

Simulación de fenómenos transitorios por descargas eléctricas atmosféricas en subestaciones

Joseph Sosapanta Salas | Institución Universitaria Pascual Bravo¹,
j.sosapantasa@pascualbravo.edu.co

Santiago Ruiz Salazar | Institución Universitaria Pascual Bravo²,
s.ruiz2597@pascualbravo.edu.co

DOI: <https://doi.org/10.21158/...>

Fecha de recepción: 27 de mayo de 2024

Fecha de aprobación: 07 de octubre de 2024

Como citar este artículo: J. Sosapanta Salas, y S. Ruiz Salazar. "Simulación de fenómenos transitorios por descargas eléctricas atmosféricas en subestaciones", Rev. Ont., vol. 12, p. , 2024. Disponible en

¹ Docente. Institución Universitaria Pascual Bravo. Grupo de Investigación e Innovación Ambiental – GIIAM. Ingeniero electricista y Magíster en ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Magíster en administración. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2035-9323>

² Estudiante de ingeniería eléctrica y estadística, Institución Universitaria Pascual Bravo. Semillero de Investigación Ambiental – SIA. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0081-0396>



Resumen

Los fenómenos transitorios por descargas atmosféricas son una de las principales amenazas para las redes de transmisión y subestaciones, debido a un incremento del voltaje, lo que puede causar afectaciones en el aislamiento de los equipos o directamente a componentes eléctricos. Para mitigar estos riesgos, se utilizan los descargadores de sobretensiones (DPS) que son dispositivos conectados entre fase y tierra para proteger las redes eléctricas, proporcionando un camino de baja impedancia a tierra para la descarga atmosférica. Este artículo examina las magnitudes de los sobrevoltajes transitorios que se producen en los equipos de una subestación como resultado del impacto de descargas eléctricas atmosféricas en las líneas de transmisión, simulando las descargas atmosféricas en distintos tramos de la línea con y sin DPS mediante el uso del programa ATPDraw. Los resultados obtenidos revelan que la implementación de DPS puede reducir significativamente el riesgo de daño causado por estos transitorios. En particular, se observó que los DPS pueden disminuir hasta en un 70,35 % los valores de sobretensiones en los equipos de la subestación. Esto subraya el papel crucial de los DPS en la protección de los sistemas eléctricos contra los daños ocasionados por las descargas eléctricas atmosféricas, contribuyendo a mejorar la fiabilidad y la seguridad de las instalaciones eléctricas.

Palabras clave: protección contra rayos; protección contra sobretensiones; protección de subestaciones; protección sistemas de potencia; transitorios en sistemas de energía.



Simulation of transient phenomena due to atmospheric electrical discharges in substations

Abstract

Transient phenomena caused by atmospheric discharges are one of the main threats to transmission networks and substations, due to an increase in voltage, which can cause damage to the insulation of the equipment or directly to electrical components. To mitigate these risks, Surge Arresters (SPD) are used, which are devices connected between phase and ground to protect electrical networks, providing a low impedance path to ground for the atmospheric discharge. This paper examines the magnitudes of transient overvoltages that occur in substation equipment as a result of the impact of atmospheric electrical discharges on transmission lines, simulating atmospheric discharges in different sections of the line with and without SPD using the ATPDraw programa. The results obtained reveal that the implementation of SPD can significantly reduce the risk of damage caused by these transients. In particular, it was observed that SPDs can reduce overvoltage values on substation equipment by up to 70.35%. This underlines the crucial role of SPDs in protecting electrical systems from damage caused by atmospheric electrical discharges, contributing to improving the reliability and safety of electrical installations.

Keywords: Lightning protection; power system protection; power system transients; substation protection; surge protection.



1. Introducción

Una subestación eléctrica es una instalación que transforma y regula los niveles de voltaje de la electricidad para su distribución segura y eficiente a hogares e industrias, utilizando transformadores, interruptores y dispositivos de protección. En ese sentido, las subestaciones enfrentan numerosos desafíos, siendo uno de los más significativos las ondas de frente rápido, también conocidas como sobrevoltajes por rayos, que son transitorios de alta energía que ocurren cuando un rayo cae cerca de una red eléctrica. Estos eventos pueden ocasionar desde interrupciones en el suministro hasta daños graves en transformadores, interruptores y otros componentes críticos de la infraestructura eléctrica [1].

Ante esta problemática, es fundamental estudiar y comprender los impactos de las descargas eléctricas atmosféricas en las subestaciones, así como desarrollar estrategias efectivas para mitigar estos efectos y mejorar la fiabilidad del sistema. Esto incluye la implementación de medidas de protección adecuadas, como los DPS, que ayudan a reducir el riesgo de daño causado por los transitorios producidos por descargas eléctricas atmosféricas. Además, los DPS desempeñan un papel crucial en la protección activa de las instalaciones eléctricas. Estos dispositivos actúan como desviadores de sobrevoltajes, proporcionando una ruta de baja impedancia para conducir las sobretensiones de forma segura a tierra, donde se disipan sin causar daño a los equipos conectados. La implementación adecuada de DPS en las redes eléctricas es esencial para minimizar los riesgos de daño y garantizar la continuidad operativa de los sistemas eléctricos [2].

Este trabajo se centra en la evaluación del impacto de las descargas eléctricas atmosféricas en el equipamiento de las subestaciones, utilizando simulaciones para analizar los efectos de estos fenómenos en condiciones reales. A través de un enfoque integral y analítico, se busca identificar los riesgos asociados con los fenómenos transitorios y proponer soluciones efectivas que no solo mitiguen los efectos de las descargas atmosféricas, sino que también fortalezcan la seguridad de las instalaciones eléctricas en condiciones adversas. La investigación no solo contribuirá a un mejor entendimiento de los desafíos que enfrentan las subestaciones, sino que también proporcionará recomendaciones prácticas para la implementación de medidas de protección más efectivas, garantizando así un suministro eléctrico más seguro y fiable para la sociedad [3].

Realizando una revisión de la literatura se encontró que los autores en [1], [4], [5], [6], [7], [8] presentan un análisis sobre la modelación y simulación de sistemas eléctricos en relación con los fenómenos transitorios y las descargas eléctricas atmosféricas. Se destaca la importancia de comprender el impacto de estos fenómenos en la operación y el equipamiento de subestaciones y sistemas de transmisión de alta tensión. Los estudios revisados utilizan diversas herramientas de simulación, como ATPDraw e HYPERSim, para evaluar los efectos de las descargas eléctricas atmosféricas en el comportamiento del sistema eléctrico. Además, se proponen estrategias para mitigar los riesgos asociados con estos eventos, como la implementación de DPS y el diseño de sistemas de puesta a tierra efectivos. En conjunto, estos trabajos contribuyen al avance del conocimiento en ingeniería eléctrica al proporcionar una



comprensión más profunda de los desafíos y soluciones asociados con las descargas eléctricas atmosféricas en sistemas de potencia.

Investigaciones más recientes, como las llevadas a cabo por los autores [9], [10], utilizan el método de Montecarlo para simular y calcular los sobrevoltajes causados por maniobras y rayos. Estos estudios emplean Matlab para calcular y graficar la función de densidad de probabilidad de los sobrevoltajes y la probabilidad de fallo del aislamiento, considerando diferentes escenarios de estudio.

El proyecto actual aporta una contribución significativa al destacar la eficacia específica de los DPS, demostrando una reducción de hasta el 70,35 % en los valores de sobretensiones en el barraje de la subestación. A diferencia de otros estudios, que se enfocan principalmente en la modelación general y el uso de herramientas estadísticas para prever sobrevoltajes, este trabajo proporciona evidencia concreta y cuantificada de la mejora en la protección de los equipos mediante DPS.

2. Marco teórico

Los sobrevoltajes son un incremento abrupto de la tensión eléctrica en una red de transmisión, lo cual representa un riesgo significativo para la integridad de los sistemas eléctricos y la seguridad del personal. Los efectos de los sobrevoltajes son multifacéticos y dependen de diversos factores, como la intensidad, duración y frecuencia de los eventos, así como la sensibilidad y robustez del equipo eléctrico afectado. Entre estos efectos se encuentran el deterioro del aislamiento, que aumenta la vulnerabilidad del sistema a futuros fallos; daños directos a componentes electrónicos, que pueden resultar en la pérdida permanente de funcionalidad; pérdida de datos almacenados en dispositivos sensibles; interrupciones en el suministro eléctrico, con impactos económicos y sociales significativos; y riesgos para la seguridad del personal, como descargas eléctricas y otros peligros asociados [11].

Para mitigar estos riesgos, se emplean DPS, que son dispositivos conectados entre la fase y la tierra. Estos protegen las líneas de distribución y transmisión, así como sus equipos, de sobretensiones tanto externas como internas, ofreciendo un camino de baja impedancia a tierra para la corriente de sobretensión. Los esquemas de protección contra sobretensiones por rayos se definen según el tipo, número y ubicación de los DPS en la subestación [12]. En este contexto, estudios recientes han demostrado que los DPS de óxido metálico (MOA) muestran un comportamiento dinámico significativo bajo impulsos de corriente, tanto en condiciones de sobrevoltaje por rayos como en situaciones de sobrevoltaje transitorio muy rápido (VFTO) [13]. Además, se ha documentado que la respuesta de los DPS a transitorios con frentes de onda muy cortos, como los impulsos de polaridad negativa, puede resultar en un aumento significativo de la tensión de chispa, lo que afecta su capacidad de protección [14].



Las fallas de aislamiento en una línea de transmisión cerca de la subestación pueden generar corrientes de cortocircuito de gran magnitud. La descarga eléctrica del aislador resulta en una sobretensión con un frente muy pronunciado que ingresa a la subestación, causando tensión de aislamiento, especialmente en los devanados de los transformadores de potencia [15]. En particular, se ha observado que la tensión residual de los DPS bajo VFTO es mayor que la registrada bajo impulsos de rayo, lo que subraya la importancia de considerar estos efectos en el diseño y la implementación de sistemas de protección [13].

Sus orígenes son diversos, abarcando desde descargas eléctricas atmosféricas hasta maniobras en la red. En particular, las descargas eléctricas atmosféricas son eventos electromagnéticos naturales que se caracterizan por presentar transferencias de energía en forma de rayos ionizados de alta temperatura, capaces de inducir sobrevoltajes de gran magnitud en los sistemas eléctricos [16]. Además, se ha documentado que las características de la forma de onda de los sobrevoltajes, como la duración y la rapidez del frente, influyen en el comportamiento de los DPS, lo que resalta la importancia de realizar investigaciones adicionales sobre su respuesta bajo diferentes condiciones de excitación [13].

Las descargas eléctricas atmosféricas presentan amplitudes y formas de onda que varían de manera aleatoria, y la forma de la onda de la corriente de retorno está fuertemente influenciada por la polaridad del rayo. En rayos de polaridad negativa, la segunda descarga suele tener una forma de onda diferente a la primera, con un frente más rápido y una duración más corta. En cambio, los impulsos de polaridad positiva tienen un frente de onda más lento y una duración más prolongada [10]. Según las estadísticas medidas, el tiempo de inicio de la corriente del rayo se encuentra principalmente en el rango de 1 μ s a 5 μ s, mientras que el tiempo de cola está en el rango de 20 μ s a 100 μ s [17]. Basándose en estas características, se propone un modelo matemático ajustado a este fenómeno, como se indica en (1):

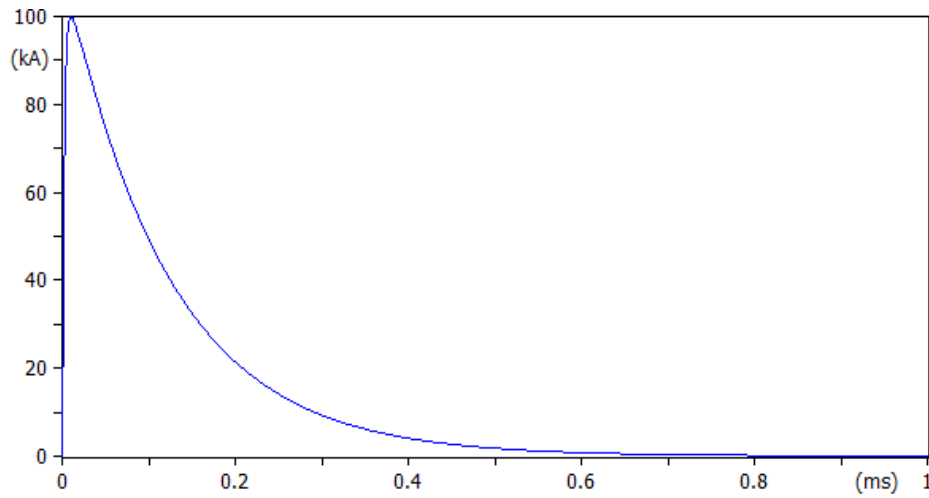
$$i(t) = I(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

Donde, I : valor pico de la corriente del rayo, α, β : coeficientes que describen una forma de onda estandarizada para pruebas de alto voltaje. La onda estandarizada se muestra en la figura 1.

Las descargas eléctricas atmosféricas pueden simularse utilizando una fuente de corriente de polaridad positiva o negativa (ondas monopolares) o con ambas polaridades (ondas bipolares).



Figura 1. Forma de onda de la corriente del rayo usada



(file SIMULACION_FINAL.pl4; x-var t) c:XX0001-XX0004

Fuente. Elaboración propia.

En este estudio, se emplearán descargas negativas, debido a que son las más comunes y se modelan mediante (2) [18]:

$$i(t) = \frac{I_{pk}}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n + 1} e^{\left(\frac{-t}{\tau_2}\right)} \quad (2)$$

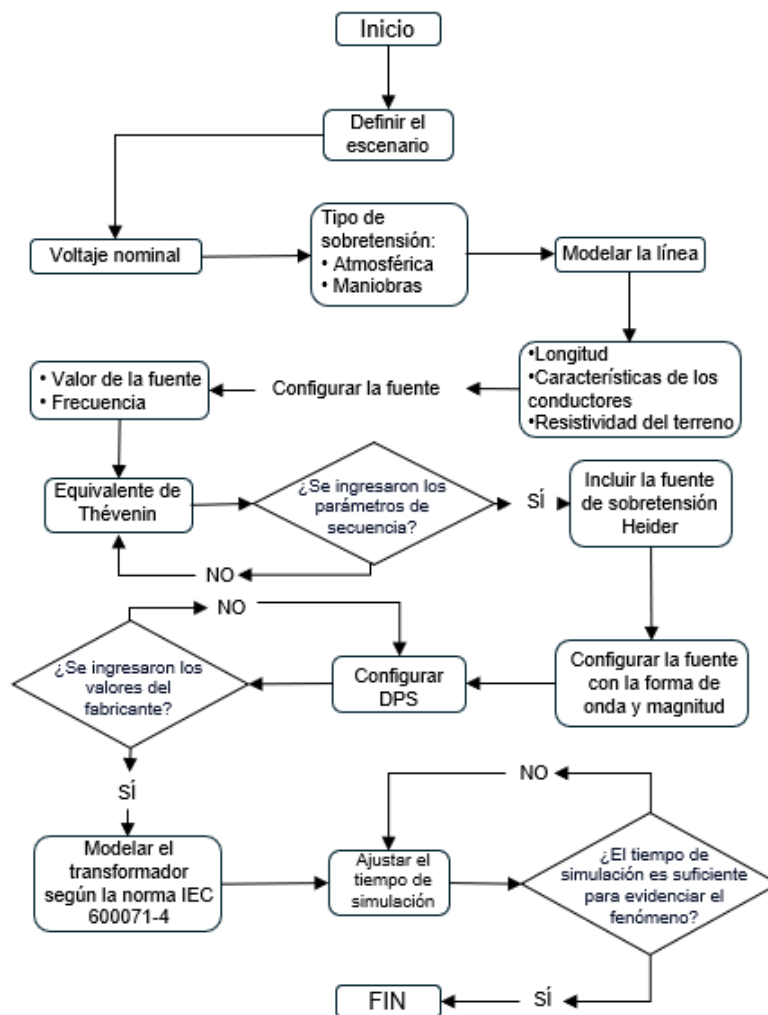
Donde, I_{pk} : valor de cresta de la corriente, τ_1 : constante de tiempo de subida, τ_2 : constante de tiempo de cola, η : factor de corrección del valor de la cresta, n : factor de concavidad.

3. Materiales y métodos

La metodología propuesta para este estudio se ilustra en la figura 2 comienza con la definición del punto de inyección de la sobretensión, que se establece en tres secciones diferentes de la línea de transmisión. Esta elección es crucial para simular adecuadamente el impacto de las descargas eléctricas atmosféricas en el sistema. A continuación, se llevan a cabo simulaciones en dos escenarios distintos: uno sin la inclusión de DPS y otro con la inclusión de estos dispositivos. El objetivo de esta comparación es evaluar las diferencias en los niveles de voltaje y determinar el impacto de los DPS en la mitigación de las sobretensiones.



Figura 2. Diagrama de bloques de la metodología



Fuente. Elaboración propia.

Para realizar las simulaciones, se utiliza el programa ATPDraw, una herramienta gráfica fundamental para crear y simular modelos eléctricos y electromagnéticos complejos. ATPDraw permite un análisis detallado de los transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia, facilitando la evaluación de los efectos de las descargas atmosféricas en el comportamiento del sistema eléctrico. Una vez completadas las simulaciones, se analizan los resultados para identificar las diferencias en los niveles de voltaje entre los dos escenarios. Este análisis permitirá cuantificar la efectividad de los DPS en la reducción de sobretensiones y, por ende, en la protección de los equipos eléctricos.



ATPDraw facilita la creación de esquemas y diagramas mediante una interfaz gráfica intuitiva, donde se pueden insertar componentes eléctricos, definir parámetros y realizar simulaciones para evaluar el desempeño de la red ante diferentes condiciones. Los grandes sistemas eléctricos se representan mediante ecuaciones diferenciales, y se utilizan métodos numéricos para encontrar sus soluciones. Para resolver transitorios eléctricos, las técnicas más comúnmente usadas son el método de Euler hacia atrás y la regla trapezoidal. A continuación, se presentan las ecuaciones recursivas de actualización para estas dos reglas [19]. Para Euler hacia atrás:

$$\begin{aligned} x(t) &= x(t - \Delta t) + \Delta t \dot{x}(t) \\ \dot{x}(t) &= 2 \frac{x(t) - x(t - \Delta t)}{\Delta t} - \dot{x}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

Para la regla trapezoidal:

$$\begin{aligned} x(t) &= x(t - \Delta t) + \Delta t \dot{x}(t) \\ \dot{x}(t) &= 2 \frac{x(t) - x(t - \Delta t)}{\Delta t} - \dot{x}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

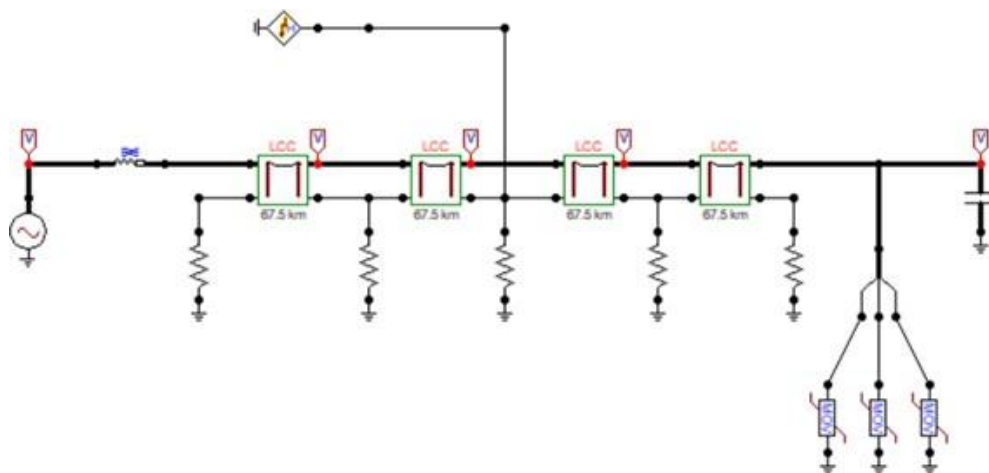
Donde, Δt : paso de integración, $\dot{x}$: derivada de x con respecto al tiempo. Las ecuaciones en (3) y (4) se expresan en términos del instante de tiempo actual y un paso de integración atrás [19].

4. Resultados y discusión

La figura 3 presenta el modelo implementado en ATPDraw, el cual representa la infraestructura eléctrica de una subestación y sus componentes clave para simular fenómenos transitorios. Este modelo incluye líneas de transmisión segmentadas para analizar el impacto de descargas en diferentes puntos y la implementación de DPS como elementos de protección. Construido para reflejar condiciones reales de operación, el modelo permite simular las descargas como fuentes de corriente impulsiva, evaluando su interacción con los componentes del sistema y observando cómo el DPS mitiga eficazmente las sobretensiones en puntos críticos. Sin embargo, este modelo podría ampliarse para incluir variaciones de configuración o condiciones climáticas, constituyendo una extensión interesante para estudios futuros.



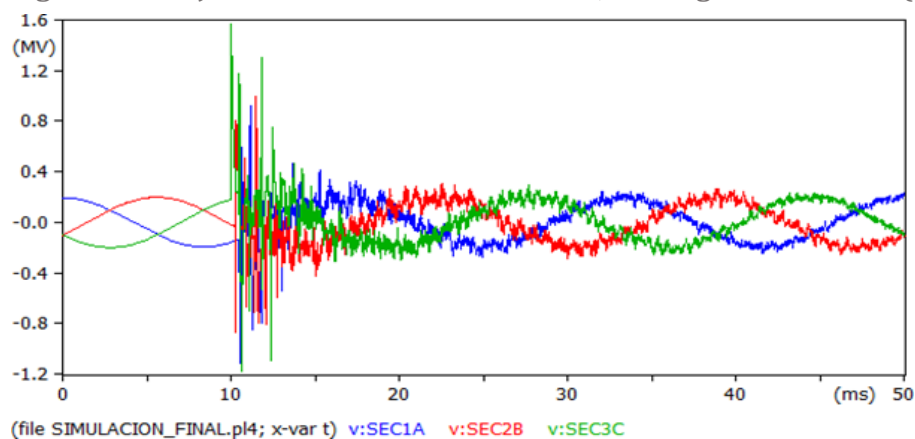
Figura 3. Modelo en ATPDraw



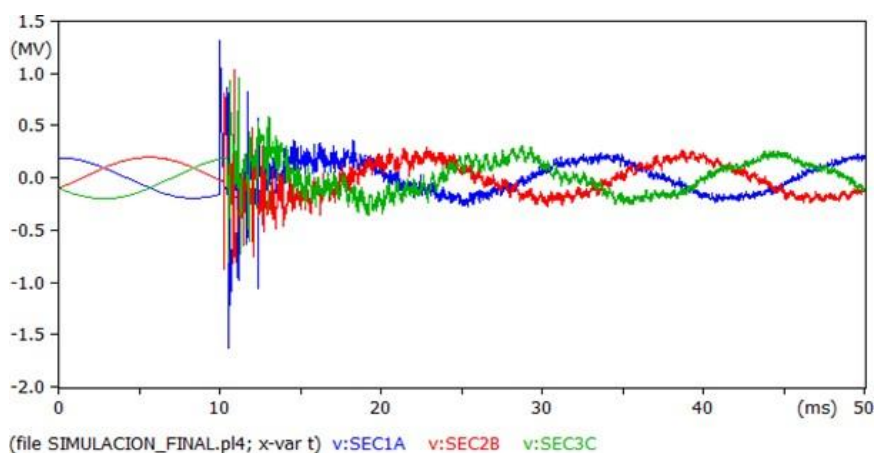
Fuente. Elaboración propia.

En este conjunto de simulaciones la descarga impacta en cada una de las 3 secciones y se observan los valores de voltaje que se tiene a través de los diferentes tramos de la línea, como se ilustra en la figura 4, donde las simulaciones muestran voltajes en los órdenes de los MV, los cuales son bastantes altos y podrían afectar el funcionamiento de la red, también se puede ver que, al alejarse del lugar del impacto de la descarga, el voltaje comienza a disminuir y como el DPS actúa así viendo los valores voltaje disminuidos en el orden de kV.

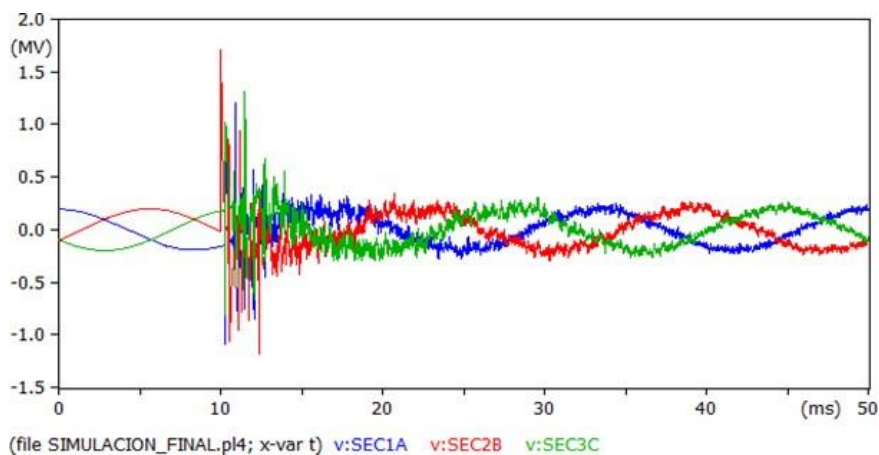
Figura 4. Voltaje en las tres secciones con DPS, descarga en la sección (a) 1 (b) 2 (c) 3



(a)



(b)



(c)

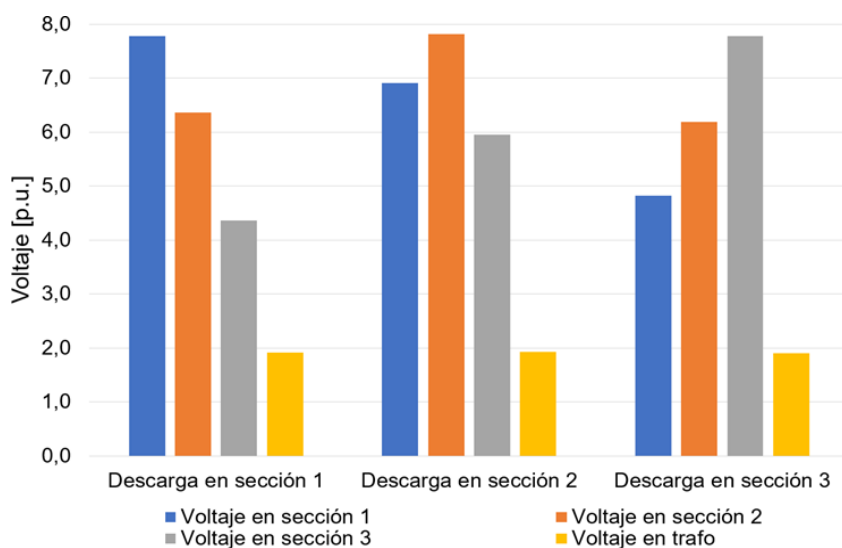
Fuente. Elaboración propia.

Las figuras 5 y 6 muestra cómo se comporta el voltaje en la línea frente a las descargas en las diferentes secciones y el voltaje en el barraje de la subestación, en el eje de las abscisas se encuentra la ubicación de la descarga y en el eje de las ordenadas los valores de voltaje arrojados por la simulación donde se tomó para el valor de la base el voltaje nominal de la línea 220 kV para el sistema p.u.

La figura 5 ilustra cómo la magnitud del voltaje en los elementos varía según la distancia, mostrando dos comportamientos distintos entre el voltaje en la línea de transmisión y el barraje de la subestación. El voltaje pico disminuye con respecto al impacto de la descarga en la línea de transmisión, mientras que en el barraje de la subestación, la relación del voltaje pico con el frente de onda se mantiene constante. Es importante destacar que el voltaje en el barraje de la subestación se mantiene relativamente estable y cercano al valor de 2 p.u., independientemente de la ubicación de las descargas atmosféricas. Este comportamiento indica que las medidas de protección existentes en la subestación son efectivas para evitar que las descargas afecten al voltaje en el punto de conexión a la red eléctrica.

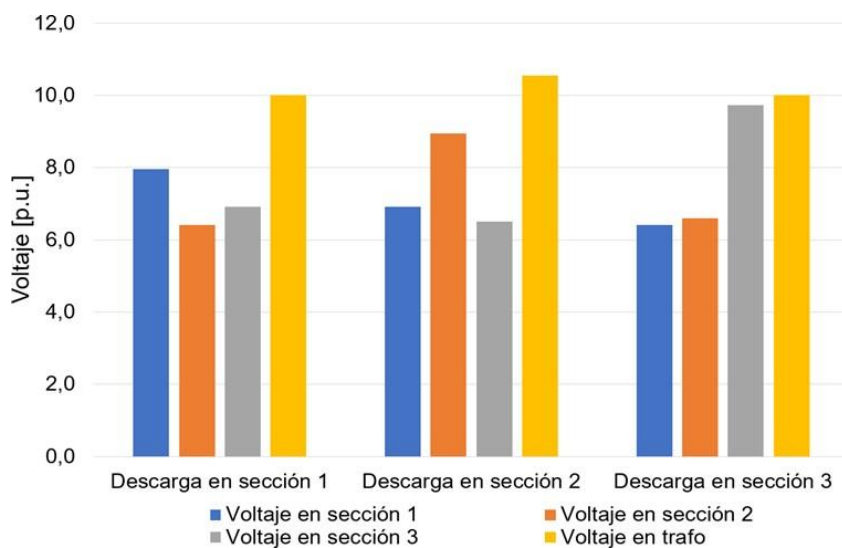


Figura 5. Voltajes en la línea en diferentes lugares de descarga con DPS



Fuente. Elaboración propia.

Figura 6. Voltajes en la línea en diferentes lugares de descarga sin DPS



Fuente. Elaboración propia.



La figura 6 muestra que sin DPS los valores de voltaje cambia, siendo su comportamiento menos uniforme debido a que no se puede apreciar claramente que se presenta una caída de voltaje con la distancia, como se observa en la gráfica de la descarga en la sección 1 el voltaje en la sección 3 es más alto al voltaje de la sección 2, esto debido a que la onda electromagnética del rayo llega a un extremo de la línea de transmisión, se encuentra con un cambio en la impedancia. Esto provoca un reflejo de la onda, lo que significa que una parte de la energía de la onda se refleja de regreso hacia la fuente, haciendo que los niveles de tensión aumenten en la línea. También se observa que el voltaje en el barraje de la subestación es el más alto con un valor de hasta 10,5 p.u. o un 15,09 % más que el voltaje más alto registrado en la línea.

Los resultados obtenidos en este estudio, que evidencian una reducción de hasta el 70,35 % en las sobretensiones gracias al uso de DPS, coinciden con las investigaciones previas de [13], [14] y [15], quienes destacaron el comportamiento de los DPS bajo condiciones de transitorios rápidos y sobretensiones por rayos. Mientras que este estudio se enfoca en la eficacia cuantitativa de los DPS en sistemas de 220 kV, otros trabajos como [12] subrayan que la ubicación estratégica de los DPS en subestaciones puede influir significativamente en la mitigación de sobrevoltajes y en la distribución de energía durante eventos extremos. Adicionalmente, las simulaciones en [15] enfatizan la importancia de ajustar los niveles de aislamiento y protección considerando las características específicas de las descargas eléctricas. Esto resalta que, aunque los DPS son dispositivos altamente eficaces, su diseño y configuración deben adaptarse a las características de cada sistema eléctrico para optimizar su desempeño.

5. Conclusiones

Las simulaciones realizadas en ATPDraw, demuestran que la implementación del DPS es altamente efectiva para reducir significativamente los valores de voltaje en un sistema eléctrico durante eventos de descargas eléctricas atmosféricas, dado que reduce un 70,35 % estos valores. Los resultados de las simulaciones indican que los valores de voltaje sin DPS eran considerablemente mayores, considerando que el voltaje nominal de operación de la línea es 220 kV tomado como base para el sistema por unidad, teniendo esto en cuenta 1,0 p.u. es el voltaje nominal de operación, se registraron valores de voltaje en el transformador con DPS instalado máximo de 1,91 p.u. mientras que sin DPS instalado de hasta 10 p.u. Las simulaciones también muestran que cuando no tiene DPS el voltaje se comporta casi de manera lineal frente a las descargas con una pendiente muy pronunciada, lo cual indica que a medida que el valor de la descarga aumenta el voltaje también, mientras que cuando tiene DPS se comporta de manera más constante. Esto confirma que el DPS actúa como una barrera eficaz contra las sobretensiones transitorias inducidas por rayos. La notable reducción de sobretensiones lograda con el uso de DPS resalta su importancia crucial para la protección de equipos eléctricos y la seguridad de las instalaciones. El estudio valida la efectividad de ATPDraw como herramienta para realizar simulaciones de sobretensiones transitorias en sistemas eléctricos. Los resultados obtenidos son consistentes con los principios físicos y con datos observados de otros proyectos sobre el comportamiento de los DPS.



Aunque los resultados obtenidos en este trabajo evidencian la eficacia de los DPS en la mitigación de sobretensiones, este estudio se limitó al análisis de descargas atmosféricas bajo escenarios idealizados y con un rango de parámetros específico. Futuras investigaciones podrían incluir el estudio de eventos extremos con características no consideradas aquí, como cambios climáticos que alteren la frecuencia e intensidad de las descargas, así como otro tipo de DPS o la incorporación de otros dispositivos de protección en combinación con los DPS para evaluar su efectividad. Además, es posible analizar el comportamiento de las líneas de transmisión cuando una descarga atmosférica cae cerca de ellas, pero no directamente en el cable de guarda, dado que este fenómeno puede generar perturbaciones significativas en el sistema eléctrico debido a los campos electromagnéticos inducidos por el rayo. Otra línea interesante de investigación sería estudiar los fenómenos transitorios asociados a descargas atmosféricas en líneas de transmisión de diferentes niveles de voltaje, para evaluar cómo varía su impacto y protección según el nivel de operación.

Referencias

- [1] M. A. Linares Vargas, "Simulación y análisis de transitorios electromagnéticos de frente rápido debido a descargas eléctricas atmosféricas en instalaciones eléctricas de alta tensión", Universidad Nacional de Ingeniería, tesis de maestría, 2013. Disponible en <http://hdl.handle.net/20.500.14076/2595>
- [2] W. Schmidt y F. Greuter, "Nuevos enfoques de la protección contra sobretensiones", ABB Rev., pp. 49-55, 2002.
- [3] J. C. Landeo Mallascca, "Análisis del diseño de apantallamiento contra descargas atmosféricas en la ampliación de la subestación Chupaca, 2021-2023", Universidad Nacional del Centro de Perú, tesis de pregrado, 2023. Disponible en <http://hdl.handle.net/20.500.12894/9980>
- [4] A. X. Landi Placencia y K. I. Macancela Allaico, "Modelación y simulación de un sistema de transmisión eléctrica de alta tensión con corriente continua (HVDC) mediante ATPDraw", Universidad Politécnica Salesiana, tesis de pregrado, 2023. Disponible en <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24463>
- [5] L. Pazmiño, D. Echeverría y J. Cepeda, "Análisis de transitorios electromagnéticos en el Sistema Nacional Interconectado (SNI) a nivel de 230 kV y 500 kV usando el simulador digital en tiempo real HYPERsim", Rev. Téc. En., vol. 15, n.º 1, pp. 11-20, 2018. Disponible en <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v15.n1.2018.319>
- [6] C. Abril López, "Simulación de descargas eléctricas atmosféricas usando GEANT4", Universidad Nacional de Colombia, tesis de maestría, 2011. Disponible en <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/20497>



- [7] P. Rodríguez, L. Rosales, J. Toledo y E. Contreras, “Simulación de descargas eléctricas atmosféricas mediante la ecuación de onda viajera”, Universidad, Ciencia y Tecnología, vol. 13, n.º 53, pp. 319-328, 2009.
- [8] R. Álvarez y L. Rosales, “Simulación de descargas eléctricas atmosféricas y su efecto en redes eléctricas de potencia”, Universidad, Ciencia y Tecnología, vol. 16, n.º 64, pp. 161-172, 2012.
- [9] A. Juárez Núñez, “Mejora de la confiabilidad en la coordinación de aislamiento de la línea PON-73090-SRL”, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, tesis de maestría, 2021. Disponible en <https://hdl.handle.net/20.500.12371/15531>
- [10] V. P. Correa, J. D. Guasgua y M. A. Castro, “Influencia de la altitud sobre el riesgo de falla del aislamiento de líneas de transmisión de 500 kV considerando el comportamiento estadístico de los sobrevoltajes”, Rev. Odigos, vol. 4, n.º 1, pp. 31-53, 2023. Disponible en <https://doi.org/10.35290/ro.v4n1.2023.774>
- [11] C. F. Prieto Castro, “Estudio de sobrevoltajes causados por impactos de rayo en sistemas de transmisión con el programa ATP”, Universidad de Chile, tesis de pregrado, 2009. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103606>
- [12] S. Ahmad Hosseini, M. Mirzaie & T. Barforoshi, “Impact of surge arrester number and placement on reliability and lightning overvoltage level in high voltage substations”, Int. J. of Elec. P. & Ener. Sys., vol. 65, pp. 146-158, 2015. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.09.037>
- [13] J. Chen et al., “Behavior Comparison of Metal Oxide Arrester Blocks When Excited by VFTO and Lightning”, IEEE Trans. on Elec., Comp., vol. 57, n.º 6, pp. 1608-1615, 2015. Disponible en <https://doi.org/10.1109/TEMC.2015.2450221>
- [14] R. Mori & A. Tatematsu, “Response of a Surge Arrester with a Series Gap for 6.6- kV Distribution Lines to Steep-Front Transients”, IEEE Trans. on Elec. Comp., vol. 64, n.º 6, pp. 2296-2300, 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1109/TEMC.2022.3202155>
- [15] B. Franc, B. Filipović-Grčić & V. Milardić, “Lightning overvoltage performance of 110kV air-insulated substation”, Elec. P. Sys. Res., vol. 138, pp. 78-84, 2016. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.12.002>
- [16] J. O. Oña y L. E. Ruales, “Análisis de sobrevoltajes por impulso atmosférico en sistemas de transmisión con discontinuidades líneas de transmisión aéreas y cables aislados usando ATP”, Rev. Téc. Ener., Vol. 20, n.º 2, pp. 1-10. 2024. Disponible en <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v20.n2.2024.597>
- [17] Z. Hu, Y. Han, P. Yang, C. Wang & A. S. Zalhaf, “Evaluation of lightning overvoltage at neutral point of HVDC converter transformer based on EMTP”, Ener. Rep., vol. 8, Suppl. 10, pp. 274-283, 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.05.194>



- [18] E. J. Camacho Vargas, "Cálculo de sobrevoltajes por descargas eléctricas atmosféricas en subestación de 500 kV utilizando el ATP (Alternative Transients Program) aplicado a la subestación El Inga (antes Pifo) de 500 kV", Escuela Politécnica Nacional, tesis de pregrado, 2014. Disponible en <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/8861>

- [19] D. López-Coronado et al., "Simulación de redes eléctricas con procesamiento paralelo mediante Matlab", Rev., Téc., en Mar., vol. 34, n.º 7, pp. 142-157, 2021. Disponible en <https://doi.org/10.18845/tm.v34i7.6021>