

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v9i17.0329>

ANÁLISIS DEL FENÓMENO TRANSITORIO POR DESCARGAS PARCIALES UTILIZANDO EL SOFTWARE ATP

ANALYSIS OF THE TRANSIENT PHENOMENON DUE TO PARTIAL DISCHARGES USING ATP SOFTWARE

Lopez-Naula Jairo ¹; Mullo-Pallo Mauricio ²

¹ Universidad Técnica de Cotopaxi. Latacunga, Ecuador. Correo: jairo.lopez0577@utc.edu.ec.

² Universidad Técnica de Cotopaxi. Latacunga, Ecuador. Correo: mauricio.mullo@utc.edu.ec.

Resumen

El estudio desarrollado aborda la simulación de fenómenos transitorios asociados a descargas parciales en sistemas eléctricos de potencia, con el fin de comprender su comportamiento bajo condiciones transitorias y su influencia en la integridad de los sistemas de transmisión. El estudio considera una red representativa de 138 kV, con modelos de líneas distribuidas y parámetros concentrados, donde la configuración de conductores se define como la disposición geométrica y forma de interconexión eléctrica entre fases. Los resultados muestran frentes de onda con tiempos de ascenso cercanos a 0,5 ms y amplitudes transitorias significativas, coherentes con eventos reales. La solución propuesta consiste en el uso de modelación detallada para identificar trayectorias críticas de propagación y evaluar la severidad del fenómeno. La importancia del estudio radica en demostrar que ATP permite reproducir con precisión fenómenos rápidos, optimizando el diagnóstico del comportamiento transitorio y apoyando decisiones técnicas orientadas a mejorar la confiabilidad operativa y prolongan la vida útil del sistema eléctrico.

Palabras clave: Propagación transitoria, modelado computacional, aislamiento eléctrico, fenómenos transitorios, descargas parciales.

Abstract

This study addresses the simulation of transient phenomena associated with partial discharges in electrical power systems, aiming to understand their behavior under transient conditions and their influence on the integrity of transmission systems. The study considers a representative 138 kV network, using distributed line models and lumped parameters, where the conductor configuration is defined as the geometric arrangement and form of electrical interconnection between phases. The results show wavefronts with rise times close to 0.5 ms and significant transient amplitudes, consistent with real-world events. The proposed solution involves the use of detailed modeling to identify critical propagation paths and assess the severity of the phenomenon. The study's significance lies in demonstrating that ATP (Automatic Phase Transformation) allows for the accurate reproduction of rapid phenomena, optimizing the diagnosis of transient behavior and supporting technical decisions aimed at improving operational reliability and extending the lifespan of the electrical system.

Keywords: Transient propagation, computational modeling, electrical insulation, transient phenomena, partial discharges.

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 11 de noviembre de 2025.

Fecha de aceptación: 12 de enero de 2026.

Fecha de publicación: 19 de febrero de 2026.



1. Introducción

Los sistemas eléctricos son afectados por una abundante cantidad de señales transitorias de corriente y de tensión, las cuales tienen el potencial de perjudicar su rendimiento óptimo y el de los equipos que puedan estar conectados e interconectados [1]. Este tipo de señales pueden ser causadas por sucesos que ocurren dentro o fuera del sistema eléctrico de potencia. Los fenómenos externos son provocados por las descargas atmosféricas que afectan directamente las líneas de alta y media tensión, o por sobretensiones inducidas en relación con los campos electromagnéticos que emiten los rayos [2].

Los signos iniciales más importantes de que un sistema de aislamiento se está deteriorando, como los cables XLPE, las máquinas rotativas y los transformadores, son las descargas parciales (DP) [3]. El análisis de este asunto ha tomado un papel estratégico en la ingeniería eléctrica contemporánea a nivel global, ya que afecta directamente la confiabilidad y continuidad operativa de las redes de media y alta tensión.

Instituciones como IEC y CIGRÉ han creado procedimientos y estándares particulares para su detección, modelado y evaluación [4]. En este escenario, la simulación por computadora se ha vuelto una herramienta indispensable para prever el comportamiento transitorio de estos fenómenos sin poner en riesgo equipos reales en el laboratorio.

El programa ATP (Alternative Transients Program) es uno de los programas más empleados para analizar transitorios eléctricos. Se trata de una plataforma de cálculo electromagnético que utiliza el método EMTP y que ha sido ampliamente adoptada en empresas distribuidoras y universidades ubicadas en Asia, Europa y Norteamérica [5]. Su flexibilidad posibilita que se modelen descargas parciales como impulsos de corriente o de onda doble exponencial, se analice su propagación en líneas de transmisión y se valore su efecto en diferentes puntos de medición. Alemania, Brasil y Japón han puesto en marcha modelos híbridos de ensayo-simulación que emplean ATP y ATPDraw [6], los cuales se combinan con sensores HFCT y

métodos de detección en banda ancha para supervisar en línea cables subterráneos en redes urbanas.

En Ecuador, el vertiginoso desarrollo de la infraestructura eléctrica ha promovido la utilización a gran escala de cables aislados en las redes primarias de distribución de 13.8 kV, particularmente en las áreas urbanas de Guayaquil, Cuenca y Quito [7]. No obstante, el seguimiento de fenómenos precursores como las descargas parciales queda en segundo plano, ya que la mayor parte de los sistemas de monitoreo instalados en el país todavía se centran en sobrecorrientes o fallas permanentes. Este vacío técnico crea una amenaza latente de averías imprevistas en cámaras subterráneas o cables enterrados, donde el acceso físico para la inspección es limitado [8]. La simulación a través de ATP se vuelve un instrumento estratégico para prever conductas críticas y crear esquemas de protección preventiva frente a esta realidad.

Además, las regulaciones ecuatorianas (especialmente el Código Eléctrico Nacional y las

normas INEN) todavía no tienen procedimientos concretos para evaluar descargas parciales en redes de media tensión [9]. Esto brinda una posibilidad técnica y científica para establecer futuras regulaciones a través de investigaciones que se basan en modelamiento y análisis transitorio [10]. El uso de ATP en este ámbito no solo posibilita la replicación de condiciones reales de operación, sino que también hace posible determinar parámetros fundamentales como la magnitud, la frecuencia y la atenuación de los pulsos producidos por DP en cables XLPE empleados en el país. Por lo tanto, es esencial el análisis del fenómeno transitorio de descargas parciales mediante software especializado para aumentar la sostenibilidad y la confiabilidad de los sistemas de distribución eléctrica en cada país [11].

2. Metodología

Métodos de las descargas parciales

El modelo a-b-c (también llamado modelo de condensador) puede utilizarse para representar las

descargas parciales en cavidades cerradas [12]. Este modelo se fundamenta en la hipótesis de la cavidad cerrada se puede representar como capacitancia, el aislamiento saludable próximo a ella se puede representar como una capacitancia distinta y otra capacitancia extra puede simbolizar el material aislante restante. En tal situación, la carga aparente Q que un detector de DP percibe puede expresarse de la siguiente manera:

$$Q = C_b * \Delta V_c \quad (1)$$

Donde C_b es la capacitancia del aislamiento sano que está al lado de la cavidad, y ΔV_c es la variación de voltaje que ocurre debido a la descarga en el interior de la cavidad. Se toma esta cantidad como una medida de descarga precisa, aunque no solo depende de las dimensiones de la cavidad, sino también del grosor del aislamiento [13]. La energía de una descarga individual, que se expresa como: está relacionada con el modelo abc.

$$W = 0.7 * Q * V_i \quad (2)$$

donde, Q es la carga aparente de una descarga individual y V_i la tensión de inicio de descarga.

Modelado eléctrico del sistema trifásico

Para cada fase del sistema trifásico mediante parámetros eléctricos distribuidos, permitiendo modelar con realismo el comportamiento dinámico del sistema ante fenómenos transitorios. A diferencia de los modelos concentrados, esta formulación considera la naturaleza continua de la línea, siendo fundamental para analizar la propagación de impulsos de alta frecuencia, los originados por descargas parciales [14].

Los parámetros R , L , C y G representan respectivamente la resistencia serie, inductancia serie, capacitancia transversal y conductancia transversal por unidad de longitud. La resistencia modela pérdidas óhmicas, la inductancia almacena energía magnética, la capacitancia representa el acoplamiento eléctrico entre conductores y tierra, y la conductancia incorpora pérdidas dieléctricas del aislamiento.

Impulso de descarga parcial

La corriente de descarga parcial se modela mediante una función doble

exponencial, la cual permite reproducir de manera realista el rápido crecimiento y la posterior disipación del impulso [15]. Este tipo de representación es ampliamente aceptado para describir fenómenos transitorios de corta duración y alta pendiente temporal.

$$i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (3)$$

La ecuación 3, I_0 corresponde a la amplitud máxima del impulso, mientras que α y β son constantes de decaimiento que controlan la velocidad de crecimiento y amortiguamiento de la señal. El tiempo t representa la evolución temporal del fenómeno. La diferencia entre exponentes permite capturar la asimetría típica de las descargas parciales reales.

Velocidad de propagación del impulso

La velocidad de propagación del impulso electromagnético se obtiene a partir de los parámetros inductivos y capacitivos del sistema, siendo una magnitud clave para la localización temporal de eventos transitorios. En la Ecuación 4, permite relacionar directamente las propiedades físicas

del medio con la dinámica del impulso.

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4)$$

Los parámetros L y C representan la inductancia y capacitancia por unidad de longitud del sistema. La velocidad v depende inversamente del producto LC , indicando que medios con mayor almacenamiento de energía eléctrica o magnética presentan velocidades de propagación menores, lo cual explica los desfases temporales entre fases observados en la simulación.

Tiempo de propagación hacia el punto de medición

En la Ecuación 5, permite determinar el tiempo que tarda un impulso en propagarse desde su punto de origen hasta el punto de medición. Es fundamental para el análisis temporal de señales y para la identificación de la ubicación espacial de eventos transitorios.

$$t_p = \frac{l}{v} \quad (5)$$

El parámetro l corresponde a la longitud recorrida por el impulso, mientras que v es la velocidad de propagación previamente calculada.

El tiempo t_p representa el retardo introducido por el sistema físico, el cual varía entre fases debido a diferencias en trayectorias, acoplamientos y parámetros eléctricos.

Impedancia característica de la línea

La impedancia característica define la relación entre tensión y corriente de una onda viajera en la línea, siendo esencial para analizar reflexiones y transmisión de impulsos. En la Ecuación 6, es clave para interpretar la forma y amplitud de las señales medidas.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (6)$$

Los parámetros L y C representan la inductancia y capacitancia distribuidas del sistema. La impedancia Z_0 depende del cociente entre ambos, reflejando las propiedades electromagnéticas del medio. Una correcta estimación de Z_0 permite predecir el comportamiento del impulso ante discontinuidades eléctricas.

Atenuación del impulso a lo largo de la línea

La Ecuación 7, de atenuación describe la reducción progresiva de la amplitud del impulso conforme se propaga a lo largo del sistema. Este fenómeno es relevante para explicar la disminución de magnitud observada en señales medidas a mayor distancia [16].

$$V(x) = V_0 e^{-\alpha x} \quad (7)$$

El parámetro V_0 representa la amplitud inicial del impulso, α es el coeficiente de atenuación del medio y x la distancia recorrida. La dependencia exponencial indica que las pérdidas aumentan con la longitud, influyendo directamente en la detectabilidad de las descargas parciales.

Relación entre carga aparente y variación de tensión

Permite cuantificar la carga aparente asociada a una descarga parcial a partir de la variación de tensión generada, en la Ecuación 8. Es ampliamente utilizada en diagnóstico de aislamiento eléctrico.

$$Q = C_b \Delta V_c \quad (8)$$

El parámetro C_b representa la capacitancia equivalente del sistema, mientras que ΔV_c corresponde a la variación instantánea de tensión provocada por la descarga. La carga Q es un indicador directo de la severidad del fenómeno y su potencial impacto sobre el aislamiento.

Potencia instantánea del impulso

La potencia instantánea describe la transferencia de energía durante la ocurrencia del impulso, permitiendo analizar la intensidad energética del evento transitorio, en la Ecuación 9.

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (9)$$

En lo que $v(t)$ e $i(t)$ representan la tensión y corriente instantáneas del impulso. La potencia $p(t)$ varía rápidamente en el tiempo, reflejando la naturaleza altamente transitoria del fenómeno y su impacto térmico y electromagnético local.

Energía total de la descarga parcial

La energía total permite evaluar el efecto acumulativo de la descarga parcial sobre el sistema eléctrico, en Ecuación 10, siendo un parámetro

clave para análisis de degradación del aislamiento.

$$W = \int_0^T p(t) dt \quad (10)$$

El intervalo de integración T representa la duración del impulso, mientras que $p(t)$ es la potencia instantánea. La energía W cuantifica el daño potencial causado por la descarga y su contribución al envejecimiento del sistema.

Diferencia de tiempo entre fases para localización

La diferencia temporal entre las señales registradas en cada fase permite identificar la ubicación espacial del fenómeno transitorio dentro del sistema trifásico. Este enfoque es fundamental en técnicas de localización basadas en tiempo de llegada en la Ecuación 11.

$$\Delta t_{ij} = \frac{|x_i - x_j|}{v} \quad (11)$$

Las diferencias de tiempo dependen de la velocidad de propagación, la geometría del sistema y los parámetros eléctricos de cada fase. Este análisis explica por qué las fases no presentan respuestas simultáneas en la simulación

ATPDraw, reforzando la validez del modelo utilizado.

Consecuencias de las descargas parciales

A pesar de ser muy útil durante muchas décadas, este modelo recibió críticas. donde se consideró que la capacitancia solo se aplica a electrodos metálicos y no a las superficies aislantes en oposición [17]. Por consiguiente, se diseñó un modelo alternativo, que se conoce como modelo de Pedersen y que está fundamentado en la teoría electromagnética:

$$Q = k * \Omega * \varepsilon_r * \varepsilon_0 * (E_i - E_1) \nabla \lambda_0 \quad (12)$$

Donde Q es la carga que se induce en el electrodo de medición a partir de la descarga parcial en una cavidad, k representa el factor geométrico de la misma, Ω se refiere al volumen de dicha cavidad, E_i es el campo eléctrico inicial para generar corriente continua, E_1 es el límite del campo eléctrico para la ionización, ε_r es la permitividad relativa del material aislante sólido circundante, ε_0 es la permitividad del espacio libre y $\nabla \lambda_0$ corresponde a la función que establece cómo se relacionan entre sí el voltaje entre los electrodos y el

campo eléctrico existente en el lugar donde está situada la cavidad. Se determina la cantidad $(E_i - E_1)$ de acuerdo con el criterio de corriente continua [18], es decir:

$$(E_i/p) = (1 + B/\sqrt{2} * a * p) E_i/p \quad (13)$$

Donde B es una propiedad constante del gas en la cavidad, a la distancia entre el radio de la cavidad y p la presión dentro de ella. Como se explica en [19], el beneficio de la carga Q está vinculada con varios parámetros. Este modelo hacía referencia a las descargas de tipo serpentín. El modelo mencionado fue precedido por el modelo planteado en. El modelo establece que la carga aparente Q se calcula usando la ecuación siguiente:

$$Q = \varepsilon_r * \varepsilon_0 * E_2 * \gamma * V/1_a \quad (14)$$

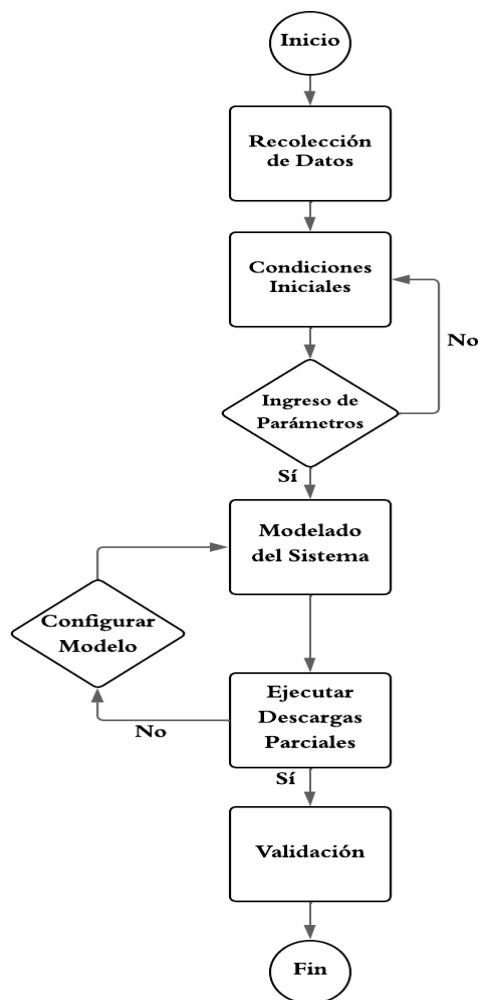
Donde ε_r y ε_0 , como en [19], V representa el volumen de la cavidad, y equivale a λ_0 , E_2 se refiere a la tensión inicial de la descarga parcial según la ley de Paschen y a es el factor geométrico que depende del cociente entre los ejes de la cavidad. Este modelo se basa fundamentalmente en las descargas de tipo Townsend, pues tiene en cuenta la tensión inicial de la

descarga parcial desde el enfoque de la ley de Paschen. En realidad, los modelos comparten varios parámetros.

Se emitieron críticas al modelo de Pedersen, en las que se apuntó que este es válido para condiciones experimentales iniciales y que es esencial para el modelo. El modelo supone una ruptura en un espacio uniforme (la cavidad se rompe, aunque no es estrictamente así; lo que ocurre es una redistribución de cargas en la superficie de la cavidad). Las críticas posteriores provinieron de, donde se señaló que la capacitancia cambia en función de las cargas espaciales y que el cambio de capacitancia del sistema con respecto a las cargas espaciales fue refutado mediante las ecuaciones de Pedersen [20]. No obstante, es importante señalar que el modelo de Pedersen, en lo que se refiere a ciertos resultados experimentales con cavidades cerradas en polímeros, mostró un buen rendimiento (en comparación con el modelo del condensador) y proporcionó valores teóricos de descarga más próximos a los experimentales [21]. Por otra parte, es importante destacar que en estos

experimentos únicamente se estudiaron las descargas parciales bajo condiciones iniciales de experimento.

La Figura 1, ilustra una secuencia metodológica estructurada e iterativa que inicia con la recolección sistemática de información relevante y el establecimiento riguroso de condiciones iniciales. Posteriormente, se incorpora una etapa decisional orientada al ingreso y verificación de parámetros, la cual permite retroalimentación en caso de inconsistencias. Superada esta fase, se procede al modelado formal del sistema, seguido de la configuración detallada del modelo para asegurar coherencia física y numérica. La ejecución de los eventos simulados constituye el núcleo del proceso, habilitando ciclos de ajuste cuando los resultados no son satisfactorios. Finalmente, el procedimiento culmina con una etapa de validación, garantizando la confiabilidad y consistencia de los resultados obtenidos antes de cerrar el proceso analítico.

Figura 1. Flujograma del modelo simulado

3. Resultados y discusión

La simulación desarrollada en ATPDraw cumple una función fundamental como herramienta de validación, análisis y comprensión del comportamiento dinámico del sistema eléctrico bajo estudio, permitiendo reproducir de manera controlada fenómenos transitorios que, en condiciones reales de operación, resultan difíciles de medir

con precisión o implican elevados costos y riesgos operativos [22]. En particular, la modelación del sistema trifásico y de los eventos transitorios asociados permite analizar la propagación temporal de las señales eléctricas en cada fase, evidenciando los desfases temporales observados en las formas de onda simuladas.

Parámetros utilizados en la simulación

La simulación radica en la representación detallada del fenómeno de propagación electromagnética en líneas y conductores reales, donde cada fase presenta características eléctricas propias (impedancia, inductancia, capacitancia y acoplamientos mutuos). Esto explica la separación temporal entre fases observada en los resultados, ya que los impulsos transitorios no se propagan simultáneamente, sino que están condicionados por la velocidad de propagación del medio y por las discontinuidades eléctricas del sistema.

Modelación de la línea [23]

Tabla 1. Coordenadas de las fases de la torre

	X	Y
Ground Wire	0 m	32.0 m
Conductor Fase A	3.1 m	24.0 m
Conductor Fase B	-3.3 m	21.0 m
Conductor Fase C	3.6 m	18.0 m

La caída momentánea de tensión (sag) para el sistema de 138 kV se asume:

Conductores de fase: 6 m

Alambre de apantallamiento: 5 m

Tabla 2. Parámetros de conductor de fase y cable de guarda

Tipo	Conductor de Fase	Cable de Pantalla
Conductor	Tubular	Solid
DC-Resistencia	0.05 Ω/km	0.50 Ω/km
GMR	11.73 mm	6.0 mm
Diámetro externo	28.8 mm	17.0 mm
Diámetro interno	9.6 mm	-

Modelo eléctrico de la torre de transmisión de 138 kv [24]

$$h_{MATS} = 20 \text{ m}$$

$$r_{MATS} = 5 \text{ m}$$

$$L_{MITS} = 1 \mu H/m$$

Para los aisladores:

C entre 10 pF a 100 pF

L = 0.002 mH

R de pie de torre = 10 Ω

Modelación de una barra [25]

La subestación aislada en aire con esquema de barra doble será modelada mediante un modelo de línea de parámetros distribuidos.

El detalle de la geometría de ubicación de las fases y las características de sus conductores en las barras se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 3. Coordenadas X-Y del sistema de las barras de 138 kV

Phase	X-Coordinate	Y-Coordinate
Phase A	-2.8 m	5.0 m
Phase B	0.0 m	5.0 m
Phase C	2.8 m	

Table 4. Especificaciones de la barra 138 kV

Parameter	Value
Conductor Type	Tubular
DC-Resistance	0.005 Ω/km
GMR	59.26 mm
Outer Diameter	60.0 mm
Inner Diameter	50.0 mm

Modelación de un transformador [25]

El modelo de transformador para análisis de transitorios debe considerar las capacitancias que se presentan entre las partes vivas del equipo y tierra. Los valores que se consideran para las simulaciones se detallan a continuación.

Line-to-ground capacitances HV side: 4 nF

Line-to-ground capacitances LV side: 3 nF

Inter-Winding capacitances HV-LV: 3 nF

Modelación de interruptores

Los interruptores se modelarán, para análisis de transitorios, mediante sus

efectos capacitivos con los valores que se presentan a continuación.

Line-to-ground capacitances per side: 50 pF

Line-to-Line capacitances: 5 pF

Modelación de transformadores de medida y protección

Los transformadores de medida y protección serán modelados mediante sus efectos capacitivos a tierra asumiendo un valor de 500 Pf

A. Validación del sistema de medición de PD trifásica

El modelo fue desarrollado con el software ATPDraw, un instrumento que se utiliza frecuentemente para estudiar sucesos transitorios en sistemas eléctricos de potencia. La simulación se centró en cómo

funciona el sistema de medición de descargas parciales (PD) a lo largo de una línea llamada CC (Cable Conductor), que une la fuente de impulsos con la subestación receptora. Este esquema facilita una representación realista de la difusión de las señales de PD generadas por un calibrador, que viajan por el cable y simulan el comportamiento físico de las descargas en una línea aérea bajo condiciones controladas. El objetivo es estudiar su distorsión y atenuación.

El calibrador emite un pulso que funciona como una señal de PD simulada; esta se difunde a través de la línea CC y es registrada por la subestación después de haber recorrido cierta distancia. Este método experimental es esencial para entender de qué manera los parámetros eléctricos del medio de transmisión influyen en la señal de una descarga parcial. Los hallazgos posibilitan la evaluación de la sensibilidad del sistema de detección y la calibración de los aparatos de medición, lo que asegura una interpretación exacta de los eventos de PD en situaciones reales. De igual modo, permite examinar la relación entre la longitud del cable, la

magnitud del pulso y la respuesta que ofrece el sistema.

La línea CC se simuló con una altura cercana a los 3 metros, imitando así un montaje realista. Con esta disposición, se pueden calcular teóricamente las propiedades de propagación de la línea en función de la frecuencia, partiendo del supuesto de que las señales PD tienen componentes con frecuencias muy altas. La modelación posibilita el reconocimiento de las consecuencias de la atenuación, la dispersión y las pérdidas dieléctricas; estos son elementos fundamentales para establecer la exactitud en la localización de fallos y en el hallazgo de descargas parciales en sistemas eléctricos de potencia.

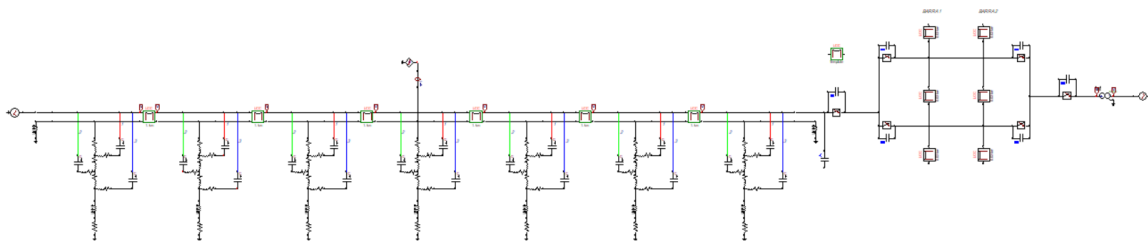
En una etapa posterior, se desarrolló un modelo de medición en línea trifásico que permite extender el análisis del sistema de PD a líneas CC trifásicas. Sin embargo, se recomienda ampliar el estudio a líneas de 10 metros de altura para simular condiciones reales de redes de media tensión. Esta perspectiva posibilitará analizar el efecto de la distancia, el acoplamiento electromagnético entre las fases y

las variaciones en la propagación de impulsos en configuraciones más complejas desde el punto de vista estructural.

El modelo de simulación realizado en ATPDraw respaldado en [26], se presenta en la Figura.2, donde se puede ver la configuración total del sistema que mide descargas parciales. La fuente de excitación y el generador de impulsos calibrado están a la izquierda, después se encuentra la línea CC, que se ha

modelado a través de segmentos distribuidos con inductancias, resistencias y capacitancias representativas. La subestación receptora, que está a la derecha, consiste en una serie de transformadores, acopladores y nodos de conexión que posibilitan la detección del pulso de PD. Este sistema posibilita que se examinen con exactitud la distorsión, propagación y reflexión de la señal a lo largo de la línea simulada.

Figura 2. Sistema simulado en ATPDraw



Desde un punto de vista diagnóstico, esta separación temporal es altamente valiosa, ya que constituye la base para técnicas avanzadas de localización de descargas parciales por tiempo de arribo (Time of Arrival, TOA)[27]. Las diferencias de tiempo entre fases permiten estimar con precisión la posición espacial del defecto, transformando el sistema trifásico en un sensor distribuido. En consecuencia, los resultados obtenidos no solo validan el modelo

de ATPDraw, sino que confirman su capacidad para reproducir fenómenos físicos reales con alto grado de fidelidad.

B. Análisis de transitorios en la simulación

El comportamiento temporal diferenciado observado entre las fases A, B y C en las respuestas transitorias de tensión no es un efecto aleatorio, sino la consecuencia directa de la propagación electromagnética de

impulsos de descarga parcial (DP) en un sistema trifásico distribuido. Cada fase presenta un tiempo de llegada distinto debido a la combinación de tres factores fundamentales: la posición espacial relativa de la fuente de descarga, las diferencias en la impedancia distribuida de cada conductor y el acoplamiento electromagnético entre fases. La separación temporal entre fases se explica, en primer lugar, por la velocidad de propagación finita de los impulsos de alta frecuencia, que depende de la inductancia y capacitancia distribuidas del conductor. Dado que la DP se origina en un punto localizado del sistema, la distancia efectiva recorrida por el impulso hacia cada punto de medición no es idéntica, generando retardos medibles del orden de microsegundos. Este fenómeno es coherente con la teoría de líneas de transmisión, donde el tiempo de propagación ($t = l/v$) varía según la longitud efectiva del trayecto electromagnético.

La señal es de tipo impulso, con un aumento brusco y una posterior caída rápida; esto es típico de sucesos que tienen una duración

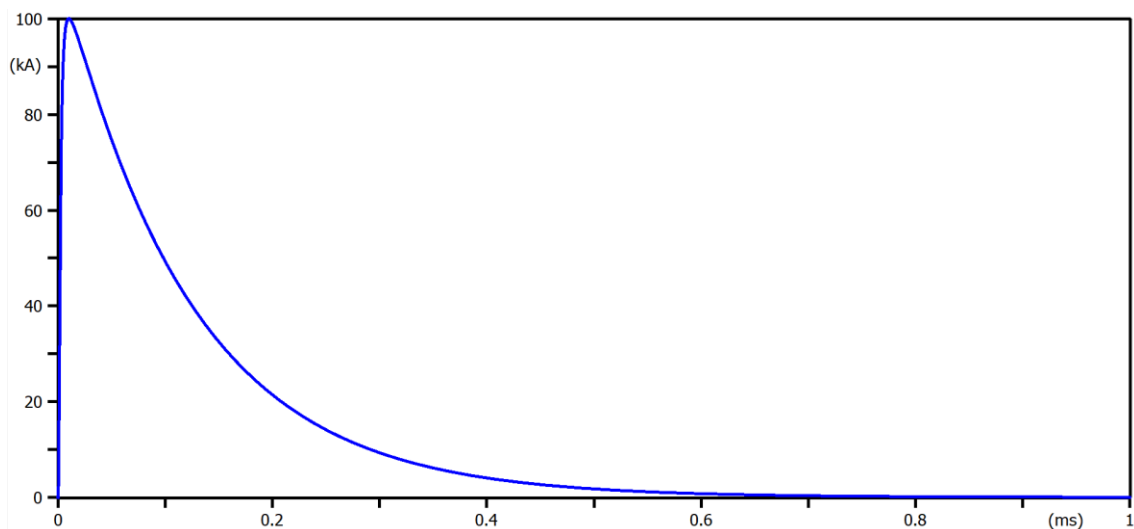
muy corta y una inclinación inicial alta como se observa en la Figura 3. El fenómeno tiene una magnitud instantánea que se determina por la amplitud alcanzada en el punto máximo; la forma asimétrica del pulso, en cambio, indica que ha ocurrido casi de inmediato una liberación de energía seguida de una disipación exponencial regulada por el medio. Este tipo de conducta se relaciona generalmente con irregularidades internas en los materiales aislantes, donde las anomalías pequeñas generan descargas breves. La resolución temporal utilizada facilita la captura precisa de la cresta principal y sus oscilaciones residuales subsiguientes, que son esenciales para análisis comparativos posteriores entre distintos escenarios simulados.

La pendiente inicial del impulso ofrece datos fundamentales acerca de la rapidez con que se transfiere la carga vinculada al fenómeno observado. A medida que la pendiente sea más alta, el evento impactará con mayor agresividad los componentes periféricos del sistema eléctrico. El nivel de amortiguamiento natural del medio

en el que se genera la perturbación es indicado por la cola del pulso; esto hace posible determinar si el entorno tiene características capacitivas o inductivas predominantes. La señal tiene una única cresta predominante y no presenta repeticiones

inmediatas, lo que sugiere que es un proceso no oscilatorio, el cual se produce por una única emisión puntual. Esta característica la hace apta para investigaciones de propagación en sistemas distribuidos.

Figura 3. Pulso de corriente de la descarga parcial



En la Figura 4. está representada en una alteración de corta duración provoca un aumento repentino de tensión en un punto específico dentro de una estructura trifásica. La respuesta muestra un pico inicial, después del cual se dan oscilaciones atenuadas que van disminuyendo poco a poco con el tiempo. Este comportamiento muestra que la perturbación no se limita a un solo nodo, sino que se propaga hacia los elementos vecinos, aunque encuentra resistencia por la impedancia natural del entorno. La

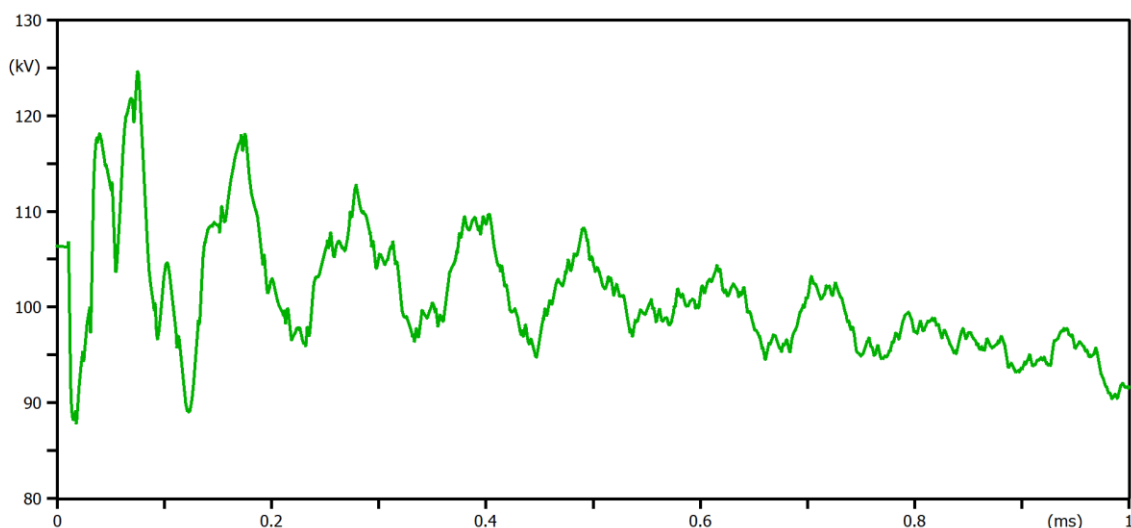
amplitud obtenida en la primera cresta posibilita calcular la susceptibilidad del punto observado, lo que permite determinar si la configuración eléctrica relacionada tiene suficiente capacidad para contener sucesos impulsivos.

Las oscilaciones que ocurren después del pico principal demuestran la interacción entre componentes inductivos y capacitivos que se encuentran cerca de la zona de monitoreo. La resonancia natural del circuito, que se puede determinar a partir de la

frecuencia de dichas oscilaciones, es útil para detectar posibles acoplamientos indeseados con otros elementos sensibles. La energía inicial se va dispersando a través de la estructura conductora, disminuyendo su efecto local de manera progresiva. Esto lo evidencia la atenuación progresiva. En

configuraciones donde las cargas distribuidas funcionan como filtros pasivos, este tipo de respuesta es común. A pesar de que se permite la detección para propósitos diagnósticos, los eventos con alta pendiente son limitados en términos de propagación.

Figura 4: Respuesta transitoria de tensión de la descarga parcial de la Fase A.



La señal observada presenta propiedades parecidas a las de la respuesta registrada en la fase B, aunque con un leve cambio en la amplitud y en su forma oscilatoria. Esto indica que el origen del evento está más cerca de una de las rutas de propagación, lo que causa pequeñas variaciones entre trayectorias cercanas entre sí. La primera cúspide se presenta con menos intensidad que en otros períodos, lo que señala un nivel más

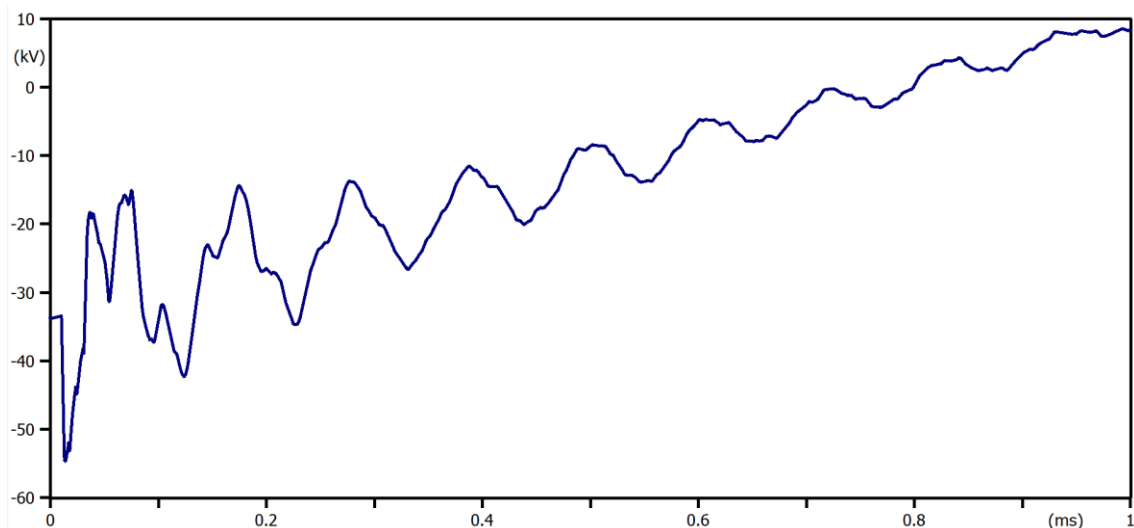
alto de amortiguamiento o una mayor distancia recorrida antes de llegar al punto de medición. Las técnicas de triangulación, que se fundamentan en la amplitud relativa y en el tiempo de llegada, permiten estimar la localización aproximada del evento gracias a este comportamiento asimétrico.

Las fluctuaciones posteriores tienen una frecuencia un poco diferente, lo que demuestra variaciones en la impedancia efectiva del camino

recorrido como en la Figura 5. Esas alteraciones pueden ser causadas por empalmes, modificaciones de sección o efectos de acoplamiento entre fases cercanas. El patrón registrado muestra estabilidad, lo que evidencia que el sistema tiene un comportamiento determinístico frente a perturbaciones específicas y posibilita la repetición de mediciones

en condiciones controladas. Esta clase de respuesta es útil para desarrollar modelos predictivos que pueden detectar anomalías antes de que ocurran fallos graves. La concordancia entre las formas de onda en las diferentes etapas confirma que el fenómeno observado se difunde de forma coherente a través del medio circundante.

Figura 5. Respuesta transitoria de tensión de la descarga parcial de la Fase B.



La amplitud intermedia entre las respuestas observadas con anterioridad es una característica de la gráfica de esta etapa, lo cual apoya la hipótesis de que el fenómeno tuvo lugar en un punto equidistante entre dos trayectorias principales. A pesar de que el tiempo de ascenso varía 0.5 (ms), la forma general del pico inicial se mantiene. Esto hace posible concluir sobre cambios en la inductancia distribuida

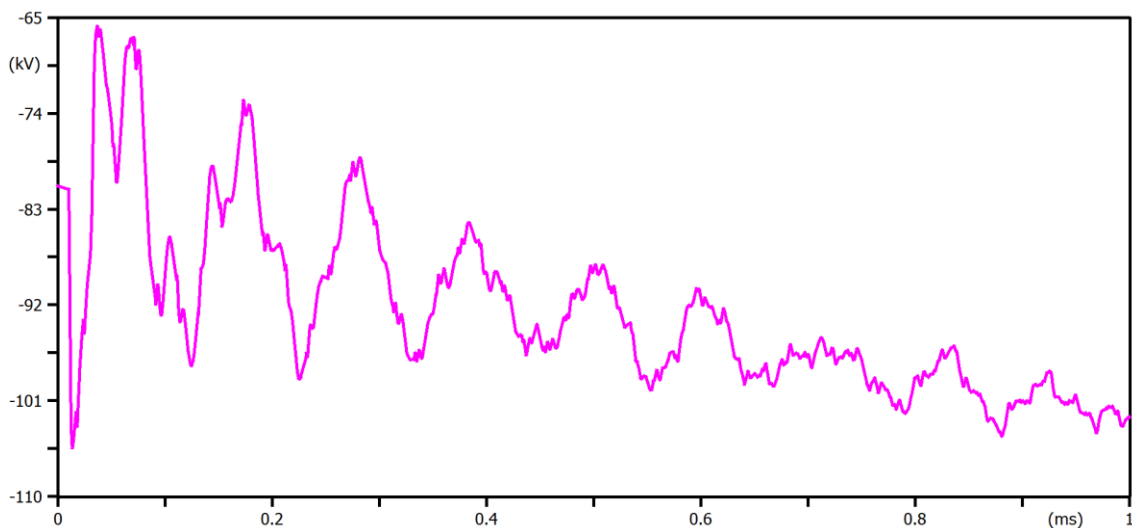
o en la constante dieléctrica del recorrido. Las oscilaciones posteriores son coherentes con las otras fases, lo que señala que el acoplamiento transversal entre los conductores es importante y que la energía del evento se reparte de manera uniforme a través de varias vías de retorno.

La amplitud intermedia entre las respuestas observadas con anterioridad es una característica de

la gráfica de esta etapa, lo cual apoya la hipótesis de que el fenómeno tuvo lugar en un punto equidistante entre dos trayectorias principales. A pesar de que el tiempo de ascenso varía ligeramente, la forma general del pico inicial se mantiene como se muestra en la Figura 6. Esto hace posible concluir sobre cambios en la inductancia

distribuida o en la constante dieléctrica del recorrido. Las oscilaciones posteriores son coherentes con las otras fases, lo que señala que el acoplamiento transversal entre los conductores es importante y que la energía del evento se reparte de manera uniforme a través de varias vías de retorno.

Figura 6: Respuesta transitoria de tensión de la descarga parcial de la Fase C.



4. Conclusiones

Los resultados obtenidos evidencian que es importante conectar la simulación transitoria con aplicaciones prácticas en los sistemas eléctricos de potencia. Con ATPDraw se logró replicar de manera precisa los sucesos vinculados a descargas parciales en redes de 138 kV, tomando en cuenta las configuraciones geométricas reales de los conductores y las

variables distribuidas R, L, C. La detección de tiempos de propagación en términos de microsegundos y cambios de amplitud que son consistentes con la teoría de líneas confirma su capacidad para ser utilizados en diagnósticos in situ. Esta conexión directa entre la simulación y la operación real optimiza la fiabilidad del sistema, disminuye los riesgos operativos en particular en redes urbanas con cables aislados y

acceso restringido para realizar inspección preventiva de forma directa favoreciendo el proceso de tomar decisiones técnicas.

El fenómeno transitorio por descargas parciales fue modelado de forma integral gracias a ATPDraw, fusionando modelos capacitivos, líneas de parámetros distribuidos y fuentes de impulso. Se obtuvieron respuestas temporales distintas entre las fases A, B y C, con retardos que se explican a partir de la relación mediante la dinámica del impulso y de los tiempos propagados hacia el punto de medición. La simulación tomó en cuenta valores representativos como capacitancias de aisladores de entre 10 pF y 100 pF, resistencias de torre de 10 Ω y líneas de 138 kV; se lograron formas de onda coherentes con eventos reales. Estos hallazgos corroboran la habilidad predictiva del software, validan el modelo implementado y evidencian su eficacia para estudiar la propagación, atenuación y localización temporal de descargas parciales.

A pesar de los resultados positivos, el análisis tiene limitaciones debido a la idealización de ciertos parámetros y a que en algunos contextos las

líneas simuladas tienen una longitud corta, cercana a 3 m. Los estudios futuros deben incluir variaciones ambientales, ampliar el análisis a configuraciones de 10 metros o más y corroborar los modelos mediante la toma de medidas experimentales en campo. Se sugiere también que se profundice en el acoplamiento electromagnético entre fases, que tiene un impacto en las discontinuidades reales. La integración de ATP con métodos de localización sofisticados, como el Time of Arrival, posibilitaría aumentar la precisión espacial y extender el uso del modelo en redes reales de media y alta tensión.

Bibliografía

- [1] A. S. Zalhaf, E. Zhao, Y. Han, P. Yang, A. H. Almaliki, and R. M. H. Aly, "Evaluation of the Transient Overvoltages of HVDC Transmission Lines Caused by Lightning Strikes," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 4, p. 1452, Feb. 2022, doi: 10.3390/en15041452.
- [2] R. Tarko, J. Gajdzica, W. Nowak, and W. Szpyra, "Study of the Lightning Overvoltage Protection Effectiveness of High Voltage Mixed Overhead

- Cable Power Lines," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 8, p. 2329, Apr. 2021, doi: 10.3390/en14082329.
- [3] X. Zhang *et al.*, "Review on Detection and Analysis of Partial Discharge along Power Cables," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 22, p. 7692, Nov. 2021, doi: 10.3390/en14227692.
- [4] J. Wu, A. Rodrigo Mor, and J. J. Smit, "The effects of superimposed impulse transients on partial discharge in XLPE cable joint," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 110, pp. 497–509, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.03.031.
- [5] A. Z. Abdullah, M. Isa, M. N. K. H. Rohani, H. A. Hamid, M. H. Amlus, and N. Azizan, "Modelling and simulation of online partial discharge measurement for medium voltage power cable," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 9, no. 2, pp. 427–435, Apr. 2020, doi: 10.11591/eei.v9i2.2076.
- [6] M. Popov, L. Grcev, L. vanderSluis, and V. V. Terzija, "An ATP-EMTP-Based Model for Analysis of Shielding Properties of Ferromagnetic Cable Sheaths," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 3, pp. 2241–2247, Jul. 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2004.843398.
- [7] C. E. Espinoza Torres, "Aplicación de monitoreo en línea de descargas parciales al generador eléctrico de la unidad TV2 en la central termoeléctrica Ing. Gonzalo Zevallos G.," Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2015. Accessed: Oct. 18, 2025. [Online]. Available: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/41344>
- [8] A. Z. Abdullah, M. Isa, M. N. K. H. Rohani, H. A. Hamid, M. H. Amlus, and N. Azizan, "Modelling and simulation of online partial discharge measurement for medium voltage power cable," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 9, no. 2, pp. 427–435, Apr. 2020, doi: 10.11591/eei.v9i2.2076.
- [9] D. Pila, C. Quinatoa, L. Camacho, and J. Vaca, "Transient Stability Analysis of the Ecuadorian Electrical System: Case of the Southern Segment," *WSEAS Transactions on Power Systems*, vol. 19, pp. 360–373, 2024, doi:

- 10.37394/232016.2024.19.3
1.
- [10] H. Kumar, M. Shafiq, K. Kauhaniemi, and M. Elmusrati, "A Review on the Classification of Partial Discharges in Medium-Voltage Cables: Detection, Feature Extraction, Artificial Intelligence-Based Classification, and Optimization Techniques," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 5, p. 1142, Feb. 2024, doi: 10.3390/en17051142.
- [11] F. SERTTAŞ and F. O. HOCAOĞLU, "Partial discharge detection and localization on the medium voltage XLPE cables with multiclass support vector machines," *TURKISH JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING & COMPUTER SCIENCES*, vol. 28, no. 4, pp. 2331–2344, Jul. 2020, doi: 10.3906/elk-2003-16.
- [12] J. M. Rodríguez-Serna, R. Albarracín-Sánchez, M. Dong, and M. Ren, "Computer Simulation of Partial Discharges in Voids inside Epoxy Resins Using Three-Capacitance and Analytical Models," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 1, p. 77, Jan. 2020, doi: 10.3390/polym12010077.
- [13] J. M. Rodríguez-Serna, R. Albarracín-Sánchez, and A. Mas'ud, "Finite-element-analysis models for numerical simulation of partial discharges in spherical cavities within solid dielectrics: a review and a novel method," *High Voltage*, vol. 5, no. 5, pp. 556–568, Oct. 2020, doi: 10.1049/hve.2019.0392.
- [14] J. R. Constante, D. G. Colome, and J. L. Camacho, "Adversarial Learning as a PMU Signal Filtering Technique in Load Models Identification," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 100601–100613, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3577897.
- [15] H. N. Afrouzi et al., "In-depth exploration of partial discharge modelling methods within insulations," *Clean. Eng. Technol.*, vol. 6, p. 100390, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.clet.2021.100390.
- [16] S. Murtaza et al., "Fractional-order analysis of voltage and current propagation in lossy transmission lines with thermal feedback," *AIMS Mathematics*, vol. 10, no. 11, pp. 27191–27216, 2025, doi: 10.3934/math.20251195.
- [17] A. Pedersen, G. C. Crichton, and I. W. McAllister, "The theory and measurement of partial discharge transients," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 26,

- no. 3, pp. 487–497, Jun. 1991, doi: 10.1109/14.85121.
- [18] E. Lemke, "A critical review of partial-discharge models," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 28, no. 6, pp. 11–16, Nov. 2012, doi: 10.1109/MEI.2012.6340519.
- [19] A. Pedersen, G. C. Crichton, and I. W. McAllister, "The theory and measurement of partial discharge transients," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 26, no. 3, pp. 487–497, Jun. 1991, doi: 10.1109/14.85121.
- [20] E. Lemke, "A critical review of partial-discharge models," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 28, no. 6, pp. 11–16, Nov. 2012, doi: 10.1109/MEI.2012.6340519.
- [21] D. Verginadis, T. Iakovidis, A. Karlis, M. Danikas, and J.-A. Antonino-Daviu, "A Study on the Effectiveness of Partial Discharge Models for Various Electrical Machines' Insulation Materials," *Machines*, vol. 11, no. 2, p. 230, Feb. 2023, doi: 10.3390/machines11020230.
- [22] G. M. Hashmi, M. Isa, and M. Lehtonen, "Modeling On-line Three-phase PD Monitoring System for MV Overhead Covered-Conductors," in *Proceedings of the International Conference on Power System Transients (IPST 2009)*, Kyoto, Japan, Jun. 2009. [Online]. Available: https://ipstconf.org/papers/Proc_IPST2009/09IPST093.pdf
- [23] B. Cintula, Ž. Eleschová, M. Cenký, P. Janiga, J. Bendík, and A. Beláň, "Three-Phase and Single-Phase Measurement of Overhead Power Line Impedance Evaluation," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 19, p. 6314, Oct. 2021, doi: 10.3390/en14196314.
- [24] N. Zawani, Junainah, Imran, and M. Faizuhar, "Modelling of 132 kV Overhead Transmission Lines by using ATP/EMTP for Shielding Failure Pattern Recognition," *Procedia Eng.*, vol. 53, pp. 278–287, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.02.037.
- [25] W. Scott Meyer & Tsu-huei Liu, *EMTP_Theory_Book*. 1995.
- [26] J. H. A. Rojas, M. A. T. Deleg, and F. A. Q. Palomeque, "Partial Discharge Modeling Using ATP Software," in *2024 4th Interdisciplinary Conference on Electrics and Computer (INTCEC)*, IEEE, Jun. 2024, pp. 1–8. doi:

10.1109/INTCEC61833.202
4.10603141.

- [27] N. Patwari, J. N. Ash, S. Kyperountas, A. O. Hero, R. L. Moses, and N. S. Correal, "Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 22, no. 4, pp. 54–69, Jul. 2005, doi: 10.1109/MSP.2005.1458287.