} \right) = \frac{2V_1}{Z_A}$$

Ecuación 1.25. Coeficientes de transmisión

$$V_3 = \left(\frac{2Z_B}{Z_B + Z_A} \right) V_1$$

Ecuación 1.26. Coeficientes de transmisión

1.4.4 Descargas atmosféricas

Las descargas atmosféricas son una de las fuentes de sobrevoltajes más importantes en los sistemas eléctricos. Su mayor afección se produce cuando éstas se producen en las líneas de transmisión, produciendo ondas de voltaje, generalmente con un frente de onda empujado que viajan hasta las subestaciones. Lo anotado no significa que no se produzcan descargas atmosféricas sobre las subestaciones, en este caso el grado de apantallamiento de éstas hace que no se produzcan mayores consecuencias.

Las descargas en líneas de transmisión pueden producirse sobre las torres y cables de guardia, sobre conductores de fase, conocido como falla de apantallamiento y por descargas que caen en las cercanías de las líneas de transmisión, produciendo inducción en los conductores de la línea.

Ya que las líneas de transmisión se encuentran apantalladas. Una descarga atmosférica puede impactar en los conductores de fase o impactar en el cable de guardia, si la diferencia de potencial entre la torre y los conductores de fase es muy elevada se producirá un cebado a través de la cadena de aisladores.

En el caso que la descarga se de en una sección del cable de guardia se generarán dos ondas con una intensidad igual a la mitad del valor de la descarga, las cuales se propagan en dos direcciones hacia las torres más cercanas como se aprecia en la figura 1.3.

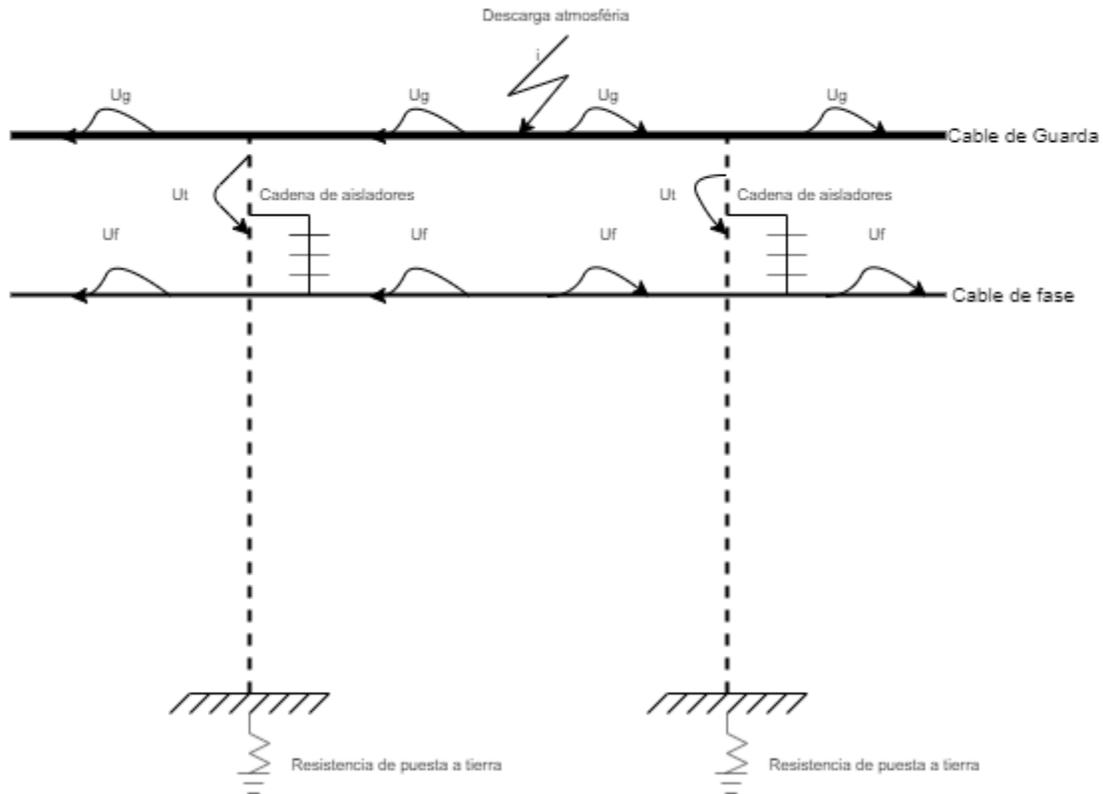


Figura 1.3 Descarga atmosférica en cable de guarda

Siendo las ecuaciones que se presentan a continuación las que describen el comportamiento de las ondas de tensión que se generan después de la descarga en el cable de guarda U_g o en el de fase U_f .

$$U_g = \frac{Z_g * I_d}{2}$$

Ecuación 1.27 voltaje en el cable de guarda

$$U_f = K * U_g$$

Ecuación 1.28 voltaje en el cable de fase

$$U_g - U_f = (1 - K)U_g$$

Ecuación 1.29 Limite para el contorno de aisladores

Donde Z_g representa la impedancia característica del cable de guarda, I_d la corriente de descarga y K el coeficiente de acoplamiento entre el cable de guarda y el de fase, si la Ecuación 1.29. presenta un valor superior al valor máximo que soporta la cadena de alisadores que sostiene al cable de fase, se produce un contorneo hacia el cable de fase, en caso contrario la onda viajará por la torre hacia tierra. [5]

En el caso que la descarga sea directa en la torre la corriente de rayo se dividirá en dos ondas que viajan en direcciones contrarias hacia las otras torres por el cable de guarda, y una parte que viajar por la torre para lo cual se debe de considerar un circuito equivalente para la torre como se muestra en la Figura 1.4, el cual está representado por una línea ideal con una impedancia característica Z_t y el tiempo de propagación τ_t , el cable de guarda se modela con líneas aéreas ideales con impedancia característica Z_g y la impedancia de puesta a tierra de la torre se representa con R_p . [5]

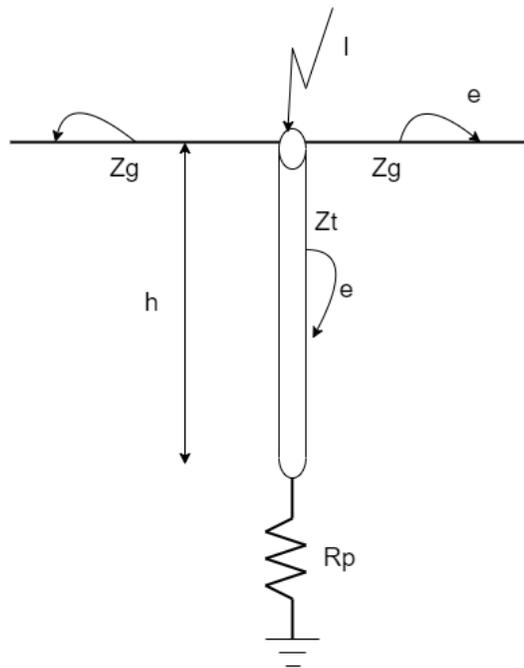


Figura 1.4. Descarga atmosférica en la torre.

De igual manera la resistencia de puesta a tierra será un factor importante ya que entre más alta sea ésta mayor será el voltaje que se origine en las crucetas de la torre [5].

Por lo general cuando la descarga impacta en un conductor de fase de la línea la mayor probabilidad de que se produzca es en el conductor ubicado en la fase superior de la torre o en la fase exterior. Como se muestra en la Figura 1.5. la corriente del rayo se divide en

dos ondas iguales que viajan en direcciones opuestas donde la siguiente expresión representa el máximo voltaje [5]

$$U_1 = \frac{Z_c * I_d}{2}$$

Ecuación 1.30 Voltaje máximo generado por la descarga.

Donde Z_c representa la impedancia característica del conductor de fase

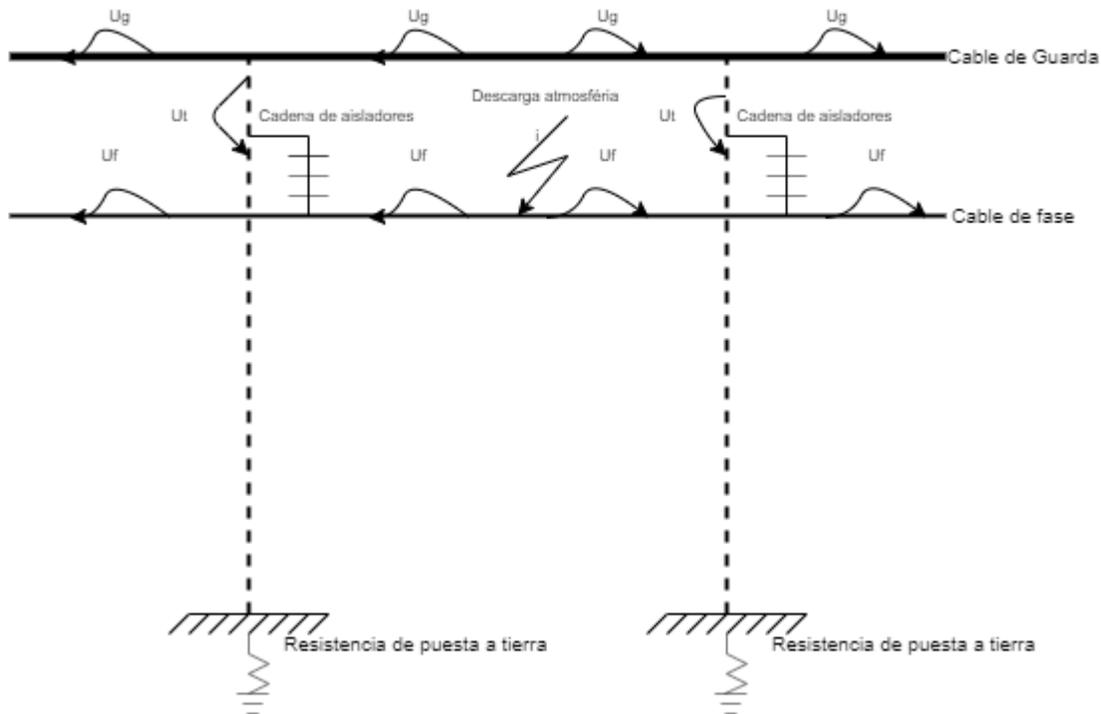


Figura 1.5. Descarga atmosférica en cable de fase.

Debido al acoplamiento entre las fases también se originan sobrevoltajes en las demás fases, considerando que K es el coeficiente de acoplamiento entre dos fases, el máximo voltaje inducido en otra fase será expresado por la Ecuación 1.31 [5]

$$U_2 = K * U_1 = \frac{K * Z_c * I_d}{2}$$

Ecuación 1.31 Máximo voltaje inducido.

1.4.5 Apantallamiento de líneas aéreas y subestaciones

La función del apantallamiento es proteger a las líneas de transmisión de las descargas atmosféricas desviando la corriente hacia tierra, el apantallamiento se lo realiza por medio de cables de guarda los cuales se encuentran sobre los conductores de fase y conectado a tierra por medio de las torres. [5]

La probabilidad de impacto de una descarga atmosférica es una variable aleatoria, se considera que existe una distancia crítica que rodea al conductor de fase, el cable de guarda y a tierra para el cual el último paso de la descarga que se encuentre más cercano a esta distancia impactara sobre el correspondiente conductor o tierra, esta distancia es directamente proporcional al pico de corriente de la descarga [5].

La intensidad máxima de la descarga I_m que produce falla de apantallamiento, es aquella para la cual todas las distancias críticas coinciden en un solo punto (Q) como se indica en a la figura 1.6 y, la figura 1.7. Nos muestra el cálculo de la distancia horizontal entre el cable de guarda y la fase más alejada, de la cual se puede calcular la distancia crítica a tierra r_g para una intensidad máxima de apantallamiento I_m [5]

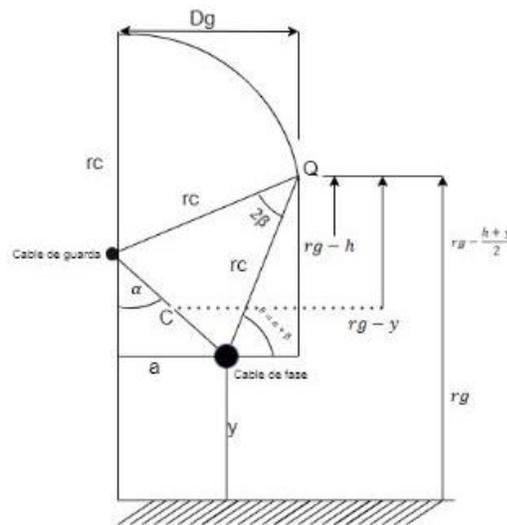


Figura 1.6 Intensidad máxima de fallo de apantallamiento

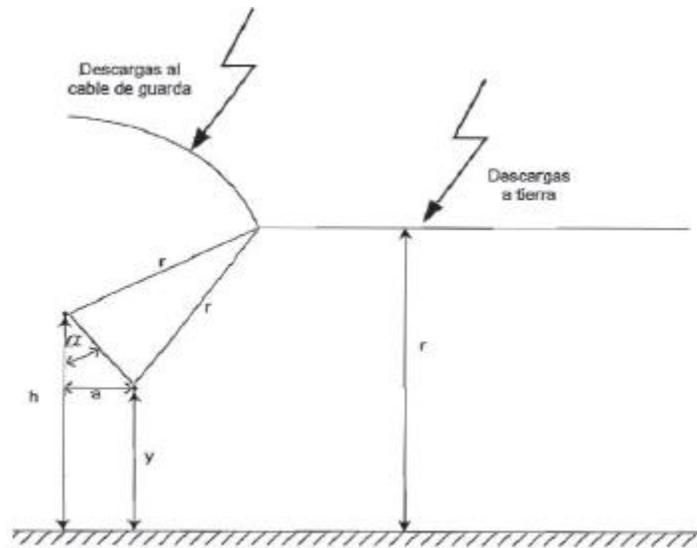


Figura 1.7 Intensidad máxima de fallo de apantallamiento [5]

Cuando la descarga atmosférica llega a una distancia r del cable de guarda, de la línea o de tierra, la descarga impactará en una de ellas, la distancia r depende de la intensidad de corriente de la descarga atmosférica como se ve en la Ecuación 1.33.

Primero calculando el ángulo de apantallamiento con la Ecuación 1.32.

$$\alpha = \text{Tan}^{-1} \left(\frac{a}{h - y} \right)$$

Ecuación 1.32. Ángulo de apantallamiento

$$r = \frac{h + y}{2(1 - \text{sena}\alpha)}$$

Ecuación 1.33. Distancia de falla de apantallamiento [5]

Para así poder despejar de la intensidad máxima de corriente para que se dé el fallo del apantallamiento con la Ecuación 1.34

$$r = 8 * I^{0.65}$$

Ecuación 1.34. Distancia de falla de apantallamiento [5]

Por lo general las subestaciones aisladas en SF6 se encuentran en un espacio cubierto (apantallado) por lo que no se consideraran descargas atmosféricas directamente en la subestación, sin embargo, al tener una onda de voltaje viajando por la fase de la línea de

transmisión, esta ingresara a la subestación afectando a sus componentes, causando un deterioro en su aislamiento.

1.4.6 Subestaciones aisladas en SF6

Las subestaciones aisladas en SF6 presentan una característica constructiva muy compacta en comparación a una subestación aislada en aire, lo que es de gran utilidad cuando el espacio para la instalación es reducido como se da en los centros urbanos. Como su nombre lo indica los componentes se encuentran encapsulados en una tubería, la cual está llena del gas SF6 como se muestra en la figura 1.7.



Figura 1.7. Barra aislada en SF6 [6]

Los equipos aislados en SF6 (Exa fluoruro de azufre) son muy usados en sistemas de potencia debido a su alta fiabilidad [7].

Las barras al estar encapsuladas en SF6, las ondas de voltaje y corriente viajan a una velocidad cercana a la de la luz y su impedancia característica toma valores entre 40 a 80 ohmios, mientras que el valor de la impedancia característica de la línea de transmisión, está entre 350 y 400 ohmios. Esta relación de las impedancias características determina la discontinuidad entre los dos componentes del sistema eléctrico, produciendo que las ondas que desde la línea de transmisión inciden en las barras en SF6 de la subestación se vean reducidas en su magnitud.

1.4.7 Descargadores de sobrevoltaje ZnO (Oxido de Zinc)

Los varistores de Oxido de Zinc son elementos semiconductores muy útiles para la tecnología de pararrayos, una de las propiedades más importantes es que logra soportar una gran gama de intensidades de corriente en un estrecho rango de voltajes, la ecuación que describe el comportamiento de la característica de voltaje y corriente esta expresada en la ecuación 1.35.

$$I = \beta * U^\alpha$$

Ecuación 1.35 Área disruptiva

Donde beta depende de las características de fabricación del material siendo directamente proporcional a la sección del elemento e inversamente proporcional a la longitud de este, mientras que alfa representa un coeficiente de no linealidad entre el voltaje y la corriente. Entre las principales ventajas que presentan los pararrayos de ZnO es que presenta un coeficiente de no linealidad superior al pararrayos de SiC [5].

El voltaje para el funcionamiento continuo del pararrayos es el valor máximo admisible de voltaje eficaz a frecuencia nominal que puede soportar cuando trabaja en la zona de predescarga [5].

Para la modelación de los pararrayos se debe considerar el nivel de protección frente a descargas atmosféricas o (LPL) la cual se refiere a la máxima descarga de corriente para una descarga con forma de onda 8/20 μ s Según los estándares IEEE Std C62.22-1997 y el estándar IEEE 60099-5 [8]

Primero se debe determinar el máximo voltaje de operación continua, es el valor rms máximo a frecuencia industrial que se puede aplicar de manera continua a los bornes de la cadena de aisladores, después de debe determinar el la capacidad de sobre voltaje temporal (TOV) los pararrayos son capaces de operar durante un tiempo limitado frente a sobre voltajes superiores a su voltaje de operación normal, para esto los fabricantes nos brindan una curva potencia-frecuencia como se muestra en el ejemplo de la figuras 1.8 [8].

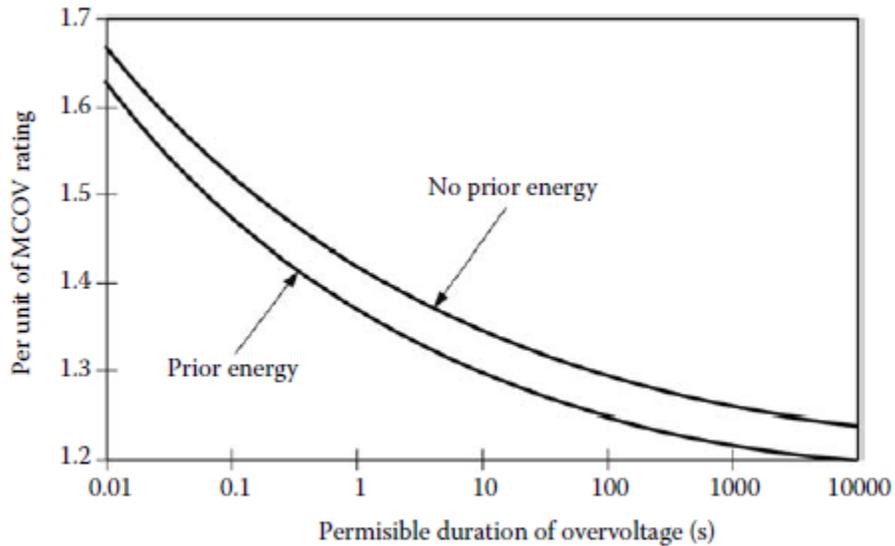


Figura 1.8 curva típica TOV [8]

1.4.8 ATPDraw

ATPDraw es una herramienta gráfica para la versión de ATP (Alternative Transients Program) del programa Electromagnetic Transients Program (EMTP), esta herramienta nos permite modelar circuitos y sistemas eléctricos usando componentes de sus librerías, al igual que permite modelar elementos adicionales, es uno de los más usados para la simulación digital de fenómenos transitorios de naturaleza electromagnética y electromecánica [9]

2. METODOLOGÍA

Para el análisis de sobrevoltajes Se ha propuesto una metodología que es desarrollada en el programa ATP. La estructura de este capítulo consta de los pasos necesarios que fueron seguidos para lograr cumplir los objetivos del trabajo. Primero se muestra el cálculos de los parámetros para los diferentes elementos del sistema, seguido de su implementación en el software de simulación.

2.1 Modelo de torre

El modelo multi-piso es una forma de modelar las torres de trasmisión la cual se dividirá en 4 secciones divididas por las crucetas de esta, como se observa en la figura 2.1. Cada una de estas secciones se representa por medio de una línea ideal en serie con un circuito R-L en paralelo el cual modela la atenuación de las ondas viajeras. [8]

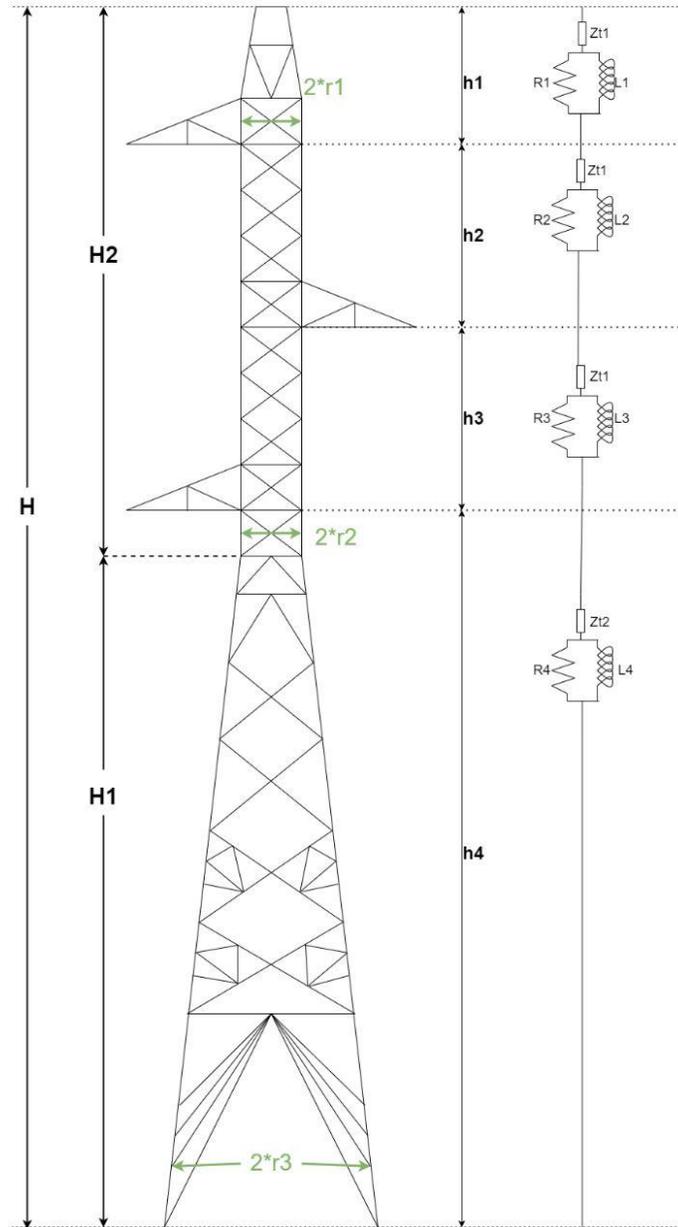


Figura 2.1. Modelo multi-piso de una torre de transmisión [8]

Tabla 2.1 Dimensiones de la torre

Sección	Dimensión [m]
h1	3.8
h2	3
h3	3
h4	29.5
H1	28.3
H2	11
H	39.3
r1	0.7
r2	0.7
r3	2.195

Para determinar los valores de la impedancia característica Z en el modelo se puede usar la fórmula de Jordán ecuación 2.2.

$$Z = 60 \left(\ln \left(\frac{H}{r_{eq}} \right) - 1 \right)$$

Ecuación 2.2. Ecuación de Jordán para cálculo de impedancia

La resistencia equivalente r_{eq} se representada en la ecuación 2.3

$$r_{eq} = \frac{r1H2 + r2H + r3H1}{2H}$$

Ecuación 2.3. Cálculo de resistencia equivalente

$$r_{eq} = \frac{0.7 * 11 + 0.7 * 39.3 + 2.195 * 28.3}{2 * 39.3} = 1.238276 \Omega$$

El valor de r_{eq} es remplazado en la ecuación 2.2.

$$Z = 60 \left(\ln \left(\frac{39.3}{1.238276} \right) - 1 \right) = 147.450266$$

Considerando que $Z=Z_{t1}=Z_{t2}$, y que el coeficiente de atenuación ' γ ' por lo general presenta valores en el rango de 0.7 a 0.8, podemos determinar el valor de la resistencia para cada una de las secciones de la torre usando la ecuación 2.4. y 2.5. [8]

$$R_i = \frac{-2 * Z_{T1} * \ln\sqrt{\gamma}}{h1 + h2 + h3} h_i$$

Ecuación 2.4. Resistencia para la sección superior

$$R_4 = -2 * Z_{T1} * \ln\sqrt{\gamma}$$

Ecuación 2.5. Resistencia para la sección inferior

$$R_1 = \frac{-2 * 147.450266 * \ln\sqrt{0.75}}{3.8 + 3 + 3} * 3.8 = 16.4481\Omega$$

$$R_2 = R_3 = \frac{-2 * 147.450266 * \ln\sqrt{0.75}}{3.8 + 3 + 3} * 3 = 12.9853\Omega$$

$$R_4 = -2 * 147.450266 * \ln\sqrt{0.75} = 42.418\Omega$$

Para el cálculo de la inductancia se considera la ecuación 2.6 para cada uno de los segmentos considerando que el coeficiente de amortiguamiento 'α' usualmente presenta un valor de 1 y que 'c' representa la velocidad de la luz

$$L_i = \alpha * R_i * \frac{2hi}{c}$$

Ecuación 2.6. Inductancia para todas las secciones de la torre

$$L_1 = 1 * 16.4481 * \frac{2 * 39.3}{3 * 10^8} = 4.3094 \mu F$$

$$L_2 = L_3 = 1 * 12.9853 * \frac{2 * 39.3}{3 * 10^8} = 3.4021 \mu F$$

$$L_4 = 1 * 42.418798 * \frac{2 * 39.3}{3 * 10^8} = 11.11372l \mu F$$

Con estos valores se procede a la modelación de la torre en ATP usando los modelos de resistencias, inductancias, e interruptores. Teniendo como resultado el modelo-multi piso de la torre como se muestra en la Figura 2.2

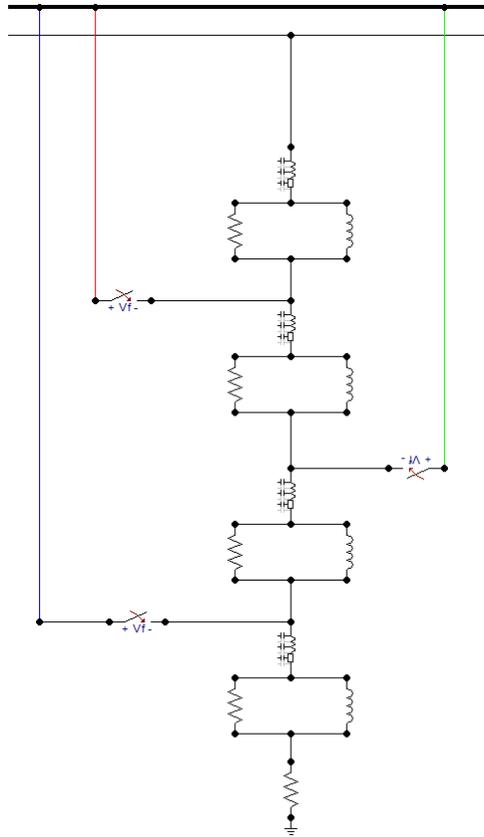


Figura 2.2. Modelo multi piso de torre de 230kV

2.2 Modelo de línea de transmisión

Para el modelo de la línea de transmisión se consideran conductores tipo ACAR 1100 para los conductores de fase y para el cable de guarda se usará conductores de acero galvanizado 3/8" de acero, cuyos parámetros se presentan a continuación [10]

Conductor de fase:

Diámetro del conductor: 30.66 mm

Resistencia a C.C a 20°: 0.05564 ohm/km

Sección transversal: 557.37 mm² [11]

Cable de guarda:

Calibre: 3/8" kCM

Sección transversal: 51.14 mm²

Diámetro nominal: 9.52 mm

Resistencia a C.C a 20°: 3.75 ohm/km

Peso total aproximado: 497 kg/km

Para el estudio se usará el modelo de línea de transmisión, que se presenta en la siguiente pantalla con se muestra en la figura 2.3, para el ingreso de parámetros de la línea.

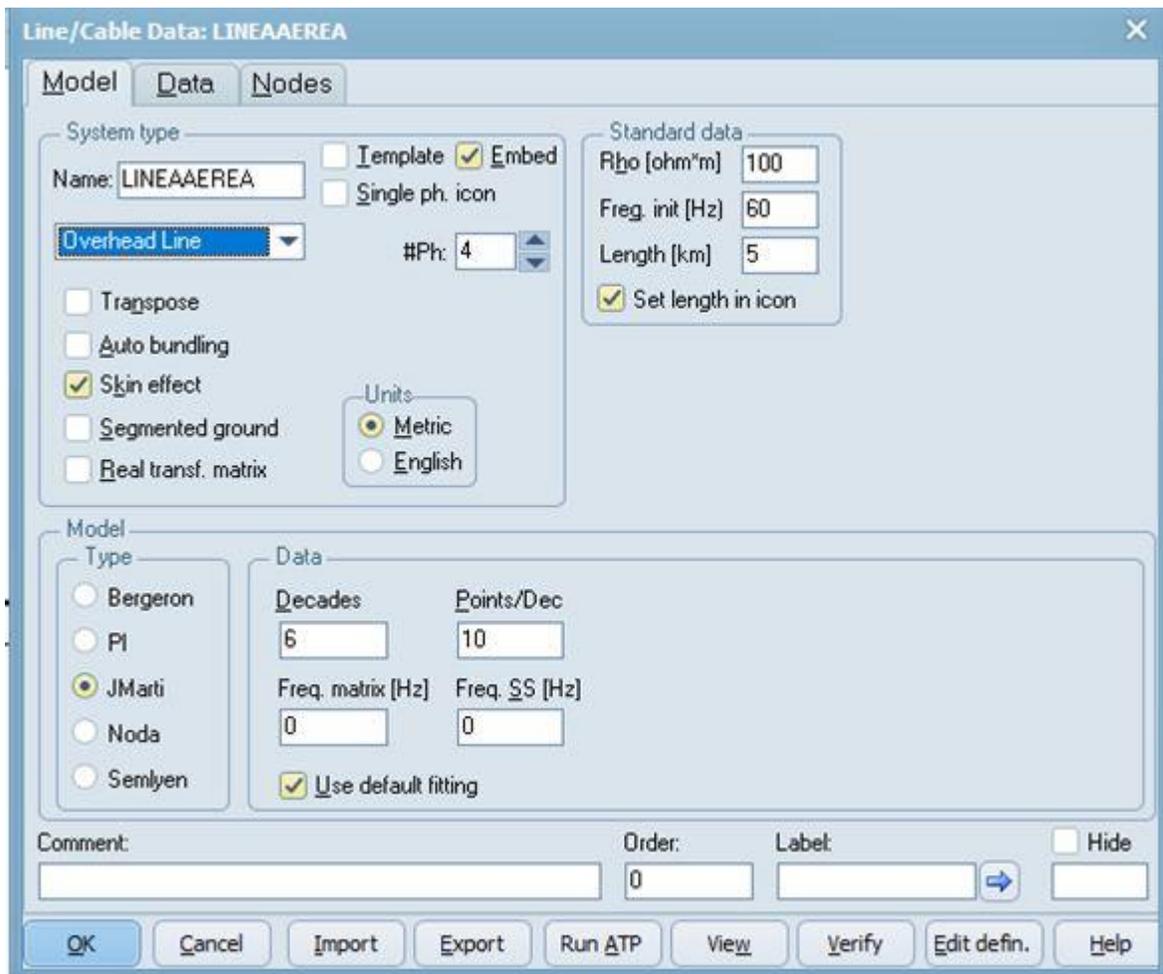


Figura 2.3 Ingreso parámetros de la línea

En donde:

$Rho[ohm*m] = 200 \text{ ohm*m}$; resistividad del suelo de la torre según la teoría de Carson

$Freq \text{ init [Hz]} = 60$; frecuencia de operación del sistema en condiciones normales

Length [km] = 5; longitud de la línea en kilómetros

#Ph= 4; número de fases considerando una adicional para el cable de guarda

Ph.no.= número de la fase

Rin[cm] = 0 cm; radio interno del conductor

Rout [cm] =1.533; radio externo del conductor [10]

Resis [ohm/km DC] =0.0556 resistividad DC del material [10]

Horiz [m] =distancia horizontal

Vtower [m] = distancia vertical

Vmid = distancia vertical a la mitad del vano

Considerando que la fase 4 es donde se ingresa las variables del cable de guarda y para las alturas verticales se debe considerar la longitud de la cadena de aisladores.

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0	1.533	0.0556	-3.5	38.018	28.518
2	2	0	1.533	0.0556	4	35.018	25.518
3	3	0	1.533	0.0556	-3.5	32.018	22.518
4	4	0	0.47625	3.75	0	44.3	34.8

Figura 2.4 Ingreso parámetros de la geometría de la línea

2.3 Modelo de pararrayos

Según la norma IEC el voltaje máximo del sistema para un sistema con un voltaje nominal de 230 kV es de 245 kV [11].

Para determinar el voltaje nominal del pararrayos para un nivel de voltaje de 245 kV se debe ver el valor mínimo de voltaje nominal el cual esta determinado por el TOV_c (1s) que debe ser capaz de soportar de soportar el pararrayos.

$$TOV_{10} = \frac{k * U_s}{\sqrt{3}} * \left(\frac{t}{10}\right)^m$$

Ecuación 2.7. Sobrevoltajes temporales

Donde TOV_c es el sobre voltaje temporal representativo, t es la duración del sobre voltaje y m es un factor con un valor recomendado de 0.02, Para un sistema con neutro rígido a tierra es habitual una duración máxima de falla a tierra de 1s y se considera un factor $k= 1.4$ se deduce que el valor mínimo de sobre voltaje temporal del pararrayo debe ser el que se muestra en la ecuación 2.8 [8].

$$TOV_{10} = \frac{1.4 * 245}{\sqrt{3}} * \left(\frac{1}{10}\right)^{0.02} = 189.0885 \text{ kV}$$

Ecuación 2.8. Sobrevoltaje temporal

Donde el voltaje nominal del pararrayos será el inmediato superior a 189.08 que según la norma IEC tiene un valor de 192 kV.

La curva de operación del pararrayos para descargas de frente rápido (8/20 microsegundos) se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Curva de operación para descargas de frente rápido [12]

IEEE/IEC pararrayos clase 3		
IEC60099-4 Clase 3	Um [kV]	245 [kV]
	Ur [kV]	192 [kV]
	Uc [kV]	153.6 [kV]
Máximo voltaje residual para ondas 8/20 para cada nivel de corriente	1.5 [kA]	430 [kV]
	2.5 [kA]	439 [kV]
	5 [kA]	469 [kV]
	10 [kA]	500 [kV]
	20 [kA]	560 [kV]
	40 [kA]	624 [kV]

El elemento usado para modelar al pararrayos es una resistencia dependiente de la corriente, tipificada en ATP como tipo 92, Para su implementación ATP presenta la siguiente pantalla, como se muestra en la figura 2.5

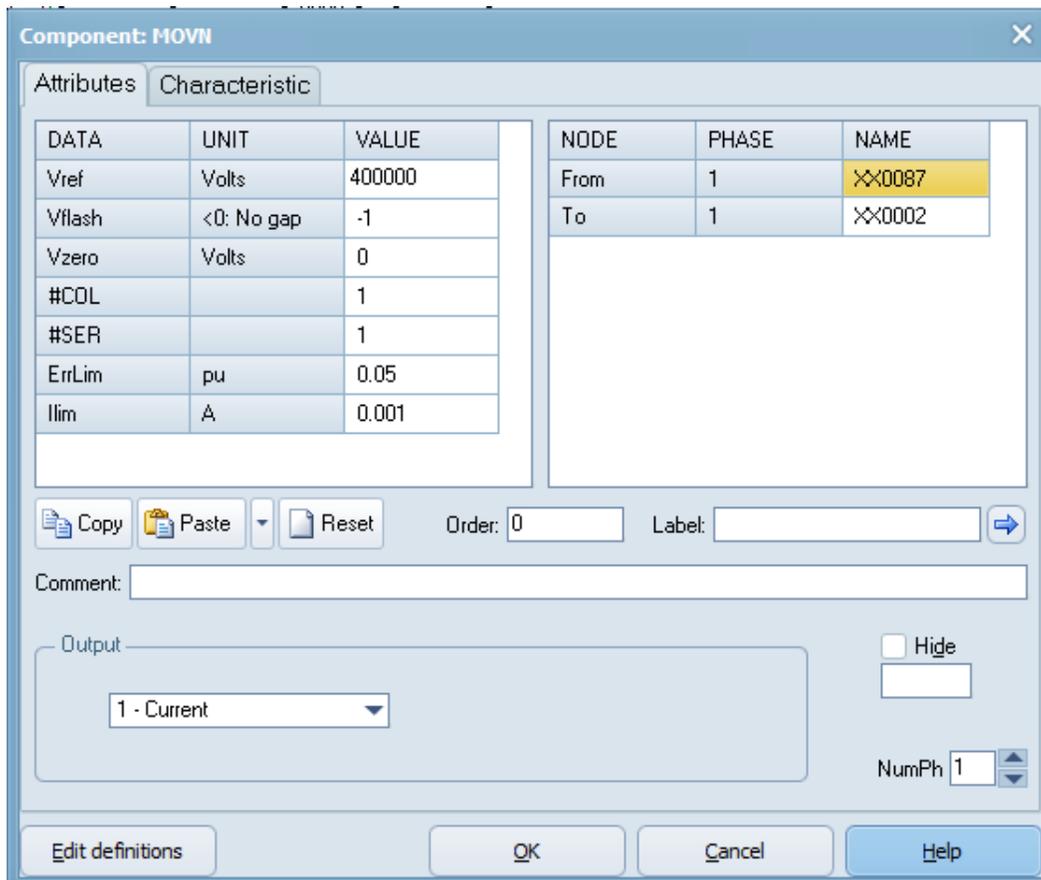


Figura 2.5 Pantalla para el ingreso de los parámetros del pararrayos

Donde en la ventana de atributos tenemos los siguientes parámetros:

Veref = Voltaje de referencia [V]

Vflash= Voltaje de ruptura (en caso de que no tenga gap el valor debe ser menor a cero) el modelo a usar no cuenta con gaps

Vzero = Voltaje inicial (opcional)

#COL= Número de columnas

#SER =Número de bloques en serie en cada pararrayos

ErrLin = Tolerancia de ajuste [pu]

Ilin = la característica se asume que es lineal por debajo de este valor [A]

De igual forma se debe de ingresar la curva de operación con los datos de la tabla 2.2.

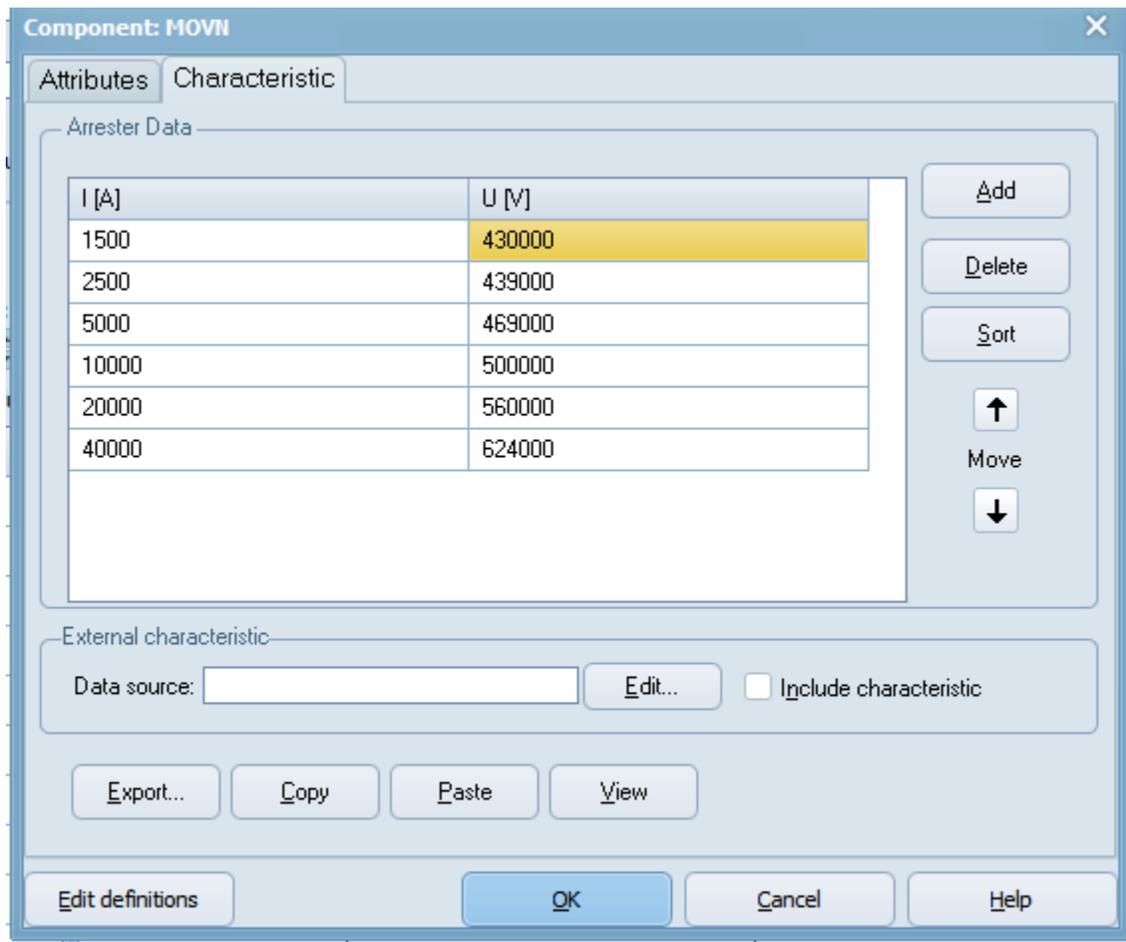


Figura 2.6 Pantalla para el ingreso la curva voltaje-corriente del pararrayos

2.4 Cadena de aisladores

Los aisladores que componen la cadena serán del tipo ANSI 52-3 el cual presenta las características que se muestran en la tabla 2.3

Tabla 2.3Característica del aislador 52-3

Aislador de suspensión tipo ANSI 52-3	
Tipo	ANSI 52-3
Estándar aplicado	ANSI C29.2
Altura	265 mm
Diámetro	146 mm
Distancia de fuga	292 mm

Conforme a la práctica de CELEC EP Transelectric, en la línea de trasmisión de 230 kV considerara, en las cadenas de aisladores se utilizarán 17 unidades, asumiendo que la línea de transmisión está a nivel del mar.

Basados en la característica tiempo-voltaje, que determina el voltaje de flameo de la cadena de aisladores frente a sobre voltajes tipo impulso atmosférico V_{FO} dado por la ecuación 2.9.

$$V_{FO} = \left(400 + \frac{710}{t_c^{0.75}} \right) * D$$

Ecuación 2.9. Voltaje de flameo frente a sobre voltajes de frente rápido

Donde:

$D = 2.482$ [m]; longitud de la cadena de aisladores

$t_c = 6$ [μ s]; tiempo del flameo

$$V_{FO} = \left(400 + \frac{710}{6^{0.75}} \right) * 2.482 = 1452.47 \text{ kV}$$

El cebado de la cadena de aisladores sara interruptor controlado por voltaje, que cierra sus contactos cuando el voltaje a través de sus polos alcance el valor del CFO de la cadena. El interruptor se presenta en la siguiente ventana para ingresar los parametros Figura 2.7

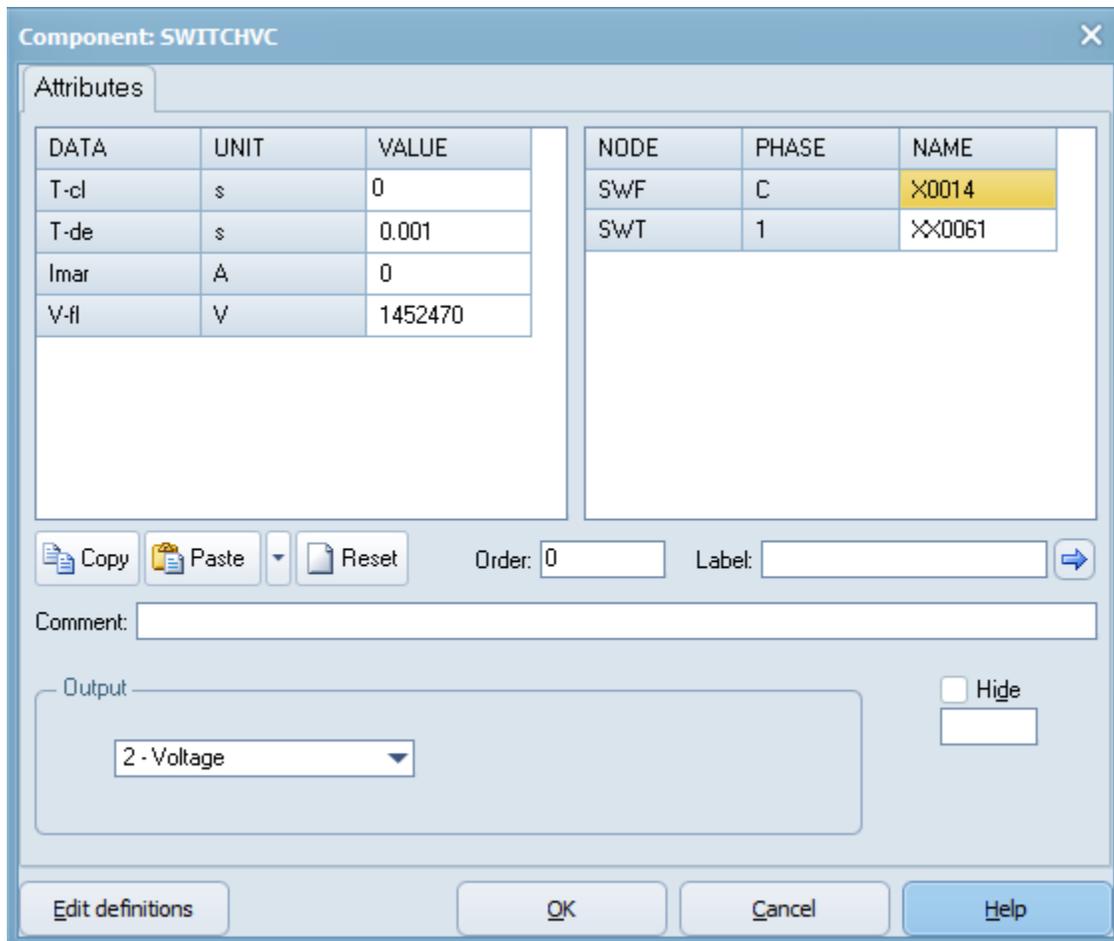


Figura 2.7 Ingreso parámetros cadena de aisladores

Donde:

T-cl = 0 [s]; tiempo de cierre del interruptor

T-de = 0.001 [s]; tiempo mínimo que el interruptor debe permanecer cerrado

lmar = 0 [A]; margen de corriente

V-fl = 1452470 [V]; voltaje de flameo

2.5 Modelo de la subestación

Como se puede observar en la figura 2.8 en la entrada de la subestación se encontrará el pórtico bajo el cual se instalan el pararrayos y un divisor capacitivo de potencial (DCP), representado con una capacitancia de un valor de 6000 pF conectada a la fase y a tierra

por medio de la malla de puesta a tierra, Luego consta un tramo de conductor el cual será modelado con una inductancia de 1 μH por cada metro hasta llegar a la barra aislada en SF6.

Tanto en la entrada como en la salida de la barra están los bushings los cuales se modelan con el uso de capacitores monofásicos conectados fase tierra. El valor de la capacitancia tendrá un valor de 50 μF como se puede ver en la figura 2.8.

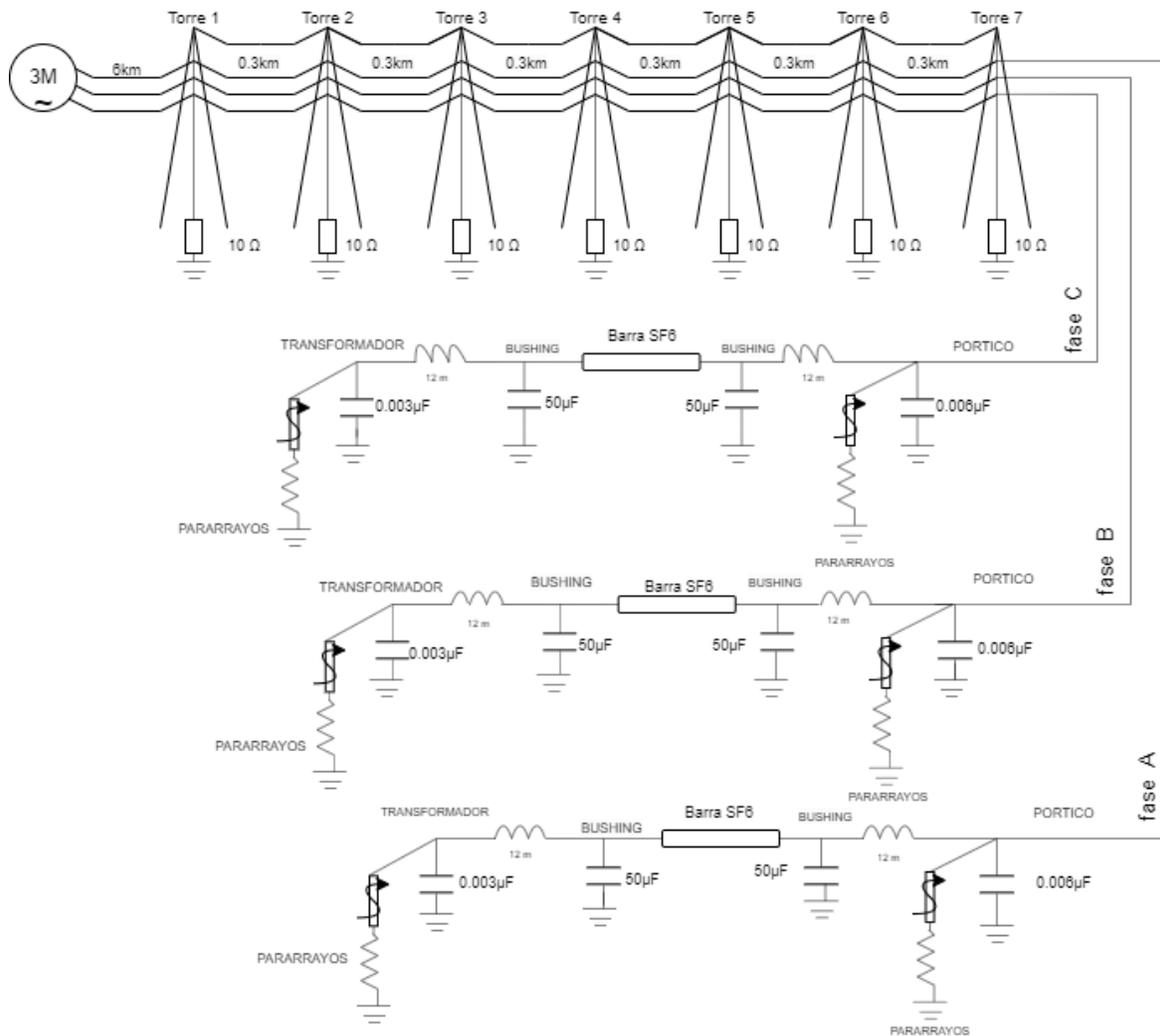


Figura 2.8 Diagrama unifilar del sistema considerado [13]

Para modelar la barra aislada en SF6 se considera como segmento de línea, haciendo uso de la subrutina LCC de ATP, con la opción "Enclosing Pipe"

La ventana para el ingreso de los parámetros se muestra en la figura 2.9.

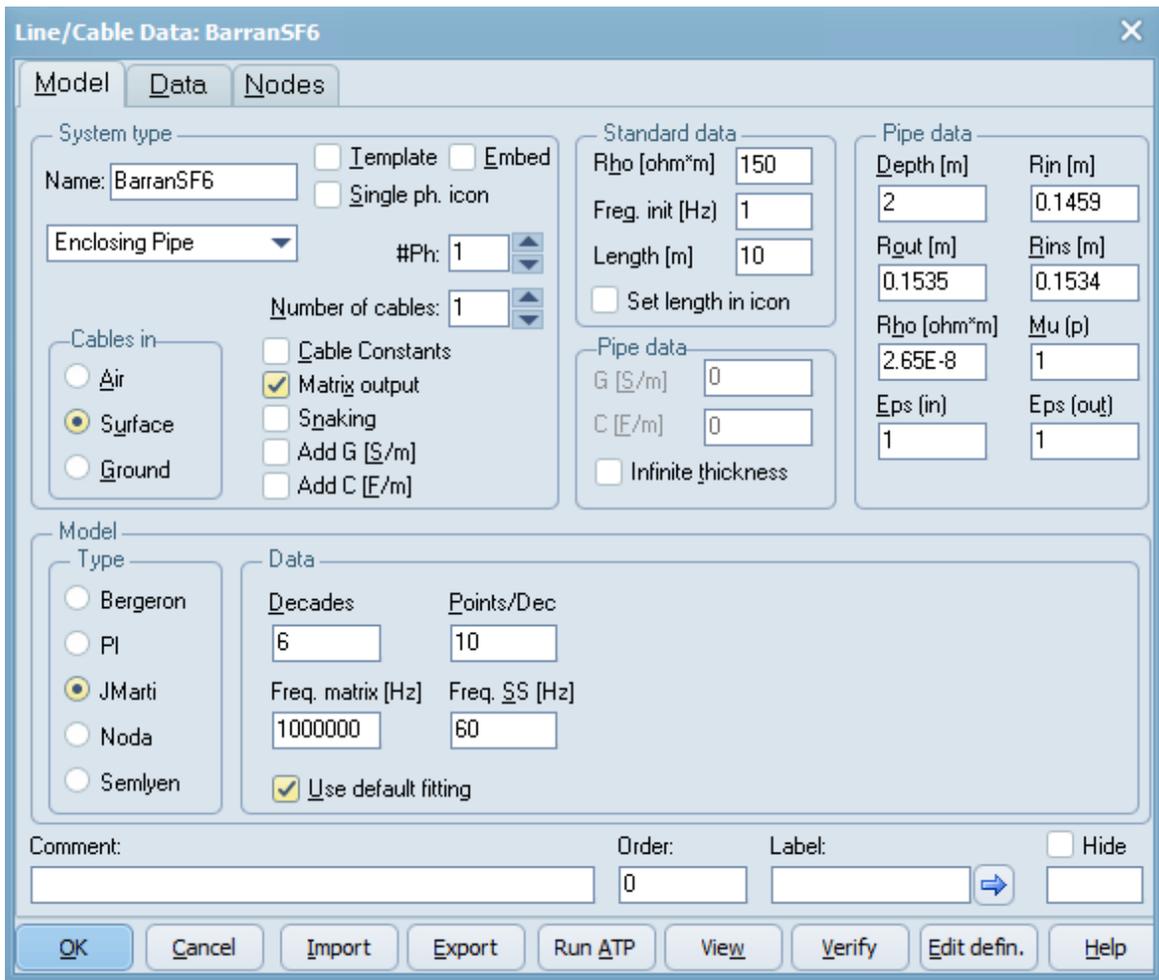


Figura 2.9 Pantalla de ingreso parámetros barra aislada en SF6

Donde:

Datos estándares: [14]

Rho = 150 [ohm*m]; resistividad del terreno

Length = 10 [m]; Longitud de la barra

Datos de la tubería: [14]

Depth = 2 [m]; distancia entre el centro de la tubería y el suelo

Rin = 0.1459 [m]; radio interno de la tubería

Rout = 0.1535 [m], radio externo de la tubería

Rho = 0.0265 [$\mu\Omega\cdot m$]; resistividad de la tubería

Mu =1 [p]; Permeabilidad relativa de la tubería

Eps in =1; permitividad relativa del dentro de la tubería

Eps out = 1; permitividad relativa del fuera de la tubería

Los datos de la barra aislada en SF6 constan en la ventana "data" como se muestra en al figura 2.10

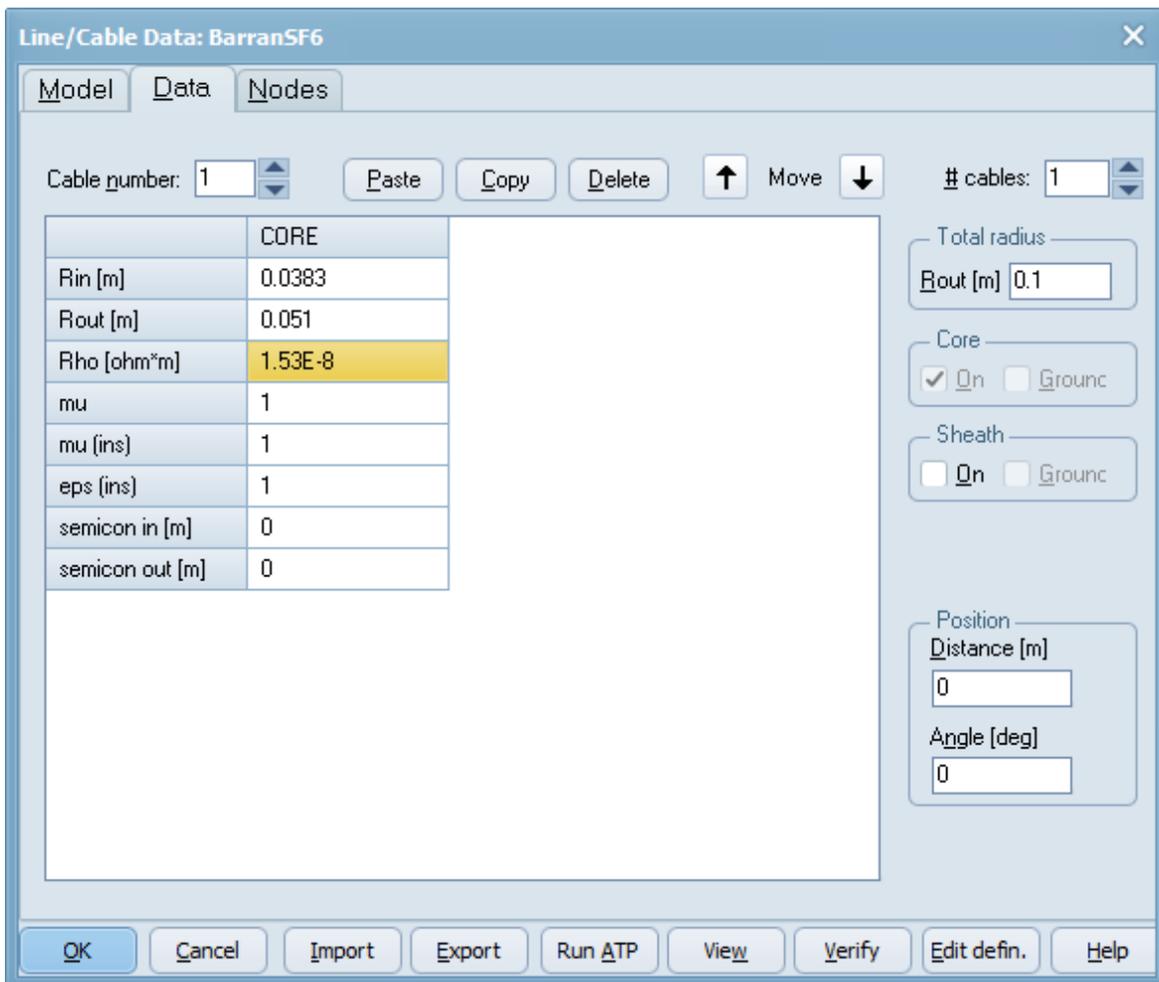


Figura 2.10 Pantalla de ingreso parámetros de la barra

Donde:

Rin = 0.0383 [m]; radio interno del conductor

Rout = 0.051 [m]; radio externo del conductor

Rho = 0.0153 [$\mu\Omega\cdot m$]; resistividad del material conductor

Mu =1 [ins]; permitividad relativa del material aislante dentro del conductor

Eps =1[ins]; permitividad relativa del material aislante fuera del conductor

Semicon in = 0 [m]; espesor de la capa semiconductor interior

Semicon out = 0 [m]; espesor de la capa semiconductor exterior [14]

A continuación del bushing de salida de la barra consta una sección de conductor de 12 metros modelada con una inductancia de 1mH por cada metro hasta llegar al transformador de potencia le cual es modelado con una capacitancia igual a 0.003 μF y en nuestro caso de estudio se coloca un pararrayos con las mismas características que el pararrayo de ingreso a la subestación. [13]

2.6 Fuente de corriente de impulso atmosférico

Cálculo de la máxima corriente que produce falla de apantallamiento: el ángulo de apantallamiento es determinado con la ecuación 1.29, las dimensiones de la torre y la dimensión de la cadena de aisladores como se muestra en la figura 2.11.

$$\alpha = \text{Tan}^{-1}\left(\frac{3}{6.282}\right) = 25.52^\circ$$

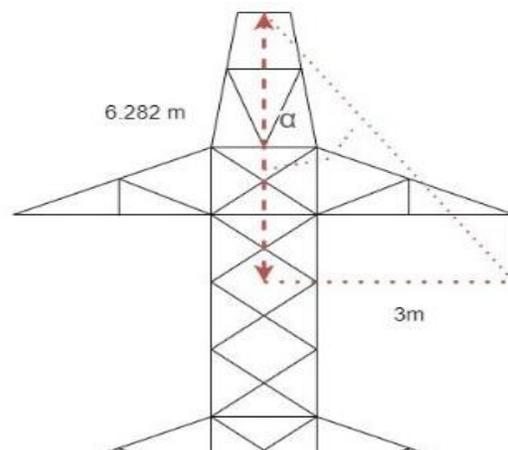


Figura 2.11. Ángulo de apantallamiento

Con el valor del ángulo de apantallamiento, con la ecuación 1.30. se obtiene:

$$r = \frac{39.3 + 33.018}{2(1 - \text{sen}25.52)} = 63.54$$

Despejando el valor de la corriente máxima de la descarga que produce falla de apantallamiento de la Ecuación 1.31, se tiene el siguiente resultado.

$$I = \sqrt[0.65]{\frac{63.5412}{8}} = 24.24 \text{ kA}$$

Para modelar la descarga atmosférica se usa una fuente de corriente tipo Heidler, La ventana para el ingreso de los parámetros se muestra en la figura 2.12

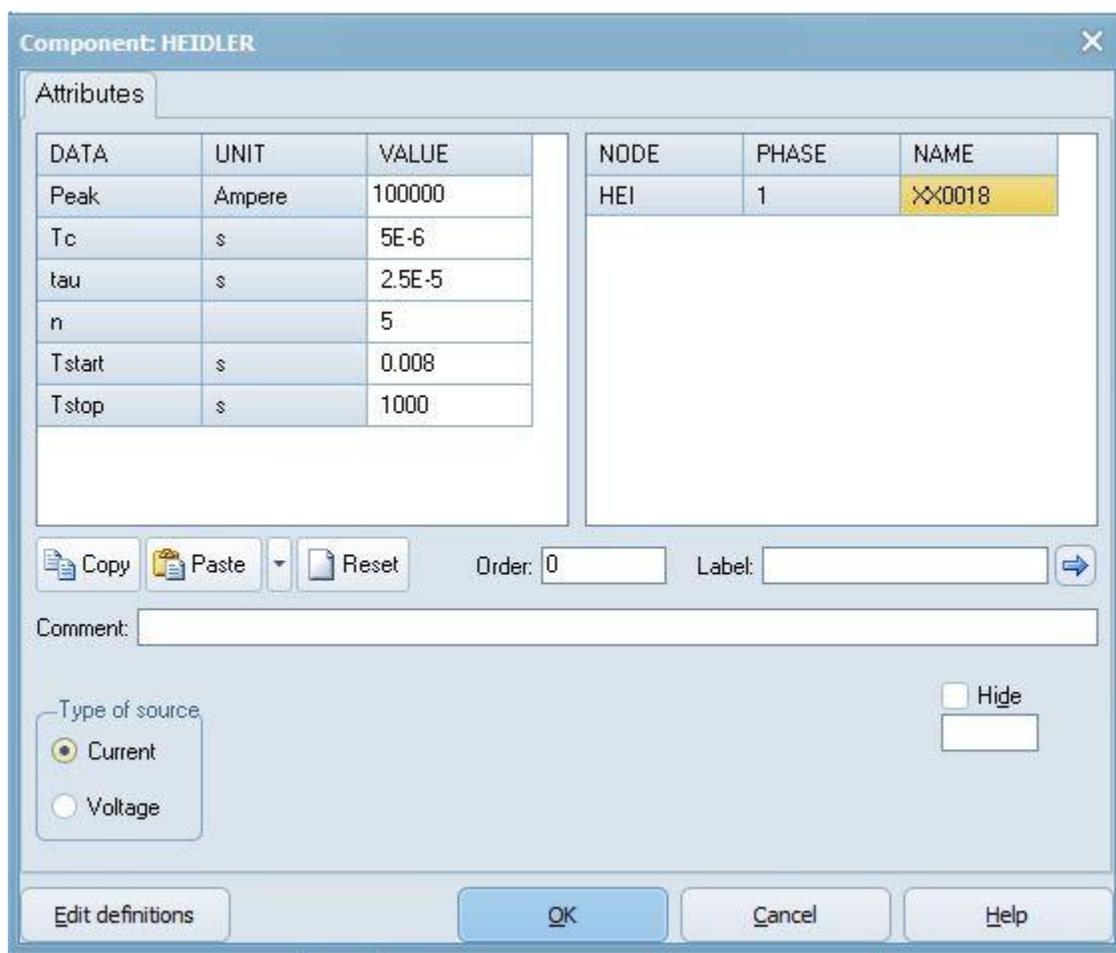


Figura 2.12 Pantalla de ingreso parámetros fuente Heidler

Donde:

Peak = 100000 [A]; valor pico de la descarga.

Tc =5 [μs]; tiempo de cresta.

Tau = [μs], duracion de la descarga desde t=0 hata que la cola tenga un valor del 37 % del pico.

n = 5 ; valor que influye en la subida de la funcion.

Tstart =0 [p]; Permeabilidad relativa de la tuberia

Tstop =100; permitividad relativa del dentro de la tuberia

2.7 Fuente sinusoidal de voltaje de 230 kV

La modelacion de la fuente sinusoidal se la realiza usando el modelo de fuente Ac la cual presenta la sigueinte ventana de parametros como se muestra en la Figura 2.13.

DATA	UNIT	VALUE
AmplitudeA	Volt	230000
Frequency	Hz	60
PhaseAngleA	degrees	0
StartA	sec	-1
StopA	sec	100

NODE	PHASE	NAME
AC	ABC	X0037

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Type of source: Current Voltage
Num phases: Single 3-phase 3*1-phase
Angle units: Degrees Seconds
Amplitude: Peak L-G RMS L-G RMS L-L
Grounding: Grounded Floating Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 2.13 Fuente sinusoidal 230 kV

Donde:

Amplitude A = 230000 [V]; Valor pico de la fase A.

Frequency = 60 [Hz]; Frecuencia.

Phase Angle A = 0 [degrees]; Angulo de la fase A.

Start A = -1 [s]; Tiempo de inicio de la fase A.

Stop A = 100 [s]; tiempo de fin de la fase A

Type of souce = Voltage; tipo de fuente.

Num Phases = 3-phase; Numero de fases.

Angle units = Degrees ; Unidad de los ángulos

Amplitude = RMS L-L; Amplitud del voltaje RMS linea -linea.

Grounding= Grounded; conectado a tierra.

3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

3.1.1 CASO BASE DE ANALISIS

Para validar la metodología propuesta en el capítulo anterior se implementó un sistema base en ATP como se muestra en el Anexo 1.

El caso base estará compuesto por 6 vanos de línea con 7 torres de suspensión, la cual finaliza en una subestación aislada en SF6. Se considera una descarga atmosférica con un valor de 100 kA en $t=0$, sobre la antepenúltima, Cuenta con 6 pararrayos, 3 en el ingreso de esta y 3 junto al transformador. En este caso base no se considera una fuente sinusoidal que alimente al sistema, la cual se considera posteriormente como un caso de análisis adicional.

Las resistencias de pie de torre tienen un valor de 10Ω con excepción de la primera torre vista desde la subestación la cual tiene un valor de 1Ω . (se asume que se conecta a la malla de puesta a tierra de la subestación).

Las mediciones se las realizo en 3 puntos del sistema, en la ante penúltima torre donde se da la descarga, en el ingreso de la sub estación y en el transformador de potencia.

En la figura 3.1 se puede observar que tenemos un pico de voltaje en las 3 fases, siendo la fase A la que presenta un cebado en sus aisladores.

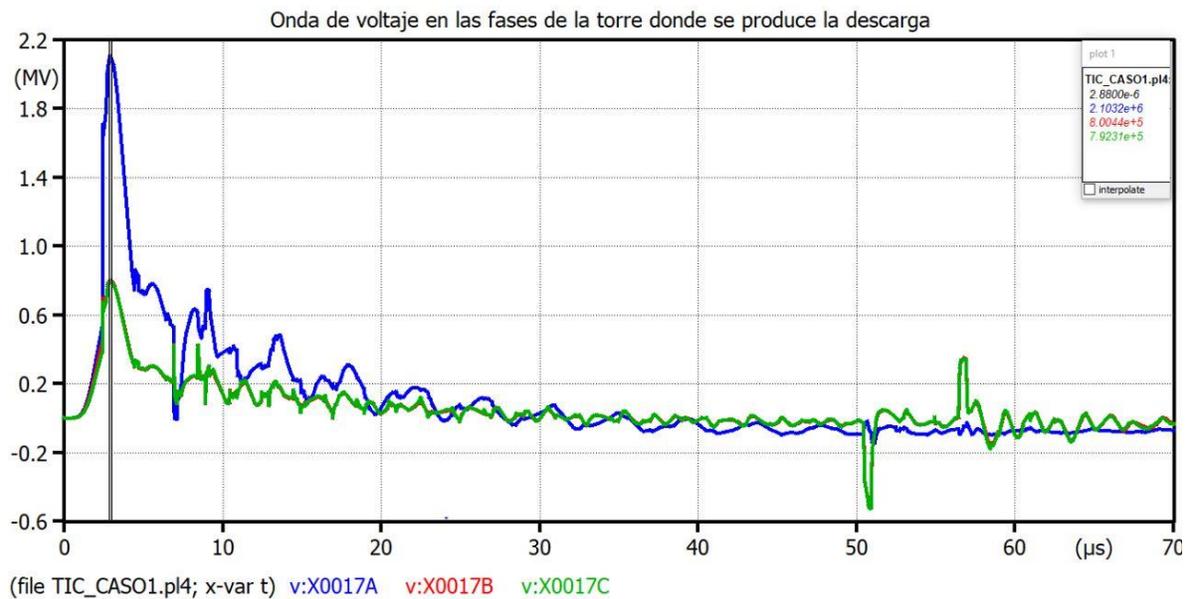
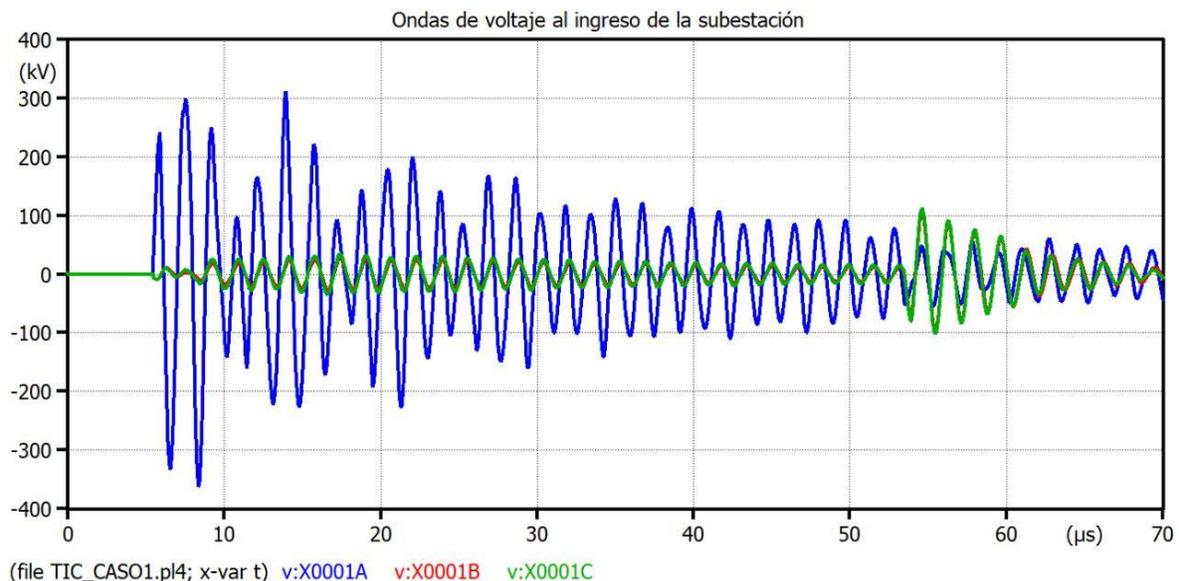


Figura 3.1. Ondas de voltaje en las fases de la torre donde se produce la descarga



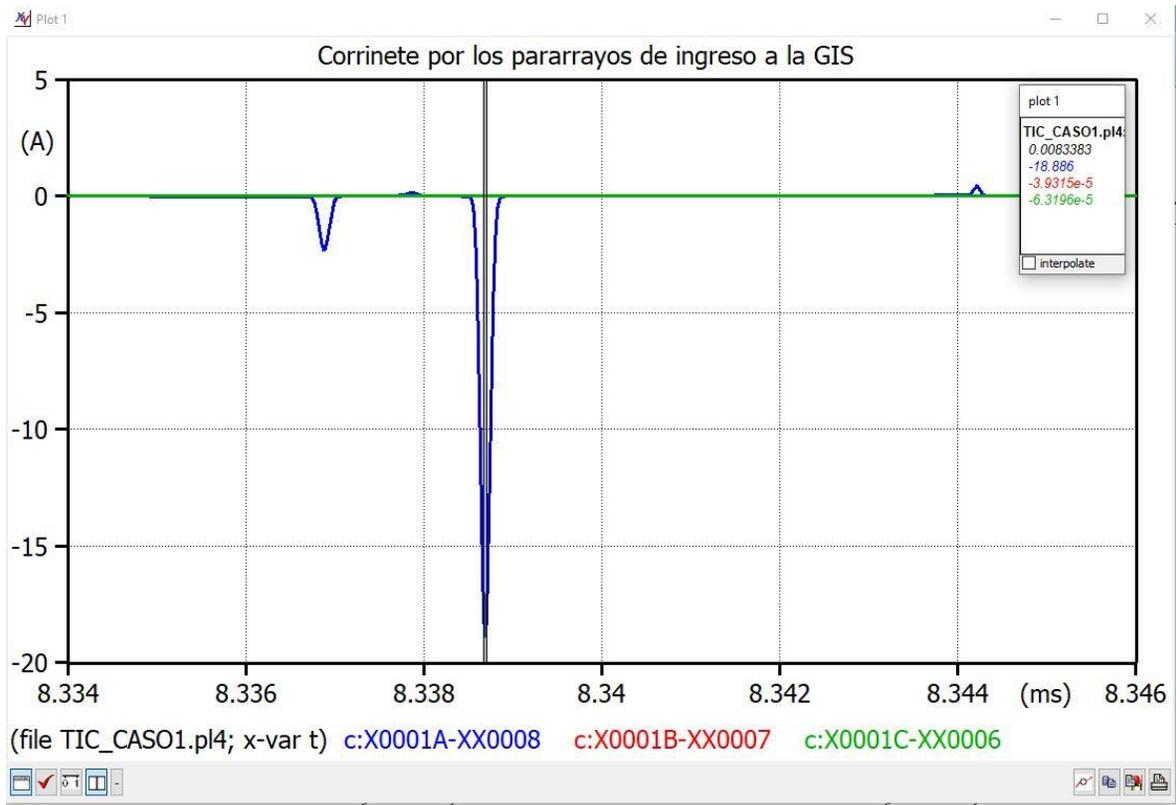


Figura 3.4 Corriente del pararrayos de ingreso a la subestación

En la figura 3.4 se puede observar que la magnitud de la corriente a través del pararrayos de la fase A no es considerable, en vista del voltaje que produce sus actuación.

En la tabla 3.1 se puede notar los picos de voltaje en cada uno de los puntos de medición

Tabla 3.1. Mediciones de voltaje caso base

Corriente de descarga	Voltaje pico vano de descarga [MV]	Voltaje pico en la entrada de la subestación [kV]	Voltaje pico en el transformado [V]
100 [kA]	2.107	-360	4902

3.1.2 Voltaje incidente en el ingreso de la subestación con y sin los pararrayos

En este caso, se modificó el caso base desconectando los pararrayos de la subestación. En la Figura 3.5 se observan las ondas de voltaje en el ingreso de la subestación, donde se puede ver que los voltajes, tienen valores pico muy similares al caso base.

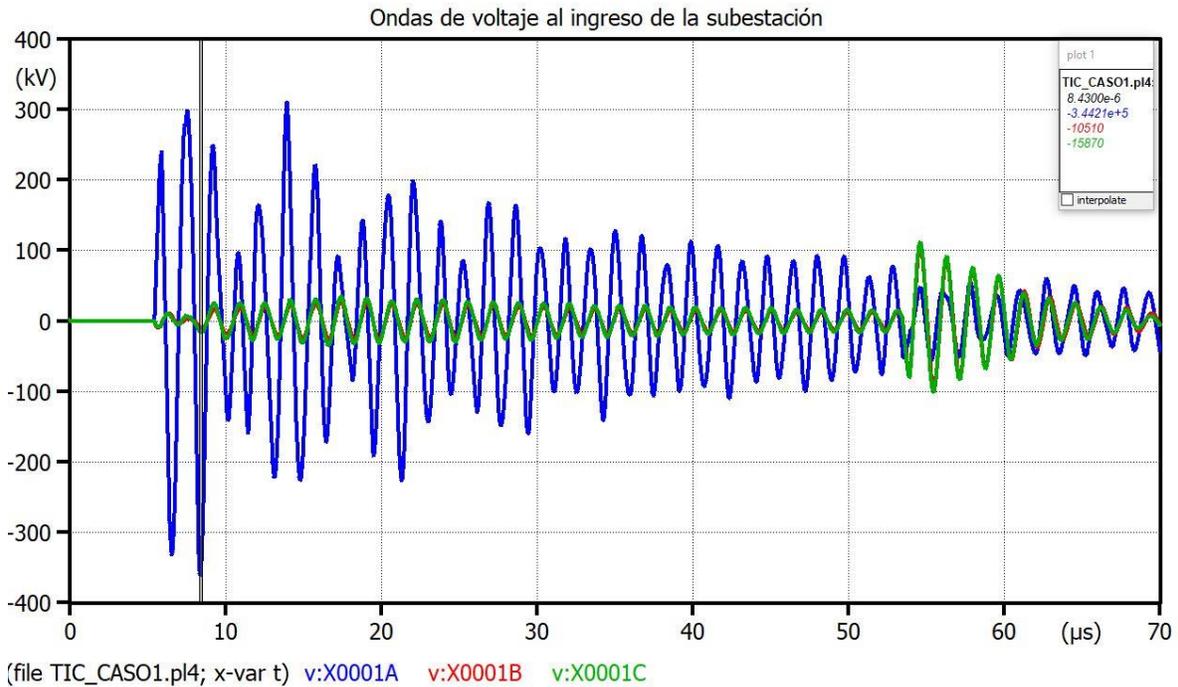


Figura 3.5 Voltaje en la entrada de la subestación sin considerar los pararrayos

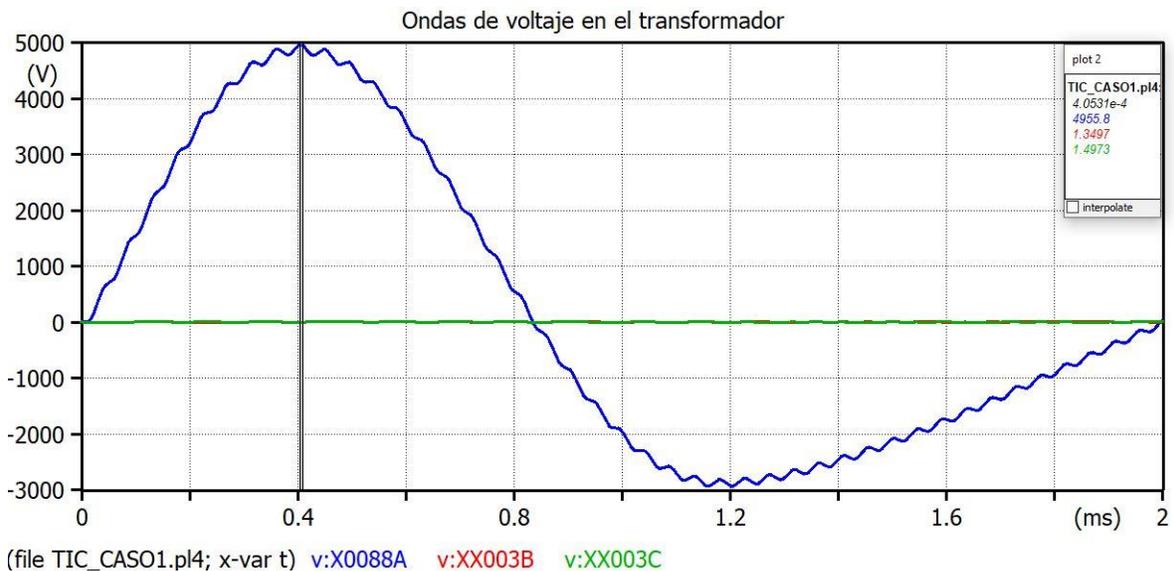


Figura 3.6 Voltaje en el transformador sin considerar los pararrayos

Tabla 3.2 Mediciones de voltaje sin pararrayos

Corriente de descarga	Voltaje pico en la entrada de la subestación [kV]	Voltaje pico en el transformado [V]
100 [kA]	-360	4952

3.1.3 Descargas inversas para magnitudes de corriente de rayo de 100,200 y 250 kA, manteniendo constantes la torre en la que se produce la descarga y la resistencia de pie de torre.

El caso base se varió la magnitud de la corriente de descarga primero a un valor de 200 kA, donde se puede ver en las Figuras 3.7, 3.8 y 3.9. Al producirse la descarga atmosférica con una intensidad de 200 kA produce un cebado en los aisladores de las fases A y B, al igual que un incremento en los voltajes pico que ingresan a la sub estación y en el transformador, sin embargo estas magnitudes no son significativas.

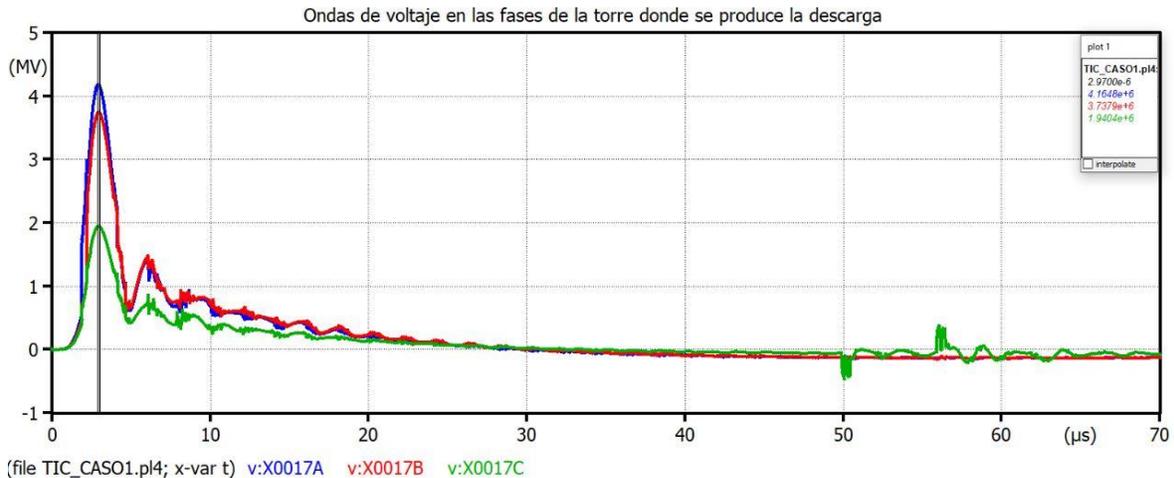


Figura 3.7 Ondas de voltaje en las fases de la torre donde se produce la descarga (Id=200 kA)

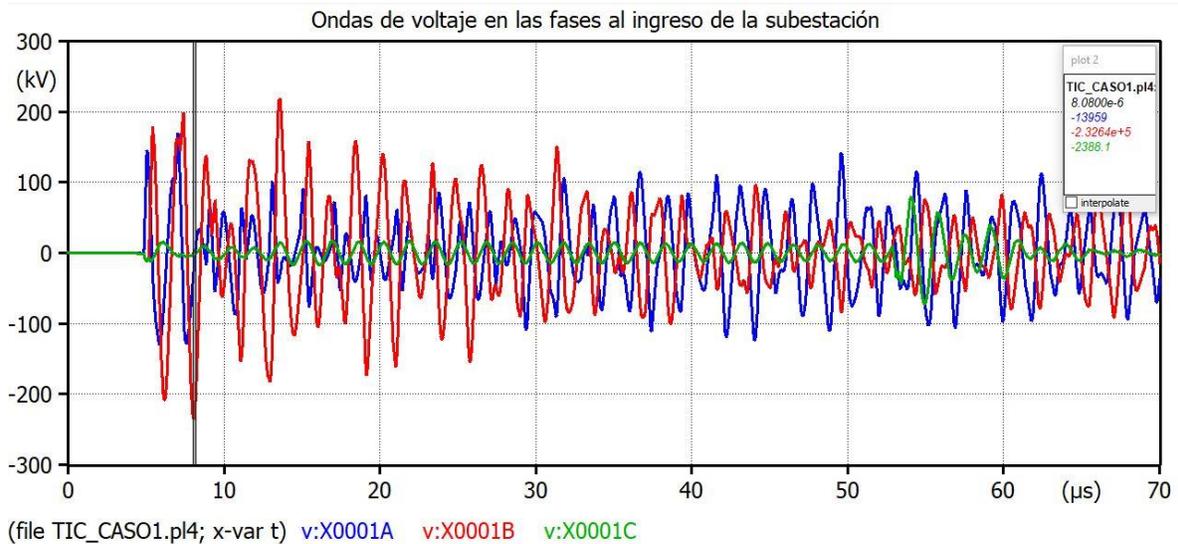


Figura 3.8. Ondas de voltajes en la entrada de la subestación ($I_d=200$ kA)

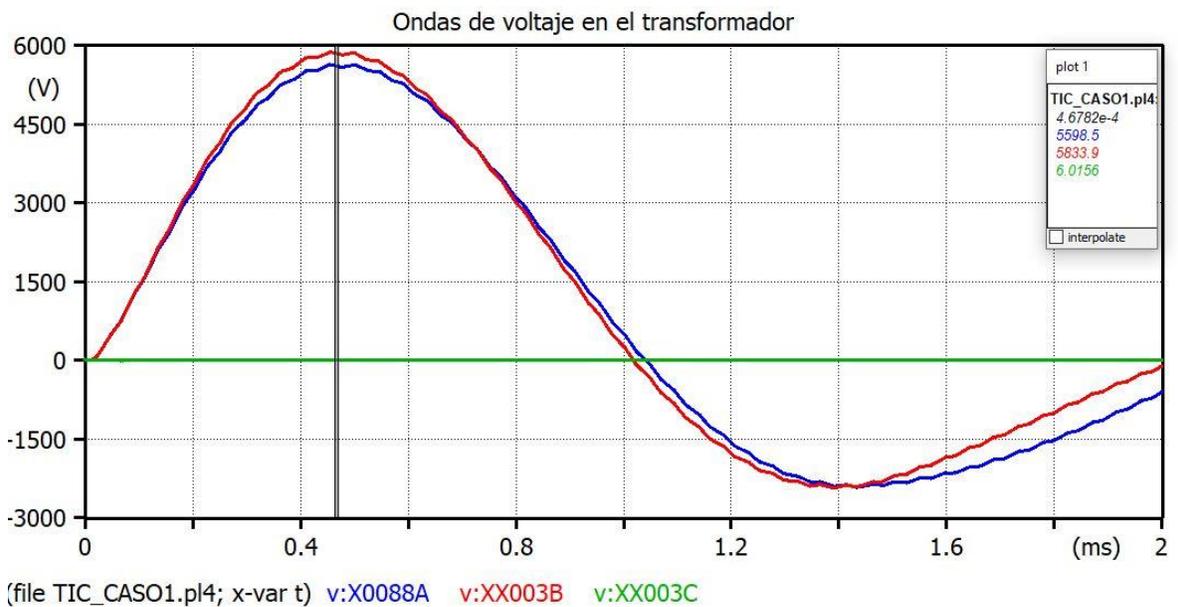


Figura 3.9 Voltajes en el transformador ($I_d=200$ kA)

Para descargas con una intensidad de corriente de 250 kA los resultados se muestran en las Figuras 3.10, 3.11 y 3.12 donde se ve que el cebado de los aisladores se da en las 3 fases, sin embargo, estas magnitudes de voltaje aun no son significativos como para activar a los pararrayos de ingreso de la subestación como se muestra en la Figura 3.13

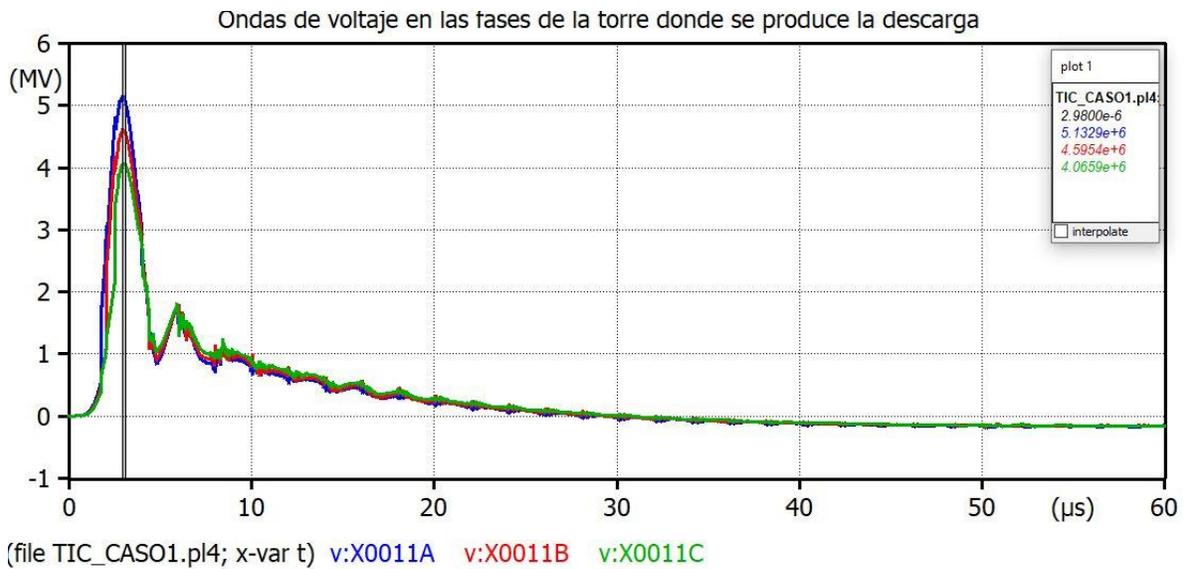


Figura 3.10 Ondas de voltaje en las fases de la torre donde se produce la descarga
($I_d=250$ kA)

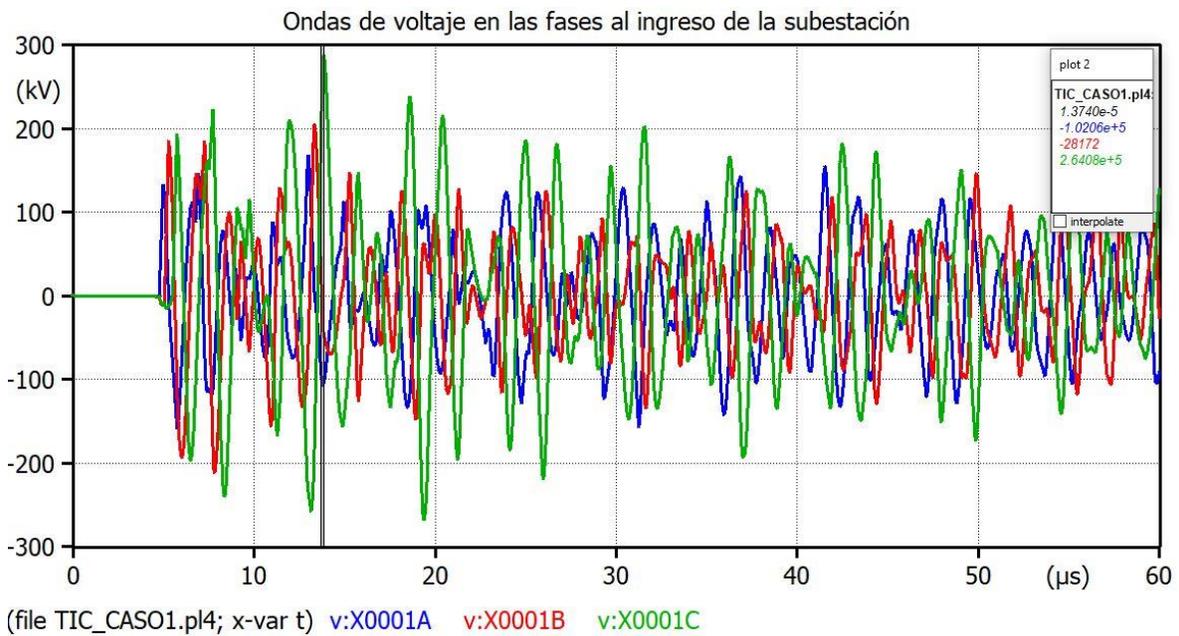


Figura 3.11 Ondas de voltajes en la entrada de la subestación ($I_d=250$ kA)

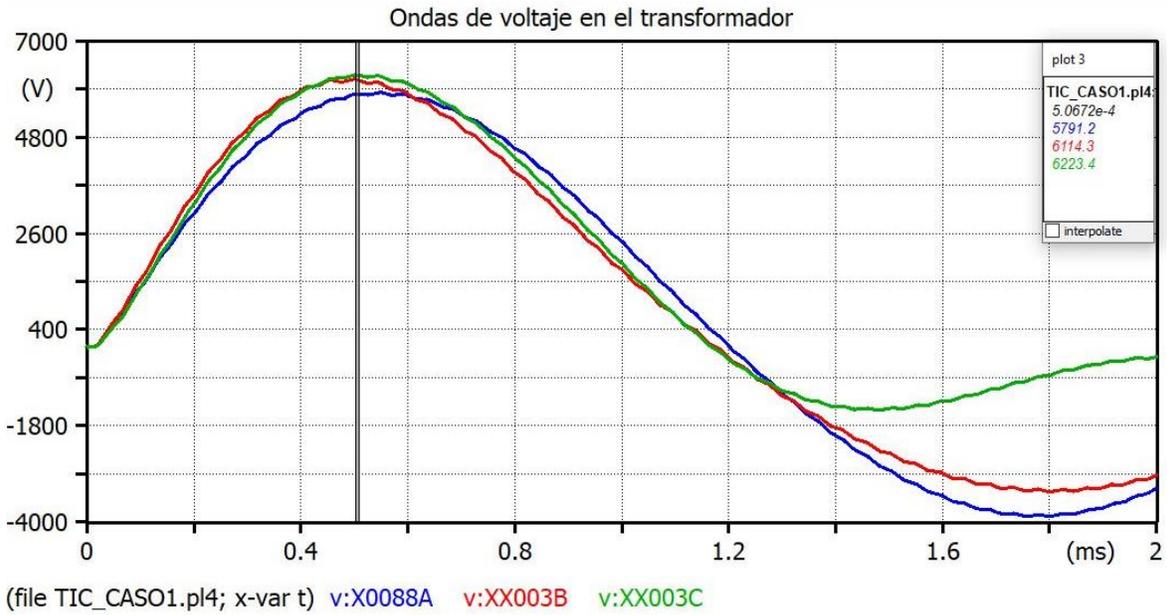


Figura 3.12 Voltajes en el transformador ($I_d=250$ kA)

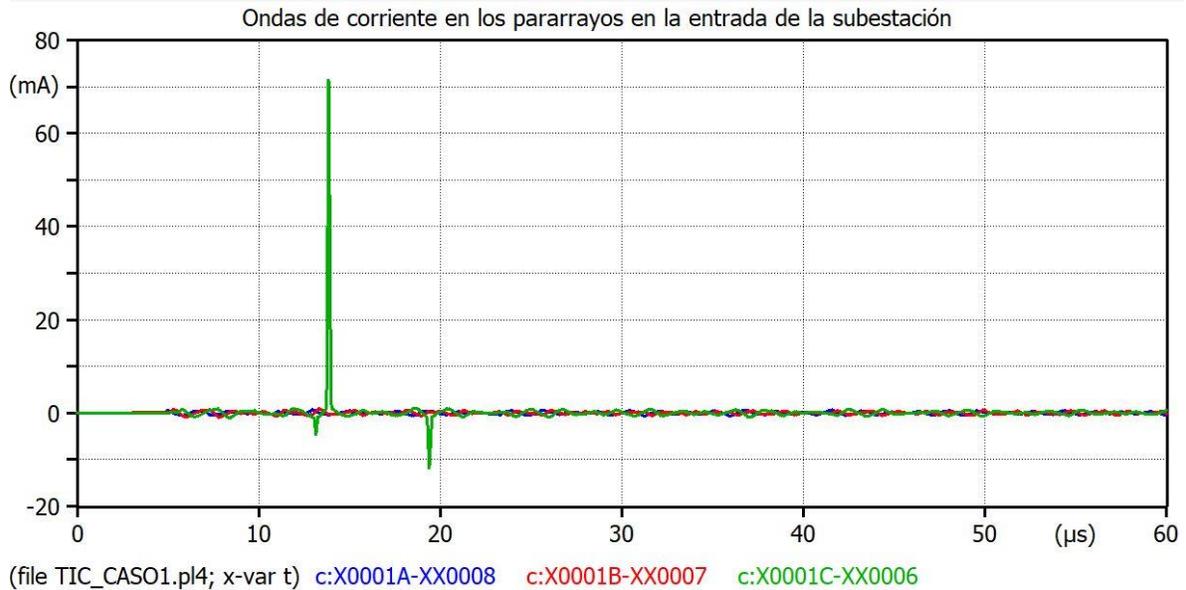


Figura 3.13 Corriente en los pararrayos de ingreso a la sub estación ($I_d=250$ kA)

Tabla 3.3 Comparación de voltajes para cada magnitud de la corriente de descarga

Corriente de descarga	Voltaje pico vano de descarga [MV]	Voltaje pico en la entrada de la subestación [kV]	Voltaje pico en el transformado [V]
100 [kA]	2.107	-360	4902
200 [kA]	4.175	-234	5871
250 [kA]	5.145	-210	6228

3.1.4 Simulación de casos más favorables y menos favorables al considerar una fuente de 60 Hz

Para este caso se incluyó la fuente sinusoidal de 60 Hz con un voltaje de 230 kV. El caso menos favorable se da cuando la descarga atmosférica, con polaridad positiva, se produce cuando la fase A de la fuente de 60 Hz se encuentra en su pico negativo. Lo cual supone que, aproximadamente, la cadena de aisladores estará sujeta a un voltaje igual a la suma del valor de la descarga atmosférica y el valor pico de la onda de 60 Hz. Por lo tanto, se ha configurado para que la descarga atmosférica se de a los 8.33 ms. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Voltajes en caso menos favorable

Corriente de descarga	Voltaje pico vano de descarga [MV]	Voltaje pico en la entrada de la subestación [kV]	Voltaje pico en el transformado [kV]
100 [kA]	2.117	-469	372

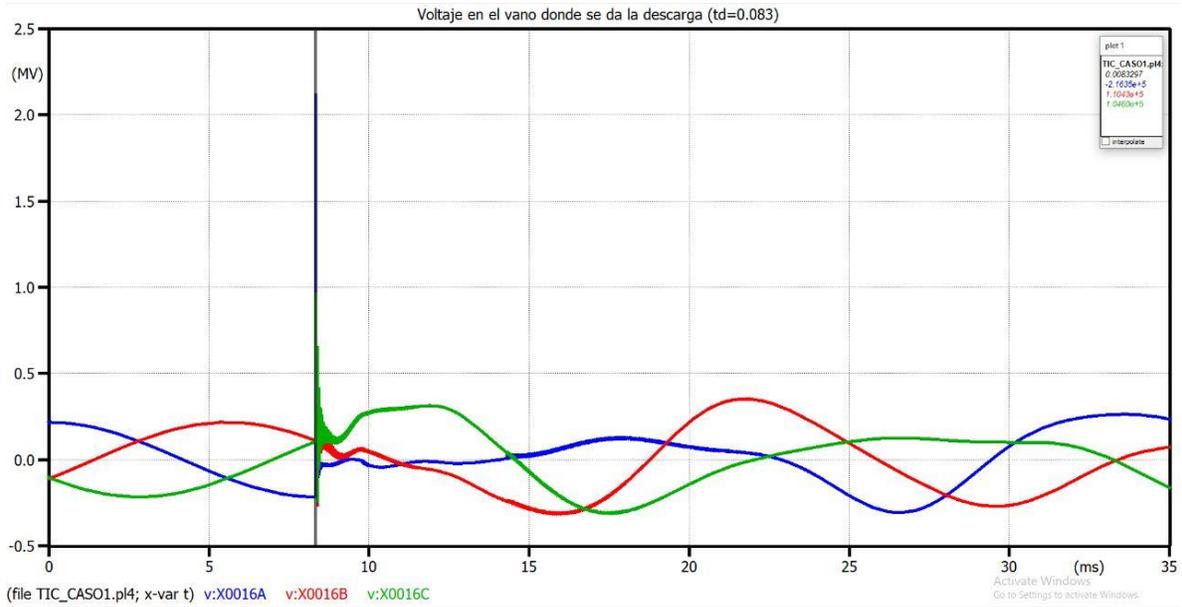


Figura 3.14. Ondas de voltajes de fase en la torre donde se produce la descarga

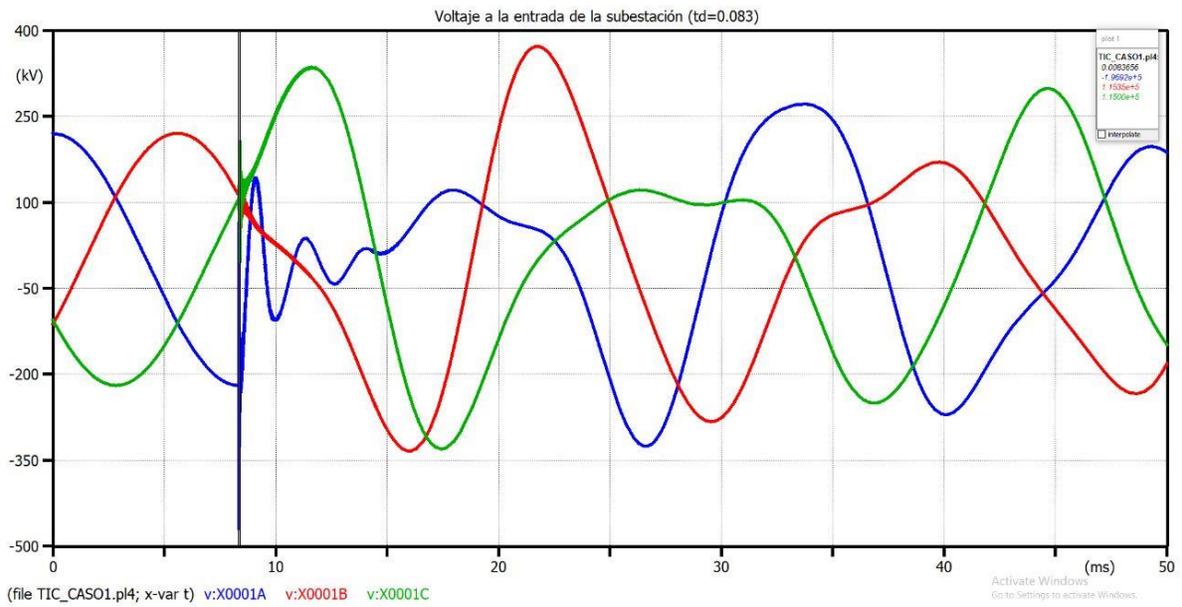


Figura 3.15 Ondas de voltajes en la entrada de la subestación

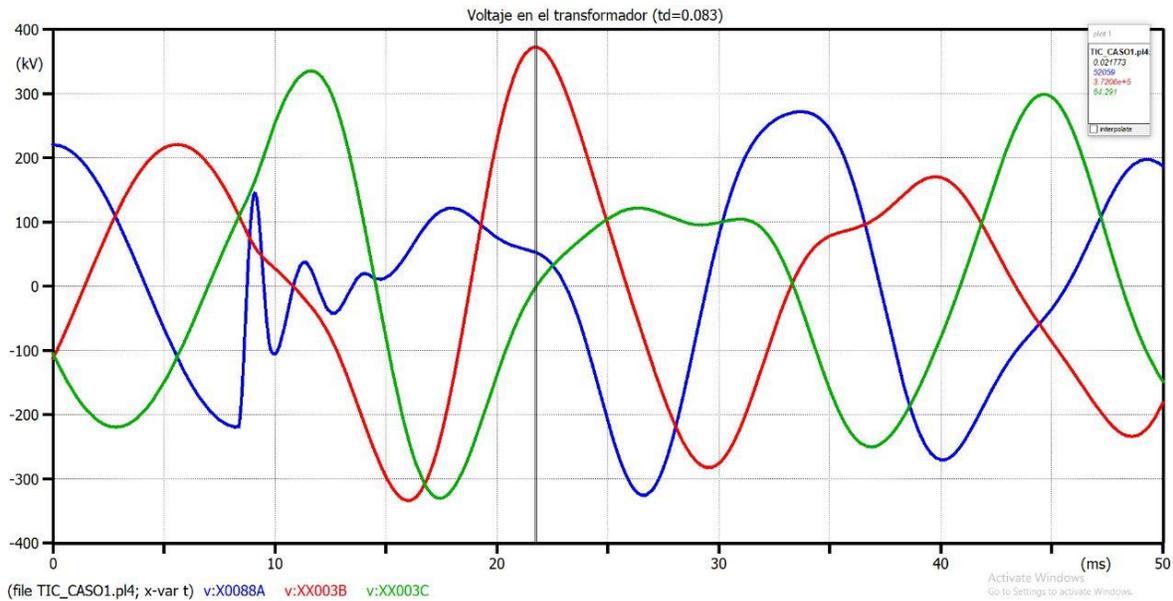


Figura 3.16 Ondas de voltajes en el transformador

En el análisis precedente, caso más desfavorable, considerando la fuente de 60 Hz, produce un voltaje pico de 372 kV en el transformador, valor que es muy inferior a la magnitud del nivel de aislamiento para impulso atmosférico que generalmente se especifica al menos un valor de 750 kV.

La probabilidad de ocurrencia de este evento está dada por la probabilidad de que la descarga atmosférica, con polaridad positiva, se produzca cuando una de las fases de la fuente de 60 Hz pase por su pico negativo.

El caso más favorable, al considerar la fuente de 60 Hz, se da cuando la onda de voltaje de la fase A de la fuente de 60 Hz pasa por su pico positivo, esto es a los 16.666 ms. La cadena de aisladores estará sujeta a un voltaje igual al valor de voltaje producido por la descarga atmosférica menos el valor pico de la onda de voltaje de 60 Hz.

Tabla 3.5 voltajes en caso más favorable

Corriente de descarga	Voltaje pico vano de descarga [MV]	Voltaje pico en la entrada de la subestación [kV]	Voltaje pico en el transformado [kV]
100 [kA]	1.89	285	-271

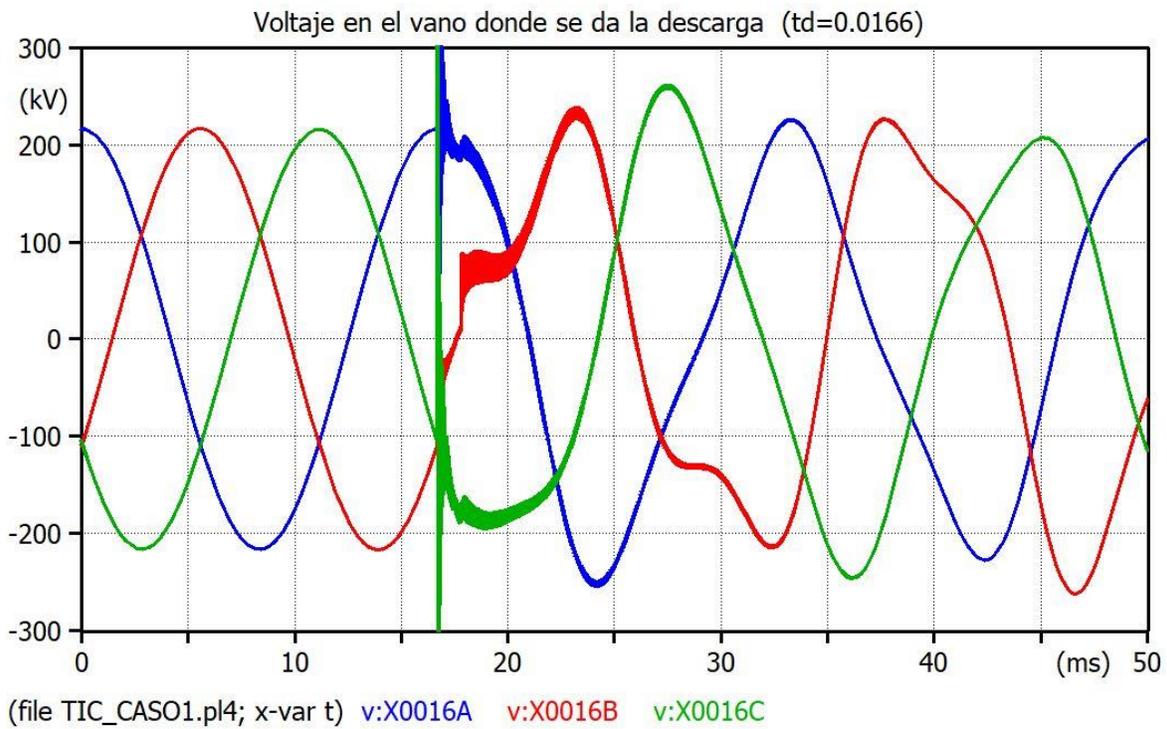


Figura 3.17. Ondas de voltajes de fase en la torre donde se produce la descarga

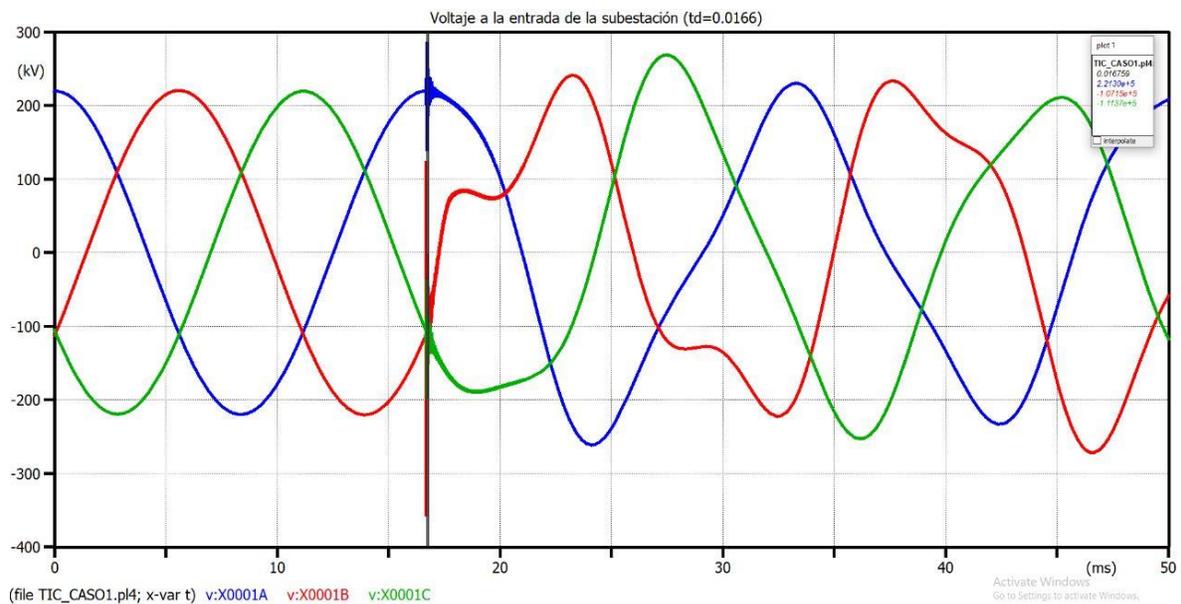


Figura 3.18. Ondas de voltajes en la entrada de la subestación

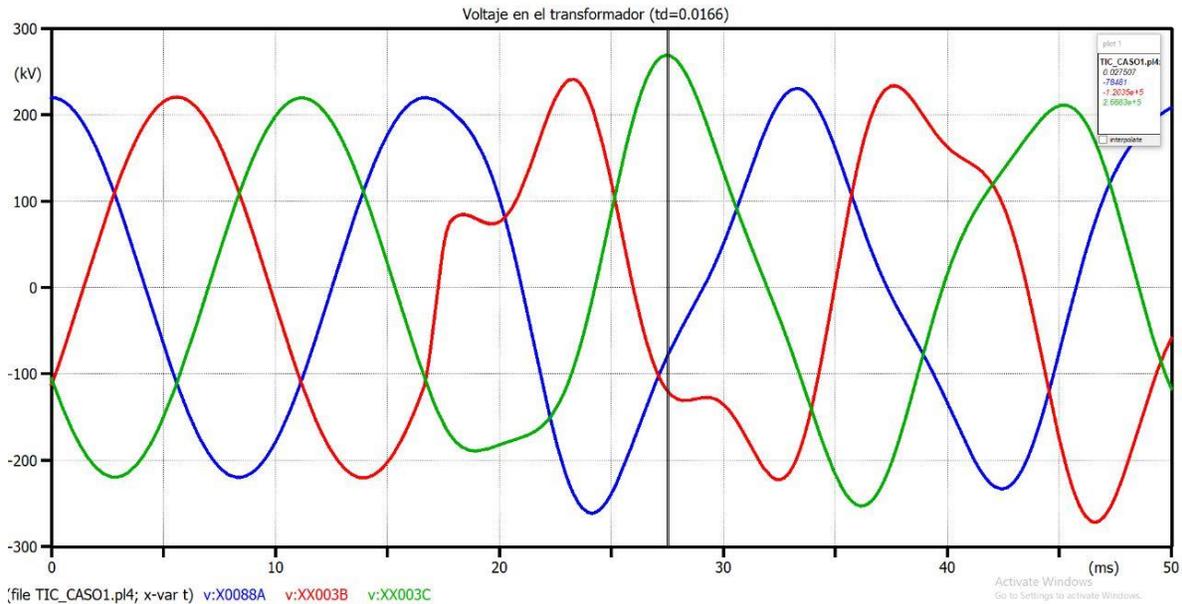


Figura 3.19 Ondas de voltajes en el transformador

Podemos notar como los voltajes en este caso son mucho menores que los obtenidos en el caso precedente. Sin embargo, en este caso, debe considerarse que los voltajes en las fases B y C tendrán una mayor magnitud, debido a que sus ondas de 60 Hz, tienen polaridad contraria al de la fase A, aunque no estén pasando por sus picos.

3.1.5. Comparación de los voltajes al variar la ubicación de la descarga

En el caso base se modifica considerando que la descarga atmosférica se produce en la primera torre de la línea de transmisión, cerca de la subestación, sin cambiar sus demás parámetros, Como resultado se puede apreciar que el voltaje a la entrada de la subestación se incrementa como se puede notar en la Tabla 3.6. donde se presentan los valores de voltaje en la subestación.

Tabla 3.6. Voltajes cuando la descarga se da en el vano próximo a la subestación

	Voltaje pico en la entrada de la subestación [kV]		
I de descarga	Fase A	Fase B	Fase C
100 [kA]	-413.05	111.3	116.22

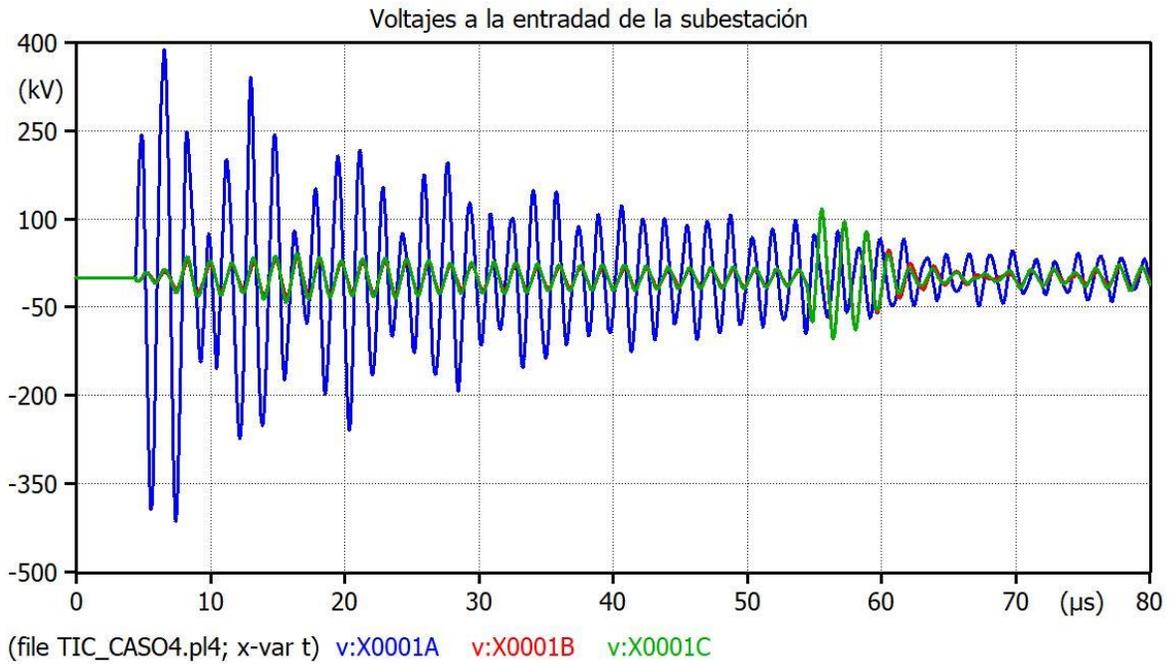


Figura 3.20 Ondas de voltajes en la entrada de la subestación

Mientras que cuando la descarga se produce en el vano más alejado se pueden notar voltajes menos elevados en la entrada de la subestación como se ve en la tabla 3.7

Tabla 3.7 voltajes cuando la descarga se da en el vano más alejado a la subestación

	Voltaje pico en la entrada de la subestación [kV]		
	Fase A	Fase B	Fase C
I de descarga			
100 [kA]	-301.6	77.59	77.58

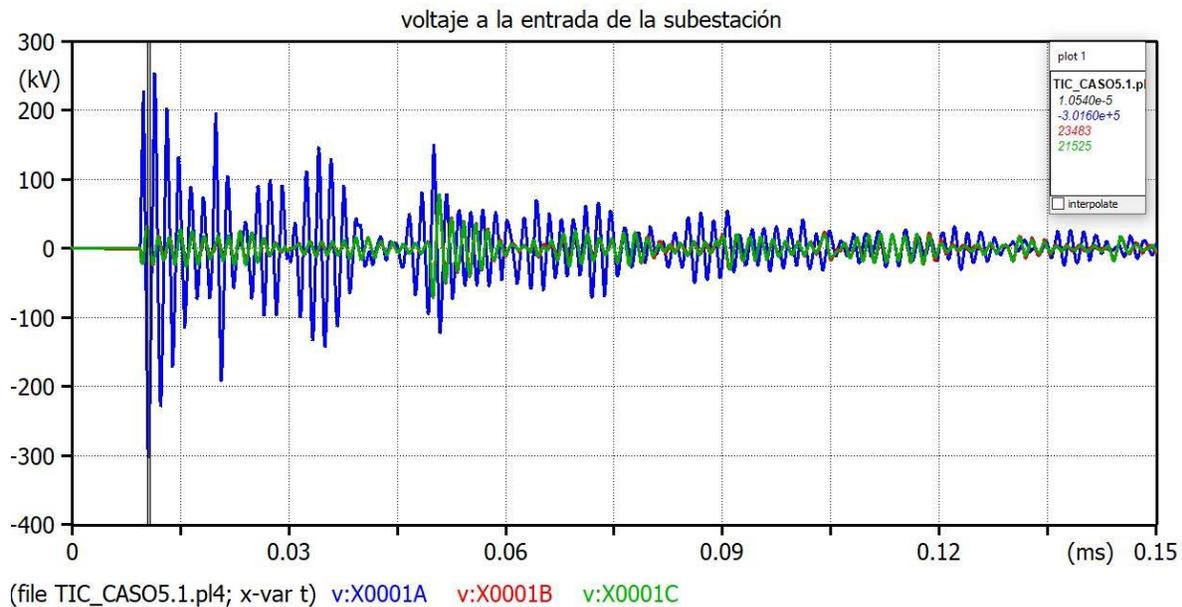


Figura 3.21 Ondas de voltajes en la entrada de la subestación

3.1.6 Variación de resistencia de pie de torre

El caso base se modifica cambiando el valor de la resistencia de pie de torre en la torre donde se produce la descarga. Si se varia la resistencia de pie de torre se puede notar que los voltajes en las fases de la torre donde se produce la descarga aumentan a medida que aumenta el valor de la resistencia de pie de torre, sin embargo se puede notar que el voltaje incidente en la entrada de la subestación disminuye debido a que se producen mas cebados de las cadenas de aisladores en las torres adyacentes.

Tabla 3.8 voltajes en los puntos de medición variando la resistencia de pie de torre

R puesta tierra de la torre	Voltaje pico vano de descarga [MV]			Voltaje pico en la entrada de la subestación [kV]			Voltaje pico en el trasformado [V]		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
5 [Ω]	1.816	0.696	0.688	-254	79	80.7	4941	42.7	43.8
10 [Ω]	2.107	0.802	0.793	-360	105	110	4902	10.1	10.4
15 [Ω]	2.336	0.851	0.878	-256	78	81.8	4334	9.28	9.5

20 [Ω]	2.58	0.968	0.961	-230	68.7	72.1	4279	10.4	10.7
30 [Ω]	2.85	2.685	1.336	-221	253	64.1	3505	3549	15.97

3.1.7 Descargas atmosféricas en el conductor de fase

Considerando la corriente máxima de fallo de apantallamiento se simula la descarga directa en la fase A de la línea de transmisión. No se considera la fuente de 60 Hz.

Tabla 3.9 voltajes en caso mas favorable

I de descarga[kA]	Voltaje pico en el vano donde se presenta la descarga [MV]			Voltaje pico en la entrada de la subestación [kV]			Voltaje pico en el transformado [V]		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
24.24	1.56	-0.42	-0.42	-222	74.2	77.4	2750	9.34	9.52

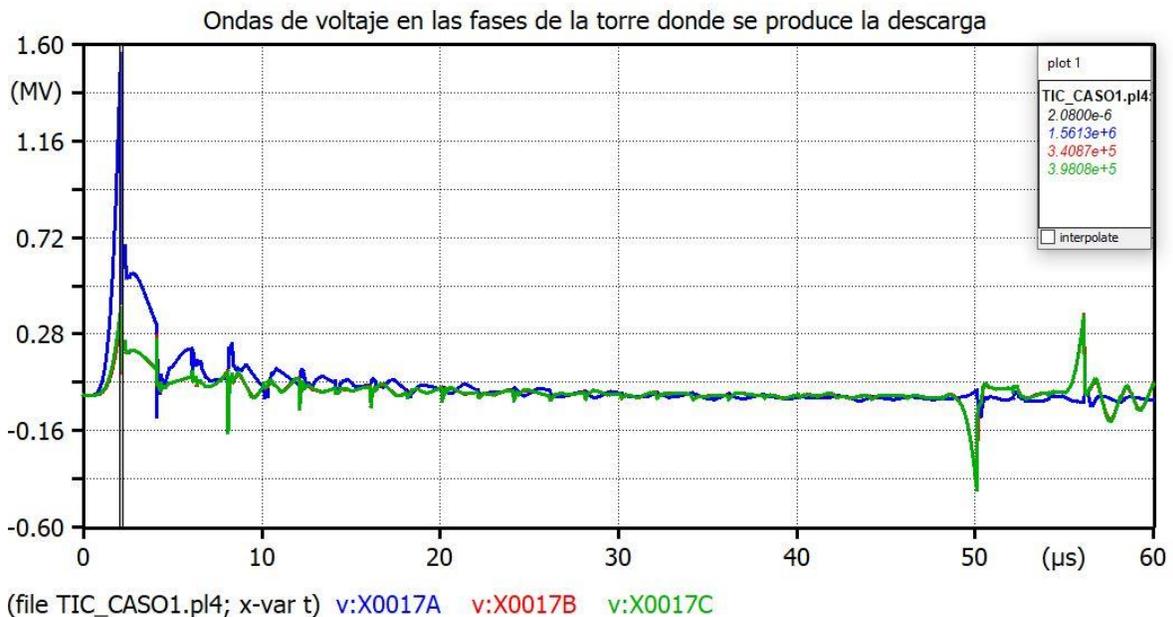


Figura 3.22 voltajes en el vano de la descarga

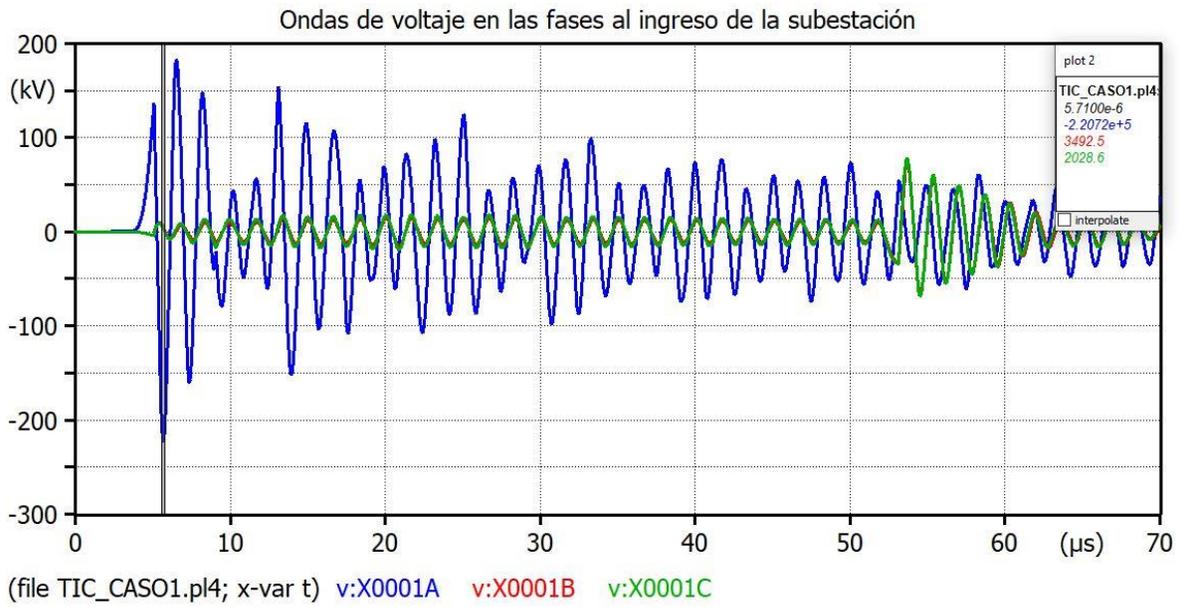


Figura 3.23 voltajes en la entrada de la subestación

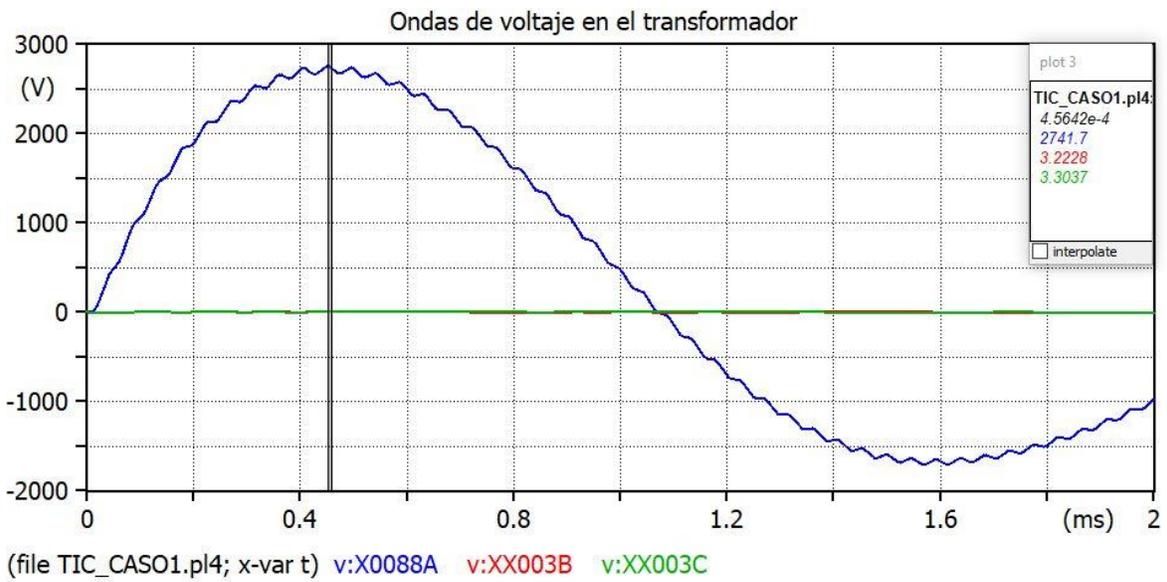


Figura 3.24 Voltajes en el transformador

3.2 Conclusiones

- Los resultados obtenidos confirman el hecho de que ante la presencia de discontinuidades, determinadas por la variación de los valores de las impedancias características de los componentes, ante la presencia de disturbios como la ocurrencia de descargas atmosféricas, las magnitudes de los voltajes en los componentes, dependen de la relación de sus impedancias características, que producen coeficientes de transmisión menores que la unidad.
- De todos los casos analizados el mayor voltaje obtenido en el transformador es de 372 kV, pico, valor muy inferior a la magnitud del aislamiento a impulso atmosférico especificado para transformadores con nivel de voltaje de 230 kV, que es de al menos de 750 kV. Situación que evidencia la no necesidad de ubicar pararrayos junto al transformador.
- Con la variación de la magnitud de la corriente en la fuente de impulso de la descarga atmosférica, se observó que las magnitudes de sobrevoltajes originados en la torre donde ocurre la descarga se incrementa con forme aumentó la magnitud de la corriente, de esta manera se concluye que una de las variables de mayor predominancia en este tipo de sobre voltajes es la magnitud de la corriente de descarga.
- Al considerar la fuente trifásica de 60 Hz, se tendrá que considerar el valor del voltaje en cada fase en el momento de la descarga, ya que esto puede ser favorable o desfavorable según sea el caso, puesto que si la onda de la fuente de 60 Hz se encuentra en su pico negativo en el momento de la descarga, la diferencia de voltaje entre los bornes de la cadena de aisladores será mayor que si la onda se encuentra en su pico positivo.
- Con la variación de la ubicación de la descarga a lo largo de la línea de transmisión, se observó que mientras más cercana a la subestación sea la descarga, mayores serán los sobre voltajes generados en ese punto, esto se debe a que el recorrido de las ondas viajeras es mucho menor que el caso cuando la descarga se da en la torre más alejadas a la subestación.
- El variar la resistencia de pie de torre es un factor fundamental para el nivel de sobre voltajes que se generaran en la torre, lo que afecta directamente al funcionamiento de las cadenas de aisladores, mientras mayor es la resistencia de pie de torre mayor es la probabilidad de descargas inversas en la torre.

- Considerando la corriente máxima de falla de apantallamiento, se tiene una descarga directa en la fase, la cual induce voltajes significativos en el sistema; sin embargo, estos sobrevoltajes no llegan a activar los pararrayos por lo que se concluye que para descargas directas no actuarán los pararrayos considerando que la descarga se da en el antepenúltimo vano antes del ingreso a la subestación

3.3 Recomendaciones

- Se recomienda prestar suma atención a las dimensiones de la torre al momento de realizar los cálculos para su modelo, ya que se debe considerar la geometría exacta para su modelación.
- Se recomienda realizar un buen estudio bibliográfico para que al momento de la realización del proyecto tener claros los conceptos físicos del fenómeno analizado y poder interpretar los resultados de una manera correcta.
- Se recomienda al momento de realizar la simulación del sistema en ATP ir probando los elementos, ya que pueden generar errores por elementos duplicados complicando la simulación.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] B. C. F. Rafael, «Mejora en el aislamiento y sobretensiones del sistema eléctrico interconectado de Orcapampa- Cotahuasi,» Universidad Católica de Santa María, Arequipa Perú, 2022.
- [2] P. J. S. Pazmiño, *Cálculo de Transitorios en Líneas de Transmisión a 230 Kv con Aplicación a la Línea Quevedo Totoras*, Quito, 2010.
- [3] L. Bewley, «Traveling Waves on Transmission Systems,» *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 50, nº 2, p. 12, 1931.
- [4] W. D. S. J. John J. Greinger, *Análisis de sistemas de potencia*, Mexico: McGraw Hill, 1996.

- [5] J. A. M. Velasco, *Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión*, Madrid : Red eléctrica España , 2007.
- [6] R. Vega, «wika,» [En línea]. Available: https://www.bloginstrumentacion.com/knowhow/que-es-el-hexafloruro-de-azufre-o-sf6/?doing_wp_cron=1677611679.4767189025878906250000. [Último acceso: Enero 2023].
- [7] Y. B. M. H. Z. C. a. W. F. G. Wei, «Reserch on Environmental Protection Treatment for Ex'Service SF6 adsorbent,» *IEEE Access* , vol. 8, 2020.
- [8] J. A. Martinez-Velasco, *Power System Transients Parameter determination*, Boca Raton : Taylor & Francis Group, 2010.
- [9] L. P. F. P. Hans Kristian Hoidalén, *ATPDRAW Users Manual*, Norwegian University of Technology Trondheim, 2021.
- [10] E. CABLES, «ELECTRO CABLES,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.electrocable.com/uploads/catficha/cata-logo-electrocables-2018.pdf>. [Último acceso: 01 2023].
- [11] A. E. d. N. y. *Certificación, UNE-EN60099-5*, madrid: AENOR, 2000.
- [12] G. electric, *IEEE/IEC Lightning Arrester*, General Electric Digital Energy .
- [13] B. Standards, *Insulation co-ordination- part 4 Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks*, British Standards, 2004.
- [14] Z. B. M. B. Stjepan Jonjic, «Induced Oervoltages on the SF6 Substation Enclosure Caused by Switching,» JJ. Strossmayer University of Osijek, Croatia , 2011.
- [15] A. R. Hileman, *Insulation Coordination for Power Systems*, London New York : Taylor & Francis , 1999, p. 771.
- [16] J. M. Rovira, «Dsitancias a lineas electricas de BT y AT,» 1983. [En línea]. Available: https://www.insst.es/documents/94886/326853/ntp_073.pdf/428aa9d1-859d-4c0b-936d-499525502e1a?version=1.0&t=1528462080748. [Último acceso: Enero 2023].
- [17] N. A. Garcia Meythaler, «MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL EFECTO “FLASHOVER VOLTAGE” EN LOS AISLADORES DE SUSPENSIÓN DE,» Universidad de las fuerzas armadas ESPE , Latacunga, 2019.
- [18] E. cables, «Electro Cables,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.electrocable.com/uploads/catficha/cata-logo-electrocables-2018.pdf>. [Último acceso: Enero 2023].
- [19] L. Carvajal, *Metodología de la Investgación Científica. Curso general y aplicado*, 28 ed., Santiago de Cali: U.S.C., 2006, p. 139.

Anexo 1

