

Caracterización del uso de carbón mineral y el G.E.M como mejoradores del sistema de puesta a tierra en líneas de transmisión y su incidencia ante descargas atmosféricas.**Characterization of the use of coal and G.E.M as improvers of the grounding system in transmission lines and their impact on atmospheric discharges.**

Álvaro Santiago Mullo Quevedo, Rommel Eusebio Suarez, Edison Patricio Paredes Pucachaqui, Edgar Guillermo Lincango Sigcha.

**INNOVACIÓN Y CONVERGENCIA:
IMPACTO MULTIDISCIPLINAR**

Enero - Junio, V°6 - N°1; 2025

- ✓ Recibido: 20 /02/2025
- ✓ Aceptado: 26/02/2025
- ✓ Publicado: 30/06/2025

PAÍS

- Ecuador – Rumiñahui – Sangolquí
- Ecuador – Rumiñahui – Sangolquí
- Ecuador – Rumiñahui – Sangolquí

INSTITUCIÓN

- Instituto Tecnológico Universitario "Rumiñahui"
- Instituto Tecnológico Universitario "Rumiñahui"
- Instituto Tecnológico Universitario "Rumiñahui"

CORREO:

-  alvaro.mullo@ister.edu.ec
-  rommel.suarez@ister.edu.ec
-  Edgar.licango@ister.edu.ec

ORCID:

-  <https://orcid.org/0009-0008-6060-0418>
-  <https://orcid.org/0009-0000-4319-9476>
-  <https://orcid.org/0000-0002-3574-7644>

FORMATO DE CITA APA.

Mullo, A. Suarez, R. Paredes, E. Lincango, E. (2025). Caracterización del uso de carbón mineral y el G.E.M como mejoradores del sistema de puesta a tierra en líneas de transmisión y su incidencia ante descargas atmosféricas. Revista G-ner@ndo, V°6 (N°1.). 1900 – 1918.

Resumen

La presente investigación trata sobre la caracterización de dos compuestos químicos que se usan en el mantenimiento de puesta a tierra como es el Ground Enhancement Material (GEM) con respecto al carbón activado considerando un proceso práctico mediante el ensayo en un cubo de 10 cm con una placa inferior y superior aplicando el método de medición mediante dos placas como electrodos para hallar la resistividad del suelo a diferentes condiciones. Obteniendo los siguientes resultados de acuerdo a las siguientes combinaciones el 30% de carbón y 70% de tierra reduciendo la resistencia a 15 ohm y con respecto al GEM con base de bentonita con la misma mezcla de 30% y 70% de tierra obteniendo una resistencia de 27 ohm y cuando aumenta sus proporciones se mejora la resistencia 70% de carbón y 30% de tierra reduciendo la resistencia a 4.3 ohm y con respecto al GEM con base de bentonita con la misma mezcla de 70% y 30% de tierra obteniendo una resistencia de 27 ohm. Al momento de aplicar la simulación en el programa ATP para líneas transmisión a dos condiciones extremas de 400 ohm aplicando una simulación de descarga atmosférica de 27KA se obtiene un pico de 600KV que puede romper la rigidez dieléctrica de la cadena de aisladores (BILL) generando un Flashover a diferencia de una mejora a tierra con carbón activado que el voltaje en los extremos de los aisladores es de 340KV muy inferior al BILL de la cadena y un tiempo de disipación de la falla en 0.3 us. Quedando concluido el análisis comparativo entre el GEM y el carbón en los sistemas a tierra considerando la disipación de una descarga atmosférica.

Palabras clave: Caracterización, mejoramiento de tierra, líneas de transmisión, descarga atmosférica.

Abstract

This research deals with the characterization of two chemical compounds used in grounding maintenance such as Ground Enhancement Material (GEM) with respect to activated carbon considering a practical process by testing in a 10 cm cube with a lower and upper plate applying the measurement method using two plates as electrodes to find the soil resistivity at different conditions. Obtaining the following results according to the following combinations 30% carbon and 70% soil reducing the resistance to 15 ohm and with respect to the GEM with bentonite base with the same mixture of 30% and 70% soil obtaining a resistance of 27 ohm and when their proportions increase the resistance is improved 70% carbon and 30% soil reducing the resistance to 4.3 ohm and with respect to the GEM with bentonite base with the same mixture of 70% and 30% soil obtaining a resistance of 27 ohm. When applying the simulation in the ATP program for transmission lines to two extreme conditions of 400 ohm applying a 27KA atmospheric discharge simulation, a peak of 600KV is obtained that can break the dielectric strength of the insulator string (BILL) generating a Flashover unlike a ground improvement with activated carbon where the voltage at the ends of the insulators is 340KV much lower than the BILL of the string and a fault dissipation time of 0.3 us. The comparative analysis between GEM and carbon in grounding systems considering the dissipation of an atmospheric discharge is concluded.

Keywords: Characterization, land improvement, transmission lines, atmospheric discharge.

Introducción

Un problema que se produce en las líneas de transmisión eléctrica son los cortes de energía provocado por descargas atmosféricas y la falta de mantenimiento de las puestas a tierra. La puesta a tierra constituye un factor importante para mantener la confiabilidad del sistema ya que permite la conductibilidad de sobre corrientes a tierra una vez que se conoce las especificaciones de resistencia del terreno (R. T. Hasbrouck, April 1989). Una descarga atmosférica genera aumento de voltajes y corrientes transitorias en un instante de tiempo corto que afectan a los equipos y sistemas de protección (I.W.Gross and G.D. Lippert, April 1942) (J. Schoene, 2007) (A. Mullo, 2017). Es importante considerar que las variables para determinar la conductibilidad de la puesta a tierra son las sales solubles, composición propia del terreno, granulometría, temperatura, compactación, de acuerdo a la norma NOM-022-STPS-1999 la resistividad se define como la resistencia que ofrece al paso de corriente en un cubo de tierra de un metro por lado (Durham, Jan 1995). Para el análisis del estado transitorio se toma en cuenta la modelación de la impedancia de la tierra basado en la teoría de circuitos, en las que se considera que cuando existe una inyección de corriente permite una circulación de corriente y voltaje a tierra. (I.Djamel, 2016) (A. Ametani, 2012) Como se puede representar en la figura (1).

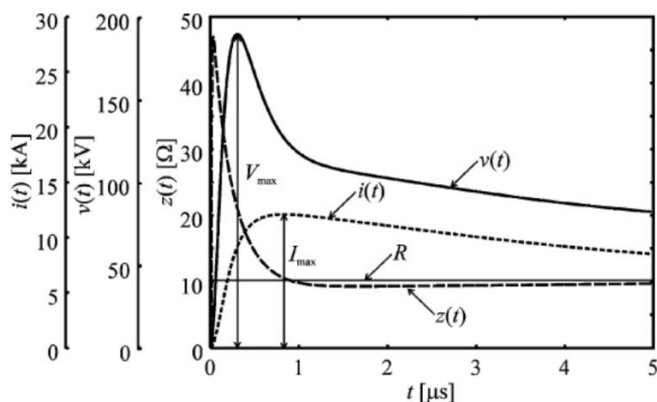


Figura. 1. Impedancia, voltaje y corriente que varían en el tiempo a lo largo de la conexión a tierra.

$$Z(t) = \frac{v(t)}{i(t)}$$

Donde:

$v(t)$ - Voltaje de impulso en el instante de descarga en un t .

$z(t)$ - Impedancia de impacto a tierra en un t .

$i(t)$ - Corriente inyectada al sistema de tierra en un t .

Para el modelamiento de la línea de transmisión es necesario tener en cuenta los parámetros de los conductores como la resistividad, distancia y calibre, por los efectos inductivos y capacitivos se consideran como la unión de circuitos unidos eléctricamente como se muestra en la figura 2. (Liu, 2004) (Christopoulos, 2006).

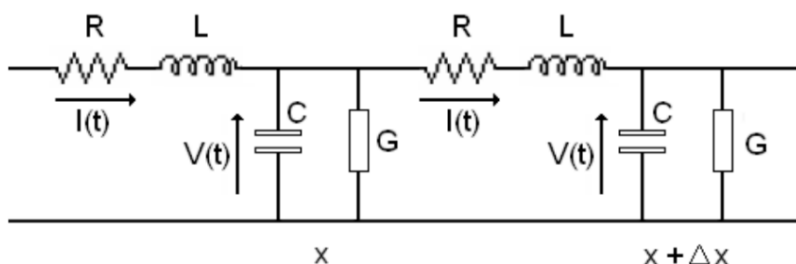


Figura. 2. Línea de transmisión de energía eléctrica

Para demostrar el objetivo del trabajo de investigación, se modela una línea de transmisión simple circuito de 138kV con hilo de guarda. En el extremo local de la línea de transmisión se utiliza una fuente de generación y en el extremo remoto en vacío. Se utiliza un modelo para obtener la impedancia de la torre de transmisión con su respectiva cadena de aisladores y su resistencia a pie de torre.

La línea de transmisión parte desde la central Hidro Normandía - San Bartolo posee un voltaje de transmisión de 230 kV, que es parte del circuito San Bartolo – Sopladora – Taday en

el Sistema Nacional Interconectado. La línea de transmisión tiene una distancia de 85 km desde Hidronormandía hasta HidroSanbartolo, y está compuesta por 177 torres en cada una de estas interconectadas por hilos de guarda con un sistema de puesta a tierra .

Características de la Línea de Transmisión

Para el respectivo análisis del modelo de la línea de transmisión se aplica un modelo de descarga atmosférica; de esta manera; se obtiene los voltajes de fase, voltajes en la cadena de aisladores, curva de tiempo de avería, voltajes y corrientes de descarga por la resistencia a pie de torre. A continuación, la tabla 1 muestra las características técnicas del modelo de línea de transmisión a simularse.

Tabla 1. Característica de la Línea de Transmisión

Tipo	Característica
Voltaje	138 kV
Longitud de la línea	70 km
Longitud de la cadena	1.2 m
Número de circuitos	1
Vano promedio	450 m
Conductor de fase	ACAR 300 MCM
Conductor hilo de guarda	3/8" acero galvanizado
Ángulo de apantallamiento máximo	<30°
Resistencia de puesta a tierra promedio	450 ohms
(antes del tratamiento)	
Voltaje de disrupción de la cadena de aisladores	600kV

La figura 3, muestra el modelamiento de la línea de transmisión en condiciones normales

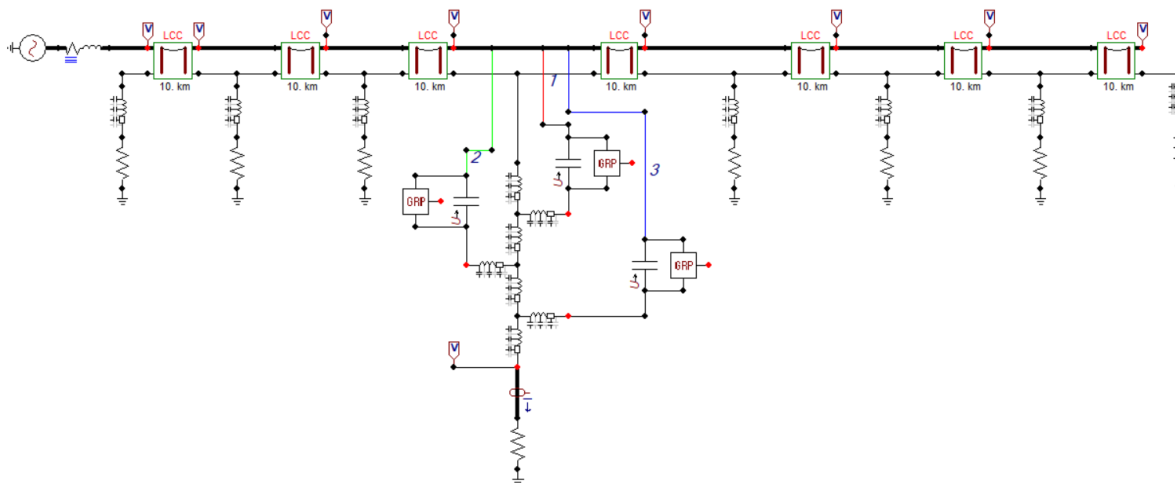


Figura 3. Modelamiento de la L/T 138kV en ATP

en el software ATP que será usado para las respectiva modelación.

Características del mejoramiento a tierra basado en carbón mineral y carbón vegetal. - La conductividad de un carbón mineral se refiere a su capacidad para permitir el paso de corriente eléctrica, y está influenciada por varios factores, entre ellos la estructura del carbón, la cantidad de impurezas presentes y su grado de metamorfismo. La resistividad describe el comportamiento de un material frente al paso de corriente eléctrica, por lo que da una idea de lo buen o mal conductor que es, su designación se la reconoce con su letra (ρ) y se mide en ohmios por metro ($\Omega \cdot m$) que en el caso del grafito (carbón) es de 3 a $60 \times 10^{-5} \Omega \cdot m$ a una temperatura de 20 a 25 °C con una conductibilidad de 1×10^3 a 1×10^4 S/m, la conductividad eléctrica se mide en siemens por metro (S/m) y se utiliza para comparar la conductividad de diferentes materiales, conductividad eléctrica (σ) = $1 /$ Resistencia eléctrica (R). (Giancoli, 2013) (Carbon, 2025)

Material químico de Mejora a conexión a tierra (Ground Enhancement Material GEM). - Es un material que permite la conductibilidad basado en bentonita usado cuando poseen problemas de resistividad elevada de tierra en lugares extremos como arenosos, rocosos y cimas de montaña. Una excelente propiedad es que no requiere mantenimiento continuo, entre la norma

que cumple es la IEC ® 62561-7. Esta norma presenta un parámetro de desempeño eléctrico y corrosión de los materiales para mejorar la conexión a tierra, su resistividad se encuentra entre 0.02 a 0.2 Ω .m. (IEC62561-7, 2018)

Se basa en una modificación a la ley de ohm donde mediante placas eléctricas en un a superficie de cuadrada que sirve como muestra son enterrados en una cuba que servirá como probeta de medición regularmente de 10 cm se inyecta un flujo de corriente eléctrica a través de los electrodos que servirá para la circulación de corriente generando una caída de voltaje en el punto de medición expresado por la ecuación (1) y la resistividad por la ecuación (2). (M.H. Loke a, 2013)

$$v = I . R \tag{1}$$

Donde:

R : Resistencia eléctrica Ω .

I : Corriente eléctrica A.

v : Voltaje V.

La definición de resistencia eléctrica R y resistividad de un material ρ , de Longitud L y sección transversal S como se muestra en la figura 3, se tiene:

$$R = \frac{\rho L}{S} \tag{2}$$

Donde:

R = Resistencia eléctrica Ω .

L = Longitud

S = Seccion

ρ = Resistividad aparente

Despejando (2) y reemplazando (1) se obtiene la siguiente expresión (3) que se puede también observar el proceso de medición práctica se observa en la figura 4.

$$\rho = \frac{V}{I} \left(\frac{S}{L} \right) \quad (3)$$

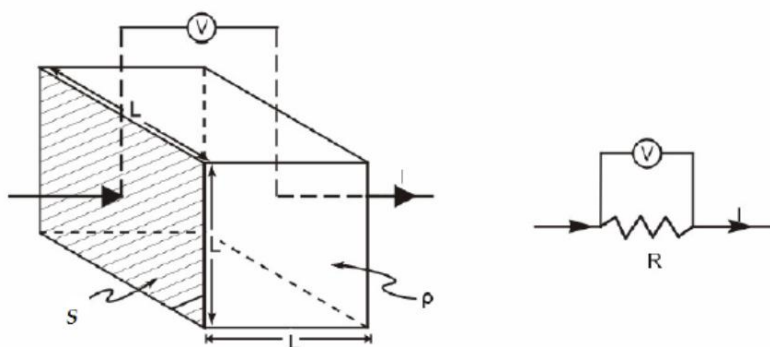


Figura 4. Diagrama de una medición de resistividad en un espacio cubico mediante un flujo de corriente I, medición de voltaje V, sección transversal S y longitud del material L.

Materiales y Métodos

Caracterización de la resistividad de la tierra con respecto a porcentajes de mejoradores de tierra. - Se aplica la norma IEC 62561-7:2024 donde se especifica los requisitos y ensayos para los compuestos potenciadores de la puesta a tierra que producen una baja resistencia de un sistema de puesta a tierra. Mediante una cuba (caja cubica) de 10 cm por lado, posee placas metálicas de cobre en la parte superior e inferior si le rellena de material de grafito (carbón mineral) de igual forma con el GEM en base a bentonita.

Tabla2. Tabla de caracterización de la resistividad en un volumen de 100cm³

# ensayos.	de Carbón	Gem	Tierra negra	Resistividad
1	100%	-	-	2 ohm
2	-	100%	-	34 ohm
3	30%	-	70%	15 ohm
4	-	30%	70%	27 ohm
5	50%	-	50%	7,8 ohm
6	-	50%	50%	17 ohm
7	70%	-	30%	4,3 ohm
8	-	70%	30 %	24,8 ohm
9				

Mediciones superficiales de las puestas a tierra de las torres de transmisión. - Las mediciones de la resistencia de la puesta a tierra se los realiza mediante el método de Wenner de tres picas mediante el equipo Fluke 1625-2 mediante una la toma de datos de una muestra de 10 mediciones de las torres que de manera visual se observan desgaste en conectores, cable a tierra sulfatados y varillas corroídas, en la tabla 3 se muestra las mediciones obtenidas en las torres.

Tabla3. Tabla de mediciones iniciales de la resistencia de la malla.

	Resistencia medida	Dentro de las consideraciones IEEE80
Torre 1	380 Ω	No
Torre 2	266 Ω	No
Torre 3	483 Ω	No
Torre 4	276 Ω	No
Torre 5	430 Ω	No
Torre 6	180 Ω	No
Torre 7	235 Ω	No
Torre 8	130 Ω	No
Torre 9	328 Ω	No
Torre	460 Ω	No

Mantenimiento de la puesta a tierra.– El mantenimiento de la puesta a tierra se realizó con los dos mejoradores de tierra la instalación de dos varillas a una distancia de 4m con cable conductor de 1/0 con suelda exotérmica y conectada a la torre con conector de ojo, la clasificación que se realizó es bajo las mismas condiciones realizar una mezcla del 30% de mejorador de químico y el restante del 70% de la tierra del sector bajo condiciones similares de resistividad superficial del suelo en un agujero de diámetro 40 cm y de profundidad de 1.5m mts. Las cuales se obtienen las siguientes mediciones de resistencia de la puesta a tierra, cuyas mediciones clasificadas se observa en la tabla 3.

Tabla 3. Mediciones con la resistencia a tierra mejorada

	Resistencia medida	Mejoramiento con Gem	Mejoramiento con Carbón activado	Porcentaje de reducción
Torre 1	380 Ω	-	9,5 ohm	2.5 %
Torre 2	266 Ω	22 ohm	-	8.27 %
Torre 4	276 Ω	-	4.5	1.6 %
Torre 5	430 Ω	13.5 ohm	-	3.13 %
Torre 7	235 Ω	8.5 ohm	-	3.6%
Torre 9	328 Ω	-	1.5 ohm	0.45 %

Modelación de la torre de transmisión ante una descarga eléctrica

Para la modelación de las variables eléctricas se usó el programa ATP-EMTP para líneas de transmisión como se muestra en la figura 3 con los datos de la tabla 1. Con el objetivo de tener una correcta inicialización del modelo de la línea de transmisión, se verificó los voltajes en la barra local y remota pertenecientes a la línea de transmisión. En la figura 5 y 6, se muestran los voltajes de fase en condiciones normales.



Figura 5. Voltajes de fase en la barra local de la L/T



Figura 6. Voltajes de fase en la barra remota de la L/T

Para el modelamiento de la descarga atmosférica se modela una fuente de corriente tipo Heidler en paralelo con una resistencia de 20 ohms. Esta fuente transitoria se ajusta de mejor manera a la forma de onda normalizada de la corriente del rayo establecida con la norma IEC-60070-1-1996; con un tiempo de onda de rayo de 1.2 μ s. La figura 7, muestra el circuito de simulación de la descarga atmosférica en ATP.

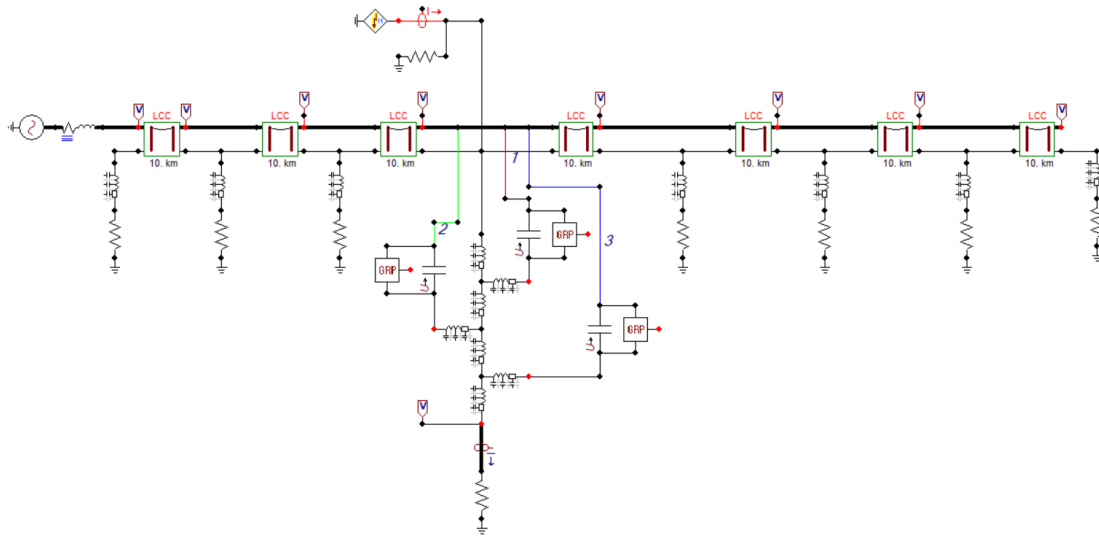


Figura 7. Circuito de simulación para la descarga atmosférica

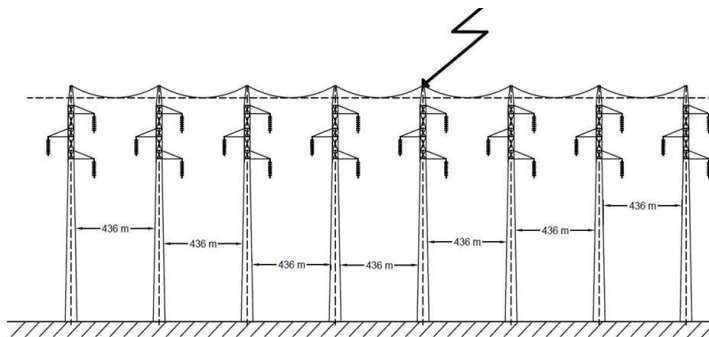
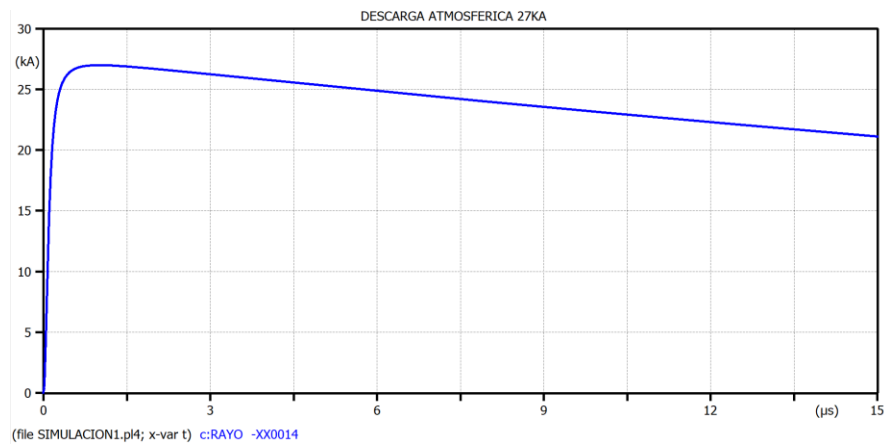


Figura 8. Representación de la descarga atmosférica en la L/T

La fuente de generación de la línea de transmisión es de 112.68kV Pico; por otro lado, la fuente de la descarga atmosférica tipo Heidler se simula con un valor de 27kA; este es el valor con mayor probabilidad de ocurrencia según la norma IEC 60071-2-1996. Para el análisis de la descarga atmosférica no es necesario simular toda la longitud de la L/T; es suficiente con simular vanos de 10 km entre cada torre por el efecto de reflexión de la onda. En la figura 5, se puede verificar el comportamiento de la descarga atmosférica.

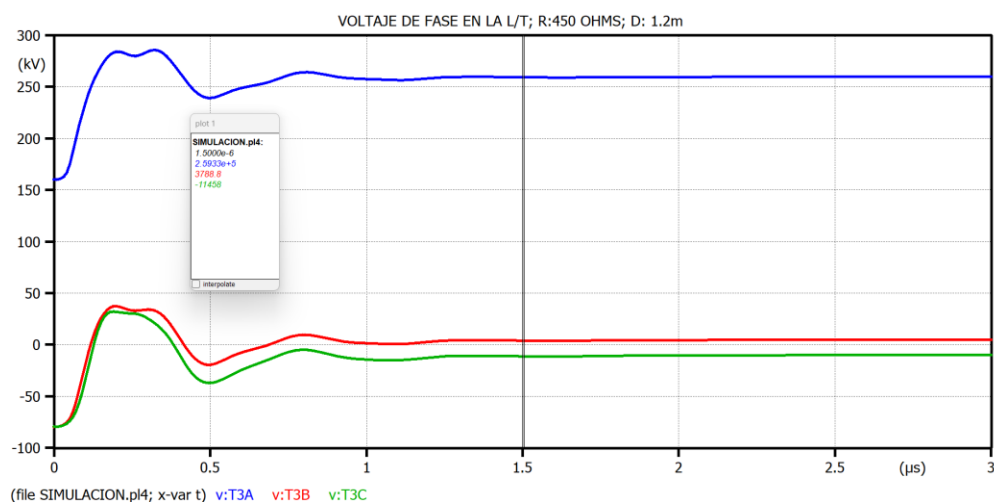
Figura 9. Comportamiento de la descarga atmosférica 27Ka



Nota: Se considera una descarga atmosférica en el hilo de guarda de la línea de transmisión para el análisis y simulación de los dos casos de estudio.

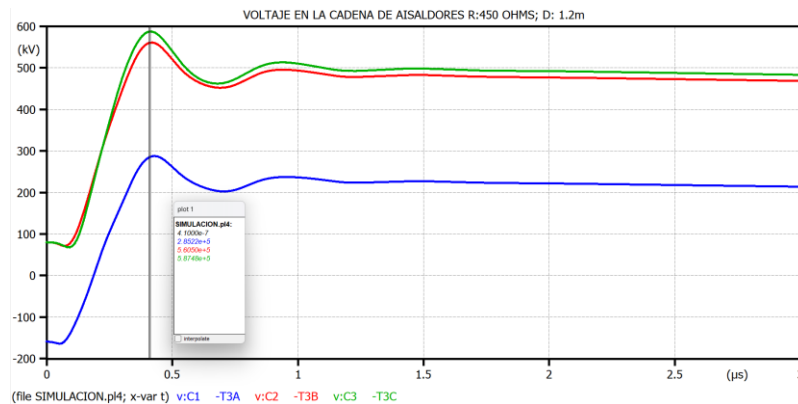
Caso 1 tomando en consideración los parámetros de Resistencia a pie de torre 450 ohms y distancia cadena de aisladores 1.2 m. La figura 10, muestra los voltajes de fase en la L/T para el caso 1; la fase A presenta un pico de voltaje máximo de 259kV

Figura 10. Voltaje de fase en la L/T - CASO 1



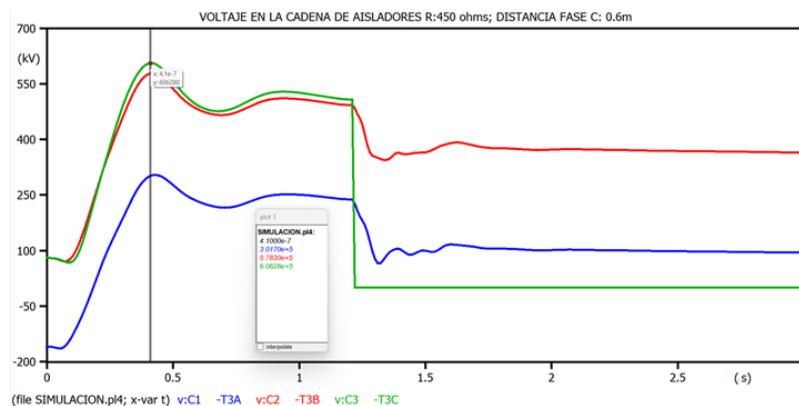
La figura 11 muestra el voltaje transitorio en la cadena de aisladores, la fase A con 285 kV, la fase B con 560kV y la fase C con 587kV; de acuerdo con la figura, se puede verificar que la fase C está muy próxima a superar los 600kV; es decir, está por superar el nivel básico de aislamiento de una cadena de aisladores en 138kV.

Figura 11. Voltaje en la cadena de aisladores - Caso 1



En la figura 12 se muestra el transitorio en la cadena de aisladores con una modificación; la distancia de la cadena de aisladores de la fase A y B son de 1.2 metros; mientras que la cadena de aisladores de la fase C tiene una distancia de 0.6 metros. Es decir; se supone que esta cadena de aisladores ha perdido sus propiedades de aislamiento por algún agente externo y por tal motivo la distancia de aislamiento disminuye en un 50%.

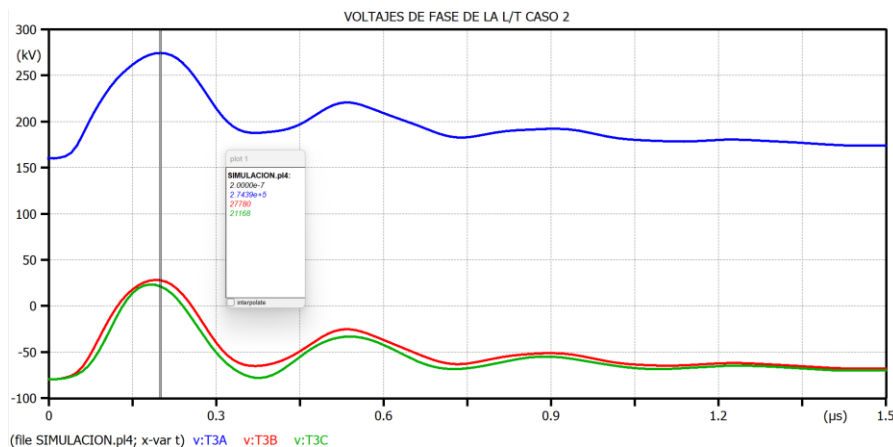
Figura 12. Voltaje en la cadena de aisladores - Caso 1 - Distancia 0.6 m en la fase C



Caso 2 tomando en consideración los parámetros de Resistencia a pie de torre 1.5 ohms y distancia cadena de aisladores 1.2

La figura 13, muestra los voltajes de fase en la L/T para el caso 2; la fase A presenta un pico de voltaje máximo de 275kV; comparando con los voltajes de fase del caso 1 el pico de voltaje es similar; sin embargo, en el caso 2 el voltaje de estabilización es menor que el caso 1.

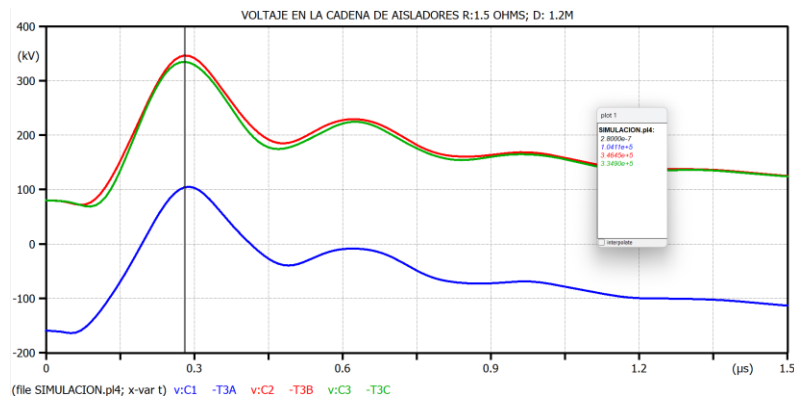
Figura 13. Voltajes de fase en la L/T - CASO 2



La figura 14 muestra el voltaje transitorio en la cadena de aisladores, la fase A con 1.05 kV, la fase B con 347kV y la fase C con 334kV; de acuerdo con la figura, se puede verificar que la fase C y la fase B muestran los picos de voltajes más altos. Sin embargo; no superan el nivel básico de aislamiento de 600kV; por lo tanto, se puede concluir, que la corriente es drenada a través de la torre de transmisión por la baja impedancia de 1.5 ohms de la puesta a tierra. Esto debido; a que se ha realiza un mejoramiento del suelo de la puesta tierra a pie de torre.

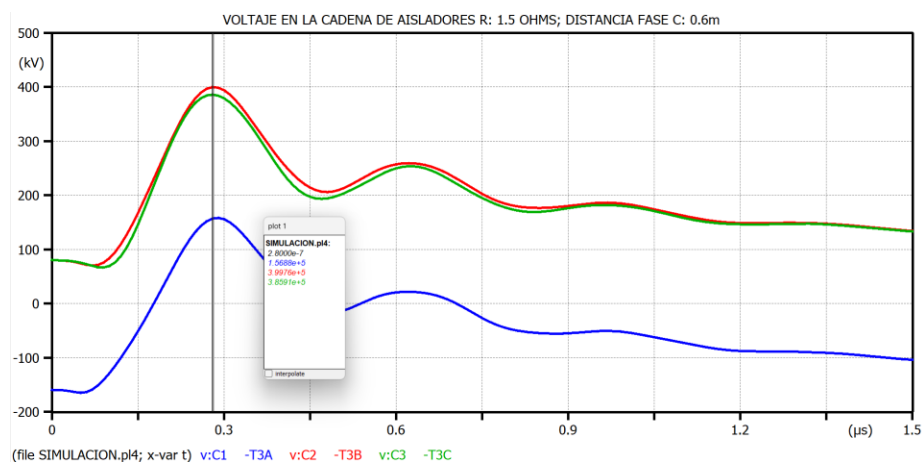
Adicional; es importante mencionar que, debido a la reducción del voltaje en la cadena de aisladores por la baja resistencia de la puesta a tierra, la línea de transmisión no sale de operación.

Figura 14. Voltaje en la cadena de aisladores - Caso 2



En la figura 15 se muestra el transitorio en la cadena de aisladores con una modificación para el efecto en estudio; la distancia de la cadena de aisladores de la fase A es de 1.2 metros; mientras que la cadena de aisladores de la fase C y B tiene una distancia de 0.6 metros. Es decir; se supone que estas cadenas de aisladores han perdido sus propiedades de aislamiento por algún agente externo y por tal motivo la distancia de aislamiento disminuye en un 50% para el efecto en estudio.

Figura 15. Voltaje en la cadena de aisladores - Caso 2 - Distancia 0.6 m en la fase C



Análisis de Resultados

Es necesario corregir la resistencia a pie de torre con el objetivo que la corriente provocada por la descarga atmosférica sea drenada a través de la torre de transmisión por una baja impedancia; evitando de esta manera el efecto FLASHOVER (flameo) y la salida innecesaria de la línea de transmisión ocasionando cortes de energía totalmente innecesarios. En la figura 15 con respecto al caso 2 con un sistema a tierra mejorado, el voltaje en la cadena de aisladores de la fase B y C son de 399kV y 386kV respectivamente; es decir; no supera el nivel básico de aislamiento; comparando con el caso anterior no se produce ningún efecto FLASHOVER o flameo; por consecuencia la línea de transmisión no sale de operación; esto ocurre debido a la baja resistencia de la puesta a tierra en la torre de transmisión, esto se logra con un sistema tierra usado carbón activado como elemento químico a diferencia que con el GEM donde las resistencias llegan a ser bajas con una inversión técnica mas alta.

Conclusiones

Se caracterizo dos compuestos químicos para determinar su actuación como compuesto que permite el mejoramiento de la resistividad de la puesta a tierra en una torre de transmisión tomando en cuenta carbón activado y GEM. Obteniendo buenas características técnicas con el carbón activado en combinaciones 30% de carbón y 70% de tierra reduciendo la resistencia a 15% con respecto al GEM con base de bentonita con la misma mezcla de 30% y 70% de tierra obteniendo una resistencia de 27 ohm, aplicando el método de medición de resistividad con dos electrodos en un cubo de 10 cm o 1000cm³.

Se estima que con una resistencia de tierra superior a 450 ohm ante una descarga atmosférica considerando 27KA puede llegar a generar un pico de 600KV que puede romper la rigidez dieléctrica (BIL) de los aisladores en vista que no permite el drenado de corriente por tierra y un posible FLASHOVER. En comparación con un sistema de tierra mejorado con carbón

activado a 1.5 ohm que puede generar un pico de voltaje entre los aisladores de 334KV muy inferior a la rigidez dieléctrica (BIL). Se establece que los tiempos de estabilidad ante la presencia de una descarga eléctrica cuando el sistema posee resistencia de la puesta a tierra superiores a 450 ohm es 1.5 s mientras que cuando la resistencia es de 1,5 ohm es de 0.6 us generando una estabilidad mucho más rápida y permitiendo que exista una coordinación adecuada de las protecciones.

Bibliografía bibliográficas

- A. Ametani, T. C. (2012). "Impedance characteristics of grounding electrodes on earth surface. Elect. Power Syst. Res, vol. 85, pp. 38–43.
- A. Mullo, J. V. (2017). Analysis of the incidence of grounding with high resistivity against atmospheric discharges in the sub - transmission line of 69KV SanRafael - Mulalo. Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON). Chile.
- Carbon, E. (2025). Obtenido de Electrical conductivity of graphite with the conductivity of metals: <https://www.eastcarb.com/es/conductividad-electrica-del-grafito/>
- Christopoulos, C. (2006). The Transmission-Line Modeling Method in Electromagnetics. San Rafael, CA, USA:Morgan & Claypool,.
- Durham, M. O. (Jan 1995). "Lightning, Grounding and Protection for Control Systems". IEEE Transactions on Industry Applications.
- Giancoli, D. C. (2013). Physics. Prentice Hall, 7ma Ed.
- I.Djamel, F. S. (2016). "Transient Response of Grounding Systems Under Impulse Lightning Current". Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ). Tallinn, Estonia.
- I.W.Gross and G.D. Lippert. (April 1942). "Lightning investigation on 132- Kv transmission system of the American Gas and Electric Company," . Electrical Engineering, vol. 61 Issue 4, pp. 178-184.
- IEC62561-7. (2018). Requirements for earthing enhancing compounds. Lightning protection system components (LPSC) Part 7, ISBN 9782832252499 pag. 32.
- J. Schoene, M. A. (2007). "Direct Lightning Strikes to Test Power Distribution Lines-Part I:Experiment and Overall Results". IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 22, vol. 22, pp. 2236-2244.
-

- Liu, Y. (2004). Transient Response of Grounding Systems Caused by Lightning: Modelling and Experiment. Université de Uppsala: thèse the doctorat, Université de Uppsala.
- M.H. Loke a, J. C. (2013). Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method, Journal of Applied Geophysics 95. 135 -156.
- R. T. Hasbrouck. (April 1989). "Lightning - Understanding It and Protecting Systems from Its Effects". UCRL-53925 Lawrence Livermore National Laboratory.
-