

Analysis of over voltages due to atmospheric impulse in transmission systems with discontinuities, overhead transmission lines and insulated cables, using ATP

Análisis de sobrevoltajes por impulso atmosférico en sistemas de Transmisión con discontinuidades líneas de transmisión aéreas y cables aislados, usando ATP

J.O. Oña¹ 0009-0000-9379-2833L.E. Ruales¹ 0009-0009-5303-8452¹Departamento de Energía Eléctrica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, EcuadorE-mail: josua.ona@epn.edu.ec; luis.ruales@epn.edu.ec

Abstract

This paper shows an analysis of the overvoltages caused by atmospheric impulses in transmission systems with discontinuities, overhead transmission lines, and insulated cables using the Alternative Transients Program (ATP) software.

The analysis is performed considering direct lightning impact on the guard cable or transmission tower and the direct impact on the phase conductor, when shielding failure occurs. In order to determine voltages at the ends of the insulated cable and analyze its potential affection, a test transmission system has been implemented, and Base Case has been defined; this case is formed by six transmission towers and insulated cable protected in both sides by surge arresters.

The effect of varying parameters that affect the magnitude of the voltages at both the input and the output of the insulated cable is analyzed in order to determine the most critical situation that can influence the maximum overvoltage values in the insulated cable.

The results confirm the effect that the discontinuities between two components of an electrical system have on the voltage magnitudes that may occur in a system due to atmospheric discharges.

Index terms— Insulated cable, atmospheric discharges, surges, ATP.

Resumen

El artículo muestra un análisis de los sobrevoltajes ocasionados por impulsos atmosféricos en sistemas de transmisión con discontinuidades, esto es, líneas de transmisión aéreas que se conectan a cables aislados, las simulaciones se hacen mediante el uso del software Alternative Transients Program (ATP).

El análisis se realiza considerando descargas atmosféricas directas en el cable de guarda o torre de transmisión, y cuando ocurre una falla del apantallamiento de la línea, esto es un impacto directo del rayo en el conductor de fase. Para la determinación de los voltajes en los extremos del cable aislado y analizar su potencial afectación, se ha implementado un sistema de transmisión de prueba en el cual se ha definido un Caso Base, que está compuesto por seis torres de transmisión y un cable aislado protegido en ambos extremos por dispositivos descargadores de sobretensión, DPS.

Se analiza el efecto de variar algunos parámetros que inciden en la magnitud de los voltajes tanto al ingreso del cable aislado como a la salida, con el fin de determinar la situación más crítica que puede influir en los valores máximos de sobrevoltaje en el cable aislado.

Los resultados obtenidos permiten confirmar el efecto que tienen las discontinuidades presentes entre dos componentes de un sistema eléctrico en las magnitudes de voltaje que puedan producirse en un sistema debido a descargas atmosféricas.

Palabras clave— Cable aislado, descargas atmosféricas, sobrevoltajes, ATP.

Recibido: 30-10-2023, Aprobado tras revisión: 21-12-2023

Forma sugerida de citación: Oña, J.; Ruales, L. (2024). "Análisis de sobrevoltajes por impulso atmosférico en sistemas de Transmisión con discontinuidades líneas de transmisión aéreas y cables aislados, usando ATP". Revista Técnica "energía". No. 20, Issue II, Pp. 1-10.

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

Doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v20.n2.2024.597>

© 2024 Operador Nacional de Electricidad, CENACE



Esta publicación es de acceso abierto bajo una licencia Creative Commons



1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, debido a restricciones para la construcción de líneas de transmisión aéreas sea por aspectos ambientales en áreas protegidas o por regulaciones establecidas por los Gobiernos Autónomos Descentralizados para áreas urbanas con mayor frecuencia será necesario recurrir al uso de cables aislados de alta tensión, generalmente subterráneos. Esta situación puede llevar a la instalación de líneas de transmisión compuestas por secciones de líneas de transmisión aéreas y cables aislados de alta tensión.

Al contar con este tipo de configuración en los sistemas de transmisión para un sistema eléctrico, es importante conocer el comportamiento de los cables aislados ante descargas atmosféricas que impactan en la línea de transmisión aérea, dado que las descargas atmosféricas directas en cables aislados no son posibles.

En el presente trabajo, haciendo uso del software Alternative Transient Program, ATP por sus siglas, se modela un sistema eléctrico con la presencia de un sistema de transmisión compuesto por una línea aérea y un cable aislado, con el objeto de determinar el efecto de la discontinuidad sobre la tensión producida por la descarga atmosférica en los extremos del cable. La discontinuidad se entiende como la conexión de dos elementos o más con diferentes valores de impedancia característica.

2. MARCO TEÓRICO

En esta sección del documento se presenta en forma breve el marco teórico que soporta el análisis realizado. Los sobrevoltajes de frente rápido dentro de los cuales las descargas atmosféricas son las más representativas. Se describe el apantallamiento en sistemas eléctricos de transmisión, se analiza la teoría de ondas viajeras y, finalmente, se hace una breve descripción de los cables aislados de alto voltaje.

2.1 Sobrevoltajes de frente rápido

Son en su mayoría de origen atmosférico, es decir, son causados por el impacto directo e indirecto del rayo en las subestaciones y líneas de transmisión, o en sus proximidades. Por otra parte, también existe la posibilidad de que se produzcan sobrevoltajes debido a la ejecución de maniobras de conexión y desconexión de elementos al sistema eléctrico [1].

2.2 Descargas atmosféricas

Un sistema eléctrico de potencia está expuesto a descargas atmosféricas, más aún en líneas de transmisión de larga distancia, debido a que atraviesan varias zonas con diferentes niveles cerámicos (cantidad de tormentas existentes en un año) [1].

Hay distintas formas en las que las descargas atmosféricas pueden impactar en líneas de transmisión.

2.2.1 Descargas atmosféricas directas en conductores de fase

El rayo impacta directamente sobre el conductor de fase, debido a una falla de apantallamiento de la línea ante descargas atmosféricas; es muy común que el conductor impactado sea de una fase exterior o de una fase más elevada [1].

2.2.2 Descargas atmosféricas directas en cables de guarda o torres

El rayo impacta directamente en la estructura metálica de la torre o en el cable de guarda de la línea de transmisión, propagando ondas de corriente que dan origen a un incremento en el potencial de la estructura, produciendo un flameo inverso, corresponde a una descarga desde la estructura del brazo de la torre hacia el conductor de fase, este flameo ocurre contorneando la cadena de aisladores o produciendo ruptura de la misma [1], lo anterior sucede si y solo si se supera el nivel de soportabilidad de voltaje del aislamiento del aire o la cadena de aisladores de la línea, respectivamente.

2.2.3 Descargas atmosféricas indirectas

Se producen cuando existen descargas eléctricas a tierra cercanas a las líneas de transmisión. Debido al nivel de aislamiento y a la longitud de las líneas de transmisión, los sobrevoltajes provocados por una descarga atmosférica indirecta, usualmente, no originan ningún contorno en la cadena de aisladores [1].

2.2.4 Descargas atmosféricas en cables aislados de sistemas de transmisión

En este caso, no existe la posibilidad de que una descarga atmosférica impacte directamente, puesto que al estar enterrados se encuentran protegidos.

2.3 Análisis de Ondas viajeras

El análisis de ondas viajeras permite modelizar la propagación de impulso atmosférico en una línea de transmisión, y caracterizar el comportamiento de los impulsos ante la presencia de una discontinuidad de línea o conexiones a esta.

Al producirse el impacto de una descarga atmosférica en la torre o en los conductores de la línea, se producen ondas que viajan por las líneas de transmisión aéreas a una velocidad muy próxima a la velocidad de la luz hasta alcanzar un punto de discontinuidad, es decir, un cambio en la impedancia característica del circuito, en donde surgen ondas incidentes (voltaje y corriente) que van hacia adelante de la línea y ondas reflejadas (voltaje y corriente) que regresan por la misma línea y sobreponen las ondas principales, pero debido a las pérdidas de la línea son atenuadas y van desapareciendo conforme transcurren algunas reflexiones [2]. Las ondas reflejadas, incidentes y transmitidas se producen cuando existen discontinuidades.

De acuerdo con la Fig. 1 y considerando $Z_2 < Z_1$, se tiene una onda de voltaje que se propaga a lo largo de una línea con una impedancia característica Z_1 , la cual al encontrarse con una línea con impedancia característica Z_2 , las ondas reflejadas y transmitidas están dadas por [2]:

$$\frac{V_i}{i_i} = Z_1 \quad (1)$$

$$\frac{V_r}{i_r} = -Z_1 \quad (2)$$

$$\frac{V_t}{i_t} = Z_2 \quad (3)$$

Donde los subíndices (*i*) es la onda incidente, (*r*) la onda reflejada, (*t*) la onda transmitida

$$V_t = V_i + V_r \quad (4)$$

$$V_t = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot V_i = \alpha \cdot V_i \quad (5)$$

$$V_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot V_i = \beta \cdot V_i \quad (6)$$

Cabe señalar que α es el coeficiente de transmisión y β es el coeficiente de reflexión.

$$i_t = i_i + i_r \quad (7)$$

$$i_t = \frac{2}{Z_1 + Z_2} \cdot V_i \quad (8)$$

$$i_r = \frac{V_i}{Z_1} \cdot \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (9)$$

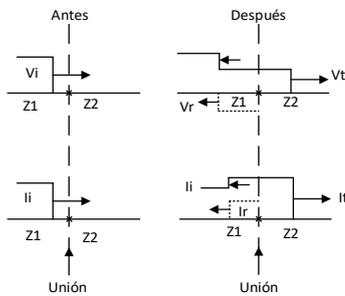


Figura 1: Ondas de corrientes y voltajes reflejadas, incidentes y transmitidas en líneas de impedancia Z_1 y Z_2 [2]

2.4 Limitación de descargas atmosféricas

La protección contra el impacto de descargas atmosféricas puede darse mediante la implementación del apantallamiento de la línea de transmisión y la protección contra los sobrevoltajes producidos por la descarga atmosférica mediante el uso de descargadores de sobretensión [1].

2.4.1 Apantallamiento

El método general para el diseño o análisis del apantallamiento se basa en el modelo electrogeométrico. Cuando un rayo se aproxima a una línea o tierra a una

distancia r_c se la denomina distancia de arqueo o impacto, la descarga puede caer en el conductor de fase, en el cable de guarda o en la tierra [1]. Esta distancia de arqueo r_c está en función de la corriente y su representación es la siguiente:

$$r_c = \alpha \cdot I^\gamma \quad (10)$$

Donde α , γ son factores que por lo general toman valores de 10, 0,9 y 0,65 respectivamente, I es la corriente del rayo en kA y r_c es la distancia de arqueo en metros [1]. Este modelo permite determinar la magnitud de la corriente de la descarga atmosférica que produce falla de apantallamiento.

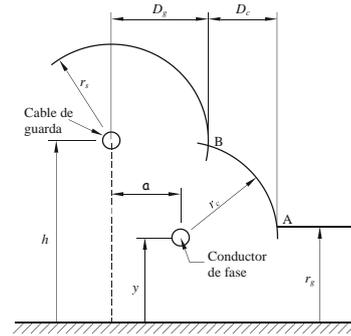


Figura 2: Distancias críticas del cable de guarda, conductor de fase y tierra [1]

En el presente trabajo, se considerará para los casos de estudio una falla de apantallamiento, por lo cual, resulta imprescindible primero encontrar una distancia de arqueo en base a la geometría del sistema de prueba y luego establecer la corriente máxima del rayo [1].

Para realizar todos los cálculos, es necesario conocer el ángulo del sistema:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{a}{h - y} \quad (11)$$

Y definir la distancia crítica por la geometría del sistema como se muestra a continuación:

$$r_{gm} = \frac{\frac{h + y}{2}}{1 - \gamma \cdot \sin \alpha} \quad (12)$$

Donde γ es la relación r_c/r_g .

Para realizar un estudio de apantallamiento adecuado, es importante conocer su probabilidad de ocurrencia, por lo cual, se establece que la probabilidad de que una corriente de pico sea menor que un valor de corriente I_o está aproximada en base a una función de distribución fraccional definida en la siguiente ecuación:

$$F(I < I_o) = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{I_{50}}\right)^{n_c}} \quad (13)$$

Siendo I_{50} igual a 31 kA y n_c igual 2,6 valores recomendados por la norma IEEE Std 1243-1997 [1].

2.5 Cables aislados

Son utilizados en redes subterráneas; sin embargo, existe la posibilidad de que también puedan implementarse sobre el terreno. Su aislamiento no es autorecuperante, por tanto, deberá darse especial atención a su dimensionamiento.

Existen distintos tipos de cables, siendo los más comunes los siguientes:

- Cable sólido, capa extruida de polietileno (PE)
- Cable sólido, polietileno reticulado (XLPE)
- Cable caucho de etileno-propileno (EPR).

2.6 Métodos de puesta a tierra de pantallas en cables aislados

En los cables aislados es importante que sus pantallas se encuentren conectadas a tierra en al menos un punto a lo largo del cable y cuenten con un método de conexión apropiado para garantizar una protección adecuada contra descargas atmosféricas [3].

Los métodos más comunes son:

- Pantallas conectadas a tierra en un solo punto (Single Point Bonding)
- Conexión rígida a tierra (Solid Bonding)
- Transposición de pantallas (Cross bonded)

3. METODOLOGÍA

El sistema modelado en el software ATP se muestra en la Fig. 3. Cuando ocurre una descarga atmosférica en una torre de transmisión, ocasiona un disturbio en la torre impactada y en las torres adyacentes. La onda de corriente originada por este fenómeno viaja hacia los dos lados de la línea provocando sobrevoltajes en los vanos y torres más cercanas. La descarga no afecta a toda la línea de transmisión, puesto que a medida que viajan sus ondas, su efecto es cada vez menor, por lo que establecer un número de seis vanos resulta adecuado. Adicionalmente, se incluye un segmento de línea de transmisión de 3,3 km para asegurar que las reflexiones de la onda viajera durante su simulación no incidan en el resultado. El sistema de prueba implementado en el presente trabajo es el siguiente:

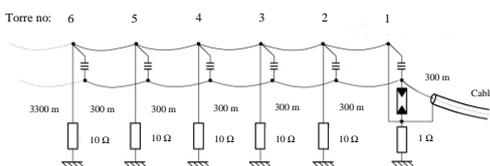


Figura 3: Sistema de prueba

Como se puede visualizar en la Figura 3 el sistema de prueba consta de líneas de transmisión aéreas y subterráneas de simple circuito, torres de transmisión, resistencias de la puesta a tierra de torre, cadena de

aisladores y descargadores de sobretensión. Además, se tendrá la representación de un impulso atmosférica como una fuente de corriente.

Es importante mencionar que solo se va a analizar únicamente los sobrevoltajes en el núcleo del cable y no en sus pantallas metálicas.

A continuación, se describe cada componente mencionado anteriormente:

3.1 Líneas de transmisión

En el presente análisis, se utilizará el modelo matemático J. Martí, puesto que es el más adecuado para fenómenos de alta frecuencia como lo son las descargas atmosféricas y sus parámetros son variables y dependen de la frecuencia [4].

ATP permite representar las líneas de transmisión mediante la componente Lines/Cables, LCC template.

3.1.1 Líneas Aéreas

Los conductores utilizados en la línea de transmisión aérea de 230 [kV] son, para las fases ACAR 1100 kcmil y para el cable de guarda, acero galvanizado de 7 hilos y 3/8" HS. A continuación, se presentan sus características.

Tabla 1: Valores de parametrización de los conductores de fase

Parámetro	Valor
Resistencia del conductor en DC (Resis)	0.0556 [Ω /km]
Radio externo del conductor (Rout)	1.533 [cm]
Radio interno del conductor (Rin)	0 [cm]

Tabla 2: Valores de parametrización del cable de guarda

Parámetro	Valor
Resistencia del conductor en DC (Resis)	3.75 [Ω /km]
Radio externo del conductor (Rout)	0.47625[cm]
Radio interno del conductor (Rin)	0 [cm]

Una configuración general para una torre con voltaje 230 [kV] es la suspensión ligera SL1, la cual se ilustra en la Figura 4, donde se indican las posiciones de los conductores y cable de guarda.

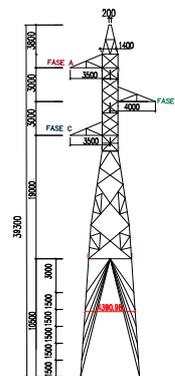


Figura 4: Torre de suspensión ligera [5]

3.1.2 Líneas Subterráneas

Se utiliza cable aislado tipo XLPE de 630 mm² y considera a las pantallas (sheath) conectadas a tierra establecidas por defecto del programa ATP.

Tabla 3: Valores de parametrización del cable aislado

Parámetro	Conductor	Pantalla
Radio interno del conductor (Rin)	0 [m]	0.04325 [m]
Radio externo del conductor (Rout)	0.01495 [m]	0.04541 [m]
Resistividad del material conductor (Rho)	1.82x10 ⁻⁸ [Ω · m]	2.83x10 ⁻⁸ [Ω · m]
Permeabilidad relativa del material del conductor (mu)	1	1
Permeabilidad relativa del material fuera del conductor (mu [ins])	1	1
Permitividad relativa del material fuera del conductor (eps [ins])	2.68	3.1
Espesor de la capa semiconductor interna (Semicon in)	0.0029 [m]	0 [m]
Espesor de la capa semiconductor exterior (Semicon out)	0.0042 [m]	0 [m]
Radio total del conductor	0.0545 [m]	

Los valores de espesor en la pantalla toman el valor de cero como sugerencia del programa ATP.

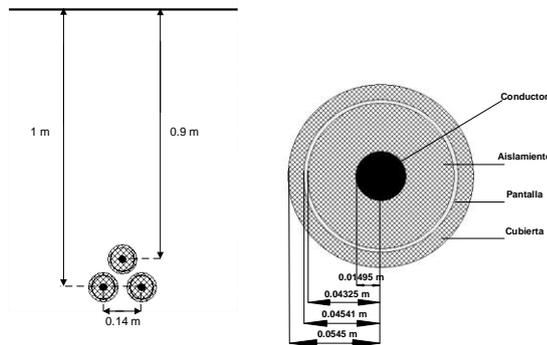


Figura:5 Visualización de cables aislados [5]

3.2 Corriente del rayo (Fuente de corriente de Heidler)

El modelo de onda que más se ajusta a la representación de una descarga atmosférica sobre una línea de transmisión es el de Heidler. Este modelo es más exacto y se aproxima bastante a mediciones de campo debido a que no presenta una discontinuidad en su tiempo derivativo t=0 [6]. La fuente de corriente de Heidler se define como:

$$I(t) = \frac{I_o}{\eta} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n + 1} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (14)$$

Donde η es el factor de corrección de amplitud, I_o el valor de cresta de la corriente de la descarga atmosférica,

τ_1 la constante de tiempo de subida de la descarga atmosférica y τ_2 la constante proporcional al tiempo de duración de la descarga (intervalo entre t=0 y el punto de la cola donde la amplitud de la función se ha caído al 50% del valor pico) [6].

3.3 Torre de transmisión

En el presente análisis, se usa el modelo multipiso, en razón a su semejanza con la torre de transmisión escogida, compuesto de cuatro tramos que representan las secciones de la torre entre crucetas [7].

Cada sección consta de una línea sin pérdidas en serie con un circuito paralelo resistencia-inductancia, incluido para la atenuación de las ondas viajeras [7].

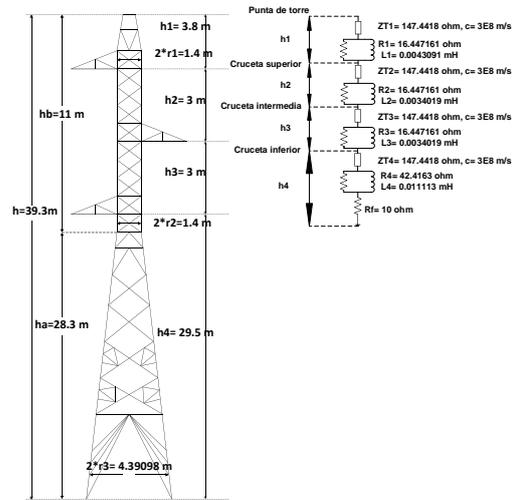


Figura:6 Modelo multipiso [7]

A continuación, se muestran las siguientes ecuaciones que definen sus parámetros:

$$R_i = \frac{-2 \cdot Z_{T1} \cdot \ln \sqrt{\gamma}}{h_1 + h_2 + h_3} \cdot h_i \quad (i = 1,2,3) \quad (15)$$

$$R_4 = -2 \cdot Z_{T2} \cdot \ln \sqrt{\gamma} \quad (16)$$

$$L_i = \alpha \cdot R_i \cdot \frac{2h}{c} \quad (i = 1,2,3,4) \quad (17)$$

Donde Z_{T1} es la impedancia característica de las tres secciones superiores de la torre, Z_{T2} es la impedancia característica de la sección inferior de la torre, h_i es la altura de cada sección de torre, γ es el coeficiente de atenuación y α es el coeficiente de amortiguamiento [7].

La velocidad de propagación considerada es igual a la velocidad de la luz, el coeficiente de amortiguamiento igual a la unidad y el coeficiente de atenuación igual a 0,75.

Una investigación experimental encontró que un cálculo adecuado para Z_{T1} y Z_{T2} es en base a la fórmula de Jordan definida como:

$$Z = 60 \cdot \left(\ln \left(\frac{h}{r_{eq}} \right) - 1 \right) \quad (18)$$



Donde h es la altura de la torre, h_a, h_b son las alturas entre brazos de la torre y r_{eq} es el radio equivalente obtenido de la geometría de la torre:

$$r_{eq} = \frac{r_1 \cdot h_b + r_2 \cdot h + r_3 \cdot h_a}{2 \cdot h} \quad (h = h_a + h_b) \quad (19)$$

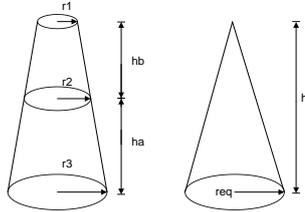


Figura:7 Geometría para el cálculo del radio equivalente [4].

3.4 Resistencia de la puesta a tierra de torre

En la práctica, el valor de la resistencia de la puesta a tierra de pie de torre tiene un rango de valores, que dependen del suelo en el que está ubicada la torre. En este trabajo se utilizan valores conforme a la práctica de CELEC EP Transelectric aplicada en el país para este tipo de líneas, es decir, se considera una resistencia de puesta a tierra igual a 10Ω .

3.5 Cadena de aisladores

Se encuentran ubicados entre el brazo o estructura de la torre y los conductores de fase con el propósito de soportar esfuerzos mecánicos y eléctricos ante alguna condición anormal como en este caso una descarga atmosférica [4].

Según la curva normalizada de CIGRE para flameos en cadena de aisladores de líneas de transmisión el voltaje crítico de flameo es calculado la siguiente ecuación [8]:

$$V_{fl} = \left(400 + \frac{710}{t^{0,75}} \right) \cdot w \quad (20)$$

Siendo t el tiempo de flameo en microsegundos y w la longitud de la cadena de aisladores en metros.

En ATP se simula como un interruptor controlado por voltaje denominado Switch voltage contr.

Al implementar los parámetros, cabe mencionar que el tiempo de cierre del interruptor, se tomará igual a 6 microsegundos debido a la curva de CIGRE y la cantidad de cadena de aisladores será de 17 unidades ANSI 52-3 para torres de suspensión y ANSI 52-5 para torres de retención tomados como referencia de CELEC EP Transelectric, con una longitud de 2.482 m.

3.6 Pararrayos

La representación de los DPS en el software ATP es mediante el modelo IEEE, el cual es un modelo dependiente de la frecuencia y está compuesto por dos secciones de resistencias no lineales denominadas A0 y A1, separadas por inductores lineales L_0, L_1 en paralelo con resistencias lineales R_0, R_1 y un condensador C [7].

En cuanto a los parámetros, es necesario conocer la curva característica de V vs I de las dos secciones de resistencias no lineales A0 y A1 [7], la longitud del descargador en metros d igual a 3.063 m, el número de columnas de varistores n igual 1, el voltaje residual en kV para 10 kA, cuando se le aplica un impulso de corriente de $8/20 \mu s$ igual a 500 kV, y las siguientes ecuaciones:

$$L_0 = 0.2 \frac{d}{n} (\mu H) \quad R_0 = 100 \frac{d}{n} (\Omega) \quad (21)$$

$$L_1 = 15 \frac{d}{n} (\mu H) \quad R_1 = 65 \frac{d}{n} (\Omega) \quad (22)$$

$$C = 100 \frac{n}{d} (pF) \quad (23)$$

Para las resistencias lineales en el programa, se escogió el componente no lineal Branch Nonlinear, MOV Type 92; mientras que para el resto de los elementos el componente Branch Linear (R, L, C).

3.7 Fuente del sistema a 60 Hz

La fuente utilizada es de tipo sinusoidal trifásica, constante y balanceada.

4. RESULTADOS

Con el sistema de prueba definido, es necesario establecer los distintos casos que serán simulados y analizados.

En el presente trabajo, se consideran los siguientes casos de estudio:

- Impacto directo de la descarga atmosférica en el cable de guarda o en la torre.
- Impacto directo de la descarga atmosférica en conductores de fase.

El evento con mayor probabilidad de ocurrencia es el impacto de un rayo en el cable de guarda y el de menor probabilidad, el impacto en una fase (falla de apantallamiento).

4.1 Caso Base

Corresponde a la simulación del sistema de prueba de la Fig. 8, con las siguientes consideraciones:

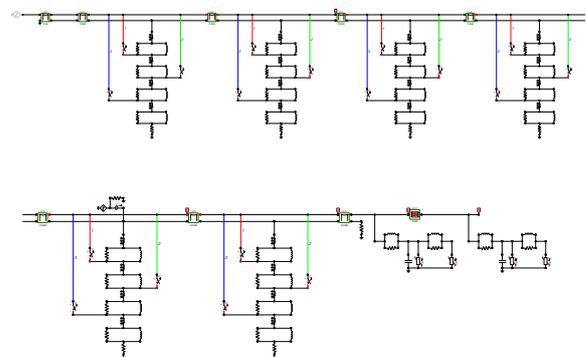


Figura:8 Sistema de prueba en ATP [5]

Descargas atmosféricas directas en cables de guarda o torres

Impacto de la descarga en la segunda torre del sistema, cercana al cable, con una magnitud de 100 kA, tiempo de cresta o pico (T_c) de 0.000005 s, duración de la descarga (τ) de 0.000025 s y factor de influencia de la tasa de crecimiento (n) igual a 5.

Consideración de la fuente de 60 Hz

No se toma en cuenta la fuente de 60 Hz porque su aporte incrementando la diferencia de potencial a través de la cadena de aisladores se da solo cuando la descarga atmosférica coincide en el momento en que la onda de voltaje sinusoidal de la fuente pasa por un pico de polaridad contraria a la polaridad de la onda de la descarga atmosférica. Evento cuya probabilidad es baja.

Debe considerarse que en otras circunstancias su presencia contribuye a disminuir la diferencia de potencial en la cadena (cuando las dos ondas tienen la misma polaridad) y por lo tanto hasta podría disminuir la probabilidad de un flameo.

Longitud del cable

El cable aislado de 230 kV está simulado con una longitud de 6.000 m.

Resistencia de puesta a tierra de las torres

Se considera una resistencia de puesta a tierra en la torre cercana al cable de 1 Ω , debido a que con este valor la probabilidad que se produzca un flameo inverso es muy reducida, y en las torres restantes de 10 Ω .

Resultados obtenidos

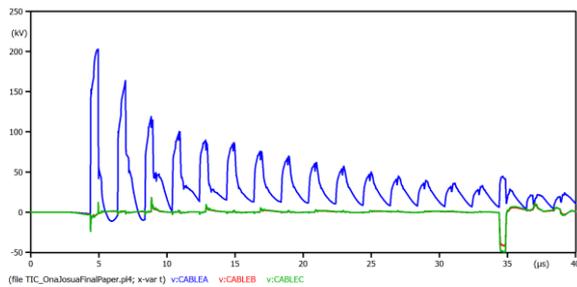


Figura 9: Voltaje a la entrada del cable aislado

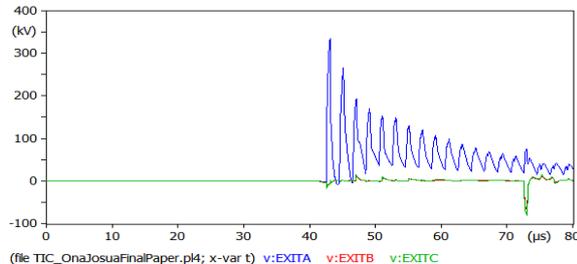


Figura 10: Voltaje a la salida del cable aislado

La Fig. 9 y 10 muestran como las ondas de voltaje al inicio presentan un incremento en su magnitud debido a la caída del rayo; sin embargo, luego empiezan a decrecer

conforme transcurre el tiempo de cola del impulso atmosférico.

La onda de la fase A (color azul) se puede observar que tiene un mayor voltaje en comparación con la fase B (color rojo) y fase C (color verde), es decir, al ocurrir una descarga en el cable de guarda presenta bastantes oscilaciones, un mayor sobrevoltaje inducido por ser la fase más elevada y un mayor tiempo para lograr su estabilidad.

En el caso base es importante mencionar que al existir una descarga atmosférica con un valor de corriente de 100 kA origina ondas viajeras que al llegar a la base de la torre y encontrarse con una discontinuidad (resistencia de la puesta a tierra de torre) provoca ondas incidentes y reflejadas; sin embargo, su efecto no es tan considerable a la entrada del cable aislado, puesto que no causan la operación del DPS implementado.

La magnitud del voltaje obtenido en el terminal remoto del cable es mayor que el obtenido a la entrada del mismo debido a la condición de vacío en la que se encuentra el cable.

4.2 Variación en la magnitud de la corriente del rayo

El presente caso de estudio corresponde a una comparación entre la magnitud de corriente del rayo definida en el Caso Base y las magnitudes de corriente de 200 y 250 kA.

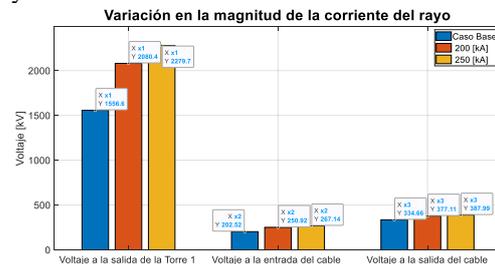


Figura 11: Resultados de voltajes obtenidos en la variación en la magnitud de la corriente del rayo

4.3 Variación de la resistencia de la puesta a tierra de torre

Los valores de resistencia de pie de torre se considerarán entre 10 y 30 Ω en la torre impactada por el rayo definida en el Caso Base. La Fig. 12 presenta los resultados obtenidos en este caso de estudio.

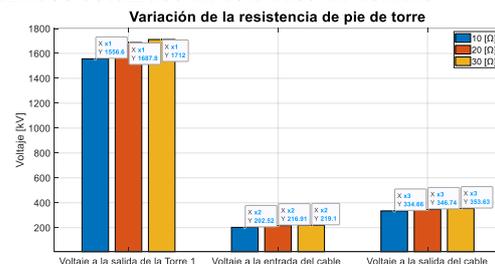


Figura 12: Resultados de voltajes obtenidos en la variación de la resistencia de pie de torre



4.4 Variación de la longitud del cable aislado

La longitud del cable aislado toma valores entre 6 y 12 km. La Fig. 13 presenta los resultados obtenidos a la entrada y salida del cable aislado al momento de impactar el rayo.

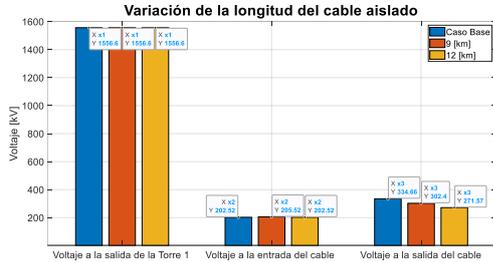


Figura 13: Resultados de voltajes obtenidos en la variación del cable aislado

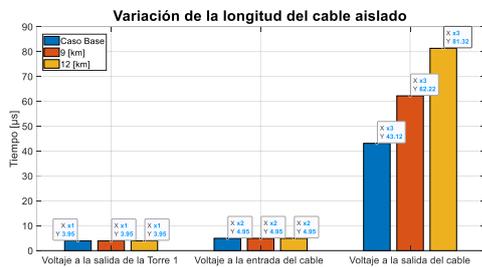


Figura 14: Tiempos obtenidos en la variación de la longitud del cable aislado

4.5 Variación en el lugar de la caída del rayo

Para este caso, se considera una descarga atmosférica de 250 kA en la torre más cercana y una torre más alejada, así como en su Caso Base (segunda torre). La Fig. 15 presenta los resultados obtenidos a la entrada y salida del cable aislado al momento de impactar el rayo.

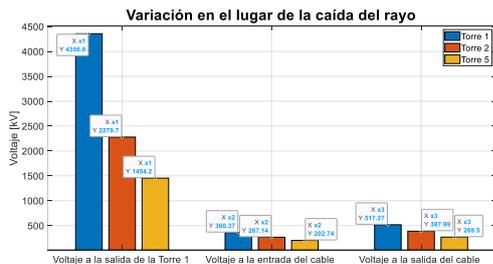


Figura 15: Resultados de voltajes obtenidos en la variación del lugar de la caída del rayo

4.6 Con la implementación de la fuente de 60 Hz

Se considera una fuente de voltaje a una frecuencia de 60 Hz para analizar los efectos que puede causar una descarga en un sistema operando a 230 kV.

En este caso, se tomarán en cuenta dos posibilidades; la primera, al coincidir la polaridad positiva de la descarga atmosférica con el semiciclo negativo de las ondas de voltaje que están en el lugar de descarga en estado estacionario y la segunda, al coincidir la polaridad positiva de la descarga atmosférica con el semiciclo

positivo de las ondas de voltaje que están en el lugar de descarga en estado estacionario.

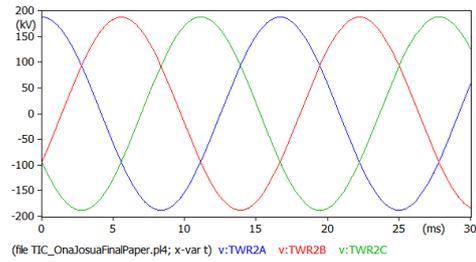


Figura 16: Voltaje a frecuencia industrial en la línea de transmisión

4.6.1 Descarga atmosférica en el Caso 1

Al iniciar la descarga atmosférica, las ondas de voltaje que van a entrar al cable serán la suma o resta de las ondas viajeras ocasionadas por la descarga y las ondas originadas por la fuente de 60 Hz.

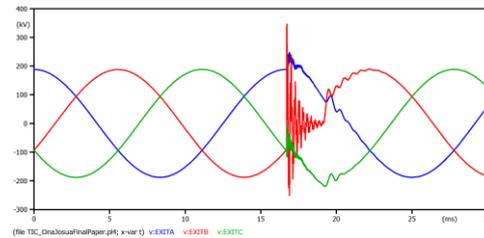


Figura 17: Resultados de voltajes obtenidos a la salida del cable cuando ocurre una descarga atmosférica a los 16,66 milisegundos

4.6.2 Descarga atmosférica en el Caso 2

En este caso, ocurrirá algo similar al caso anterior; sin embargo, es importante considerar que la descarga atmosférica iniciará en otro instante de tiempo.

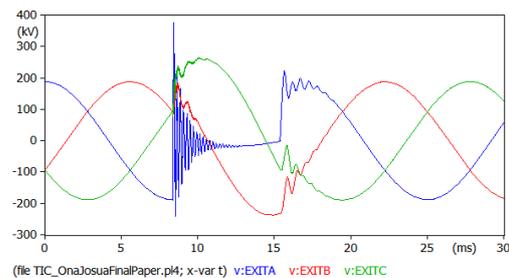


Figura 18: Resultados de voltaje obtenidos a la salida del cable cuando ocurre una descarga a los 8,33 milisegundos

4.7 Descargas atmosféricas directas en conductores

Se considera una descarga directa en el conductor de la fase A con una corriente máxima de fallo de apantallamiento igual a 28,4 kA obtenida mediante las ecuaciones (10), (11), (12). Es decir, las corrientes menores a 28,4 kA impactarán en el conductor de fase superior, mientras que las mayores o iguales a 28,4 kA impactarán en el cable de guarda.

Tabla 4: Resultados obtenidos al producirse una descarga directa en la fase A de magnitud igual a 28 kA

Voltajes en la torre cercana al impacto de rayo kV				
Tope	Fase A	Fase B	Fase C	Cadena de aisladores de la Fase A
693,6	1558,7	345,5	391,1	1475

La descarga en un conductor de fase conlleva a que las ondas viajeras se dividan en dos ondas iguales y se propaguen en ambos sentidos hasta encontrar el cable aislado. De esta forma, se puede observar cómo existe un sobrevoltaje en todas las fases, siendo en la fase A el más crítico, perceptiblemente por su impacto directo y provocando un flameo directo en su cadena de aisladores.

De acuerdo con la Ecuación (13), en la Tabla 5, se muestra la probabilidad de que ocurra una descarga con ciertos valores de magnitud.

Tabla 5: Probabilidad de que la corriente de pico sea menor a estas corrientes

Corriente [kA]	Probabilidad [%]
6,2	1,50
6,5	1,69
9	3,85
11,5	7,055
14	11,236
16,5	16,25
19	21,87
21,5	27,86
24	33,95
26,5	39,94
28	43,422

Se logra evidenciar que la probabilidad de ocurrencia incrementa conforme aumenta la magnitud de corriente del rayo; siendo este el factor más determinante en este tipo de descargas, puesto que a comparación de los casos anteriores no afecta la longitud del cable aislado o resistencia de pie de torre.

4.8 Comentario general

De los resultados obtenidos, se puede observar que, el voltaje máximo obtenido a la entrada del cable es de 360,37 kV y el voltaje máximo obtenido a la salida del cable es de 503,45 kV, siendo de acuerdo con las normas IEC, el nivel básico de aislamiento (BIL) de un cable de 230 kV, 750 kV, se puede apreciar que no existe afectación al aislamiento del cable, para impulsos atmosféricos.

La diferencia en las impedancias características de la línea aérea y del cable aislado tiene un efecto determinante en las magnitudes de voltaje en el cable aislado.

Cabe mencionar que, todos los resultados obtenidos previamente fueron válidos en base a la referencia [9].

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La diferencia de magnitud de la impedancia característica de la línea aérea y de la impedancia característica del cable aislado de alto voltaje, origen de la discontinuidad, determinan los sobrevoltajes que se obtienen en el sistema. La relación de impedancias características produce un coeficiente de transmisión de la onda incidente que reduce la magnitud del voltaje a la que se somete el cable aislado.

De los resultados obtenidos se puede concluir que la magnitud de la corriente del impulso atmosférico que cae en la torre o en el cable de guarda, es el parámetro que mayor incide en los valores máximos de sobrevoltajes, a una mayor magnitud de corriente mayor será el sobrevoltaje en el cable aislado.

Las descargas atmosféricas, que caen en la torre de la línea de transmisión cercana al cable, siempre y cuando su magnitud produzca descarga inversa a través de la cadena de aisladores, producen mayores sobrevoltajes que aquellas descargas atmosféricas que caen en las torres más alejadas del cable y producen descargas inversas en las cadenas de esa torre.

Las magnitudes de los sobrevoltajes producidos en el terminal remoto del cable aislado disminuyen conforme se incrementa la longitud del cable aislado.

Mientras más baja es la resistencia de la puesta a tierra de las torres de la línea de transmisión, la probabilidad de que se puedan producir descargas inversas a través de las cadenas de aisladores por efecto de descargas atmosféricas que golpean el cable de guarda o la torre es más baja.

Al considerar la presencia de la fuente de 60 Hz, el caso más crítico resulta cuando la descarga inversa originada por el impulso atmosférico coincide con los picos de ondas de voltaje del semiciclo negativo de la fuente, aunque su probabilidad de ocurrencia de este evento es muy baja. En consecuencia, el aporte de la presencia de la fuente de 60 Hz se puede considerar no relevante.

Debido a la relación de las impedancias características de la línea de transmisión aérea y el cable aislado, las magnitudes de voltaje obtenidos en los dos extremos del cable aislado no son considerables como para que afecten la integridad del mismo, por lo que en algunas aplicaciones se ha llegado a eliminar el pararrayos ubicado en el ingreso del cable.

Considerando el estudio, diseño e instalación de líneas subterráneas, desde el punto de vista de impulsos atmosféricos, la implementación de cables aislados resulta una alternativa aceptable en lugares donde existen restricciones para líneas aéreas.

En el presente artículo se ha considerado el comportamiento del esquema de transmisión ante descargas atmosféricas, para trabajos futuros, se

recomienda analizar las protecciones eléctricas en sistemas de transmisión conformados por segmentos de líneas aéreas y cables aislados.

Existen algunas variables aleatorias (magnitud de la corriente de rayo, su frente de onda, lugar de la descarga, punto de la onda de la fuente de 60 Hz, etc.) en el desarrollo del fenómeno analizado y que en el presente artículo se han considerado constantes y en algunos casos extremas, por lo que se recomienda realizar el análisis de estos fenómenos mediante simulaciones estocásticas.

Se recomienda probar la metodología propuesta en sistemas eléctricos reales y analizar la validez de los resultados y los tiempos de cómputo que presenta el software ATP.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. A. M. Velasco, Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión, Madrid: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. L., 2008.
- [2] A. Greenwood, Electrical transients in power systems, México, 1991.
- [3] D. A. Tziouvaras, «Protection of High-Voltage AC Cables,» Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2006.
- [4] P. X. P. Montalvo, Determinación de sobrevoltajes en el aislamiento de torres de transmisión considerando la variación aleatoria simultánea de los parámetros de las descargas atmosféricas, Quito, 2017.
- [5] J. Oña, «Análisis de los sobrevoltajes por impulso atmosférico en sistemas de transmisión con discontinuidades líneas de transmisión aéreas y cables aislados, usando ATP,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2023.
- [6] A. G. Cruz, Análisis de la respuesta transitoria de Sistemas de Puesta a Tierra, Santa Clara: Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, 2012.
- [7] J. A. Martinez-Velasco, Power System Transients, CRC Press, 2017.
- [8] G. A. V. Cedeño, Diseño eléctrico de la línea de transmisión San Francisco–Culebra–Shushufindi, a 230 kV, basado en una baja tasa de fallo: sobrevoltajes por descargas atmosféricas, Quito: EPN, 2021.
- [9] CIGRE 268, «Transient Voltages Affecting Long Cables,» Working Group B1.05, Abril 2005.



Josua Orlando Oña Aráuz.- Nació en Sangolquí, Ecuador en 1999. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico con mención en Redes Eléctricas Inteligentes de la Escuela Politécnica Nacional en 2023. Sus campos de investigación están relacionados con los sistemas eléctricos de potencia, eficiencia

energética y Smart Grids.



Luis Edmundo Ruales Corrales.- Ingeniero Eléctrico en Sistemas Eléctricos de Potencia de la Escuela Politécnica Nacional de Quito, 1978. Egresado del PSEC de GE, Schenectady, NY. Tiene una Maestría en Administración de Empresas de la ESPOL. Es

Profesor a Tiempo Parcial en la EPN. Ha desempeñado las siguientes funciones; Jefe de Sistemas de Potencia y Protecciones de la División de Ingeniería Eléctrica del INECEL hasta 1999; Responsable del Área de Planificación y Estudios y Vicepresidente Técnico en TRANSELECTRIC S.A. y CELEC EP TRANSELECTRIC; Gerente de Proyectos y Director de Generación en CELEC EP; Subsecretario de Generación y Transmisión de Energía en el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. Gerente de la Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair EP y Gerente General de CELEC EP.