



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE ELECTRICIDAD

**ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN DESCARGADOR TIPO
RAYO PARA SOBRETENSIONES DE LÍNEAS DE TRANSMISIONES
ELÉCTRICAS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: María José Torres Anzules

TUTOR: Msc. Roy Santana Jara

Guayaquil - Ecuador
2025

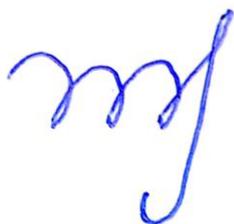
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, María José Torres Anzules con documento de identificación N° 0941894438 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 19 de febrero del año 2025

Atentamente,



María José Torres Anzules
CI: 0941894438

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, María José Torres Anzules con documento de identificación No. 0941894438, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del ENSAYO O ARTÍCULO ACADÉMICO: ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN DESCARGADOR TIPO RAYO PARA SOBRETENSIONES EN LÍNEAS DE TRANSMISIONES ELÉCTRICAS, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 19 de febrero del año 2025

Atentamente,



María José Torres Anzules
CI: 0941894438

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Roy Freddy Santana Jara con documento de identificación N° 0910972637, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN DESCARGADOR TIPO RAYO PARA SOBRETENSIONES DE LÍNEAS DE TRANSMISIONES ELÉCTRICAS, realizado por María José Torres Anzules con documento de identificación N° 0941894438, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción ENSAYOS O ARTÍCULOS ACADÉMICOS que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 19 de febrero del año 2025

Atentamente,



Msc. Roy Santana Jara
CI: 0910972637

Análisis del funcionamiento de un descargador tipo rayo para sobretensiones de líneas de transmisiones eléctricas

Analysis of the operation of a lightning arrester for overvoltages in electric transmission lines

María Torres Anzules
Ingeniería Eléctrica
Universidad Politécnica
Salesiana
Guayaquil, Ecuador
mtorresa7@est.ups.edu.ec

Msc. Roy Santana Jara
Ingeniería Eléctrica
Universidad Politécnica
Salesiana
Guayaquil, Ecuador
rsantana@ups.edu.ec

Resumen— El estudio aborda la protección de líneas de transmisión eléctrica frente a eventos transitorios inducidos por descargas atmosféricas, evaluando la efectividad de un descargador de sobretensiones tipo rayo como solución para proteger los efectos de dichas sobretensiones en la infraestructura eléctrica. En la metodología empleada se utilizó el software ATP Draw, una herramienta avanzada de simulación que permitió modelar el comportamiento del descargador en condiciones diversas, analizando su interacción con los componentes del sistema eléctrico. Mediante simulaciones detalladas, se evaluaron eventos transitorios en puntos críticos de la red, destacando la alta efectividad del dispositivo en reducir las sobretensiones generadas por los rayos. Sin embargo, el análisis subraya la necesidad de complementar esta solución con estrategias de protección adicionales para la fiabilidad y eficiencia del sistema a largo plazo. Este enfoque integral, que combina dispositivos avanzados y un diseño robusto de la red, refuerza la resiliencia del sistema eléctrico, garantizando la protección de los equipos y la continuidad operativa.

Palabras clave—protección, sobretensiones, transitorios, eficiencia, simulación, fiabilidad.

Abstract— The study addresses the protection of transmission lines against transient events induced by lightning strikes, evaluating the effectiveness of a lightning-type surge arrester as a solution to mitigate the effects of such surges on electrical infrastructure. The methodology employed utilized ATP Draw software, an advanced simulation tool that enabled the modeling of the arrester's behavior under diverse conditions, analyzing its interaction with the components of the electrical system. Through detailed simulations, transient events at critical points of the network were assessed, highlighting the device's high effectiveness in reducing lightning-induced overvoltages. However, the analysis emphasizes the need to complement this solution with additional protection strategies to ensure the system's long-term reliability and efficiency. This integrated approach, combining advanced protective devices and a robust network design, enhances the resilience of the electrical system, ensuring the protection of equipment and operational continuity.

Keywords—protection, overvoltages, transients, efficiency, simulation, reliability.

I. INTRODUCCIÓN

Las líneas de transmisión eléctricas son componentes esenciales en la infraestructura de los sistemas de energía, responsables de la distribución y transporte de electricidad a largas distancias [1]. Sin embargo, estas líneas están expuestas a condiciones ambientales adversas y fenómenos naturales

que pueden afectar su estabilidad y rendimiento. Uno de los fenómenos más críticos que afectan la operación de estas líneas es la sobretensión causada por descargas atmosféricas [2]. Estas sobretensiones pueden comprometer la integridad de los equipos y la continuidad del suministro eléctrico, generando fallas que impactan la fiabilidad del sistema de potencia [3].

Para mitigar el impacto de estas sobretensiones, se emplean dispositivos de protección como los descargadores tipo rayo o autovalvulares, que actúan permitiendo la descarga de la corriente de la sobretensión hacia tierra cuando esta supera un cierto umbral, protegiendo así a los equipos de transmisión de posibles daños [1]. Estos descargadores son especialmente útiles en sistemas de transmisión de alta tensión, donde el riesgo de daños por sobretensiones es elevado. En términos técnicos, los descargadores autovalvulares son dispositivos no lineales que utilizan materiales de óxido de zinc para limitar las sobretensiones y disipar la energía de forma segura [4].

La operación y diseño de los descargadores tipo rayo se rigen por estándares internacionales que establecen los parámetros de rendimiento y seguridad, tales como los estándares de la International Electrotechnical Commission (IEC) Y EL Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) [2]. Los estándares IEC 60099 y IEEE C62.11, en particular, definen las especificaciones de los descargadores de sobretensión en términos de resistencia a impulsos de corriente y capacidad de respuesta ante diferentes tipos de eventos de sobretensión [3].

El estudio de los descargadores tipo rayo se ha convertido en un área de investigación relevante en el ámbito de la ingeniería eléctrica debido a la necesidad de mejorar la fiabilidad y eficiencia de las redes eléctricas [4]. Diversos estudios han analizado el comportamiento de estos dispositivos bajo diferentes condiciones de operación y en presencia de impulsos de alta energía, explorando su capacidad para disipar grandes cantidades de corriente en breves periodos y minimizar así el impacto en la infraestructura de transmisión [1]. La simulación mediante software especializado, como ATP Draw o MATLAB, permite una aproximación detallada del desempeño de los descargadores bajo condiciones específicas, permitiendo prever y analizar el comportamiento del sistema ante eventos de sobretensión de magnitudes diversas [2].

Este trabajo tiene como objetivo analizar el funcionamiento de un descargador tipo rayo en un sistema de

transmisión, utilizando software como ATP Draw o MATLAB para modelar las sobretensiones y evaluar la capacidad del descargador para mitigar sus efectos. A través de este análisis, se pretende comprender mejor el proceso de descarga y las características de los impulsos de sobretensión que afectan a las líneas de transmisión, contribuyendo así al diseño de redes eléctricas más robustas y confiables frente a eventos externos que puedan comprometer su desempeño [3][4].

A. Estudio de soluciones en el sistema

Para desarrollar este apartado del artículo, se realizó una revisión detallada de estudios recientes, normativas internacionales y avances tecnológicos relacionados con los descargadores de sobretensión tipo rayo. Estos dispositivos, son esenciales para la protección de líneas de transmisión y equipos eléctricos, están diseñados para desviar las corrientes asociadas a sobretensiones transitorias hacia tierra, limitando así su impacto en los componentes del sistema. De acuerdo con la norma IEC 60099-4, un descargador debe ser capaz de manejar corrientes de impulso que pueden alcanzar hasta 100 kA con tiempos de respuesta inferiores a microsegundos, garantizando la seguridad del sistema y prolongando la vida útil de los equipos [5].

En términos de desarrollo tecnológico, se ha demostrado que los descargadores basados en óxido de zinc (ZnO) ofrecen una reducción de hasta el 40% en las tensiones residuales en comparación con los modelos tradicionales de carburo de silicio. Este avance se debe a las propiedades no lineales del ZnO, que permiten una alta capacidad de absorción de energía y una mínima degradación a lo largo del tiempo. Según publicaciones en IEEE, los descargadores modernos han mejorado su capacidad para soportar descargas repetitivas, alcanzando una eficiencia operativa superior al 95% en ambientes de alta densidad de rayos, lo que representa un aumento significativo frente a los diseños anteriores [6].

El impacto de las descargas atmosféricas en las líneas de transmisión es especialmente crítico en regiones tropicales, donde la densidad promedio de rayos puede superar los 20 rayos/km²/año. Estas descargas pueden generar transitorios de alta magnitud en la tensión nominal del sistema. Estudios realizados por CIGRÉ muestran que el 75% de las fallas en líneas de transmisión de alta tensión están asociadas a descargas atmosféricas, lo que subraya la importancia de implementar estrategias de protección adecuadas [7]. Los descargadores de sobretensión, cuando se instalan estratégicamente en nodos clave del sistema, pueden disminuir estos efectos de manera efectiva, reduciendo el riesgo de interrupciones [8].

En cuanto a las normativas aplicables, estándares como IEEE C62.11 e IEC 60099-4 especifican parámetros clave para el diseño y prueba de descargadores. Por ejemplo, las pruebas de impulso de corriente deben garantizar que el dispositivo pueda soportar tensiones de cresta superiores al de la tensión nominal, mientras que las pruebas de envejecimiento simulan condiciones extremas para verificar la estabilidad del desempeño a largo plazo. El cumplimiento de estas

normativas no solo asegura la confiabilidad del sistema, sino que también garantiza la compatibilidad entre equipos de diferentes fabricantes, un aspecto esencial en sistemas eléctricos interconectados [9].

El análisis del desempeño de los descargadores mediante herramientas de simulación como ATP Draw ha permitido avanzar en la mejora de su diseño. Este software es capaz de simular descargas atmosféricas que generan tensiones de impulso superiores a los 1200 kV, evaluando la respuesta del descargador en términos de tiempos de operación, niveles de tensión residual y distribución de energía disipada. Estas mejoras no solo reducen los costos asociados a fallos en equipos críticos, sino que también aumentan la estabilidad y confiabilidad de los sistemas eléctricos en escenarios de alta exposición a fenómenos transitorios [6] [8].

B. Metodología

La metodología aplicada en este estudio se desarrolló a través de diversas etapas orientadas a garantizar un análisis riguroso y completo. Para empezar, se realizó una revisión exhaustiva incluyendo normativas internacionales como IEC 60099-4 e IEEE C62.11, que definen los requisitos técnicos y de desempeño de los descargadores de sobretensión [10]. Al mismo tiempo, se analizaron estudios sobre descargas atmosféricas y su efecto en líneas de transmisión eléctrica, considerando características eléctricas y condiciones ambientales específicas del sistema en evaluación [11].

Posteriormente, se diseñó un modelo computacional detallado del sistema eléctrico mediante el software ATP Draw [12]. Este modelo incluyó una representación precisa de una línea de transmisión de 230 KV, incorporando parámetros como resistencia, inductancia y capacitancia, además de una caracterización técnica de los descargadores basada en las curvas de tensión-corriente proporcionadas por los fabricantes [13]. Asimismo, se modelaron fuentes de impulsos para representar descargas atmosféricas, configuradas con magnitudes y duraciones compatibles con estándares internacionales y estudios de referencia [14].

A continuación, se realizaron simulaciones que permitieron evaluar el desempeño de los descargadores en distintos escenarios operativos. Estas simulaciones incluyeron la incidencia directa de descargas atmosféricas en puntos críticos de la línea de transmisión, la aparición de sobretensiones por fallas transitorias, y variaciones en la ubicación y configuración de los descargadores instalados [15].

Los resultados obtenidos se analizaron e interpretaron con base en métricas de desempeño técnico. Se compararon los niveles de protección logrados frente a los requisitos establecidos en normativas internacionales, verificando la conformidad del sistema y su efectividad en la reducción de tensiones transitorias y la protección de los componentes eléctricos.

Por último, los hallazgos fueron acertados mediante la comparación con estudios previos. A partir de estos resultados, se generaron recomendaciones técnicas para el diseño, selección e instalación de descargadores de sobretensión en líneas de transmisión. Estas propuestas buscan garantizar un desempeño eficiente, cumplimiento normativo y sostenibilidad técnica a largo plazo.

II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Un descargador tipo rayo para una línea de transmisión de 230 KV está compuesto por una carcasa externa, un sistema interno de resistencias no lineales y un sistema de conexión a tierra. La carcasa externa, fabricada con porcelana o material polimérico, proporciona aislamiento eléctrico y resistencia mecánica, soportando condiciones ambientales adversas. En su interior, las resistencias no lineales de óxido metálico (MOV) Metal Oxide Varistor, son los componentes que presentan un comportamiento no lineal: ofrecen alta resistencia durante condiciones normales y baja resistencia

cuando ocurre una sobretensión, permitiendo que las corrientes transitorias se descarguen de manera controlada.

El sistema de conexión a tierra asegura que las corrientes

de sobretensión derivadas sean conducidas de forma segura hacia el sistema de puesta a tierra de la instalación. Además,

incluye electrodos de conexión que enlazan el descargador con los conductores de fase, garantizando una operación eficiente y rápida ante eventos de sobretensión. Todo el sistema está diseñado para actuar en tiempos inferiores a un

microsegundo, limitando la tensión residual y protegiendo los equipos conectados en la línea de transmisión [16].

A. Modelo Conceptual

El modelo conceptual para el análisis del funcionamiento de un descargador tipo rayo en líneas de transmisión de energía eléctrica se centra en tres elementos esenciales: la fuente de sobretensiones, el sistema de transmisión y descargador mismo. Las sobretensiones generadas por fenómenos como descargas atmosféricas plantean un riesgo significativo para la integridad de los equipos, lo que exige una estrategia de protección adecuada. Las normas IEC 60071-2 y IEC 60076 definen los niveles de aislamiento y los requisitos de pruebas dieléctricas que deben cumplir los sistemas de transmisión, asegurando así su resistencia frente a sobretensiones de gran magnitud [17]. Además, los estándares IEEE Std 142 y IEEE Std 998 proporcionan directrices sobre la puesta a tierra y los métodos de protección mediante blindaje directo contra impactos de rayos en subestaciones, lo cual complementa la función de los descargadores tipo rayo al disipar la energía de forma efectiva y salvaguardar los equipos conectados [16]. Como se muestra en la Figura 1.

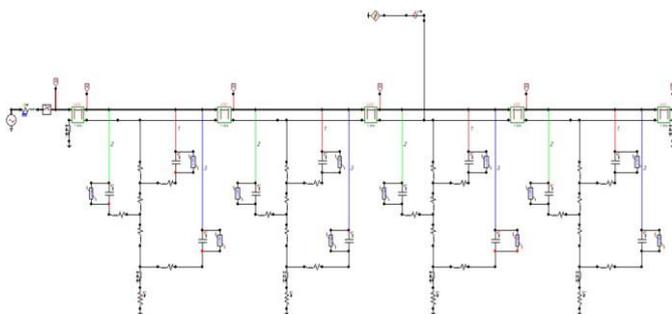


Figura 1: Modelo conceptual para el análisis del funcionamiento de un descargador tipo rayo en líneas de transmisión

B. Modelo matemático de la sobretensión

La sobretensión, causada por descargas atmosféricas, se representa mediante una onda de impulso de tipo 1.2/50 μ s, que caracteriza un rápido aumento de tensión y una decaída más lenta. La forma de la onda se define de acuerdo a la IEC 60076-3 y sigue la ecuación (1): donde la resistencia no lineal (R_{MOV} (V)) representa el comportamiento no lineal del MOV, la capacitancia (C) modela la capacidad de respuesta a transitorios rápidos, el impulso de sobretensión se modela como una fuente de tensión dependiente del tiempo $V_{sobr}(t)$ y la corriente transitoria definida como $I(t)$, con forma típica 1.2/50 μ s [18]. Para una línea de 230 KV.

$$V_{sobr}(t) = R_{MOV}(V) * I(t) + \frac{1}{C} \int I dt \quad (1)$$

Al derivar la ecuación entre la tensión, corriente y los parámetros del descargador, obtenemos la ecuación (2) que gobierna el sistema:

$$C \frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{R_{MOV}(V)} = I_{impulso}(t) \quad (2)$$

Donde $I_{impulso}(t) = \frac{V_{sobr}(t)}{Z_{sistema}}$ representa la corriente

generada por la sobretensión en el sistema, la misma que para un impulso tipo rayo de (1.2/50 μ s), la tensión de sobretensión se define como la ecuación (3):

$$V_{sobr}(t) = V_{pico} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{subida}}}) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{caída}}} \quad (3)$$

$$V_{sobr}(t) = 1200kV \cdot (1 - e^{-t/1.2 \mu s}) \cdot e^{-t/50 \mu s}$$

Sustituyendo $R_{MOV}(V) = k * V^{\alpha+1}$, la ecuación (4) se convierte en:

$$C \frac{dV(t)}{dt} + k * V^{\alpha+1} = I_{impulso}(t) \quad (4)$$

Esta ecuación se puede resolver usando el método numérico Runge-Kutta de cuarto orden o el software MATLAB, el resultado es una curva $V(t)$ que ilustra cómo el descargador limita la sobretensión y protege el sistema [19]. Como se muestra en la Figura 2.

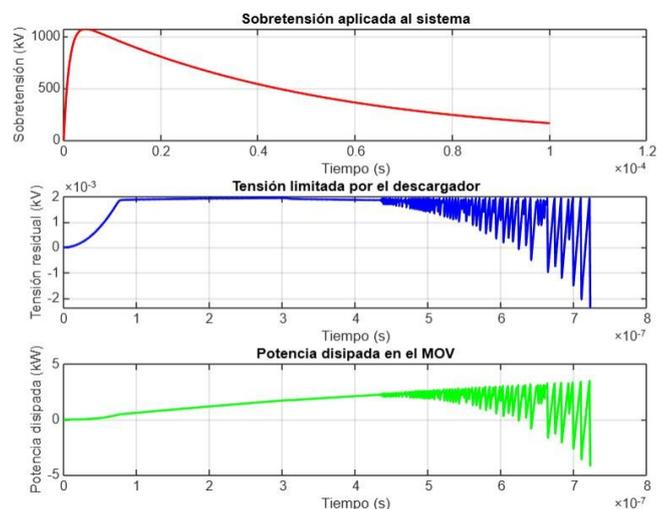


Figura 2: Modelo matemático graficado en el software MATLAB

En la sobretensión aplicada al sistema, el eje X (tiempo en segundos) representa al tiempo transcurrido durante el impulso de sobretensión, típicamente en el rango de 0s 100 μ s. El eje Y (tensión en KV) muestra el valor de la sobretensión que afecta al sistema, con un pico de 1200 KV. La forma de la onda característica del impulso es de tipo 1.2/50 μ s, lo que significa que alcanza su pico en 1.2 μ s y decae exponencialmente hasta el 50% del pico en 50 μ s. Este gráfico interpreta cómo la sobretensión afecta inicialmente al sistema, antes de que el descargador actúe para limitarla.

En la tensión limitada por el descargador, el eje X (tiempo en segundos) representa el tiempo transcurrido durante el evento. En el eje Y (tensión residual en KV) indica la tensión que queda después de que el descargador ha limitado la sobretensión, esto forma una curva que, al inicio, la tensión residual sigue al impulso aplicado, una vez que el MOV del descargador comienza a conducir (alrededor de 1.2 μ s), la tensión se limita a un valor seguro, típicamente alrededor de 650-800 KV. La curva desciende rápidamente, reflejándola disipación de la sobretensión.

En la potencia disipada en el MOV, el eje Y (potencia disipada en KW) representa la potencia que el descargador disipa al convertir la energía de la sobretensión en calor. La forma de la curva en la potencia tiene un pico inicial alto, correspondiente al momento en que el MOV comienza a conducir, disipando la mayor cantidad de energía. A medida que la sobretensión decae, la potencia disipada también disminuye, alcanzando valores cercanos a cero al final del evento. Este gráfico destaca la capacidad del descargador para manejar grandes cantidades de energía en un tiempo muy corto, demostrando su eficiencia en proteger los equipos.

C. Modelo matemático Voltaje-Corriente del descargador

El modelo matemático voltaje-corriente de un descargador autovalvular tipo rayo describe la relación no lineal entre el voltaje aplicado (V) y la corriente conducida (I) a través de sus varistores de óxido metálico (MOV). Este comportamiento se representa mediante la ecuación no lineal $I = kV^\alpha$ donde k es una constante dependiente del material y α suele ser alto (entre 30 y 50), lo que permite al descargador limitar eficazmente las sobretensiones.

Cuando se considera la respuesta dinámica del descargador, su modelo incluye los efectos capacitivos e inductivos.

La ecuación (5) que describe este comportamiento es:

$$C \frac{dV}{dt} + \frac{V}{R} + L \frac{dI}{dt} = E(t) \quad (5)$$

Donde C es la capacitancia, R la resistencia equivalente del MOV, L la inductancia de conexión, y E(t) el voltaje aplicado. Sustituyendo $I = kV^\alpha$ en la ecuación (6), se obtiene:

$$(C + L \propto kV^{\alpha-1}) \frac{dV}{dt} + \frac{V}{R} = E(t) \quad (6)$$

Este modelo permite analizar el comportamiento del descargador y su eficacia al limitar picos de tensión en líneas de transmisión de 230 KV.

D. Descripción general de las simulaciones en ATP Draw

ATP Draw es una herramienta gráfica basada en el programa EMTP (Electromagnetic Transients Program), diseñada

específicamente para analizar fenómenos transitorios en sistemas eléctricos. Este software permite modelar con precisión componentes como líneas de transmisión, fuentes de perturbación, descargadores tipo rayo y otros elementos eléctricos esenciales para la simulación de eventos transitorios. En el contexto del análisis de sobretensiones, ATP Draw ofrece un entorno altamente versátil para evaluar fenómenos como descargas atmosféricas, fallas en el sistema y procesos de reconexión que generan impactos significativos en la estabilidad del sistema eléctrico. La capacidad de representar con detalle el comportamiento dinámico de los componentes eléctricos lo posiciona como una herramienta clave en estudios de protección y confiabilidad.

En este trabajo, ATP Draw se emplea para modelar gráficamente el sistema de transmisión y simular la interacción del descargador tipo rayo con las líneas eléctricas bajo diversas condiciones de sobretensión. Estas simulaciones permiten analizar en detalle cómo el descargador reduce los picos de voltaje mediante su capacidad de derivar corrientes hacia tierra y disipar la energía generada por las perturbaciones transitorias. Además, el software facilita la evaluación de múltiples escenarios, como cambios en la magnitud y ubicación de las descargas, el comportamiento ante fallas puntuales y la respuesta del sistema ante variaciones en las características del descargador. Esto proporciona una visión integral sobre su desempeño, permitiendo validar su efectividad para minimizar riesgos y garantizar la continuidad y seguridad del sistema de transmisión eléctrica [20].

III. CASOS SIN LA PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN MEDIANTE FASES

A. Comportamiento de la fase A sin descargador tipo rayo de sobretensión.

La curva de la fase A (descargador en modo hide) muestra un comportamiento característico de transitorios eléctricos en un sistema de transmisión sin protección adecuada contra sobretensiones. Los picos de corriente alcanzan aproximadamente 5 A, con oscilaciones que persisten durante casi 8 milisegundos antes de atenuarse parcialmente. Este comportamiento puede atribuirse a la interacción entre el generador de 138 kV, operando a 60 Hz. Las propiedades físicas del conductor, con una resistencia de 0.114 ohm/km y una distancia horizontal de 4.8 m respecto a la torre, contribuyen a la aparición de fenómenos de resonancia electromagnética y reflexión de ondas.

La norma IEEE C62.22, que aborda los requisitos para la protección de líneas de transmisión contra sobretensiones, destaca la importancia de los dispositivos de protección para disipar la energía de los transitorios [21]. En este caso, la ausencia de descargadores autovalvulares permite que los picos de corriente se mantengan sin control, incrementando la probabilidad de fallas en los equipos a lo largo de la línea. La geometría del conductor favorece el acoplamiento capacitivo e inductivo entre fases, amplificando las oscilaciones y reduciendo la estabilidad del sistema durante el evento transitorio. Como se observa en el modelado de la

Figura 3, ante la incidencia de una descarga atmosférica sobre la línea de transmisión.

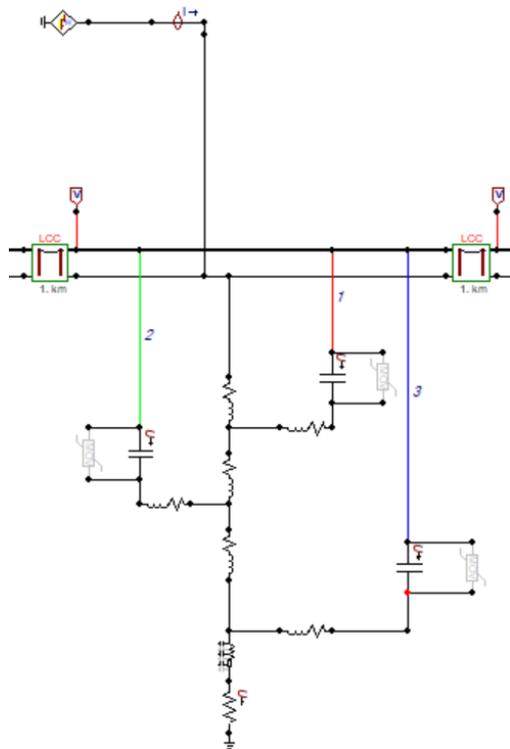


Figura 3: Representación del MOV en su configuración de protección contra sobretensiones (Modo oculto - Hide).

Otro factor es el tiempo de propagación de las ondas electromagnéticas a lo largo de la línea de transmisión, que para una distancia de 1 km equivale a aproximadamente $3.3 \mu\text{s}$, considerando que la velocidad de propagación es cercana al de la velocidad de la luz. Este intervalo temporal genera interferencias constructivas que amplifican las oscilaciones, particularmente en los primeros instantes del transitorio. La norma IEEE Std 1243, que detalla el análisis de transitorios en líneas de transmisión, describe este fenómeno como un efecto común en sistemas sin mecanismos de amortiguación, lo cual coincide con las observaciones en esta curva [23]. Como se muestra en la Figura 4.

En términos energéticos, los valores de corriente y tensión indican que, durante los picos, la potencia asociada a la fase A puede superar los 690 kW, una carga significativa para los aisladores y otros componentes de la línea. Sin dispositivos de protección, estas condiciones generan esfuerzos dieléctricos y térmicos que podrían deteriorar los materiales con el tiempo, comprometiendo la confiabilidad del sistema. La norma IEEE Std 519 subraya el impacto de los transitorios en la calidad de la energía, aunque la resistencia y la separación de 40 cm entre fases minimizan parcialmente el acoplamiento directo, los valores de inductancia y capacitancia distribuidos no son suficientes para atenuar completamente los transitorios [22]. Este análisis resalta la importancia de implementar protecciones adecuadas que eviten las oscilaciones, reduzcan las sobretensiones

transitorias y mejoren la estabilidad del sistema, especialmente en aplicaciones de alta tensión.

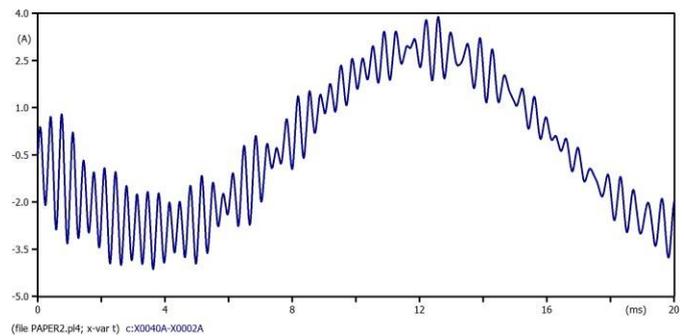


Figura 4: Curva del comportamiento de la fase A sin descargador tipo rayo de sobretensión.

B. Comportamiento de la fase B sin descargador tipo rayo de sobretensión.

La fase B (descargador en modo hide) presenta un comportamiento oscilatorio característico de un sistema de transmisión sujeto a perturbaciones sin la protección de un descargador de sobretensión. Las oscilaciones de corriente en esta fase alcanzan un máximo de aproximadamente 4.5 A y un mínimo cercano a -3.75 A . Este comportamiento es consecuencia de la interacción entre los parámetros eléctricos y geométricos de la línea y las características del generador de 138 kV, con una frecuencia nominal de 60 Hz. La amplitud y duración de estas oscilaciones reflejan los efectos de reflexiones de onda a lo largo de la línea.

En la fase B, el acoplamiento inductivo entre las líneas, junto con la disposición geométrica del conductor a 6.1 m de la torre y su resistencia de 0.114 ohm/km , contribuye a las oscilaciones observadas. Esta configuración favorece la aparición de armónicos y resonancias, que generan distorsiones en la corriente durante los primeros milisegundos del transitorio. La corriente muestra oscilaciones sostenidas hasta alrededor de 8 milisegundos, con una frecuencia modulada por las características físicas del sistema, antes de comenzar a amortiguarse gradualmente.

El fenómeno de propagación de onda en esta línea se observa de manera prominente en la fase B. La longitud de la línea de 1 km implica que las reflexiones ocurren dentro de un intervalo de tiempo de $3.3 \mu\text{s}$, provocando interferencias constructivas que amplifican las oscilaciones iniciales. Este efecto es más pronunciado en la fase B debido a su posición en la disposición geométrica de los conductores, lo que introduce asimetrías en las distribuciones de corriente y tensión.

Desde el punto de vista energético, los picos de corriente en la fase B indican que la potencia instantánea podría superar los 621 kW en los momentos más críticos. Este nivel de potencia transitoria ejerce esfuerzos mecánicos y térmicos significativos sobre los componentes del sistema, incluyendo

los aisladores y los equipos de conexión, aumentando el riesgo de fallas prematuras. La falta de un descargador de sobretensiones en este escenario permite que estas condiciones extremas permanezcan sin control, lo que afecta la confiabilidad general del sistema.

La interacción entre la fase B y los campos eléctricos y magnéticos generados en el sistema contribuye adicionalmente al comportamiento observado. Las oscilaciones se ven afectadas por el efecto capacitivo entre el conductor y el entorno, que en este caso se agrava debido a la alta tensión operativa y la proximidad geométrica entre las fases. Estas características resultan en un mayor nivel de acoplamiento entre las ondas electromagnéticas reflejadas y transmitidas, como se muestra en la Figura 5.

La norma IEEE C62.22 destaca que la ausencia de dispositivos de protección contra sobretensiones aumenta considerablemente la probabilidad de daños a los equipos debido a transitorios no amortiguados [24]. En la fase B, este riesgo es especialmente evidente debido a la amplitud de las oscilaciones de corriente y su persistencia durante el transitorio. Este comportamiento subraya la necesidad de incluir mecanismos de protección diseñados para disipar eficazmente la energía de los transitorios en líneas de alta tensión.

Las características observadas en la corriente, como la amplitud, duración y modulación, están directamente relacionadas con los parámetros eléctricos y geométricos de la línea y el generador. Estas observaciones resaltan la importancia de evaluar para disminuir los riesgos asociados a los transitorios eléctricos mediante la implementación de protecciones adecuadas, como los descargadores de sobretensión.

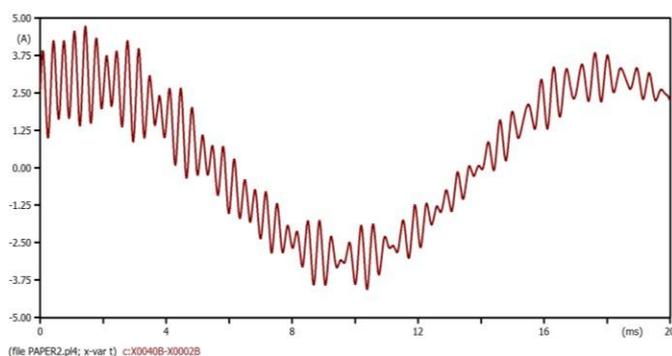


Figura 5: Curva del comportamiento de la fase B sin descargador tipo rayo de sobretensión.

C. Comportamiento de la fase C sin el descargador tipo rayo de sobretensión.

La fase C presenta un comportamiento característico en términos de amplitud y transitorios, destacándose por una mayor separación entre los picos transitorios en el tiempo. Esta separación sugiere que los picos transitorios en esta fase se disipan de forma más gradual, lo que puede implicar una respuesta más controlada a las perturbaciones. El valor

máximo de corriente observado en esta fase alcanza aproximadamente 4.5 A, lo que es significativo al evaluar la capacidad de la fase para manejar oscilaciones transitorias. Este valor indica que la fase C, aunque experimenta picos, mantiene un comportamiento relativamente estable en comparación con otros posibles escenarios de sobrecarga o falla transitoria. En este contexto, la Norma IEEE 1159 establece directrices para la calidad de la energía eléctrica, incluyendo la medición y el análisis de transitorios, lo cual es necesario para la identificación de problemas en las fases [25].

El análisis de la fase C también debe considerar su posición física en el sistema. En este caso, la fase C se ubica a una distancia de -6.1 m en el eje horizontal, lo que tiene un impacto directo sobre los tiempos de retardo en las oscilaciones que se generan. La distancia física de la fase C en relación con los otros componentes del sistema contribuye a generar oscilaciones con tiempos de retardo ligeramente diferentes. Esta diferencia se debe a las variaciones en las capacitancias distribuidas a lo largo de la fase, lo que afecta la sincronización de las oscilaciones y puede influir en la coordinación de protección y estabilidad general del sistema.

Los parámetros geométricos específicos de la fase C afectan directamente el desacoplamiento entre las fases, lo que, a su vez, modifica las características de los transitorios. El desacoplamiento entre las fases determina cómo las oscilaciones generadas en esta fase afectan o no a otras fases del sistema. En la fase C, las capacitancias distribuidas en su configuración geométrica pueden afectar tanto la amplitud como la frecuencia de los transitorios. Estas variaciones, influenciadas por la geometría, son un factor clave en la dinámica de la fase C y su interacción con el sistema eléctrico, lo que puede alterar el comportamiento de las cargas conectadas y la respuesta de la red a fluctuaciones

Un aspecto importante a considerar en la fase C son los efectos de resonancia que pueden ocurrir debido a la interacción de las capacitancias propias de la fase y las inductancias mutuas con otras partes del sistema. Este fenómeno de resonancia puede amplificar ciertas frecuencias de voltaje y corriente, creando picos indeseados que afectan la calidad de la energía. La resonancia en la fase C podría tener un impacto negativo en equipos sensibles, como generadores o transformadores, por lo que es fundamental monitorear y controlar estas frecuencias para evitar sobrecargas o fallas en los dispositivos. Si no se controla, la resonancia podría generar un desgaste prematuro de los equipos conectados a la fase, además de incrementar las pérdidas en el sistema.

La influencia de los parámetros geométricos y las propiedades eléctricas de la fase C, como las capacitancias distribuidas y las inductancias mutuas, también afecta la respuesta de esta fase a los transitorios. Las características físicas y eléctricas específicas de la fase C determinan cómo los transitorios se propagan a lo largo del sistema y cómo se amortiguan con el tiempo. Estos factores deben ser cuidadosamente estudiados para asegurar que los equipos conectados a esta fase operen dentro de sus límites de

seguridad, sin ser perjudicados por oscilaciones transitorias o resonancias no deseadas. Como se muestra en la Figura 6.

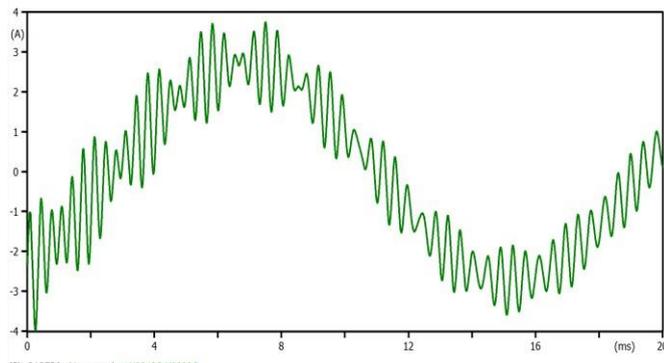


Figura 6: Curva del comportamiento de la fase C sin descargador tipo rayo de sobretensión.

IV. CASOS CON LA PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN MEDIANTE FASES

A. Caso 1: Sobretensiones por descarga atmosférica en un extremo de la línea (Fase A).

En la curva correspondiente a la fase A, se observa un comportamiento transitorio característico de una descarga atmosférica que interactúa con el sistema de protección de la línea de transmisión. Inicialmente, el voltaje presenta un pico máximo cercano a +150 kV, el cual ocurre en un tiempo aproximado de 1 ms. Este valor representa el incremento abrupto de la tensión debido a la llegada del impulso de sobretensión generado por el rayo. Posteriormente, la tensión comienza a disminuir de manera pronunciada y cruza el eje de cero alrededor de los 4 ms, alcanzando un valor mínimo cercano a -150 kV en aproximadamente 7 ms.

Después del mínimo negativo, el sistema muestra un comportamiento oscilatorio amortiguado, lo que indica la disipación de la energía residual a través del descargador tipo rayo y la línea de transmisión. Este fenómeno amortiguado es evidente por la reducción progresiva de las amplitudes de los picos de tensión. Por ejemplo, entre 8 ms y 12 ms, los valores de los picos son significativamente menores que los iniciales, oscilando entre +50 kV y -50 kV, lo que refleja la efectividad del descargador al limitar y disipar la energía asociada con el rayo.

El comportamiento detallado de esta curva puede explicarse considerando los valores del descargador mostrados en las tablas. Por ejemplo, para una corriente de 1 A, el voltaje de referencia es de 157,132 V, mientras que, para corrientes mayores como 10,000 A, el voltaje alcanza los 223,928 V. Estas características confirman la capacidad del descargador para manejar altos niveles de energía durante un evento de sobretensión, evitando que el sistema supere los límites de diseño.

Adicionalmente, según los atributos del modelo, el voltaje de referencia del descargador es de 160 kV, mientras que el límite de error es de 0.05 pu, y el límite de corriente es de

0.001 A. Estos parámetros aseguran la adecuada respuesta del descargador frente a variaciones bruscas de tensión.

Como se muestra en la Figura 7, este análisis es fundamental para verificar que la tensión de la fase A no exceda los valores máximos tolerados por los equipos de la subestación ni de la línea, garantizando la estabilidad y protección del sistema eléctrico frente a descargas atmosféricas.

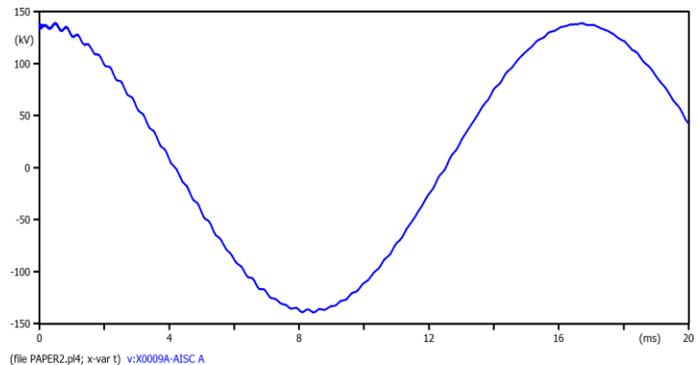


Figura 7: Curva del comportamiento transitorio FASE A

B. Caso 2: Comportamiento transitorio durante la descarga atmosférica (Fase B).

En la fase B, el análisis revela un comportamiento transitorio característico, producto de la interacción de la sobretensión generada por una descarga atmosférica y el sistema de protección implementado. Al inicio del fenómeno ($t = 0$ ms), el voltaje parte de 0 kV y asciende abruptamente hasta un valor máximo de +150 kV en aproximadamente 5 ms, lo que refleja la rapidez con la que la sobretensión se propaga en la línea de transmisión. Este pico positivo es una respuesta directa a la energía de la descarga atmosférica que se transfiere al sistema.

A partir de este máximo, la tensión de la fase B comienza a descender, cruzando el eje de cero alrededor de los 10 ms y alcanzando un valor mínimo de -150 kV en aproximadamente 15 ms. Este comportamiento indica que la energía del sistema comienza a redistribuirse, mientras las oscilaciones reflejan el balance entre la capacidad inductiva y capacitiva de la línea. La amplitud de las oscilaciones disminuye progresivamente, con valores posteriores que se estabilizan alrededor de ± 50 kV, confirmando la efectiva disipación de la energía por parte del descargador tipo rayo.

Los valores proporcionados en las tablas del descargador como se muestra en la Figura 8, son esenciales para comprender y justificar el comportamiento observado en la fase B. Por ejemplo, considerando una corriente de descarga de 8,000 A, el voltaje de protección registrado asciende a 180,000 V. Este valor demuestra que el descargador está diseñado para limitar de manera efectiva los picos de sobretensión generados por eventos transitorios, como descargas atmosféricas. Al actuar en este rango, el descargador evita que los equipos conectados a la línea sufran daños irreparables debido a tensiones excesivas.

Arrester Data	
I [A]	U [V]
1	157132
10	171682
1000	204950
10000	223928

Figura 8: Tabla de valores proporcionados en la FASE B

En términos del voltaje de referencia (V_{ref}), su valor especificado de 160,000 V como se muestra en la tabla de la Figura 9, establece un límite operativo nominal para el sistema, lo que permite mantener la integridad de los componentes eléctricos incluso durante situaciones críticas. Este parámetro asegura que las sobretensiones se atenúen sin superar los niveles que podrían comprometer el funcionamiento seguro del sistema.

Attributes Characteristic		
DATA	UNIT	VALUE
Vref	Volts	160000
Vflash	<0: No gap	-1
Vzero	Volts	0
#COL		1
#SER		1
ErrLim	pu	0.05
Ilim	A	0.001

Figura 9: Tabla de atributos proporcionados en la FASE B

Por otro lado, los parámetros asociados a la precisión del descargador son fundamentales. Por ejemplo, un límite de error de 0.05 pu garantiza que el descargador responda con alta fiabilidad frente a impulsos transitorios. Esto significa que incluso con variaciones en las condiciones del sistema, el descargador mantiene su desempeño dentro de márgenes aceptables. Además, el límite de corriente de 0.001 A especifica la sensibilidad mínima del descargador, lo que asegura su activación en presencia de corrientes de baja magnitud que puedan representar riesgos.

Este conjunto de parámetros técnicos no solo explica la rápida disipación de las oscilaciones en la fase B, sino que también valida la efectividad del diseño del descargador para minimizar las tensiones residuales. Al integrar estos valores en el análisis, se refuerza la importancia de la correcta selección y dimensionamiento del descargador para proteger las líneas de transmisión y sus componentes asociados.

La evolución de la tensión en la fase B confirma la acción sincronizada y efectiva del descargador, limitando los valores

de tensión dentro de rangos seguros. Este análisis detalla cómo la rápida acción del sistema de protección asegura la reducción de las sobretensiones, minimizando los riesgos para la infraestructura eléctrica y preservando la integridad del sistema de transmisión. Como se observa en la Figura 10.

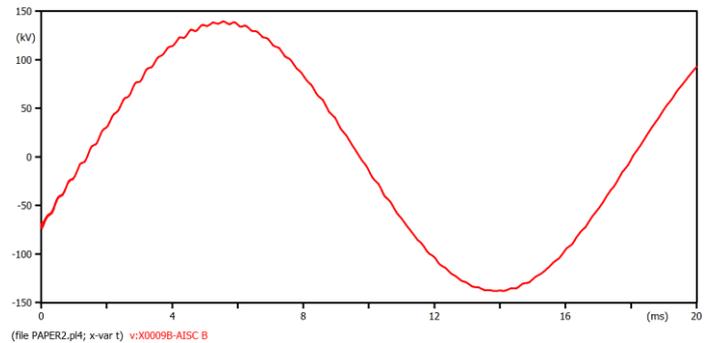


Figura 10: Curva del comportamiento transitorio FASE B

C. Caso 3: Voltaje durante la descarga atmosférica (Fase C).

En la fase C, se observa un comportamiento característico en respuesta a una descarga atmosférica. Inicialmente, la fase experimenta un pico de tensión positiva que alcanza aproximadamente los +157 kV. Este pico ocurre en el intervalo de tiempo entre 12 y 14 ms, valor que representa la máxima sobrecarga que la fase C experimenta debido a la descarga. Tras el pico positivo, la tensión disminuye rápidamente, alcanzando un valor negativo cercano a -157 kV. Este descenso ocurre en un corto periodo de tiempo, lo que refleja la rápida disipación de la energía asociada con la descarga.

El voltaje en la fase C sigue un patrón complementario al de las otras fases, pero con un retraso temporal en cuanto al momento en que se alcanza el pico positivo y se experimenta la caída de tensión. Este fenómeno es típico de los sistemas trifásicos bajo descarga atmosférica, donde cada fase responde de manera oscilante a la corriente de la tormenta, aunque con un desfase.

Las oscilaciones que se producen en la fase C son características de la interacción entre la descarga y el sistema de protección. La fase C se ve afectada por el descargador tipo rayo, que comienza a operar cuando el voltaje alcanza o supera el límite de 160 kV, disipando la energía de la sobretensión y protegiendo así al sistema. Esto resulta en una rápida caída de la tensión después del pico positivo, lo que permite que el voltaje se estabilice en valores más bajos y seguros para los equipos del sistema eléctrico.

Este comportamiento, donde se observa una rápida subida y posterior caída de la tensión, resalta la efectividad del descargador tipo rayo en la protección de la línea de transmisión demostrando cómo la energía del rayo es absorbida y manejada por el sistema de protección, asegurando que la sobretensión no afecte la integridad de la infraestructura eléctrica. Como se muestra en la figura 11.

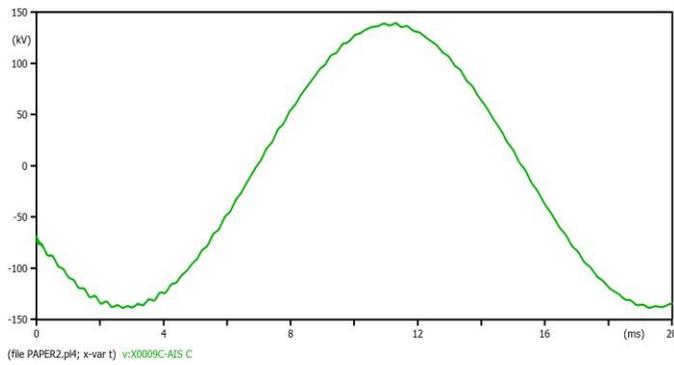


Figura 11: Curva del comportamiento transitorio FASE C

D. Caso 4: Energía disipada durante la descarga atmosférica (Fase T3).

Durante el evento de descarga atmosférica en la fase T3 de la línea de transmisión, se observó un comportamiento transitorio que refleja la interacción del sistema con la energía descargada. Inicialmente, el voltaje comenzó en un valor cercano a -150 kV, lo que indica una condición de alta tensión en el sistema antes de la incidencia de la descarga. Este valor representa un estado preexistente de tensión elevada, producto de la acumulación de energía en la línea.

En los primeros milisegundos del evento se registró una ligera oscilación en el voltaje, atribuida a la respuesta transitoria del sistema al impacto inicial de la descarga. Este comportamiento transitorio indica la capacidad del sistema para absorber y distribuir la energía de la descarga sin generar daños significativos a los componentes de la línea. La eficiencia de este proceso depende de la capacidad del descargador tipo rayo para manejar el incremento de tensión sin comprometer su funcionamiento.

A medida que la descarga avanza, el voltaje en la fase T3 comienza a aumentar de manera constante, alcanzando un pico de aproximadamente 150 kV a los 12 ms. Este aumento en el voltaje refleja la rapidez con la que la energía de la descarga se dispersa a través del sistema. La pendiente de incremento de voltaje, calculada en aproximadamente 25 kV/ms, proporciona una medida de la rapidez con la que el voltaje se eleva durante la descarga. Como se muestra en la Figura 12. Este valor es esencial para evaluar la capacidad del sistema de protección para manejar incrementos rápidos de voltaje sin causar fallos en el descargador.

El análisis de estos comportamientos transitorios, junto con el cálculo de la energía disipada, ofrece información sobre la capacidad del descargador tipo rayo para proteger el sistema. La energía absorbida y distribuida por el sistema a través de las oscilaciones iniciales y el posterior aumento del voltaje es gestionada de manera eficaz por el descargador, evitando que las sobretensiones alcancen niveles que puedan dañar los componentes de la infraestructura eléctrica. Estos resultados son fundamentales para el diseño de sistemas de protección robustos, asegurando la seguridad y eficiencia de las líneas de transmisión frente a eventos de descargas atmosféricas.

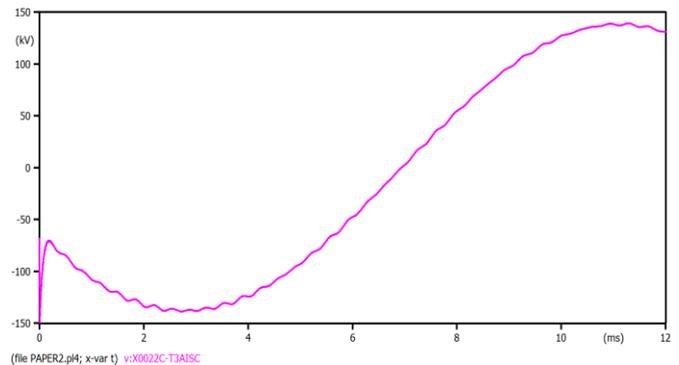


Figura 12: Curva del comportamiento transitorio FASE T3

V. RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos, el análisis incluye información detallada sobre las características operativas y de diseño de descargadores de sobretensión, utilizadas para proteger sistemas eléctricos de alta tensión frente a sobretensiones transitorias. Como se muestra en el Cuadro 1.

Tensión nominal (KV)	Tensión máxima (KV)	Corriente de descarga (KA)	Valores de fábrica (KA)
69	72.5	5	5
115	121	5	5
230	245	5	5
345	362	7	10
400	420	8	10
500	550	10	10

Cuadro 1: Valores de corriente del descargador

En la primera columna se especifican los valores de tensión nominal en kV, que corresponden a los niveles estándar de operación para los sistemas eléctricos protegidos por los descargadores. Estos valores incluyen 69 kV, 115 kV, 230 kV, 345 kV, 400 kV y 500 kV, representando las tensiones típicas en líneas de transmisión de media y alta tensión. La segunda columna indica la tensión máxima asociada a cada nivel nominal, es decir, el valor límite que el sistema puede alcanzar antes de que el descargador entre en funcionamiento.

La tercera columna muestra los valores de corriente de descarga, que representan la magnitud de corriente que el descargador puede manejar durante eventos transitorios como descargas atmosféricas. Estos valores varían entre 5 kA y 10 kA, dependiendo de la tensión nominal. Para tensiones más bajas, como 69 kV y 115 kV, la corriente de descarga es de 5 kA, mientras que, para tensiones más altas, como 400 kV y 500 kV, la capacidad de descarga aumenta a 8 kA y 10 kA, respectivamente. Finalmente, la cuarta columna describe los valores de fábrica en kA, que son equivalentes a los valores de corriente de descarga. Estos datos representan las capacidades estándares con las que se diseñan los descargadores, garantizando su confiabilidad y alineación con las normativas técnicas aplicables.

Este es un recurso esencial para comprender las relaciones entre la tensión nominal de un sistema, su capacidad de

resistencia frente a sobretensiones y la magnitud de energía que los descargadores pueden disipar de forma efectiva. Los valores proporcionados permiten establecer parámetros técnicos claros para evaluar el desempeño del descargador bajo condiciones críticas, como perturbaciones atmosféricas, y resultan de gran utilidad para estudios de simulación en software especializado como ATP Draw.

Para el efecto, se presenta un análisis comparativo entre tres alternativas de descargadores de sobretensión diseñados para proteger una subestación eléctrica de 230 kV nominales frente a sobretensiones transitorias es importante considerar no solo las tensiones nominales y de arqueo, sino también la forma en que cada descargador responde a diferentes niveles de corriente de descarga y las características de su capacidad de disipación de energía. Las tensiones nominales de 180 kV, 192 kV y 240 kV reflejan la adaptabilidad de cada descargador a distintas configuraciones del sistema eléctrico, lo que puede influir directamente en la protección y la seguridad de la subestación frente a sobretensiones transitorias. La selección de un descargador con una mayor tensión nominal proporciona una mayor capacidad para manejar sobretensiones de mayor amplitud, lo que es especialmente crucial en sistemas con mayores riesgos de picos de voltaje.

El análisis de la tensión de arqueo por frente de onda es un parámetro clave para evaluar la respuesta del descargador ante impulsos de alta frecuencia, como los causados por rayos o maniobras de desconexión. Los valores crecientes de 530 kV, 560 kV y 684 kV entre las alternativas indican que el descargador con la mayor capacidad (Alternativa 3) es el más eficiente para absorber y disipar estas sobretensiones rápidas sin comprometer la integridad del sistema. Esto es particularmente relevante para sistemas con alta actividad de descarga atmosférica, donde los picos de tensión pueden ser frecuentes y severos. De manera similar, la tensión máxima de arqueo a 100% de onda, que representa la capacidad del descargador para manejar impulsos de mayor duración, sigue el mismo patrón de incremento, lo que demuestra que la Alternativa 3 tiene un rendimiento superior en este aspecto.

En cuanto a las tensiones residuales para las distintas corrientes de descarga, el análisis revela que la Alternativa 3 no solo maneja con mayor eficacia las sobretensiones rápidas, sino que también es capaz de disipar más energía, lo que reduce significativamente la tensión residual que queda en el sistema. A medida que aumenta la corriente de descarga, las tensiones residuales en la Alternativa 3 alcanzan los 724 kV a 40 kA, lo que representa una mayor capacidad para proteger equipos sensibles frente a los efectos de corrientes elevadas. En contraste, las Alternativas 1 y 2 presentan valores inferiores de tensión residual (550 kV y 585 kV, respectivamente), lo que implica que estas opciones podrían no ser tan efectivas en la protección frente a descargas de mayor intensidad. Este análisis pone de manifiesto la importancia de elegir un descargador con una alta capacidad de disipación de energía, ya que puede prolongar la vida útil de los equipos eléctricos y minimizar la posibilidad de daños costosos. Además, una correcta selección del descargador adecuado depende de la evaluación de estos parámetros

técnicos en función de las características particulares de la subestación y el tipo de ambiente operativo al que se enfrentará, garantizando así una protección óptima contra sobretensiones y una mayor estabilidad del sistema de transmisión.

Características del descargador	Alternativa (1)	Alternativa (2)	Alternativa (3)
Tensión nominal (KV rms)	180	192	240
Tensión de arqueo por frente de onda (KV) y onda de 1200 KV/ μ s.	530	560	684
Tensión máxima de arqueo al 100% con onda de 1.2 \times 50 (KV cresta)	400	427	600
Tensión de arqueo por impulso de maniobra (KV cresta)	400	426	567
Máxima tensión residual (KV), con una onda de corriente de:			
5 KA	358	382	476
10 KA	400	427	535
20 KA	452	482	605
40 KA	550	585	724

Cuadro 2: Características de descargadores

VI. DISCUSIÓN

En la actualidad, la protección de sistemas eléctricos de alta tensión frente a sobretensiones transitorias es una prioridad para garantizar la continuidad del suministro y la protección de equipos sensibles. Estas sobretensiones, que pueden ser causadas por fenómenos naturales como rayos en las líneas de transmisión, tienen el potencial de dañar gravemente los equipos y afectar el funcionamiento del sistema eléctrico. Por esta razón, los descargadores de sobretensión son importantes en la protección de la infraestructura eléctrica, ya que son los encargados de absorber y disipar la energía de las sobretensiones, evitando que lleguen a niveles dañinos para los componentes del sistema [26].

La elección de un descargador adecuado depende de varios factores, entre ellos la tensión nominal del sistema, la capacidad para manejar impulsos de alta frecuencia y la eficiencia en la disipación de energía. Los sistemas eléctricos de alta tensión, como aquellos de 230 kV o más, están expuestos a riesgos mayores debido a la intensidad de los fenómenos de sobretensión. En este contexto, es imprescindible que los descargadores sean capaces de soportar no solo las tensiones transitorias típicas, sino también los picos de energía derivados de corrientes elevadas. La tensión máxima de arqueo, que se refiere a la capacidad del descargador para manejar impulsos de mayor duración, y la tensión de arqueo por frente de onda, que evalúa la respuesta ante impulsos rápidos, son dos parámetros

VIII. REFERENCIAS

fundamentales para dimensionar adecuadamente estos dispositivos. Sin embargo, para garantizar que el descargador seleccionado sea capaz de operar de manera eficaz bajo condiciones reales, es necesario contar con herramientas de simulación avanzadas, que permitan modelar el comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios de perturbación [27].

Aquí es donde el uso de software especializado como ATP Draw se vuelve esencial. Este tipo de herramientas permiten simular detalladamente los transitorios eléctricos, lo que facilita la evaluación de cómo los descargadores se comportarán ante diferentes tipos de sobretensiones. La simulación en ATP Draw no solo permite modelar las características estáticas de los descargadores, sino que también permite evaluar su rendimiento dinámico frente a situaciones críticas, como las generadas por rayos. Sin una herramienta de simulación como ATP Draw, la selección de un descargador adecuado sería mucho más compleja y menos precisa. Los datos generados por estas simulaciones ofrecen una visión integral sobre la disipación de energía y las tensiones residuales, lo que facilita la elección de la opción de protección más adecuada [28].

Además, los sistemas de transmisión de alta tensión pueden experimentar eventos de sobretensión en diversas formas y magnitudes, contar con un modelo de simulación asegura que los descargadores se seleccionen según las necesidades específicas del sistema, garantizando una respuesta eficiente ante cualquier perturbación. Los resultados de las simulaciones también proporcionan información para la toma de decisiones respecto al mantenimiento preventivo y la planificación de futuras actualizaciones en el sistema de protección. La capacidad de prever y simular escenarios antes de implementarlos en el mundo real no solo reduce el riesgo de fallos, sino que también los costos operativos y de mantenimiento del sistema. Por tanto, el uso de ATP Draw no solo es una herramienta técnica necesaria, sino también una estrategia fundamental para asegurar la confiabilidad y seguridad de los sistemas eléctricos de alta tensión [27].

VII. CONCLUSIONES

Una vez culminado el proceso de simulación en el software ATP Draw, se logró cumplir con los objetivos establecidos en el análisis de descargadores de sobretensión para sistemas eléctricos de alta tensión. En primer lugar, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de los catálogos de descargadores tipo rayo disponibles en el mercado, especificando los principales parámetros técnicos de funcionamiento de cada dispositivo. Además, se investigó la respuesta dinámica de estos descargadores frente a diferentes tipos de descargas atmosféricas y variaciones en las condiciones de operación, con el fin de comprender con mayor precisión su comportamiento y su capacidad para reducir los efectos de las sobretensiones en la infraestructura eléctrica. Asimismo, los resultados obtenidos de las simulaciones se compararon con datos experimentales y estudios previos, permitiendo validar la exactitud y fiabilidad de los modelos utilizados. A partir de este análisis comparativo, se formularon recomendaciones basadas en los resultados, orientadas a mejorar la selección de descargadores y garantizar la protección integral y eficiente del sistema eléctrico frente a perturbaciones transitorias.

- [1] IEEE C62.11-2012: IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits DOI: [Agent-based coordination for charging electric vehicles | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore](#)
- [2] IEC 60099-4: Surge Arresters - Part 4: Metal-Oxide Surge Arresters Without Gaps for AC Systems. <https://www.iec.ch/>
- [3] Greenwood, A., Electrical Transients in Power Systems. Wiley, 1991
- [4] Machowski, J., Bialek, J., & Bumby, J. R., Power System Dynamics: Stability and Control. Wiley, 2008 [Technologies for the Wireless Future: Wireless World Research Forum \(WWRF\) | Wiley](#)
- [5] CIGRÉ Study Committee B3, "Impact of Lightning on Power System Components" <https://www.cigre.org/>
- [6] Exposito, A., & CIGRÉ Study Committee. (2010). *Modeling of Overvoltage Protection in Power Systems using ATP Draw*. CIGRÉ. ISBN: 978-2-85873-129-1.
- [7] IEEE Std 1410-2020. (2020). *IEEE Guide for the Application of Surge Arresters in Power Systems*. IEEE. DOI: [10.1109/IEEESTD.2020.9118965](#)
- [8] ATP-EMTP. (2019). *ATP Draw: A Guide to Transient Analysis*. <https://www.emtp.com/>
- [9] IEEE C62.1-2002: IEEE Standard for Surge Arresters for Power Systems <https://ieeexplore.ieee.org/document/1244811>
- [10] IEEE C62.62-2007: IEEE Standard for Surge Arresters for Low-Voltage AC Power Circuits <https://ieeexplore.ieee.org/document/4304400>
- [11] IEC 61850. (2011). *Communication Networks and Systems in Substations*. International Electrotechnical Commission. <https://www.iec.ch/>
- [12] ATP Draw (Advanced Transients Program for Power Systems) "Modeling and Simulation of Power Systems: An Introduction," Springer, 2016 <https://www.springer.com/gp/book/9789811006289>
- [13] "High Voltage Engineering and Testing," Wiley-IEEE, 2010.
- [14] IEEE Std 80-2000. (2000). *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*. IEEE. DOI: [10.1109/IEEESTD.2000.87272](#)
- [15] Lloyd, A. J., & Spee, H. (2006). *Power Systems Protection: Principles and Practice*. Wiley.
- [16] Liu, X., & Zhang, L., "Design and Performance of Surge Arresters for High Voltage Transmission Lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 3, pp. 1720-1727, 2010. [Characteristics of the Chain Magnetic Film Storage Element | IBM Journals & Magazine | IEEE Xplore](#)
- [17] IEC 60071-2: Insulation Co-ordination - Part 2: Application Guide for High Voltage Transmission Systems.
- [18] IEC 60076-3: Power Transformers – Part 3: Insulation Levels, Dielectric Tests, and External Clearances in Air.
- [19] Pal, S., & Dey, D. (2013). *Power System Simulation and MATLAB: A Practical Approach*. CRC Press. ISBN: 978-1466554343. <https://www.crcpress.com/Power-System-Simulation-and-MATLAB-A-Practical-Approach/Pal-Dev/p/book/9781466554343>
- [20] Emtip-ATP. (2018). *Guide to ATP (Alternative Transients Program) Simulations*. <https://www.emtp.com/>
- [21] IEEE Std 1406-1997. (1997). *IEEE Guide for the Application of Surge Arresters for Alternating-Current Systems*.
- [22] IEEE Std 1159-2019: IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
- [23] IEEE Std 1243-1997: IEEE Guide for the Analysis of Transients in Power Systems.
- [24] IEEE C62.22-2017: IEEE Guide for the Application of Surge Protective Devices (SPDs) in Low-Voltage Systems.
- [25] IEEE Std 1159-2019: IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
- [26] IEEE Power & Energy Society. (2017). *Guideline for the Selection of Surge Arresters in Electric Power Systems*. IEEE Power & Energy Society Technical Report, IEEE. (2017).
- [27] Kuffel, E., & Kuffel, J. (2000). *The ATP-EMTP User's Manual*. Advanced Transients Program.
- [28] Gómez, A. (2007). *Guía de Simulación de Protecciones en Redes de Distribución con ATP Draw*. Universidad de Barcelona.

