UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Estimación de la corriente transferida en un accidente de rayo

Angélica Chitiva Reyes

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá DC, Colombia
2018

Estimación de la corriente transferida en un accidente de rayo

Angélica Chitiva Reyes

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Ingeniería Eléctrica

Director:

Ph.D. Francisco José Román Campos

Línea de Investigación:

Descargas eléctricas atmosféricas

Grupo de Investigación:

Laboratorio de compatibilidad electromagnética EMC-UNC

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Bogotá DC, Colombia

2018

A Dios Todopoderoso por regalarme el don de soñar. A mi Madre por brindarme su apoyo incondicional y depositar su entera confianza en mí. A mi Padre quien me enseñó que con trabajo y dedicación todo es posible. A mi hermanita por ser la inspiración de mi vida. A Pablo por ser mi eterno consejero.

Agradecimientos

El desarrollo de este trabajo de grado ha sido una experiencia muy enriquecedora para mi formación como investigadora. Las personas que hicieron parte de este proceso académico permanecerán en mi memoria durante mi futuro viaje de la vida.

Ante todo, quiero expresar mi más sincera gratitud a mi director, PhD Francisco Román, por su apoyo y confianza y, por su paciencia durante este proceso de aprendizaje. Le doy gracias por ser mi guía ofreciéndome sus consejos sin reserva y por su comprensión en los momentos difíciles.

Quiero agradecer al personal del Laboratorio de Ensayos Eléctricos Industriales “Fabio Chaparro” – LABE por brindarme el espacio y los elementos requeridos para desarrollar las pruebas experimentales de este trabajo de grado. Especialmente, deseo agradecer al ingeniero Francisco Amórtegui, Jefe técnico del laboratorio, por el tiempo y la energía dedicados en evaluar mi trabajo. Sus apreciaciones me han dado fortaleza y confianza para mi futuro profesional.

Quiero expresar mi gratitud a todos los integrantes del grupo EMC-UNC por sus valiosas contribuciones en la ejecución y disertación de los resultados presentados. Debo agradecer al profesor Jhon Jairo Pantoja, Carlos Rivera y Jorge Cristancho. Especialmente, agradezco a Jorge Rodríguez por su colaboración en la etapa experimental de este proyecto.

Mi más profunda gratitud está reservada para mi familia y amigos, fuente de apoyo constante e incondicional en toda mi vida. Agradezco la confianza y el apoyo de mi madre, que sin duda alguna me ha brindado todo su amor, corrigiendo mis faltas y celebrando mis triunfos. Agradezco a mi padre su ejemplo de perseverancia y constancia, por el valor

mostrado para salir adelante y por sus valiosos consejos que me han guiado durante este proceso académico. Agradezco a mi hermanita por su poder especial de hacer reír, de levantar el ánimo con una buena broma, de contagiar su entusiasmo y hacer mi vida más feliz; soy la persona más afortunada porque la vida me dio una hermana como tú, quien me entiende y me quiere por sobre todas las cosas.

Finalmente, estos agradecimientos no estarían completos sin pensar en mi compañero de vida quien me ha hecho reír siempre, me ha soportado en todo momento y me ha ayudado en los periodos de duda. Aunque hemos pasado momentos difíciles siempre me ha brindado su amor, comprensión y cariño.

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo de una metodología basada en la impedancia transitoria de puesta a tierra para la estimación de la corriente transferida a una persona en un accidente de rayo. El método considera la ionización del suelo producida durante una descarga atmosférica, la cual es un proceso no lineal. En este documento se presentan los resultados obtenidos de simulación y experimentales para la caracterización de la impedancia transitoria del suelo. Los resultados muestran que la resistividad del suelo ionizado siempre mantiene un porcentaje de la resistividad inicial. La corriente transferida es estimada utilizando un modelo circuital del cuerpo humano propuesto en la literatura.

Palabras clave: Corriente transferida, Impedancia transitoria de puesta a tierra, Ionización del suelo, Rayos, Seguridad humana.

Abstract

This paper presents the development of a methodology based on the transient grounding impedance for the estimation of the current transferred to a person in a lightning accident. The method considers the ionization of the soil produced during an atmospheric discharge, which is a non-linear process. In this document, the results obtained from simulation and experiments for the characterization of the transitory impedance of the soil are present. Results show that the ionized soil resistivity always keeps a percentage of the initial resistivity. Transferred current is estimated using a circuit model of the human body proposed in the literature.

Keywords: Transferred current, Transient grounding impedance, Soil ionization, Lightning, Human safety.

Contenido

Pág.

Resumen ..... **IX**

Lista de figuras ..... **XIII**

Lista de tablas ..... **XV**

Introducción **1**

1. Contexto de estudio **3**
1.1 Características geográficas de Colombia 3
1.2 Sistemas de puesta a tierra 8
1.3 Protecciones contra rayos 10

2. Impedancia transitoria de puesta a tierra **13**
2.1 Descripción del suelo 13
2.2 Fenómeno de ionización 15
2.2.1 Modelos de la impedancia transitoria de puesta a tierra 16
2.3 Resistencia del canal de descarga 23

3. Análisis preliminar **27**
3.1 Simulación electromagnética en *Comsol Multiphysics* 27
3.1.1 Consideraciones iniciales 27
3.1.2 Resultados 29
3.2 Análisis de transitorios en *ATP-EMTP* 33
3.2.1 Consideraciones iniciales 33
3.2.2 Resultados 36
3.3 Modelo eléctrico del suelo ante la aplicación de impulsos tipo rayo 39

4. Análisis experimental **43**
4.1 Experimento bajo condiciones controladas 43
4.1.1 Metodología 43
4.1.2 Resultados 48

5. Estimación de la corriente transferida en un accidente de rayo **59**
5.1 Modelo eléctrico del cuerpo humano 59
5.2 Parámetros de simulación 61
5.3 Resultados 62

6. Conclusiones **65**
6.1 Conclusiones 65

6.2 Recomendaciones 67

Lista de figuras

Pág.

Figura 1-1: (a) Ubicación geográfica de Colombia (b) Mapa orográfico [9] 4
Figura 1-2: Mapa global de frecuencia de rayos – rayos/km^2/año [10]..... 4
Figura 1-3: Mapa global de actividad de rayos [1] 5
Figura 1-4: (a) Mapa ceráunico de Colombia [11] (b) Mapa de densidad de rayos [12] ... 6
Figura 1-5: Sistema Integral de Protección contra Rayos (SIPRA) [11] 7
Figura 2-1: Representación esquemática por volumen de un suelo de textura media [25] 14
Figura 2-2: Curvas típicas para la tensión, corriente e impedancia durante el fenómeno de descarga en suelos [26]. 15
Figura 2-3: Modelo simplificado para la resistividad con una sola varilla enterrada [33] 19
Figura 2-4: Perfiles de resistividad en el modelo de resistencia dinámica de impulso [33] 20
Figura 3-1: Geometría y malla utilizada para representar el impacto de un rayo en el suelo 28
Figura 3-2: Variación de la posición del electrodo de alta tensión (a) Con 1 cm de GAP entre el suelo y el electrodo (b) Electrodo enterrado 1 cm en el suelo..... 28
Figura 3-3: Distribución de campo eléctrico..... 29
Figura 3-4: Característica del campo eléctrico con respecto a la distancia radial para un suelo de conductividad eléctrica $\sigma = 0{,}001\ \mathrm{S/m}$ y permitividad relativa $\varepsilon r = 1$ 31
Figura 3-5: Gráfica de campo eléctrico vs distancia radial con variación de enterramiento del electrodo de alta tensión..... 31
Figura 3-6: Gráfica de campo eléctrico vs distancia radial con incremento de la tensión aplicada al arreglo 32
Figura 3-7: Gráfica de campo eléctrico vs distancia radial con cambio de las propiedades eléctricas del suelo 32
Figura 3-8: Esquemático del circuito implementado en ATP-EMTP, donde se representa el generador de impulsos por medio de una configuración RLC. 33
Figura 3-9: Modelo semiesférico para una descarga atmosférica directa al suelo [33]. . 34
Figura 3-10: Curva resultante de la relación V/I en la zona no ionizada para dos conductividades diferentes ($\sigma 1 = 0{,}01\ \mathrm{S/m}$ y $\sigma 2 = 0{,}001\ \mathrm{S/m}$) 38
Figura 3-11: Curva resultante de la relación V/I en la zona ionizada para dos conductividades diferentes ($\sigma 1 = 0{,}01\ \mathrm{S/m}$ y $\sigma 2 = 0{,}001\ \mathrm{S/m}$) 38
Figura 3-12: Característica de la resistencia del arco 39

Figura 3-13: Modelo eléctrico propuesto del suelo ante la aplicación de impulsos tipo rayo. 40
Figura 3-14: Comportamiento de las señales de tensión y corriente durante el inicio de la descarga en el suelo 41
Figura 3-15: Comportamiento de las señales de tensión y corriente a lo largo de la descarga en el suelo 41
Figura 3-16: Curva resultante de la relación V/I 42
Figura 4-1: Disposición física y dimensiones en centímetros de la probeta de ensayo (a) Vista superior (b) Vista frontal (c) Vista isométrica (d) Vista realista 44
Figura 4-2: Variación del electrodo de alta tensión (a) Con 1 cm de GAP entre el suelo y el electrodo (b) Electrodo enterrado 2 cm en el suelo 44
Figura 4-3: Esquemático del circuito de generación de impulsos de tensión y el sistema de medición. 46
Figura 4-4: Comportamiento de las señales de tensión y corriente durante el inicio de la descarga en el suelo 49
Figura 4-5: Comportamiento de las señales de tensión y corriente a lo largo de la descarga en el suelo 49
Figura 4-6: Curva resultante de la relación V/I 50
Figura 4-7: Relación entre densidad de corriente y resistividad 51
Figura 4-8: Relación V/I obtenida con el cambio de profundidad del electrodo de alta tensión 52
Figura 4-9: Comparación entre la resistencia de arco obtenida experimentalmente y calculada teóricamente 53
Figura 4-10: Relación V/I obtenida al incrementar la tensión aplicada a la probeta de ensayo 54
Figura 4-11: Variación del radio de ionización en el tiempo al incrementar la tensión aplicada a la probeta de ensayo 54
Figura 4-12: Variación de la relación V/I en la zona de ionización al incrementar la tensión aplicada a la probeta de ensayo 55
Figura 4-13: Variación de la relación V/I con el cambio de polaridad de la tensión aplicada a la probeta de ensayo 56
Figura 4-14: Variación de la relación V/I con el aumento del contenido de agua en el suelo 57
Figura 5-1: Modelo circuital del cuerpo humano [45] 60
Figura 5-2: Representación de escenario de simulación 61
Figura 5-3: Esquemático de escenario de simulación 62
Figura 5-4: Forma de onda de la corriente transferida en un accidente de rayo a una persona ubicada a 7,3 m del punto de impacto 63
Figura 5-5: Forma de onda de la corriente transferida en un accidente de rayo a una persona ubicada a 135 m del punto de impacto 64

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1-1: Componentes del Sistema Integral de Protección contra Rayos (SIPRA) [12] 7
Tabla 2-1: Modelos de resistencia del arco [38] 23
Tabla 3-1: Materiales utilizados para representar el impacto de un rayo en el suelo..... 28
Tabla 3-2: Valores de amplitud de corriente, radio de ionización y resistencia en la zona no ionizada para un suelo húmedo representado con una conductividad de $\sigma = 0{,}01\ \mathrm{S/m}$ 36
Tabla 3-3: Valores de amplitud de corriente, radio de ionización y resistencia en la zona no ionizada para un suelo húmedo representado con una conductividad de $\sigma = 0{,}001\ \mathrm{S/m}$ 37
Tabla 4-1: Equipos utilizados durante los ensayos 45
Tabla 5-1: Parámetros eléctricos de modelo del cuerpo humano..... 60

Introducción

Desde los comienzos de la humanidad, los accidentes por descargas atmosféricas han causado la muerte y, en algunos casos, consecuencias irreversibles a miles de personas en todo el mundo. Según el *Global Lightning Activity Map (GLAM)* procesado por el *Earth Observatory (EO)* de la NASA, se ha confirmado que la actividad de rayo más fuerte en el mundo se encuentra en zonas tropicales cerca de la línea ecuatorial [1] y, en consecuencia, aproximadamente 24.000 personas mueren cada año y otras 240.000 sufren algún tipo de lesión en estas áreas [2].

Debido a su ubicación geográfica, Colombia es uno de los países en el mundo con mayor nivel ceráunico, por lo que presenta una fuerte actividad eléctrica y los habitantes tienen una alta probabilidad de ser alcanzados por un rayo [3]. El problema es de gran importancia para Colombia dado el número de accidentes que los rayos causan anualmente en el país, siendo esta cifra un orden de magnitud mayor que en los Estados Unidos [4]. Adicionalmente, existe una población especialmente expuesta correspondiente al Ejercito Nacional, quienes de acuerdo con la Dirección de Preservación de la Integridad y Seguridad del Ejército de Colombia (DIPSE), entre el 2003 y 2012 reportaron cerca de una víctima por mes [5].

Bajo el objetivo de mitigar el riesgo de las personas es necesario estudiar las características de las descargas eléctricas. La impedancia transitoria de puesta a tierra se ha identificado como una de las variables que influyen en los efectos del rayo, por lo que en este documento se considera este parámetro para estimar la corriente que se transfiere a una persona bajo condiciones de impacto de rayo [6].

El efecto de la ionización del suelo se incluye para modelar el comportamiento transitorio del sistema de puesta a tierra bajo la descarga atmosférica. El modelo utilizado por muchos autores supone que la resistividad de la región de ionización disminuye instantáneamente

al mismo valor que el del conductor de tierra (casi cero) [7]. Sin embargo, otros autores han observado que la resistividad del suelo ionizado siempre conserva cierto valor, que es mayor que el de los conductores de puesta a tierra [8].

Con el propósito de dar claridad a la problemática, el primer capítulo de este documento presenta las características geográficas de Colombia, las cuales están relacionadas con su alto nivel ceráunico. Igualmente, se exponen las dificultades actuales de los sistemas de puesta a tierra y las protecciones contra rayos que han sido desarrolladas en los últimos años.

En el segundo capítulo se familiariza al lector con los modelos utilizados para el cálculo de la resistividad residual en la región de ionización del suelo. En el mismo capítulo, se presentan los modelos desarrollados para estimar la resistencia del canal de la descarga.

El tercer capítulo expone los resultados obtenidos en la fase de simulación, en la cual se utilizaron los Software de simulación electromagnética *Comsol Multiphysics* y de análisis de transitorios *ATP-EMTP* para establecer la respuesta de la impedancia de puesta a tierra. Como conclusión de este capítulo, se plantea un modelo que considera la resistividad de la tierra y el pico de la corriente de rayo.

En el cuarto capítulo del presente documento, se analizan los resultados experimentales obtenidos en el Laboratorio de Ensayos Eléctricos Industriales “Fabio Chaparro” – LABE. Los ensayos se realizaron utilizando una muestra de tierra vegetal abonada con la modificación de variables como la profundidad de enterramiento del electrodo de alta tensión, la tensión aplicada y su polaridad y, el contenido de agua en el suelo para analizar el comportamiento de la relación V/I.

Por último, en el quinto capítulo se presentan los resultados de la estimación de la corriente transferida en un accidente de rayo utilizando un modelo del cuerpo humano propuesto en la literatura y con ayuda del Software de simulación para análisis de transitorios *ATP-EMTP*.

Este documento se concluye con la apertura de nuevas perspectivas que podrán ser desarrolladas en trabajos futuros.

1. Contexto de estudio

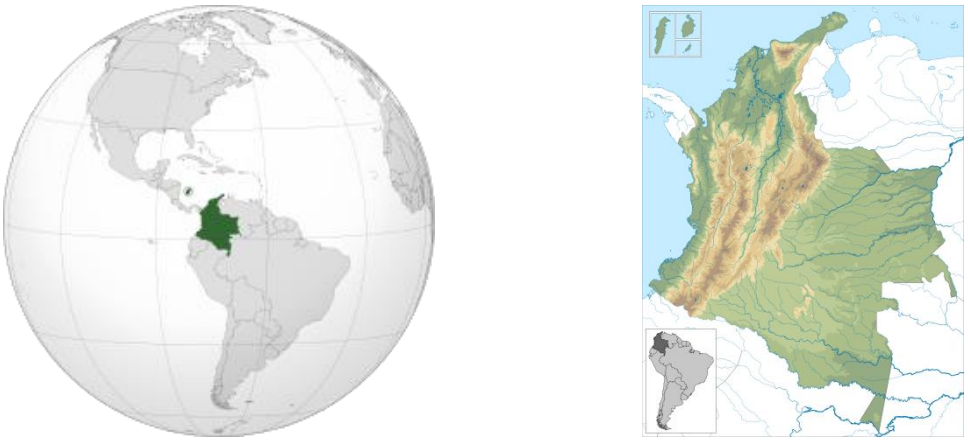
En este capítulo se realiza una breve presentación de las características geográficas de Colombia y su influencia en el alto nivel de descargas atmosféricas que afectan a la población del país. Para una mejor comprensión de la problemática se presenta la estructura actual de los sistemas de puesta a tierra. A continuación, se exponen las protecciones contra rayos que han sido desarrolladas en los últimos años.

1.1 Características geográficas de Colombia

Colombia se encuentra ubicada en el extremo noroccidental de Suramérica. El país se extiende hasta los 12°26’46’’ de latitud norte en el sitio denominado Punta Gallinas en la península de la Guajira y por el sur, hasta los 4°12’30’’ de latitud sur, en el sitio donde la quebrada San Antonio vierte sus aguas al río Amazonas. El extremo oriental se localiza en los 60°50’54’’ de longitud oeste de Greenwich, sobre la isla de San José en el río Guainía. Por el occidente, llega hasta los 79°02’33’’ de longitud oeste de Greenwich, que corresponden al Cabo Manglares.

El territorio colombiano presenta gran variedad en su relieve como se puede observar en **Figura 1-1** (b) y es el único país de América del Sur con costas sobre los océanos Atlántico y Pacífico. Colombia es atravesada por el sistema montañoso independiente de los Andes y el sistema montañoso central, compuesto por las tres cordilleras andinas. Asimismo, tiene llanuras interiores y costeras y los valles interandinos, como la llanura amazónica. Por otra parte, su territorio es cruzado por la línea ecuatorial. Esta condición geográfica origina una gran variedad de climas y ecosistemas, aunque no sufre estaciones, por lo cual, no tiene que soportar temperaturas extremas ni los estragos causados por éstas.

Figura 1-1: (a) Ubicación geográfica de Colombia (b) Mapa orográfico [9]

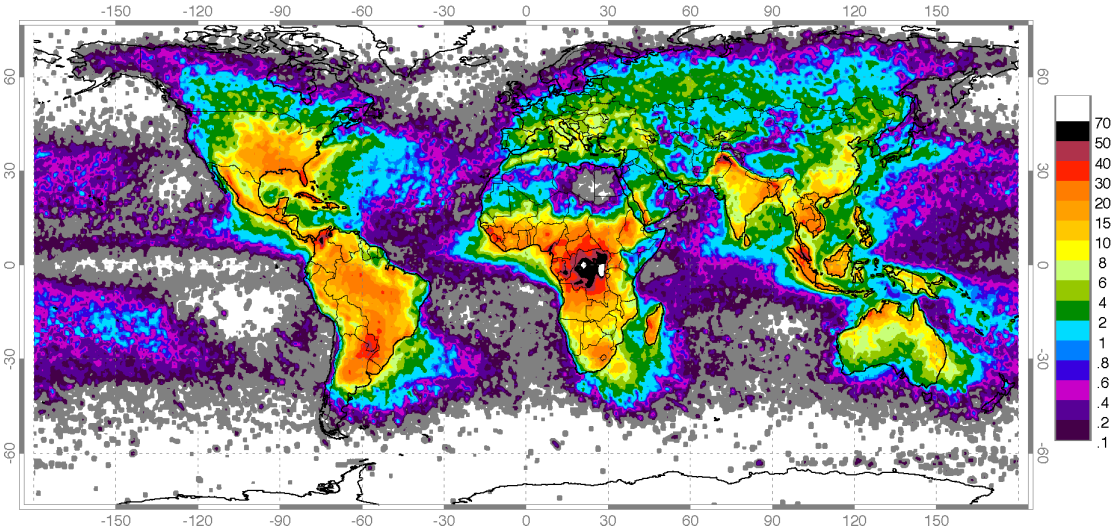


(a) (b)

Fuente: IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi

La topografía, la época del año y las condiciones climáticas desempeñan un papel importante en la actividad del rayo. Debido a sus condiciones, Colombia es uno de los países del mundo con mayor densidad de rayos [3]. Como se puede observar en cualquier mapa de rayos, como el presentado en **Figura 1-2**, la actividad más fuerte de rayos se encuentra en las zonas tropicales. Mientras que las áreas con las más bajas densidades de rayos son el Ártico y la Antártica, seguidas de cerca por los océanos con solo 0,1 a 1 rayo/km^2/año.

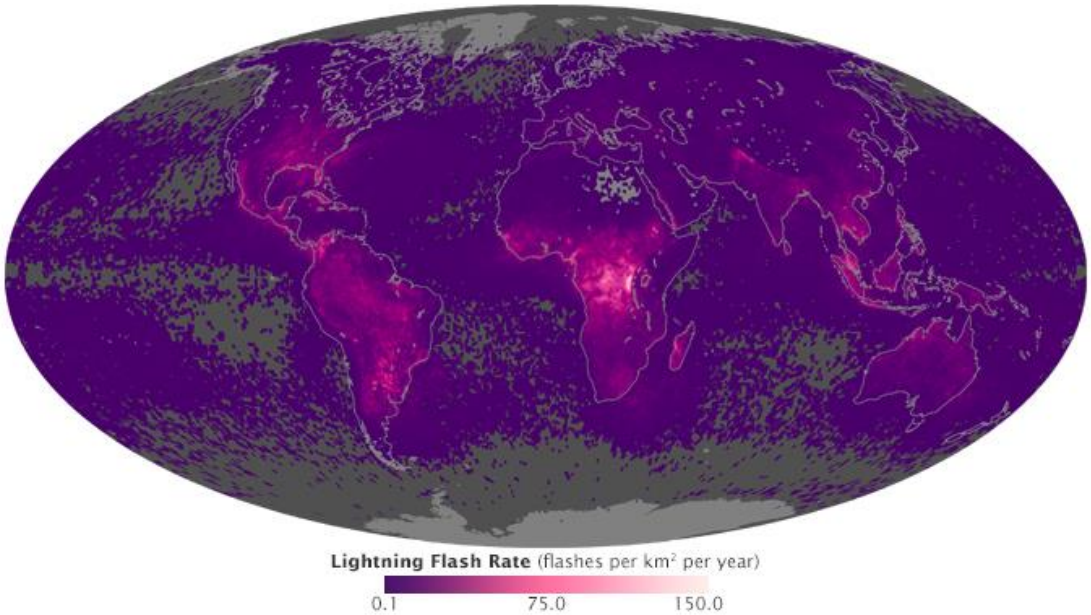
Figura 1-2: Mapa global de frecuencia de rayos – rayos/km^2/año [10]



Fuente: NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

Esta información ha sido confirmada recientemente por el *Global Lightning Activity Map (GLAM)* procesado por el *Earth Observatory (EO)* de la NASA [1], el cual es mostrado en **Figura 1-3**. El GLAM muestra el promedio anual de rayos por kilómetro cuadrado de datos recopilados entre 1995 y 2013. En el mapa, las áreas con el menor número de rayos por año son grises y púrpuras y las áreas con el mayor número de rayos (hasta 150 rayos/km^2/año) son de color rosa. Como se observa en el mapa, se presentan más descargas atmosféricas en tierra, teniendo en cuenta que la tierra sólida absorbe la luz solar y se calienta más rápido que el agua, lo que lleva a la formación de tormentas eléctricas que producen truenos y relámpagos.

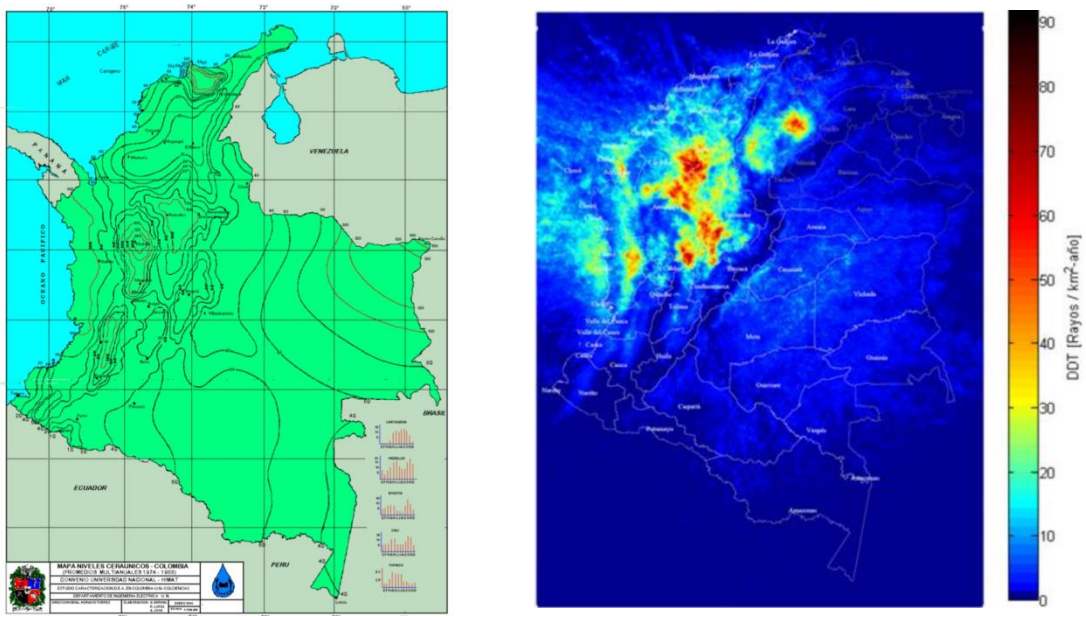
Figura 1-3: Mapa global de actividad de rayos [1]



Fuente: NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

Figura 1-4 (a) muestra el mapa de niveles ceráunicos de Colombia correspondiente a los promedios multianuales entre 1974 y 1988 [11]. Este mapa permite realizar una evaluación de la actividad de rayos en la zona de estudio. Por otra parte, aunque en los últimos años se han producido cambios en los sistemas de localización de rayos en Colombia, **Figura 1-4** (b) muestra que la distribución de la densidad de descargas a tierra (DDT) en el territorio coincide con el mapa de nivel ceráunico [12]. Ambas figuras muestran que la actividad de rayo más alta en Colombia se presenta en la zona noroeste, correspondiente al Departamento de Antioquia [5].

Figura 1-4: (a) Mapa ceráunico de Colombia [11] (b) Mapa de densidad de rayos [12]



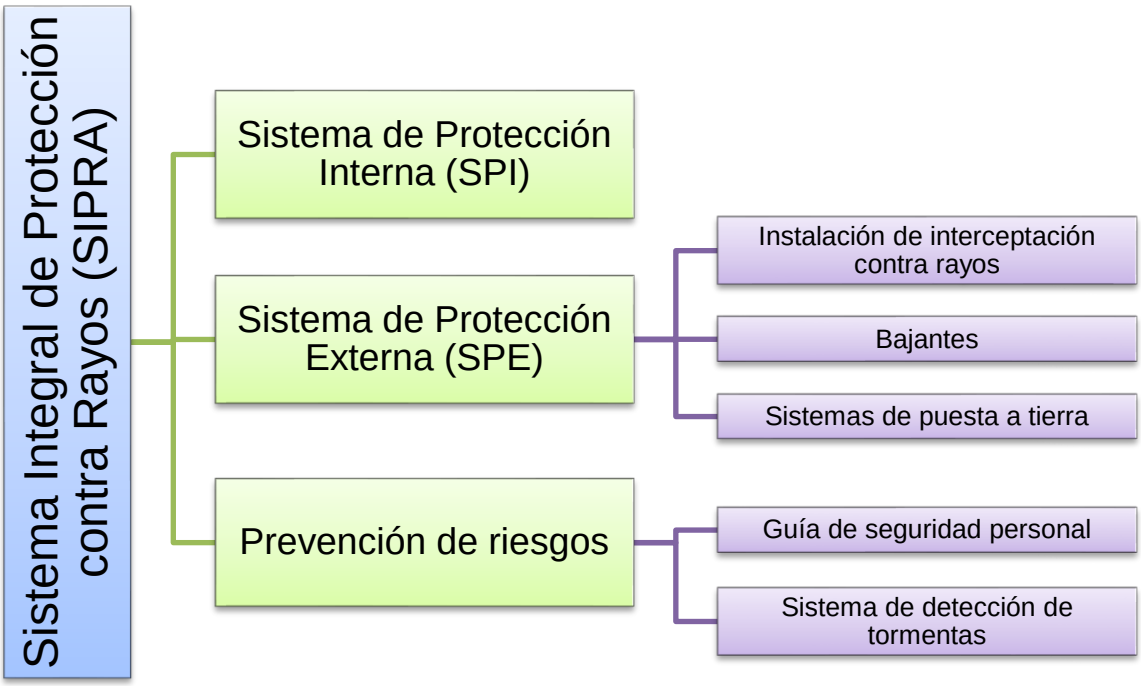
(a) (b)

Fuentes: (a) Convenio Universidad Nacional – HIMAT (b) LINET – *Lightning Detection Network*

A pesar de que la tasa de mortalidad por caída de rayos varía entre 5% y 10%, los rayos son un peligro real durante las actividades al aire libre, principalmente en lugares con aumento del riesgo por su posición relativa como es el caso del territorio colombiano [2]. Por lo tanto, **Figura 1-5** presenta esquemáticamente el Sistema Integral de Protección contra Rayos (SIPRA), el cual es recomendado por la normatividad colombiana para ser utilizado para una protección eficaz contra rayos [11]. **Tabla 1-1** presenta la explicación de la función que cumple cada uno de los componentes el Sistema Integral de Protección contra Rayos (SIPRA).

En la siguiente sección se hace énfasis en los sistemas de puesta a tierra, los cuales son parte del sistema de protección externo (SPE) y permiten disipar las corrientes originadas en un accidente de rayo.

Figura 1-5: Sistema Integral de Protección contra Rayos (SIPRA) [11]



Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC 4552

Tabla 1-1: Componentes del Sistema Integral de Protección contra Rayos (SIPRA) [11]

Componente	Función
1. Sistema de protección interno (SPI)	Limitar las sobretensiones transitorias al interior de la instalación
1.1. Equipotencialización con DPS o conductores	Limitar sobretensiones
1.2. Apantallamientos localizados	Reducir efectos internos del campo magnético en equipos electrónicos
1.3. Topología de cableados	Contribuir a la compatibilidad electromagnética
1.4. Instalación de filtros	Controlar las perturbaciones conducidas
2. Sistema de protección externo (SPE)	Canalizar el rayo hasta el suelo en forma segura
2.1. Terminales de captación	Interceptar el rayo
2.2. Bajantes	Conducir el rayo, reducir el *di/dt*, atenuar efectos internos de campo magnético
2.3. Puestas a tierra de protección contra rayos	Dispersar y disipar la corriente del rayo
3. Prevención de riesgos	
3.1. Guía de seguridad personal	Lograr comportamientos seguros de las personas
3.2. Sensor de tormentas: fijo o portátil	Suspender actividades de alto riesgo

Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC 4552

1.2 Sistemas de puesta a tierra

El sistema de puesta a tierra se refiere a la estructura metálica enterrada en el suelo, la cual permite dispersar y disipar de forma segura la corriente generada durante una descarga atmosférica. Esta estructura puede tener diferentes estructuras geométricas como cables de tierra horizontales, barras verticales, conductores en anillo, rejillas de tierra o una combinación entre las estructuras mencionadas.

En el caso de que un sistema se encuentre totalmente aislado de cualquier elemento externo que permita un acoplamiento electromagnético, no hay necesidad de implementar un sistema de puesta a tierra. Sin embargo, por lo general, existen conexiones con el mundo exterior, bien sea a través de la fuente de alimentación, las tuberías o los cables de comunicación. En consecuencia, cuando ocurre una descarga atmosférica en las cercanías del sistema, habrá un incremento de potencial y una transferencia transitoria de energía entre el sistema y el exterior. Ésta es la principal razón de daños en la infraestructura y lesiones en los seres humanos.

Teniendo en cuenta que el sistema de puesta a tierra es fundamental en el Sistema Integral de Protección contra Rayos (SIPRA) de cualquier componente del sistema de potencia (Por ejemplo: subestaciones, estaciones de generación, líneas de transmisión), sistemas ferroviarios eléctricos, torres de comunicación, grandes edificios, .entre otros, es necesario conocer las características de un buen sistema de conexión a tierra que permita asegurar la protección de las instalaciones y el personal involucrado, así como la compatibilidad electromagnética. Por lo tanto, un buen sistema de puesta a tierra debe desempeñar las siguientes funciones [13]:

- Proporcionar un medio para disipar la corriente eléctrica en la tierra bajo condiciones de rayo, sin exceder ningún límite operacional de los equipos o afectar adversamente la continuidad del servicio
- Minimizar la interferencia de los circuitos de transmisión y distribución sobre los sistemas de comunicaciones y control
- Mantener ciertos puntos de una red a un potencial definido con referencia a la tierra

- Impedir que los soportes de los equipos alcancen un potencial diferente al de la tierra
- Proteger la red contra los efectos de las descargas atmosféricas
- Proteger a los individuos, limitando las tensiones de paso y de contacto a valores aceptables en las vecindades de la instalación

Específicamente, el último requisito está planteado para evitar que una cantidad de energía determinada sea absorbida por una persona antes de que la falla sea despejada y el sistema desenergizado. Las tensiones máximas permitidas se determinan en función del tiempo de despeje de la falla a tierra, la resistividad del suelo y la corriente de falla. Éstos son los valores máximos de soportabilidad del ser humano a la circulación de corriente y consideran la resistencia o impedancia promedio netas del cuerpo humano entre mano y pie, sin que se presenten perforaciones en la piel y sin el efecto de las resistencias externas adicionalmente involucradas entre la persona y la estructura puesta a tierra o entre la persona y la superficie del terreno natural [14].

Teniendo en cuenta que, para los sistemas eléctricos y electrónicos conectados a la malla de tierra, la diferencia de potencial debida a una sobretensión no debe ser mayor al nivel de aislamiento del sistema, el sistema de puesta a tierra debe cumplir los siguientes criterios establecidos en la norma IEEE Std 80:

- El tamaño del sistema de puesta a tierra debe ser lo suficientemente grande como para reducir la diferencia de potencial cuando se presenta la descarga atmosférica. Un solo electrodo no es adecuado por sí mismo para brindar un sistema de tierra seguro. Por el contrario, cuando varios electrodos se encuentran interconectados entre sí y a todos los neutros de los equipos, soportes y estructuras, el resultado es esencialmente un arreglo en forma de malla.
- El espacio entre los cables de tierra debe estar dispuesto de tal forma que las tensiones de paso y contacto sean más bajas que el límite máximo permitido.
- Las varillas deben estar conectadas al sistema de puesta a tierra en tales puntos para reducir el aumento del potencial de tierra. Por ejemplo, las varillas de puesta a tierra deben instalarse en la periferia de las mallas de tierra en donde generalmente se encuentran diferencias de tensiones altas.

- Para diferentes estructuras al nivel del suelo, el sistema de puesta a tierra debe colocarse de tal manera que puede aprovechar la parte de baja resistividad del suelo para reducir el aumento potencial tanto como sea posible.
- La longitud / área efectiva debe considerarse cuando se intenta minimizar el costo.

El sistema de puesta a tierra es uno de los principales recursos responsables de disipar la corriente de rayo a tierra, siendo un componente importante en la seguridad de la población [15]. En consecuencia, con la implementación y el diseño eficaz del sistema a puesta a tierra, se reducen los riesgos de los dispositivos electrónicos interconectados y del personal que se encuentra en cercanías al sitio.

En la siguiente sección se realiza un resumen de las protecciones que han sido desarrolladas para la protección de las personas y la infraestructura contra este fenómeno.

1.3 Protecciones contra rayos

Un rayo es considerado como una descarga eléctrica de alta corriente que puede ocurrir entre: Nube y tierra, dentro de la nube o entre diferentes nubes. Estadísticamente, solo el 10% de los rayos son descargas entre nube y tierra, de los cuales un total de 100 golpean la superficie de la tierra cada segundo [16]. Algunos de estos rayos pueden afectar a personas o diferentes estructuras como edificios, líneas de transmisión, torres de telecomunicaciones, tanques de almacenamiento de petróleo, etc.

Durante la Edad Media, el rayo fue considerado como una expresión contra la cual no había otra protección más que las oraciones y el sonido de las campanas de la iglesia [17]. Fue hasta 1753 que Benjamín Franklin sugirió el uso de barras conductoras sobre casas, iglesias, barcos, etc., para protegerlos contra las consecuencias destructivas de un rayo [18]. Después de esto, el uso de pararrayos se extendió rápidamente en los Estados Unidos y Europa. El propósito de este sistema de protección contra rayos fue salvaguardar estructuras contra incendios y daños estructurales. Sin embargo, la disputa sobre el rango de protección que ofrecían los pararrayos comenzó poco después de la falla de un pararrayo instalado en un molino en Purfleet en 1777 [19]. A pesar de que el molino no se encendió, el incidente desató la controversia sobre la efectividad del uso de pararrayos.

Pasados 45 años después del incidente, Gay-Lussac sugirió que un pararrayos protege eficazmente contra los rayos en un espacio circular a su alrededor, cuyo radio es el doble de la altura de la barra [20]. Sin embargo, la relación entre el radio de la zona de protección y la altura de la barra varió entre 0,125 y 9, cuyos valores fueron sugeridos por diferentes científicos durante el siglo XIX [20].

En 1876, Maxwell especuló que a pesar de que el pararrayos protegió su entorno, éste atrajo más rayos que cuando la varilla no había sido instalada. Maxwell sugirió el uso de una carcasa de metal cerrada alrededor de una casa, siguiendo el principio de la jaula de Faraday [20]. De esta forma, cuando un rayo golpeara la parte superior de la carcasa de metal, se disiparía de forma segura a la tierra, mientras que el interior de la carcasa de metal estaría protegido. Sin embargo, no era práctico instalar una carcasa metálica completa alrededor de estructuras normales como edificios, subestaciones, etc. Por esta razón, se introdujo el uso de mallas como protección. En este caso, el espacio entre conductores es el factor clave que define la eficiencia de tal sistema de protección contra rayos.

De esta forma, haciendo uso del principio del pararrayos de Franklin como terminal de captación de rayos, así como el concepto de la jaula de Faraday para introducir las nociones de bajantes y puestas a tierra, se consolidó el Sistema de Protección Externo (SPE) como se conoce en la actualidad.

En la literatura es posible encontrar diferentes métodos y prácticas para implementar sistemas de puesta a tierra en función de los requisitos de las instalaciones a proteger [21] [22] [23]. La mayoría de los autores discuten el comportamiento de la resistencia de puesta a tierra en DC o en baja frecuencia. Sin embargo, el tema de interés de este documento se centra en el comportamiento transitorio ante descargas atmosféricas. Por lo tanto, en el siguiente capítulo se familiariza al lector con los modelos utilizados para representar la impedancia transitoria de puesta a tierra.

2. Impedancia transitoria de puesta a tierra

La impedancia transitoria de puesta a tierra se ha identificado como una de las variables que influyen en los efectos del rayo, por lo que en este capítulo se familiariza al lector con las características fisicoquímicas y eléctricas del suelo. Así mismo, se explica el fenómeno de ionización, el cual se incluye para modelar el comportamiento transitorio del sistema de puesta a tierra bajo la descarga atmosférica. Por otra parte, se presentan los modelos utilizados para el cálculo de la resistividad residual en la región de ionización del suelo. Finalmente, se muestran los modelos desarrollados para estimar la resistencia del canal de la descarga, la cual es una variable determinante para que se realice la descarga atmosférica a tierra.

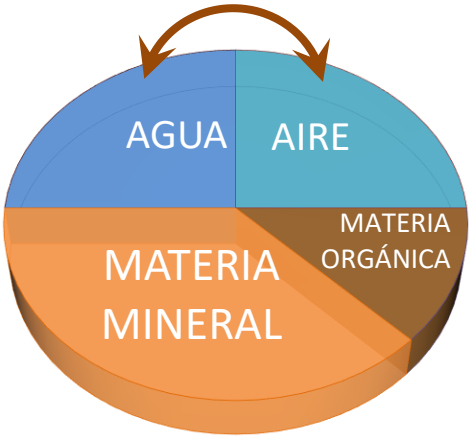
2.1 Descripción del suelo

La comprensión de la relación suelo-agua permite conocer el conjunto de factores y procesos eléctricos que ocurren en el suelo, los cuales son determinantes en la disipación de una corriente debida a una descarga atmosférica. Los tres componentes principales de los suelos son: Sólidos, agua y aire [24]. La materia en estado sólido la conforman minerales y constituyentes orgánicos. La materia en estado líquido corresponde al agua con diferentes tipos de sales disueltas. El aire y el vapor de agua constituyen la materia en estado gaseoso. Las proporciones de aire y agua están sujetas a rápidas y grandes fluctuaciones. Adicionalmente, el suelo sufre de diferentes cambios fisicoquímicos gracias a la actividad de los seres vivos, lo cual hace que el comportamiento del suelo sea bastante complejo.

Figura 2-1 ilustra de forma simplificada la distribución típica de componentes en un suelo de textura media. En **Figura 2-1** se observa que aproximadamente el 50% del volumen es

materia sólida, la cual se compone de materia mineral y materia orgánica. Adicionalmente, se observa que el 50% restante se constituye agua y aire. La flecha en la parte superior de la figura indica la variación que puede presentarse entre el contenido de agua y aire, indicando que el incremento de una cantidad está asociado con el decrecimiento de la otra [25].

Figura 2-1: Representación esquemática por volumen de un suelo de textura media [25]



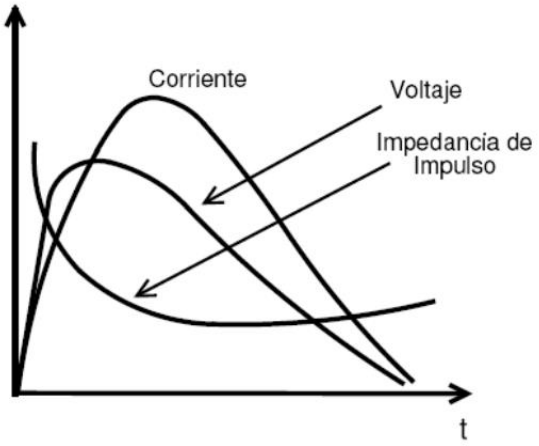
Fuente: Adaptación de Cabrera V. "*Studies of Ground Ionization and Lightning Protection of Power Lines*", 1992

Por lo tanto, la respuesta del suelo ante una descarga atmosférica es fuertemente dependiente del tipo de suelo, su conductividad eléctrica, el contenido de humedad, la capacidad térmica del medio, la geometría del electrodo del sistema de puesta a tierra, así como la magnitud y la duración del impulso tipo rayo, entre otros factores.

En diferentes aplicaciones de diseño eléctrico, la mayoría de las veces se utiliza un valor constante de resistencia eléctrica del suelo, despreciando la no linealidad de esta impedancia debida a fenómenos de ionización o descargas eléctricas presentes alrededor del electrodo, las cuales producen un decrecimiento apreciable en la impedancia de puesta a tierra del conjunto electrodo-suelo. **Figura 2-2** presenta las curvas típicas del comportamiento del suelo ante impulsos de corriente tipo rayo.

En la siguiente sección se presenta un resumen del fenómeno de ionización y se exponen los modelos que han sido utilizados para describir teóricamente este efecto en la impedancia de puesta a tierra.

Figura 2-2: Curvas típicas para la tensión, corriente e impedancia durante el fenómeno de descarga en suelos [26].



Fuente: Rincón E. "*Estudio termoeléctrico de la disrupción eléctrica en arena bajo impulsos tipo rayo*", 2010

2.2 Fenómeno de ionización

La ionización es el proceso físico en el cual se producen iones debido a la aplicación de campos eléctricos intensos o a la inyección de una alta densidad de corriente, lo cual modifica momentáneamente la estructura molecular del suelo. Este fenómeno presenta un comportamiento no lineal y ha sido atribuido a la presencia de descargas internas del terreno en la frontera del electrodo de puesta a tierra, el cual ocasiona la disminución de la resistencia de puesta a tierra [26].

El fenómeno de ionización no es la única respuesta del terreno ante impulsos tipo rayo. Adicionalmente, se presenta la dependencia a la frecuencia, los efectos de la distribución y propagación del campo eléctrico y, la simultaneidad de los fenómenos, entre otros [27]. Sin embargo, estos efectos no son considerados en el desarrollo de este trabajo de grado.

De acuerdo con la literatura, el inicio del fenómeno se debe principalmente a los siguientes mecanismos [28] [29]:

- Proceso térmico de descarga, el cual depende de la magnitud de corriente y de las condiciones de no homogeneidad del suelo. En presencia de una descarga eléctrica de impulso, la corriente empieza a circular principalmente por los

depósitos de agua presentes entre las partículas del suelo. Gracias al efecto Joule, la temperatura del agua empieza a incrementarse y la resistividad del suelo comienza a decrecer significativamente. Teniendo en cuenta que la concentración de agua y sales entre las partículas no es homogénea, los incrementos de temperatura en las rutas consideradas no son uniformes y se desencadena una inestabilidad térmica en algunos canales de baja resistividad. Si el aumento de temperatura es considerable, el agua presente en los canales se evapora y, en consecuencia, la resistividad de los espacios de aire incrementa. Cuando la magnitud del campo eléctrico supera el valor de campo crítico del terreno comienza la disrupción de las cavidades de aire del suelo.

- Proceso eléctrico de descarga, el cual se fundamenta en la disrupción de las cavidades de aire presentes en el suelo debido a que el valor crítico de campo eléctrico es superado. El campo eléctrico al interior de las cavidades aumenta debido a las terminaciones puntiagudas de los granos del terreno. Adicionalmente, teniendo en cuenta la combinación de materiales en el terreno, el aire se somete a mayores esfuerzos de campo eléctrico dado que su valor de permitividad es más bajo que el del terreno y, por lo tanto, facilita el inicio del fenómeno de ionización alrededor del conductor de puesta a tierra.

2.2.1 Modelos de la impedancia transitoria de puesta a tierra

El objetivo de incluir la influencia de la ionización del suelo en el modelado de sistemas de puesta a tierra es garantizar la seguridad humana. Bajo este precepto, existen diversos enfoques en los modelos dinámicos de suelos. Algunos parten de suposiciones en la forma en que el electrodo cambia su geometría a medida que avanza el fenómeno, y algunos en la evolución a través del tiempo de la conductividad del terreno.

Desde 1942, la suposición de que la resistividad de la región de ionización disminuye instantáneamente al mismo valor que el del conductor de tierra (casi cero) ha sido ampliamente utilizada [7]. Sin embargo, otros autores han observado que la resistividad del suelo ionizado siempre conserva cierto valor, que es mayor que el de los conductores

de puesta a tierra [8]. Los resultados teóricos y experimentales que justifican estas hipótesis son descritos a continuación.

- **Towne (1929)** [30]**:** Uno de los pioneros en la investigación del comportamiento eléctrico del suelo fue Towne, quien encontró experimentalmente que durante una descarga la resistencia a tierra decrecía en comparación con los “megas” obtenidos inicialmente. Este resultado lo motivó a determinar, mediante pruebas de laboratorio, la relación entre la resistencia del terreno en una descarga R_i y la resistencia inicial del terreno R_o (R_i/R_o).

- **Bellaschi et.al. (1942)** [31]**:** El tema central de la investigación de Bellaschi et.al. eran las descargas eléctricas en los suelos, por lo que realizaron pruebas de impulso en varillas de tierra con diferentes dimensiones (radio y longitud) y obtuvieron el comportamiento de V/I para diferentes tipos de suelos. Se considera que son los primeros en proponer un modelo impedancia dinámica del suelo que considera una zona uniforme de ionización alrededor del electrodo luego de superar un valor de campo crítico determinado.

- **Petropoulos (1948)** [32]**:** Algunos investigadores orientaron su estudio del fenómeno de ionización hacia la búsqueda de un valor de gradiente de ionización conocido como campo eléctrico crítico. Petropoulos realizó pruebas de laboratorio usando diversas muestras de suelo: homogéneas, tamizadas y humedecidas. En su análisis, asumió por primera vez la no homogeneidad del suelo durante el fenómeno y afirmó que el tamaño de los granos de suelo y la cantidad de agua contenida eran variables determinantes en el cálculo del gradiente. Adicionalmente, supuso que la zona ionizada se expande de manera uniforme alrededor del electrodo. Bajo estas suposiciones, encontró que entre las muestras de suelo variaba la resistencia y el campo eléctrico crítico medido.

- **Liew & Darveniza (1974)** [33]**:** Posterior a los resultados presentados por Petropoulos, se plantearon distintos experimentos para validar las suposiciones que describen el fenómeno de la ionización. Entre los modelos planteados se encuentra el desarrollado por Liew & Darveniza, el cual es aún uno de los más populares.

En el modelo planteado, cuando una corriente es inyectada en el suelo, ocurre el fenómeno de disrupción y se desencadenan los siguientes eventos:

- La resistividad permanece constante hasta que la densidad de corriente del elemento excede el valor crítico
- Cuando la densidad de corriente excede el valor crítico, la resistividad decae de forma exponencial por la ionización del suelo

Cuando la corriente decae de su valor pico, tres regiones son consideradas (véase **Figura 2-3**):

- *Región a,* donde $r > r_{cm}$ y la densidad de corriente es menor al valor crítico. Esta región corresponde a la porción del suelo que no ha sido ionizada y, por lo tanto, la resistividad se mantiene en su valor original

- *Región b,* donde $\mathrm{r} < \mathrm{r_{cm}}$ y la densidad de corriente es menor al valor crítico. Esta región corresponde a la porción del suelo que está siendo desionizada y, por lo tanto, la resistividad tendrá un comportamiento descrito por Ecuación (2.1).

$$\rho = \rho_{\mathrm{i}} + (\rho_o - \rho_i)\left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_2}}\right)\left(1 - \frac{J}{J_C}\right)^2 \tag{2.1}$$

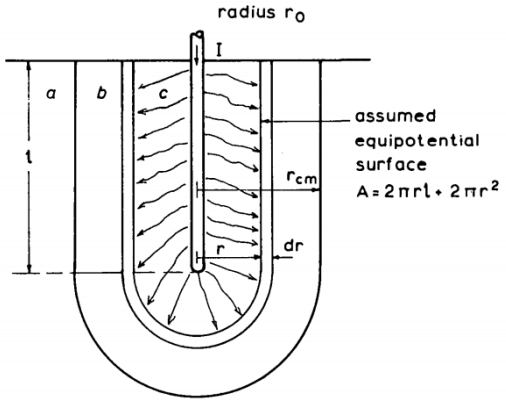
  donde τ_2 es la constante de tiempo de deionización, ρ_i es el valor de la resistividad cuando la densidad de corriente es igual al valor crítico $(J = J_C)$ y t es el tiempo medido desde el inicio de la deionización.

- *Región c*, donde $r < r_{cm}$ y la densidad de corriente es mayor o igual al valor crítico. Esta región corresponde a la porción del suelo que está siendo ionizada y, por lo tanto, la resistividad tendrá un comportamiento descrito por Ecuación (2.2)

$$\rho = \rho_o e^{\frac{-t}{\tau_2}} \tag{2.2}$$

  Este comportamiento se mantendrá hasta que la densidad de corriente sea igual al valor crítico y entre en la región b.

Figura 2-3: Modelo simplificado para la resistividad con una sola varilla enterrada [33]



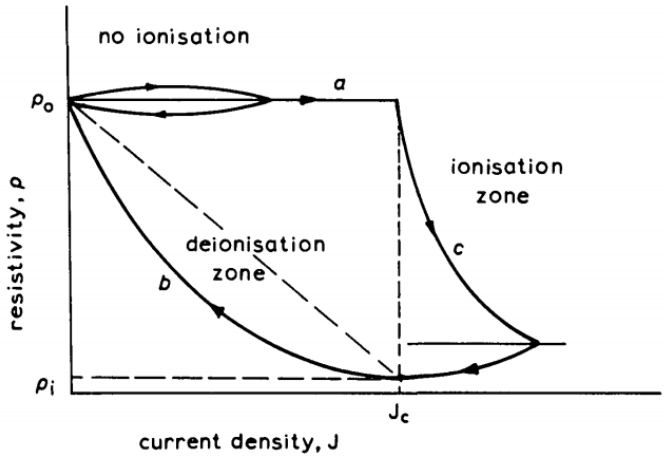
FUENTE: Liew & Darveniza, *"Dynamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earths"*, 1974.

Para la verificación experimental de su modelo, Liew & Darveniza usaron una barra vertical enterrada en suelos de diferentes resistividades como: Arcilla ligeramente arenosa, mezcla de arena y grava y, arena arcillosa. A partir del análisis de los oscilogramas de tensión y corriente obtenidos, surgieron las siguientes características, las cuales pueden ser observadas en **Figura 2-4**:

- Una característica no lineal de tensión/corriente
- El pico de la onda de tensión ocurre antes del pico de corriente
- La resistencia mínima instantánea ocurre después del pico de corriente
- Un marcado efecto de histéresis en la característica resistencia/corriente
- Aunque la corriente cae a cero, se observa una tensión residual

- **Kosztaluk, Loboda & Mukhedkar (1981)** [28]**:** Bajo el objetivo de caracterizar el comportamiento de la malla de puesta a tierra después de una descarga atmosférica, Kosztaluk et.al. seleccionaron para sus experimentos zapatas de hormigón, las cuales son utilizadas como cimiento para las torres de transmisión. Adicionalmente, instalaron un sistema auxiliar de electrodos de tierra compuesto por 32 varillas de 5 m de longitud, enterradas perpendicularmente al suelo en un círculo de 10 m de diámetro.

Figura 2-4: Perfiles de resistividad en el modelo de resistencia dinámica de impulso [33]



Fuente: Liew & Darveniza, *"Dynamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earths"*, 1974.

Luego de inyectar impulsos de corriente y medir la caída de tensión en el electrodo principal, la principal evidencia que hallaron fue una variación de la relación V/I que fue definida con el término de resistencia dinámica (R_d). Adicionalmente, observaron que a partir de un valor de densidad de corriente de $2\ \mathrm{A/cm^2}$ el valor de la resistencia R_d se reduce aproximadamente 2,5 veces con respecto a la resistencia del terreno en baja frecuencia. Por otra parte, se introduce el concepto de resistencia de impulso definido como la relación entre los valores pico de caída de la tensión sobre el electrodo y la corriente inyectada. Por ejemplo, para un valor pico de corriente de 8 kA, la resistencia de impulso se redujo 50% del valor de resistencia estática.

- **Oettle (1988)** [34]**:** Con el ánimo de determinar experimentalmente el valor de campo eléctrico en el cual comienza el fenómeno de ionización, Oettle llevó a cabo múltiples experimentos con diferentes tipos de suelos. El arreglo experimental implementado por Oettle fue un recipiente semiesférico lleno de tierra y un pequeño electrodo esférico de alto voltaje en el centro con la mitad del volumen enterrado en el suelo.

  Entre sus principales conclusiones se encuentra que el campo crítico es aproximadamente 8 kV/cm y con este valor es posible calcular el valor de

resistividad residual del suelo. Adicionalmente, observó que el radio de ionización se extiende hasta el punto en que el campo crítico empieza a decrecer. Por otra parte, encontró que la impedancia dinámica de puesta a tierra no puede ser representada considerando únicamente la relación de los valores pico de corriente y tensión. Para el cálculo de la resistencia del suelo, se debe tener en cuenta dos componentes: una resistividad residual y una resistividad estática sin ionización. En conclusión, para diferentes tamaños de electrodos esféricos, Oettle encontró que la resistividad residual varía entre un 3% a 8,3% de la resistividad original del suelo.

- **Mousa (1994)** [35]**:** Basado en un análisis teórico y una revisión crítica de los experimentos realizados previamente, Mousa llegó a las siguientes conclusiones:

  - La disrupción del suelo inicia por la ionización del aire atrapado en los vacíos del suelo. El gradiente de ionización del suelo E_o es siempre menor que el del aire y, se reduce drásticamente cuando el contenido de agua es alto.
  - El incremento del contenido de agua decrece tanto el gradiente de ionización como la resistividad del suelo ρ_o. Sin embargo, no existe una relación directa entre estas variables porque la resistividad también depende del aumento de sal en el suelo.
  - La ionización superficial no rige el valor de la resistencia de impulso R_i
  - El valor de R_i es principalmente determinado por el menor valor de E_o. El cual ocurre en cualquier lugar a lo largo del electrodo y su vecindad.
  - La resistividad residual de la zona ionizada no es un factor significante en el cálculo de R_i
  - El valor de E_o debe ser tomado igual a 300 kV/m

- **Liu et.al. (2003)** [8]**:** Bajo el objetivo de determinar la resistencia residual típica de un suelo ante descargas atmosféricas, Liu et.al. realizaron una serie de pruebas de impulso de corriente tipo rayo en un recipiente semiesférico lleno de arena de playa con diversos niveles de humedad y cambiando los radios del electrodo interno. Los resultados obtenidos muestran que la resistividad residual varía en un rango de 1,7% hasta 47% de la resistividad inicial del suelo. Sin embargo, la distribución de

los resultados es aproximadamente log normal con media geométrica de 6,77% y un valor medio de 6,6%. En consecuencia, una resistividad residual típica en la región de ionización del 7% es planteada, incluso en suelos con mayor resistividad inicial.

- **Pineda (2004)** [29]**:** A nivel regional, varios investigadores han mostrado interés en el comportamiento del suelo ante descargas atmosféricas. Pineda ha sido uno de los más destacados en este campo al realizar una descripción detallada del mecanismo termoeléctrico para el inicio de la descarga.

  El modelo experimental construido por Pineda constaba de una probeta cilíndrica y una varilla concéntrica, la cual estaba inmersa en arena. Se aplicaron impulsos de tensión tipo rayo a la varilla sometiendo la arena a diferentes condiciones de humedad, la cual estaba determinada por el contenido de agua con respecto al peso total de la muestra. De acuerdo con los resultados obtenidos, la arena presenta un comportamiento no lineal y el aumento del contenido de agua en la arena ocasiona un decrecimiento en la impedancia transitoria. Así mismo, se pudieron identificar tres estados durante la descarga: circulación de corriente de conducción, proceso de ionización y fenómeno de conducción de menor magnitud. Finalmente, se concluyó que el gradiente crítico estimado decrece cuando el contenido de humedad en el terreno aumenta.

- **Mohamad et.al (2006)** [36]**:** En el modelo desarrollado se describe el efecto de la ionización del suelo en la relación V/I ante impulsos de tensión. Para la implementación experimental utilizaron arena en una probeta de electrodos coaxiales semiesféricos. En este modelo se evalúa la resistencia de pre-ionización, así como la de post-ionización, las cuales describen la relación V/I antes y después de presentarse la ionización.

En la siguiente sección se exponen los modelos que han sido utilizados para describir teóricamente la resistencia del canal de la descarga, variable que será incluida en los análisis presentados en el siguiente capítulo.

2.3 Resistencia del canal de descarga

Una descarga en un gas aislante se produce cuando la tensión entre los electrodos se incrementa por encima de su tensión de disrupción y, por lo tanto, el gas cambia de un estado aislante a un estado conductivo. El objetivo de considerar la resistencia del canal de descarga en el modelo del sistema de puesta a tierra es garantizar la seguridad humana. Bajo este precepto, existen diversos enfoques en los modelos de la resistencia del canal de descarga. **Tabla 2-1** muestra un resumen de las principales ecuaciones de resistencia de arco.

Tabla 2-1: Modelos de resistencia del arco [37]

Investigador	Ecuación [Ω]	Parámetros	Condiciones de prueba
Toepler (1906)	$\frac{k\,d}{\int_0^\tau i\,dt}$	k: Constante del modelo d: Distancia interelectrodica [m] i: Corriente del canal [A]	d =9-17,5 [mm] p =100 [kPa] En aire
Rompe & Weizel (1944)	$\frac{d}{\sqrt{2\frac{k}{p_0}\int_0^\tau i^2 dt}}$	k: Constante del modelo d: Distancia interelectrodica [m] p_0: Presión inicial en el gas [kPa] i: Corriente del canal [A]	d ≤35 [mm] p_0 =100-600 [kPa] En aire Pulso unipolar, 50 [ns]
Braginskii (1958)	$\frac{d}{\pi\sigma k^2 \int_0^\tau i^{2/3} dt}$	k: Constante del modelo d: Distancia interelectrodica [m] σ: Conductividad del canal [Ωm] i: Corriente del canal [A]	Modelo empírico
Vlastos (1972)	$\frac{k d r^{2/5}}{\left(\int_0^\tau i^2 dt\right)^{3/5}}$	k: Constante del modelo d: Distancia interelectrodica [m] r: Radio del canal [m] i: Corriente del canal [A]	d = 130 [mm] Alambre explosivo
Sorensen & Ristic (1977)	$k\left(\frac{p^{1/2}}{E Z_0^{1/3} t}\right)$	k: Constante del modelo p: Presión en el gas [kPa] E: Campo eléctrico [kV/m] Z_0: Impedancia TL [Ω]	p =200-600 [kPa] d =50-500 [μm] Ni, He Pulso unipolar, 100 [ns]
Kushner (1985)	$k d \left(\frac{p_0^3}{A^2 i^6}\right)^{1/5}$	k: Constante del modelo d: Distancia interelectrodica [m] p_0: Presión inicial en el gas [kPa] A: Área transversal del canal [m^2] i: Corriente del canal [A]	j =2x10^4 [MA/m] d =12 [mm] p_0 ≤50 [kPa] SF_6, H_2, N_2, CH_4, Xe Pulso unipolar, 100 [ns]

Fuente: Adaptación de Santamaría F. "*Experimental Research Work on a Sub-Millimeter Spark-Gap for Sub-Nanosecond Gas Breakdown*", 2012

Desde 1906, se han realizado varios análisis teóricos y experimentales de la resistencia del canal de descarga para describir la transición de un canal *streamer* a un canal de baja resistencia. Los modelos más conocidos son descritos a continuación [37]:

- **Toepler (1906):** El modelo de resistencia del arco más ampliamente utilizado es el modelo empírico propuesto por Toepler, quien supuso que existe una columna débilmente conductora cuya conductividad aumenta por ionizaciones múltiples. En este modelo, la resistencia es inversamente proporcional a la carga que fluye a través del canal. Sin embargo, la expansión de la columna a causa del calentamiento no fue considerada en este modelo. Por lo tanto, Bluhm sugirió que el modelo de Toepler solo es válido durante un periodo de tiempo limitado, el cual es de aproximadamente 10 ns para un gas a presión atmosférica [38].

- **Rompe & Weizel (1944):** Una mejora del modelo de Toepler fue propuesta años más tarde por Rompe & Weizel, quienes incluyeron el balance de energía del canal de descarga, pero al igual que Toepler, no consideraron la expansión del canal. En consecuencia, encontraron una expresión similar a la Toepler para la resistencia del canal de descarga.

- **Braginskii (1958):** La teoría de Braginskii asume un canal cilíndrico en el cual la inercia del gas y la presión permanecen constantes durante todo el proceso, aunque la temperatura y la ionización caen bruscamente a las condiciones ambientales. Del principio de la conservación de energía, Braginskii derivó su ecuación para el radio del canal de descarga, en el cual asume una conductividad de canal específica independiente del tiempo. Adicionalmente, obtuvo un modelo de resistencia del arco utilizando tanto el modelo del radio del canal como la ecuación de resistencia del conductor cilíndrico.

- **Vlastos (1972):** Contrario al modelo de Rompe & Weizel, Vlastos supuso que la conductividad del plasma en la distancia entre electrodos se mantuvo en un estado casi estacionario en el momento de la formación del canal y sugirió que los cambios adicionales en la resistencia al arco se debieron a la expansión del canal. Por lo tanto, obtuvo una expresión para la resistencia del arco suponiendo que el plasma del canal es único y está completamente ionizado.

- **Sorensen & Ristic (1977):** Por medio de resultados experimentales, Sorensen & Ristic obtuvieron la variación temporal de la resistencia del arco al medir la corriente transmitida y la reflejada en una línea coaxial cuyo *spark-gap* estaba ubicado entre

los conductores centrales. La línea coaxial era cortocircuitada justo después de la descarga y se le inyectaban pulsos de voltaje con un ancho de 2 μs, los cuales eran medidos con un sensor de campo magnético antes del interruptor. Para los experimentos se utilizó Nitrógeno y Helio a presiones entre 200 y 600 kPa, con una distancia entre electrodos entre 50 y 500 μm.

- **Kushner (1985):** En el trabajo de Kushner se utilizó una configuración que permitía la activación del *spark-gap* por láser, en una distancia fija entre electrodos de 12 mm, la cual estaba inmersa en diferentes gases como SF6 a presiones entre 25 y 200 kPa. La tensión y la corriente se midieron con un divisor de tensión capacitivo y una resistencia shunt integrados en la cámara de descarga. Se registró el diámetro del canal de la descarga y se calculó la inductancia, con la cual se estimó la caída de tensión en el arco por efectos inductivos y se despreciaron para obtener la resistencia del arco.

Con la revisión de los modelos, tanto para la impedancia de puesta a tierra como para el canal de la descarga, es posible plantear una aproximación teórica del fenómeno de interés de este documento. Por lo tanto, en el siguiente capítulo se exponen los resultados obtenidos en la fase de simulación, en la cual se utilizaron los Software de simulación electromagnética *Comsol Multiphysics* y de análisis de transitorios *ATP-EMTP* para establecer las características eléctricas de la impedancia transitoria de puesta a tierra.

3. Análisis preliminar

En este capítulo se expone la metodología y los resultados obtenidos en la fase de simulación, en la cual se utilizaron los Software de simulación electromagnética *Comsol Multiphysics* y de análisis de transitorios *ATP-EMTP* para establecer la influencia de las características de la tierra en la impedancia transitoria de puesta a tierra. Como conclusión de este capítulo, se plantea un modelo que considera la resistividad de la tierra y el pico de la corriente de rayo.

3.1 Simulación electromagnética en *Comsol Multiphysics*

Bajo el objetivo de tener una aproximación al comportamiento transitorio del suelo cuando es impactado por una corriente de impulso tipo rayo, se realizaron una serie de simulaciones empleando un Software de elementos finitos. Por medio del solucionador transitorio, fue posible obtener la distribución de campo eléctrico en el suelo cuando es impactado por una descarga atmosférica.

3.1.1 Consideraciones iniciales

Para representar el caso en el que la descarga atmosférica impacta en un suelo que se encuentra en campo abierto, se utilizó la geometría mostrada en **Figura 3-1**, así como los materiales descritos en **Tabla 3-1**. La varilla cilíndrica se seleccionó como electrodo de alta tensión, mientras que la semiesfera exterior se definió como tierra. La posición del electrodo de alta tensión se varió perpendicularmente al suelo para verificar el efecto cuando la mitad de su volumen se encuentra enterrado y cuando se encuentra separado del suelo por algunos milímetros, como se muestra en **Figura 3-2.**

Figura 3-1: Geometría y malla utilizada para representar el impacto de un rayo en el suelo

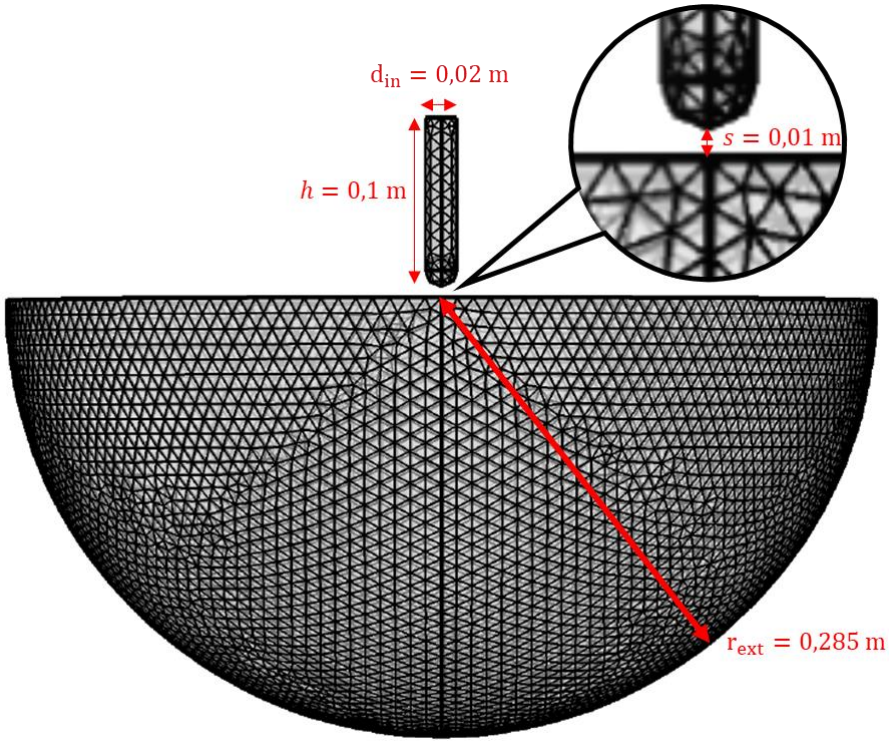


Tabla 3-1: Materiales utilizados para representar el impacto de un rayo en el suelo

Dominio	Material	Conductividad eléctrica σ [S/m]	Permitividad relativa ε_r [-]
Electrodo de alta tensión	Cobre	$5{,}998 \times 10^7$	1
Cascarón exterior	Acero	$4{,}032 \times 10^6$	1
Suelo húmedo [39]	Suelo homogéneo	0,01	40
Suelo seco [39]	Suelo homogéneo	0,001	1

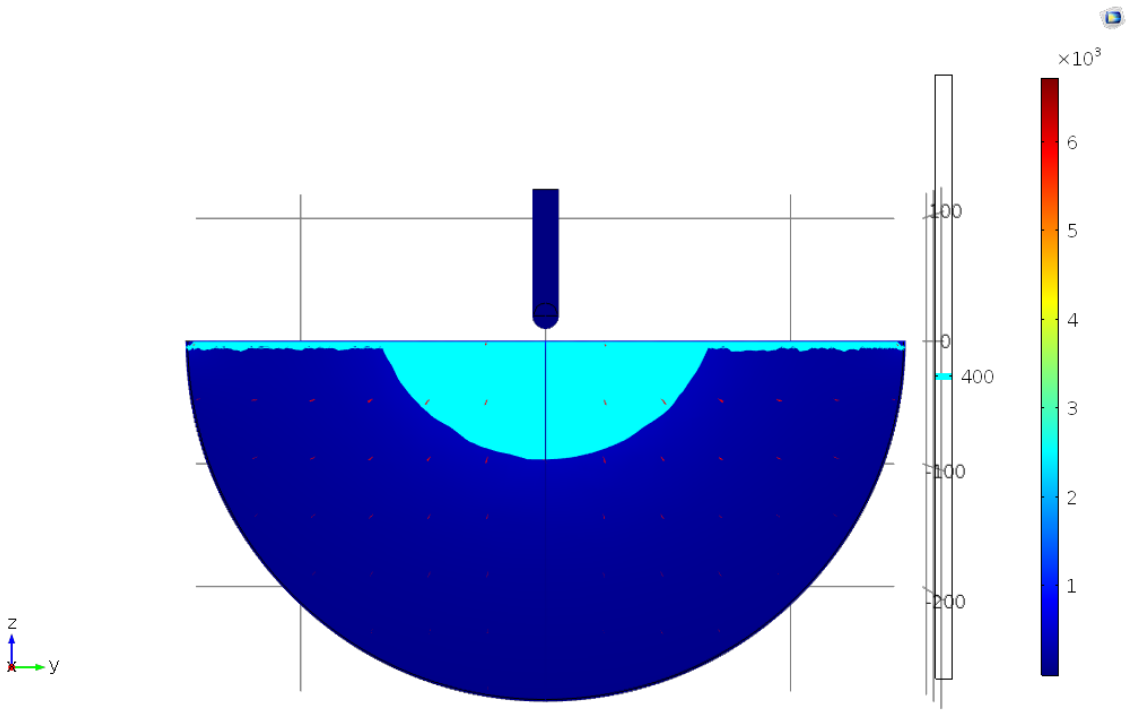
Figura 3-2: Variación de la posición del electrodo de alta tensión (a) Con 1 cm de GAP entre el suelo y el electrodo (b) Electrodo enterrado 1 cm en el suelo

(a) (b)

3.1.2 Resultados

Por medio de las simulaciones realizadas con el Software *Comsol Multiphysics* fue posible verificar el comportamiento de la zona ionizada con la modificación de variables como la profundidad de enterramiento del electrodo de alta tensión, la tensión aplicada y las propiedades eléctricas del suelo. **Figura 3-3** muestra la distribución típica del campo eléctrico, así como la zona ionizada que corresponde a la zona en azul claro.

Figura 3-3: Distribución de campo eléctrico



- **Profundidad de enterramiento del electrodo de alta tensión:** Para verificar la influencia de separar el electrodo de alta tensión de la superficie del suelo, se simuló el arreglo mostrado en **Figura 3-1** y se varió la posición del electrodo cilíndrico como se muestra en **Figura 3-2**. La característica del campo eléctrico con respecto a la distancia radial para un suelo de conductividad eléctrica $\sigma = 0{,}001\ \mathrm{S/m}$ y permitividad relativa $\varepsilon_r = 1$ se muestra en **Figura 3-4**. De acuerdo con esta gráfica, el campo eléctrico es más fuerte en cercanías al electrodo cuando la mitad de su volumen se encuentra enterrado. Por otra parte, después de superar

un radio de 100 mm en el suelo, el campo eléctrico tiene el mismo comportamiento para ambas configuraciones.

Figura 3-5 presenta un acercamiento de la curva de campo eléctrico vs distancia radial. Suponiendo que el campo eléctrico crítico es de 4 kV/cm, de acuerdo con el valor sugerido por el CIGRE [40], se puede encontrar gráficamente que el radio de ionización es aproximadamente 193 mm para ambos casos.

- **Incremento de la tensión aplicada:** Para corroborar cómo aumenta la zona ionizada conforme se incrementa la tensión aplicada, se simuló el arreglo mostrado en **Figura 3-1** y se varió la tensión aplicada desde 50 kV hasta 500 kV. La variación del campo eléctrico cuando se incrementa la tensión aplicada a un suelo de conductividad eléctrica $\sigma = 0{,}001\ \mathrm{S/m}$ y permitividad relativa $\varepsilon_r = 1$ se muestra en **Figura 3-6**. En esta gráfica se indica el radio de ionización para cada tensión aplicada, mostrando que este parámetro es mayor cuando la tensión aplicada se eleva, debido a que es más fácil superar el valor del campo eléctrico crítico y desencadenar el fenómeno de ionización.

- **Cambio de propiedades eléctricas del suelo:** Bajo el objetivo de identificar la influencia de la humedad del suelo, se simuló el arreglo mostrado en **Figura 3-1** y se cambiaron las propiedades del material. Se simularon dos tipos de suelos: Un suelo húmedo con conductividad eléctrica $\sigma = 0{,}01\ \mathrm{S/m}$ y permitividad relativa $\varepsilon_r = 40$ y un suelo seco con conductividad $\sigma = 0{,}001\ \mathrm{S/m}$ y permitividad $\varepsilon_r = 1$. La variación del campo eléctrico con el cambio de las propiedades del material se muestra en **Figura 3-7**. En esta gráfica se indica el radio de ionización para cada suelo, mostrando que este parámetro es mayor cuando la conductividad del suelo es menor.

Figura 3-4: Característica del campo eléctrico con respecto a la distancia radial para un suelo de conductividad eléctrica $\sigma = 0{,}001\ \mathrm{S/m}$ y permitividad relativa $\varepsilon_r = 1$

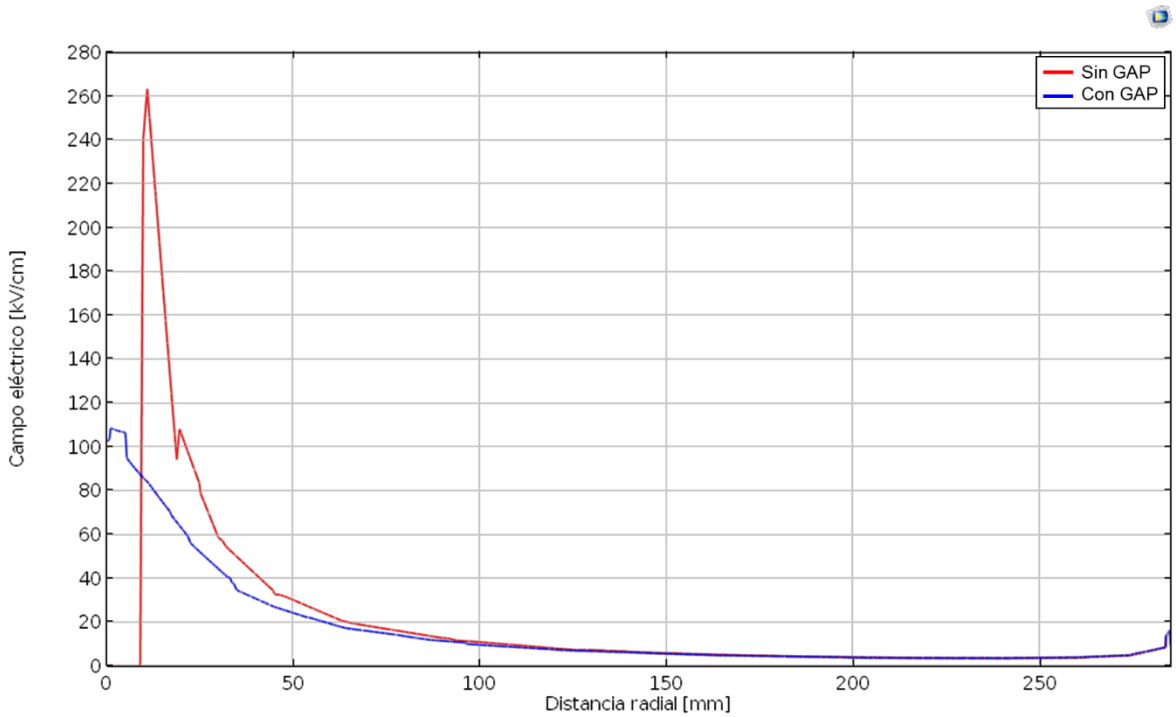


Figura 3-5: Gráfica de campo eléctrico vs distancia radial con variación de enterramiento del electrodo de alta tensión

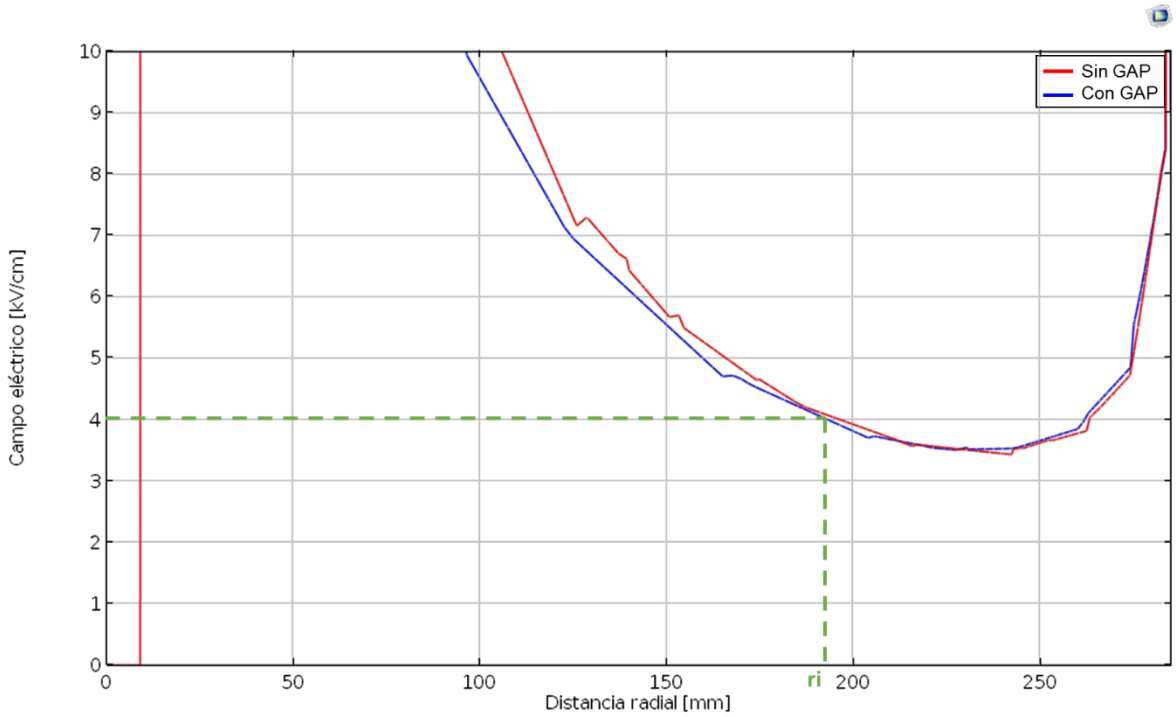


Figura 3-6: Gráfica de campo eléctrico vs distancia radial con incremento de la tensión aplicada al arreglo

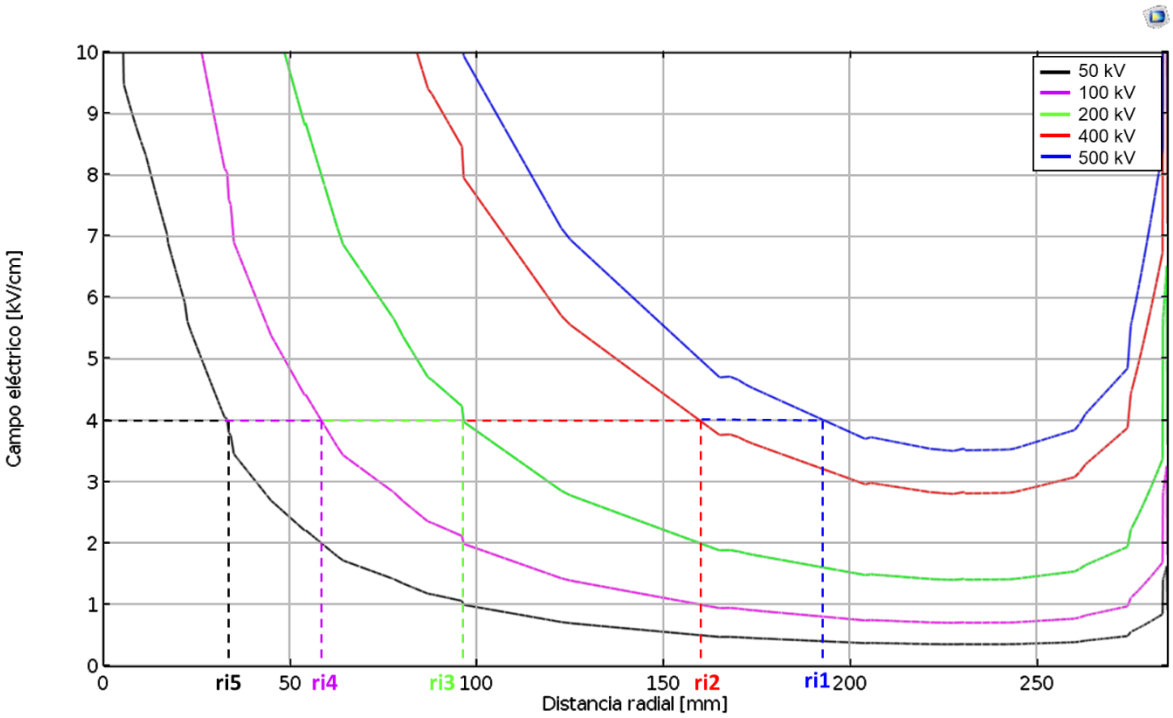
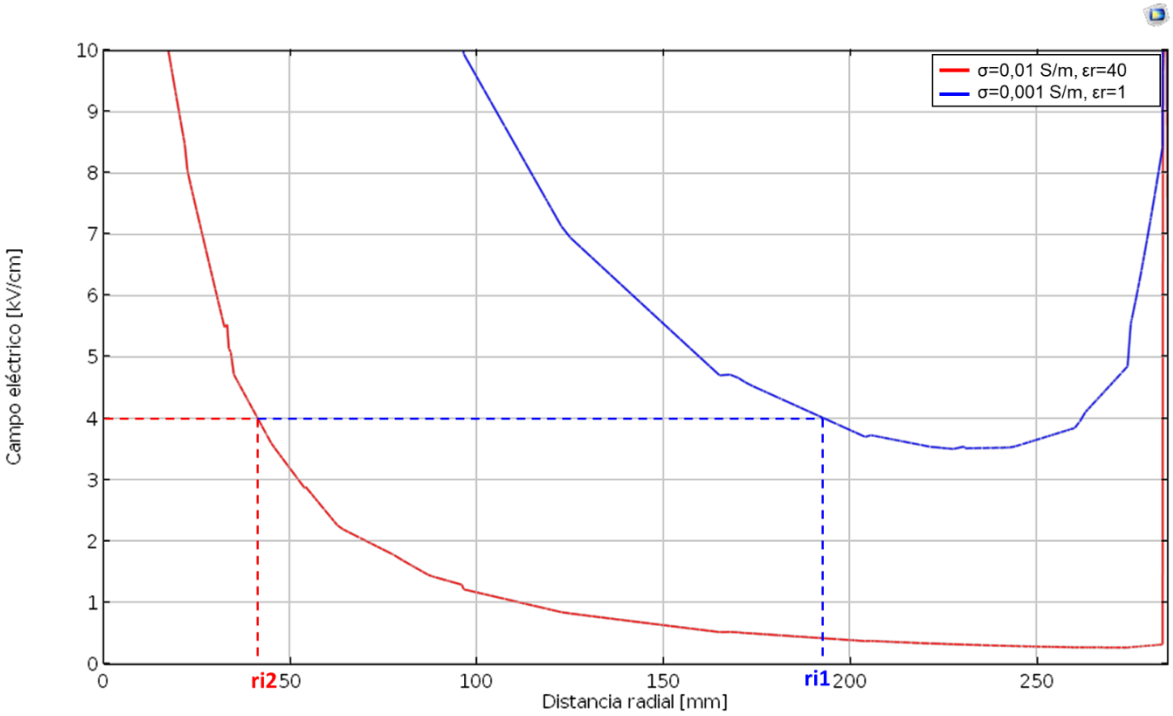


Figura 3-7: Gráfica de campo eléctrico vs distancia radial con cambio de las propiedades eléctricas del suelo



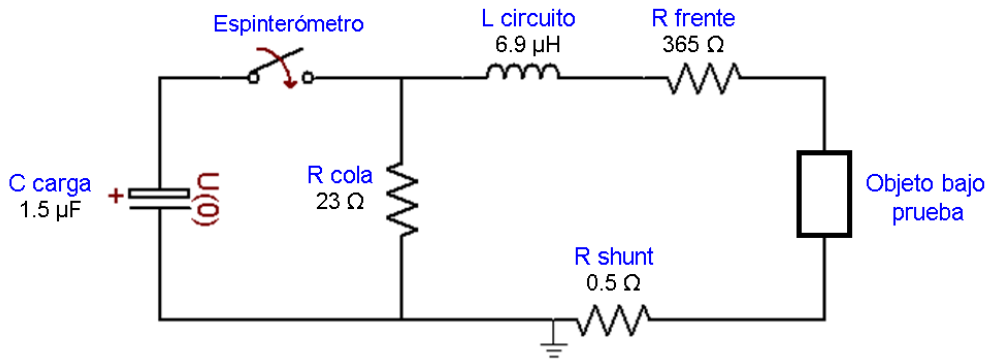
3.2 Análisis de transitorios en *ATP-EMTP*

Bajo el objetivo de tener una aproximación al modelo circuital del suelo cuando es impactado por una corriente de impulso tipo rayo, se realizaron una serie de simulaciones empleando el Software *ATP-EMTP*. Por medio de este Software para análisis de transitorios, fue posible obtener la tensión y la corriente cuando se incluye la variación de la impedancia del suelo conforme aumenta la magnitud de la corriente y la resistencia del canal de descarga.

3.2.1 Consideraciones iniciales

Para simular el caso en el que la descarga atmosférica impacta en un suelo se implementó en *ATP-EMTP* el circuito equivalente que se muestra en **Figura 3-8**. En este circuito, el generador de impulsos de tensión 1,2/50 µs se representa con un condensador $C\ carga$, el cual se descarga a través de un espinterómetro al objeto de prueba (impedancia del suelo). La tensión de carga del condensador se varió de tal forma que la capacidad de corriente de cortocircuito fuera 100 kA.

Figura 3-8: Esquemático del circuito implementado en ATP-EMTP, donde se representa el generador de impulsos por medio de una configuración RLC.



Para las simulaciones se consideró un volumen semiesférico con dos tipos de suelo homogéneos: Un suelo húmedo representado por un material con una conductividad eléctrica $\sigma = 0{,}01\ \mathrm{S/m}$, y un suelo seco con $\sigma = 0{,}001\ \mathrm{S/m}$ [39]. El radio de la semiesfera r se calculó utilizando Ecuación (3.1) y suponiendo que se inyecta una corriente con

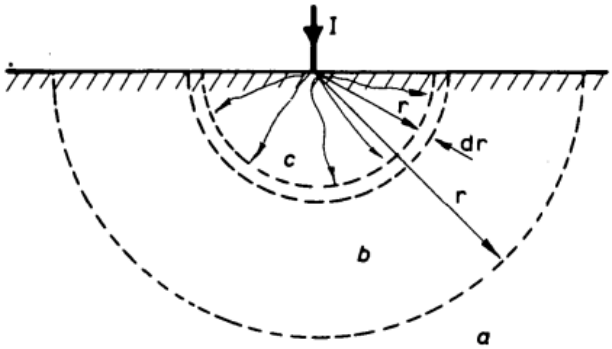
amplitud $I_k = 100\,\mathrm{kA}$. Adicionalmente, el campo eléctrico crítico se asumió de $\mathrm{E_C} = 4\ \mathrm{kV/cm}$, de acuerdo con el valor sugerido por el CIGRE [40].

$$r = \left(\frac{I_k}{2\pi\sigma E_C}\right)^{1/2} \tag{3.1}$$

En primer lugar, se realizó una simulación considerando una variación del radio de ionización en función de la densidad de corriente en el volumen de tierra, de manera que la resistencia del suelo que no se ioniza se puede obtener sumando todas las capas semiesféricas de espesor dr como se muestra **Figura 3-9** [33]. Por lo tanto, la resistencia total puede hallarse utilizando la Ecuación (3.2). Donde: ρ_0 es la resistividad del suelo, $r_a(J)$ es el radio de la zona ionizada y r es el radio total de la semiesfera.

$$R = \frac{\rho_0}{2\pi}\left(\frac{1}{r_a(J)} - \frac{1}{r}\right) \tag{3.2}$$

Figura 3-9: Modelo semiesférico para una descarga atmosférica directa al suelo [33].



FUENTE: Liew & Darveniza, *"Dynamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earths"*, 1974.

Por otra parte, se incluyó la resistencia de la zona de ionización, la cual se determinó utilizando Ecuación (3.3). Donde: ρ_0 es la resistividad del suelo, r_a es el radio de la zona ionizada y τ_1 es la constante de ionización. De acuerdo con la literatura, τ_1 es igual a 2 µs [33]. Este comportamiento se mantuvo hasta que la densidad de corriente fuera igual al valor crítico y entrara en la región de desionización.

$$R = \frac{\rho_0}{2\pi r_a} e^{\frac{-t}{\tau_1}} \tag{3.3}$$

El proceso de desionización del suelo se describe matemáticamente utilizando Ecuación (3.4). Donde: τ_2 es la constante de tiempo de deionización y ρ_i es el valor de la resistividad cuando la densidad de corriente es igual al valor crítico ($J = J_C$). De acuerdo con la literatura, τ_2 es igual a 4,5 µs [33] y la resistividad se reduce aproximadamente a 7% de la resistividad inicial ρ_o [41].

$$R = \frac{1}{2\pi r_a}\left[\rho_\mathrm{i} + (\rho_o - \rho_i)\left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_2}}\right)\left(1 - \frac{J}{J_C}\right)^2\right] \tag{3.4}$$

Finalmente, se incluyó en las simulaciones la resistencia del canal de descarga. De acuerdo con la literatura, la mejor aproximación de la variación temporal calculada de la resistencia al arco se ha obtenido con la ecuación de Kushner [37], por lo tanto, en las simulaciones mostradas en este documento se utiliza el modelo de resistencia de arco dado por la Ecuación (3.5). Donde: c es la constante del modelo ($c = 24{,}7$), P_0 es la presión inicial en el gas ($P_0 = 1 \times 10^5\ [\mathrm{bar}]$), d es la distancia entre el electrodo de alta tensión y el suelo ($d = 10\ \mathrm{mm}$), i es la corriente del canal y a es el área longitudinal del arco.

$$R_{arc} = c \cdot d\left(\frac{P_o^3}{a^2 \cdot i^6}\right)^{\frac{1}{5}} \tag{3.5}$$

Para el radio del canal se asume el dado por la teoría de Braginskii, el cual ha sido ampliamente aceptado teórica y experimentalmente. La variación temporal del radio del canal está dado por la Ecuación (3.6). Donde i es la corriente en el canal del arco y ρ_0 es la densidad del aire ($\rho_0 = 1{,}225\ \mathrm{kg/m^3}$).

$$r(t) = 2{,}94 \times 10^{-1}\left(\frac{i^{1/3} \cdot t^{1/2}}{\rho_0^{1/6}}\right) \tag{3.6}$$

3.2.2 Resultados

Por medio de las simulaciones realizadas con el Software de análisis de transitorios *ATP-EMTP* fue posible confirmar el modelo planteado por Liew & Darveniza [33]. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada una de las zonas que componen la impedancia transitoria de puesta a tierra. Estos resultados muestran que la relación V/I deja de ser un parámetro lineal cuando el suelo es impactado por una descarga atmosférica.

- **Zona no ionizada:** Teniendo en cuenta que, en la zona no ionizada la resistividad del terreno se mantiene constante mientras que no se excede el valor crítico de densidad de corriente, se halló el radio de ionización y se calculó la resistencia de la zona no ionizada. **Tabla 3-2** y **Tabla 3-3** presentan los valores de amplitud de corriente, el radio de ionización y la resistencia para dos tipos de suelo: Un suelo húmedo representado por un material con una conductividad eléctrica $\sigma = 0{,}01\ \mathrm{S/m}$, y un suelo seco con $\sigma = 0{,}001\ \mathrm{S/m}$. Estos valores fueron utilizados para parametrizar en *ATP-EMTP* la resistencia de la zona no ionizada utilizando el elemento *R(i) Type 92.*

Tabla 3-2: Valores de amplitud de corriente, radio de ionización y resistencia en la zona no ionizada para un suelo húmedo representado con una conductividad de $\sigma = 0{,}01\ \mathrm{S/m}$

Amplitud de corriente	Radio de ionización	Resistencia en zona no ionizada
[A]	**[mm]**	**[kΩ]**
1	0,20	79,97
2	0,28	56,55
5	0,44	35,76
10	0,63	25,29
20	0,89	17,88
50	1,41	11,31
100	1,99	8,00
200	2,81	5,65
500	4,45	3,57
[kA]	**[cm]**	**[Ω]**
1	0,63	2526,58
2	0,89	1785,82
5	1,41	1128,53
10	1,99	797,25
20	2,81	563,00
50	4,45	355,15
100	6,29	250,39

Tabla 3-3: Valores de amplitud de corriente, radio de ionización y resistencia en la zona no ionizada para un suelo húmedo representado con una conductividad de $\sigma = 0{,}001\ \mathrm{S/m}$

Amplitud de corriente	Radio de ionización	Resistencia en zona no ionizada
[A]	**[mm]**	**[kΩ]**
1	0,63	25,22
2	0,89	17,83
5	1,41	11,28
10	2,00	7,97
20	2,82	5,64
50	4,46	3,56
100	6,31	2,52
200	8,92	1,78
500	14,11	1,13
[kA]	**[cm]**	**[Ω]**
1	2,00	795,09
2	2,82	561,47
5	4,46	354,18
10	6,31	249,70
20	8,92	175,83
50	14,11	110,28
100	19,95	77,24

Figura 3-10 presenta la curva de la relación V/I obtenida como resultado del proceso de simulación. Esta gráfica muestra que la resistencia en la zona no ionizada aumenta conforme cae el impulso de corriente, lo cual corrobora que la zona de ionización decrece con la reducción de la densidad de corriente. Adicionalmente, esta gráfica muestra que la curva correspondiente al suelo de mayor conductividad tiene una pendiente más inclinada confirmando que para un suelo con mayor conductividad se requiere una densidad de corriente mayor para producir ionización.

- **Zona ionizada:** Teniendo en cuenta que, en la zona ionizada la resistividad del terreno estará descrita por Ecuaciones (3.3) y (3.4), se calculó la resistencia como función del tiempo y del radio de ionización de acuerdo con **Tabla 3-2** y **Tabla 3-3**. Estos valores fueron utilizados para parametrizar en *ATP-EMTP* la resistencia de la zona ionizada utilizando el elemento *R(t) Type 91.*

Figura 3-11 presenta la característica V/I en la zona ionizada obtenida como resultado del proceso de simulación. Esta gráfica muestra que la resistividad del suelo ionizado siempre mantiene un porcentaje de la resistividad inicial durante una

descarga atmosférica. Adicionalmente, se puede observar que el tiempo de recuperación es mucho más rápido cuando la conductividad es menor.

Figura 3-10: Curva resultante de la relación V/I en la zona no ionizada para dos conductividades diferentes ($\sigma_1 = 0{,}01\ \mathrm{S/m}$ y $\sigma_2 = 0{,}001\ \mathrm{S/m}$)

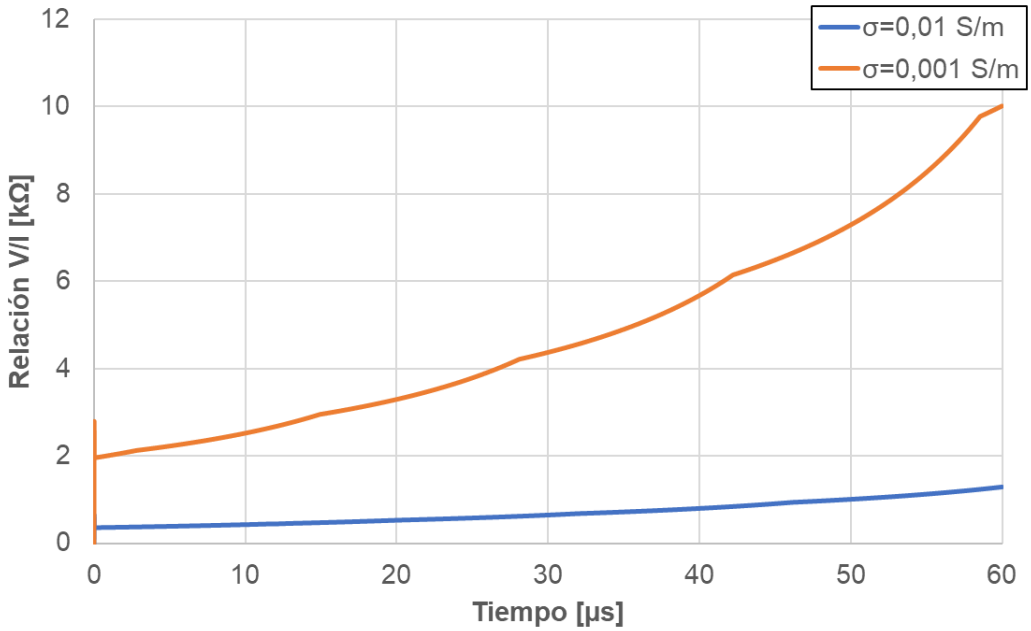
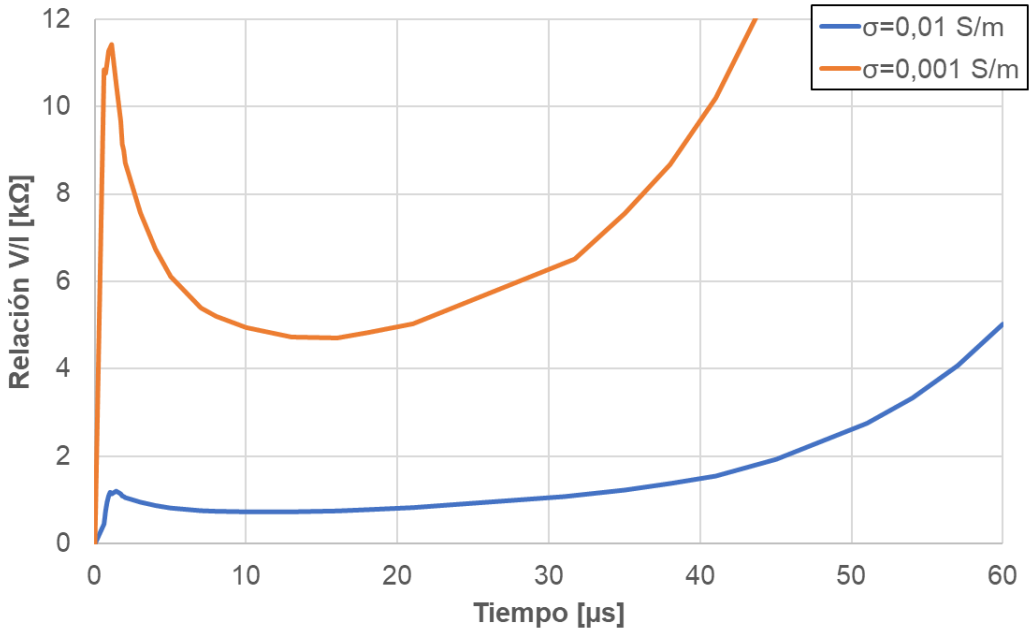


Figura 3-11: Curva resultante de la relación V/I en la zona ionizada para dos conductividades diferentes ($\sigma_1 = 0{,}01\ \mathrm{S/m}$ y $\sigma_2 = 0{,}001\ \mathrm{S/m}$)



- **Resistencia del arco:** Teniendo en cuenta que, la distancia interelectródica entre el electrodo de alta tensión y el punto de impacto en el suelo estará descrita por Ecuación (3.5), se calculó la resistencia como función del tiempo. Estos valores fueron utilizados para parametrizar en *ATP-EMTP* la resistencia del arco utilizando el elemento *R(t) Type 91.*

Figura 3-12: Característica de la resistencia del arco

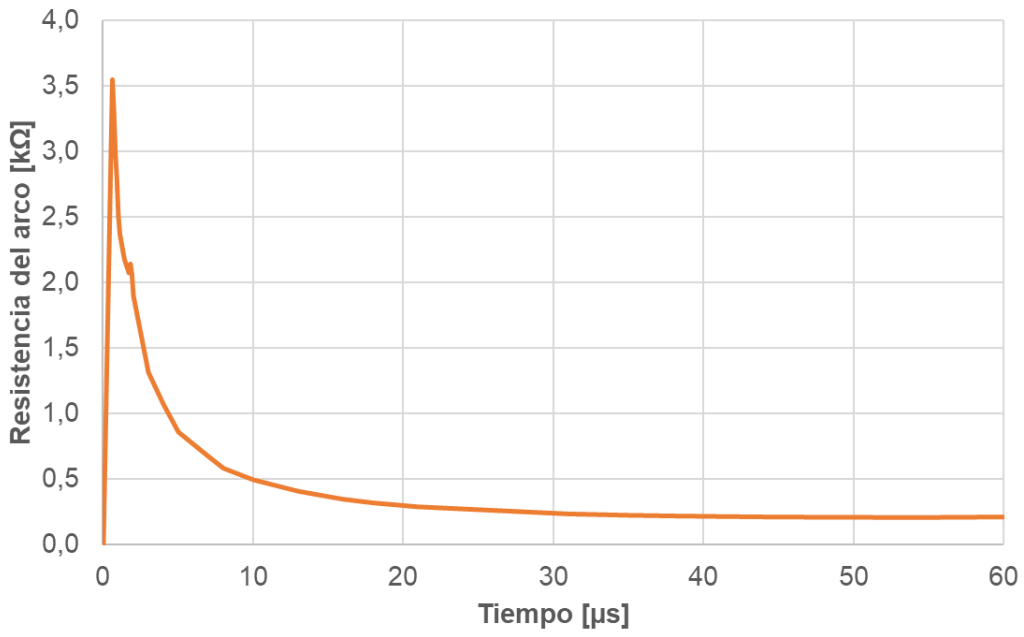


Figura 3-12 presenta la característica de la resistencia del arco. Esta gráfica muestra que a partir del momento en el que ocurre la disrupción en el aire, la resistencia del arco se reduce conforme se aumenta el área del canal hasta que se logra el pico de corriente.

3.3 Modelo eléctrico del suelo ante la aplicación de impulsos tipo rayo

Teniendo en cuenta los resultados presentados en la sección anterior, el modelo eléctrico propuesto es presentado en **Figura 3-13**. Este modelo está compuesto por un circuito en serie de la resistencia de la zona ionizada y la zona no ionizada. Igualmente, se incluye en

serie la resistencia del canal de descarga para representar el comportamiento del rayo microsegundos antes de impactar el suelo.

Figura 3-13: Modelo eléctrico propuesto del suelo ante la aplicación de impulsos tipo rayo.

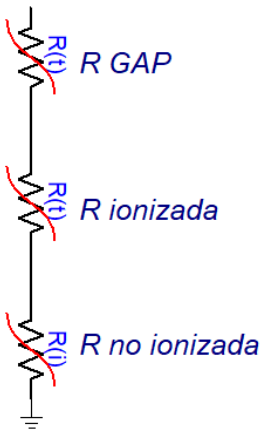


Figura 3-14 muestra el comportamiento de las señales de tensión y corriente al inicio de la descarga en el suelo. Durante los primeros instantes de tiempo, la tensión se incrementa permitiendo la conducción de corriente a través del suelo hasta alcanzar el pico de tensión. Posteriormente, la tensión desciende exponencialmente mientras que la magnitud de corriente aumenta iniciando la descarga en el suelo. Mientras avanza la descarga a través del suelo, la tensión continua su descenso de manera exponencial y la corriente aumenta hasta alcanzar su valor máximo cerca de los 7 µs como se muestra en **Figura 3-15**.

Al estimar el cociente entre la señal de tensión y corriente se obtiene la curva mostrada en **Figura 3-16**, esta curva muestra el comportamiento de la impedancia dinámica de la conexión a tierra cuando una corriente de rayo se transfiere al suelo, es decir, cuando el electrodo no está enterrado en el suelo.

En **Figura 3-16** se observa que en el instante del inicio de la descarga t_i (0,7 µs) la relación V/I del conjunto GAP y el suelo tiene un valor inicial $\mathrm{Z_i} = 4{,}1\ \mathrm{k\Omega}$. Posteriormente, cuando se produce la ruptura del aire, la corriente inyectada en el suelo ioniza una pequeña región y, por lo tanto, la relación V/I cae hasta un valor mínimo $\mathrm{Z_{min}} = 1{,}1\ \mathrm{k\Omega}$ en un tiempo t_m (14,9 µs). A partir de este momento, la resistencia permanece constante hasta el inicio

del proceso de deionización cuando la relación V/I tiende a recuperar su valor inicial Z_i en un tiempo t_r (56,1 µs).

Figura 3-14: Comportamiento de las señales de tensión y corriente durante el inicio de la descarga en el suelo

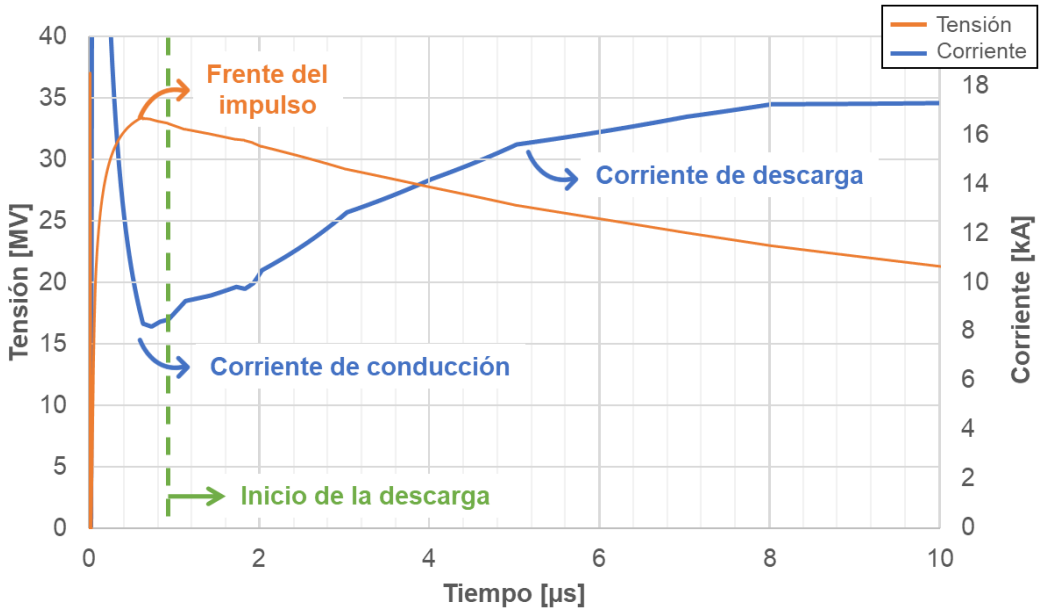


Figura 3-15: Comportamiento de las señales de tensión y corriente a lo largo de la descarga en el suelo

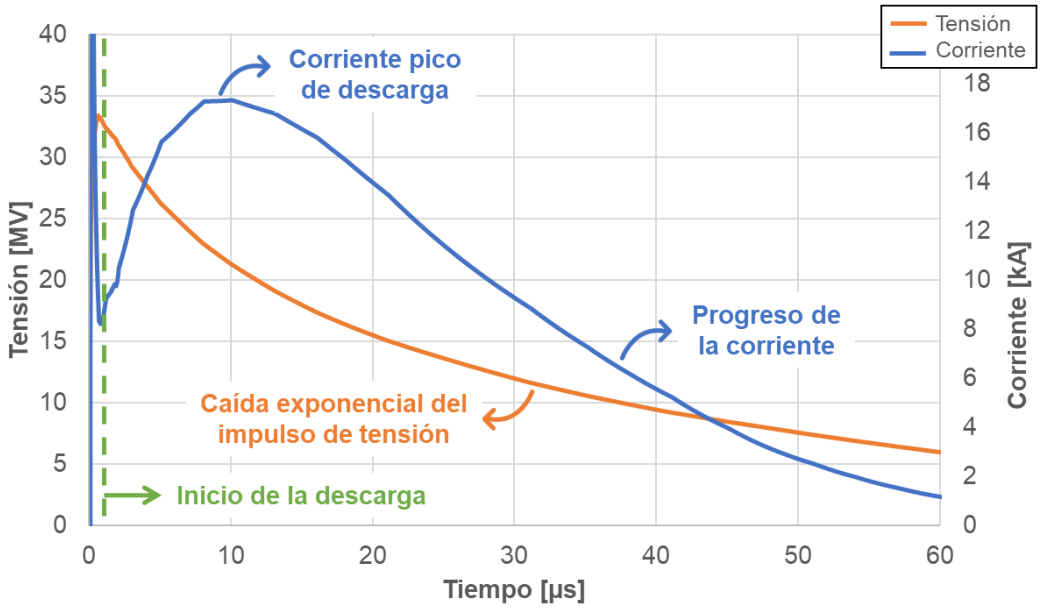
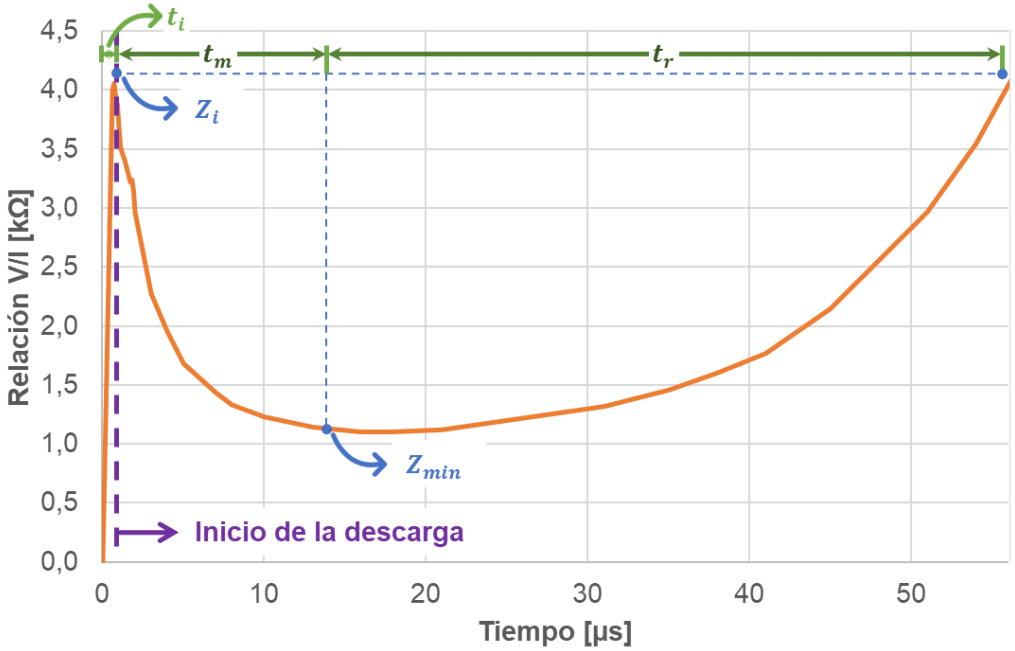


Figura 3-16: Curva resultante de la relación V/I



Bajo el objetivo de tener información adicional para soportar la idea de que existe una resistencia residual en la región de ionización, se ejecutaron una serie de pruebas en una muestra de tierra vegetal abonada. Los resultados obtenidos durante estas pruebas son presentados en el siguiente capítulo.

4. Análisis experimental

En este capítulo se expone la metodología y los resultados obtenidos en el estudio experimental de la impedancia transitoria de puesta a tierra.

4.1 Experimento bajo condiciones controladas

Bajo el objetivo de tener información adicional para soportar la idea de que existe una resistencia residual en la región de ionización, se ejecutaron una serie de pruebas en una muestra de tierra vegetal abonada. La metodología y los resultados obtenidos son presentados a lo largo de esta sección.

4.1.1 Metodología

- **Objeto de prueba:** Para las pruebas experimentales se utilizó una muestra de tierra vegetal abonada. La muestra se sometió a secado al aire durante aproximadamente un mes para obtener un nivel bajo de agua antes de iniciar los experimentos. Posteriormente, la humedad de la muestra se varió de 8% a 12%.

- **Probeta de ensayo:** El elemento utilizado para contener la muestra de suelo durante la aplicación de los impulsos fue una probeta cilíndrica de aluminio de 34 cm de diámetro y 23 cm de profundidad. Como electrodo de alta tensión se utilizó una varilla de aluminio de 1 cm de diámetro y 10 cm de largo terminada en punta. **Figura 4-1** presenta la disposición física y las dimensiones de la probeta de ensayo. Durante los ensayos, la posición del electrodo de alta tensión se varió como se muestra en **Figura 4-2**.

Figura 4-1: Disposición física y dimensiones en centímetros de la probeta de ensayo (a) Vista superior (b) Vista frontal (c) Vista isométrica (d) Vista realista

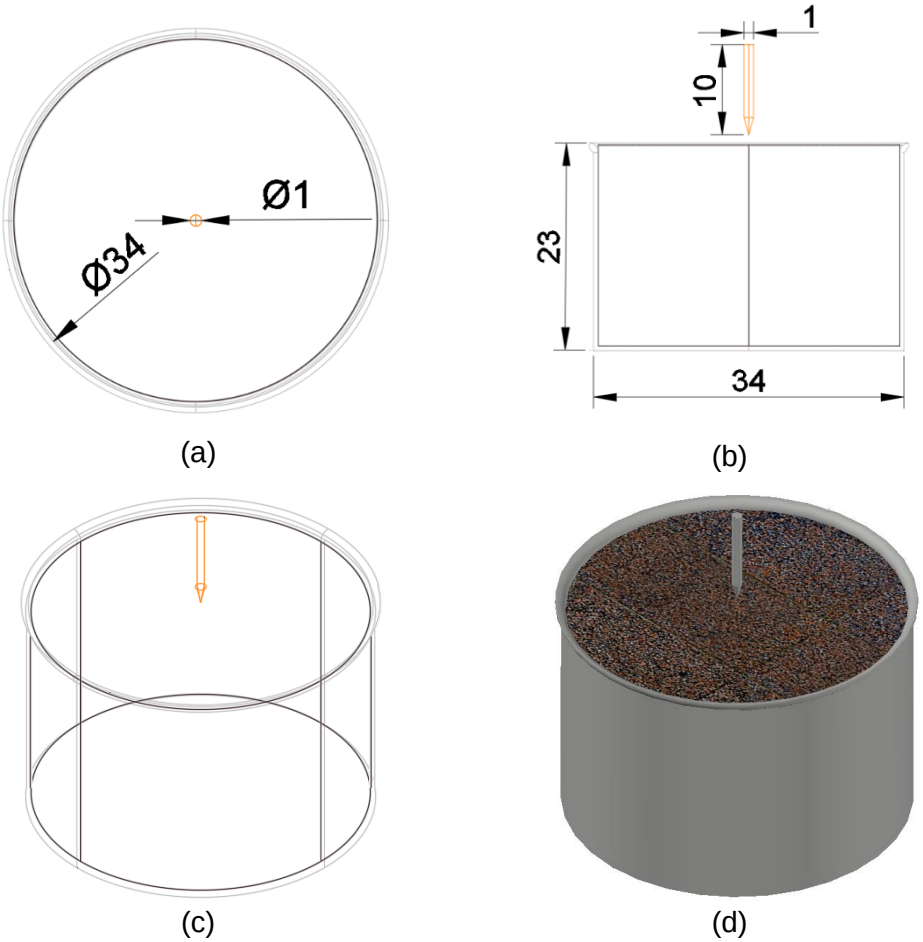
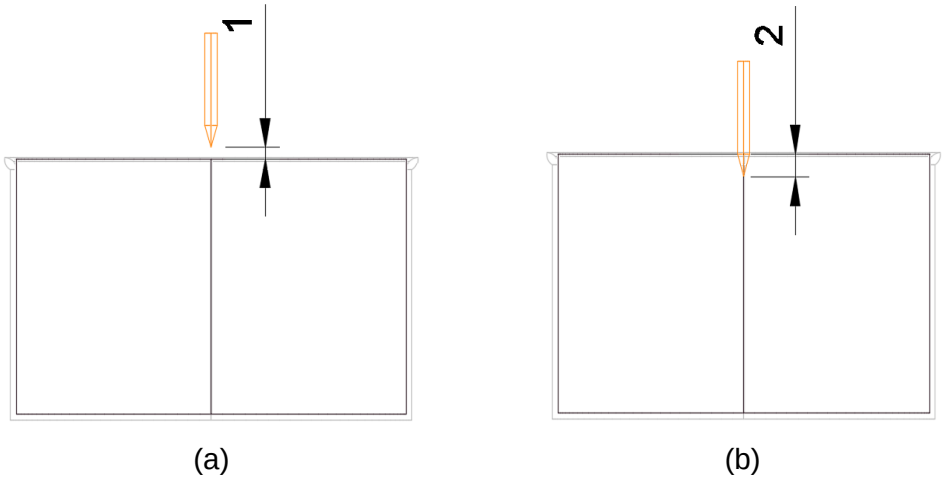


Figura 4-2: Variación del electrodo de alta tensión (a) Con 1 cm de GAP entre el suelo y el electrodo (b) Electrodo enterrado 2 cm en el suelo



- **Circuito de prueba:** Para simular experimentalmente el impacto de la descarga atmosférica en el suelo, la probeta de ensayo fue energizada mediante el Generador de Impulsos de Tensión (GIT) del Laboratorio de Ensayos Eléctricos Industriales “Fabio Chaparro” – LABE, en una configuración de 2 etapas generando ondas de impulso de 1,2/50 µs. El esquemático del circuito del GIT y el sistema de medida de las señales es presentado en **Figura 4-3**.

- **Sistema de medida:** Para obtener las señales de tensión y corriente requeridas para calcular la impedancia transitoria de puesta a tierra se utilizaron los equipos descritos en **Tabla 4-1**.

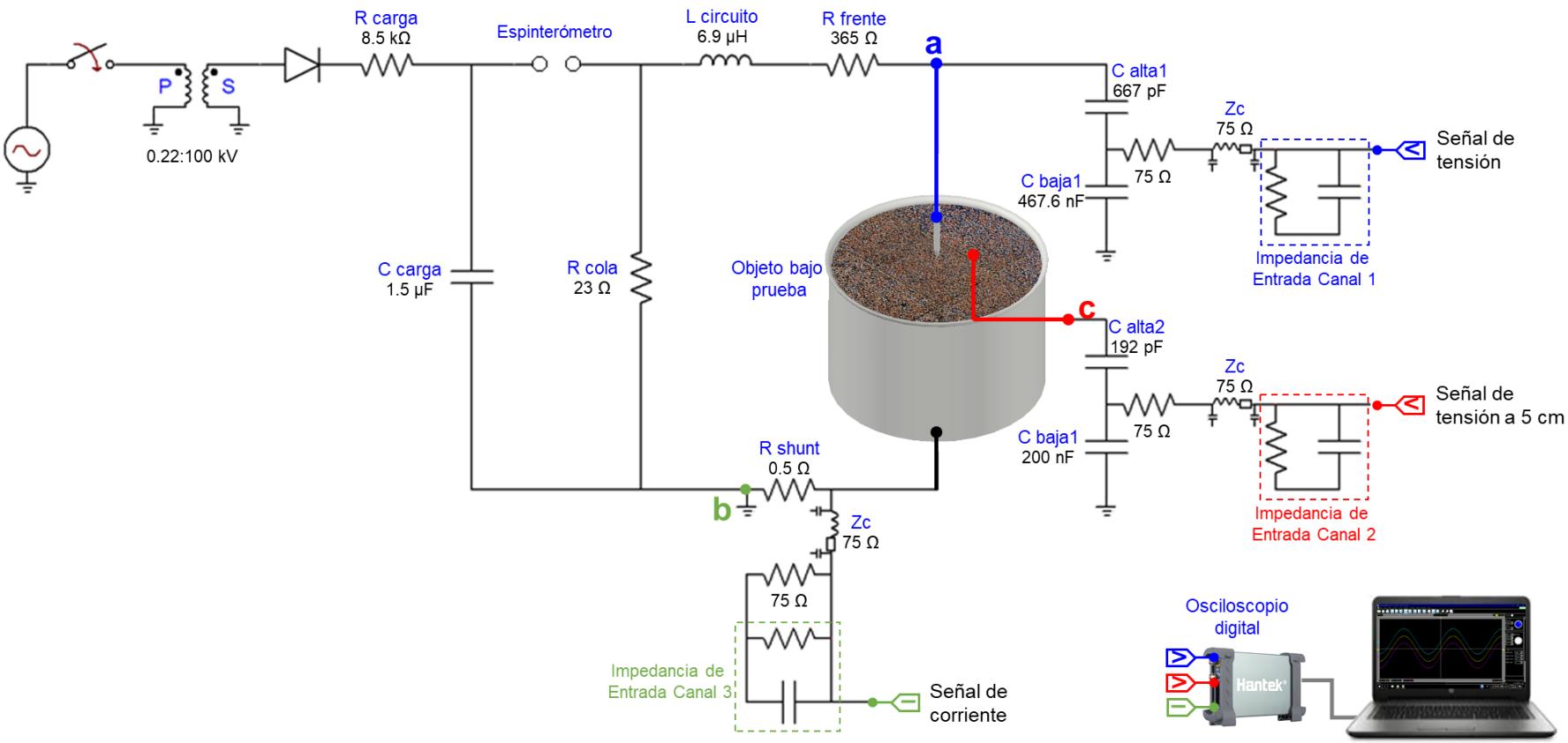
Tabla 4-1: Equipos utilizados durante los ensayos

Función	Equipo	Referencia	Especificaciones
Medida de tensión	Divisor capacitivo amortiguado	HAEFELY WOA554755	Relación de transformación: 720:1 V Voltaje pico en impulso: 1200 kV
Medida de tensión a 5 cm	Divisor capacitivo amortiguado	----	Relación de transformación: 1925:1 V Voltaje pico en impulso: 140 kV
Medida de corriente	Resistencia shunt	----	Valor nominal: 0,4988 Ω
Adquisición de datos	Osciloscopio digital	HANTEK 6104BD	Número de canales: 4 Ancho de banda: 100 MHz Frecuencia de muestreo: 1 GSa/s

Durante los ensayos se realizaron dos medidas de tensión. Una de ellas corresponde a la caída de tensión en la muestra de suelo, la cual fue medida entre el electrodo de alta tensión (referenciado con **a** en **Figura 1-1Figura 4-3**) y el exterior de la probeta de ensayo (referenciado con **b** en **Figura 4-3**). Por otra parte, con el propósito de calcular la impedancia en el volumen de suelo que se ioniza, se midió la tensión entre un hilo conductor ubicado a 5 cm del punto de inyección (referenciado con **c** en **Figura 4-3**) y el exterior de la probeta de ensayo (referenciado con **b** en **Figura 4-3**).

La forma de onda de la corriente que circula a través de la muestra de suelo se obtuvo midiendo la tensión en una resistencia shunt conectada en serie con la probeta de ensayo.

Figura 4-3: Esquemático del circuito de generación de impulsos de tensión y el sistema de medición.



Las formas de onda fueron adquiridas simultáneamente usando un osciloscopio digital de alta frecuencia. Para la transmisión de los datos de tensión y corriente se emplearon sondas coaxiales con una impedancia característica de 75 Ω. Para la medida de corriente se conectó en paralelo a la entrada del osciloscopio una resistencia de acople de 75 Ω.

El osciloscopio digital fue energizado por medio de un computador portátil desconectado de la red eléctrica para reducir los riesgos de sobretensiones causadas por la circulación de corrientes transitorias por la puesta a tierra del GIT, así como para atenuar el ruido en las señales.

- **Procedimiento:** Para la ejecución de cada ensayo se llevaron a cabo los siguientes pasos para lograr la repetibilidad del experimento:

1. Realizar el montaje mostrado en **Figura 4-3** utilizando siempre los mismos componentes
2. Pesar la muestra de suelo y confirmar que la humedad se encuentre en el valor seleccionado. En caso de que la humedad esté por debajo del porcentaje deseado, extender el suelo en un recipiente con área superficial amplia y agregar uniformemente la cantidad de agua calculada a partir de Ecuación (4.1), donde ω_{Agua} es la masa de agua en gramos que se debe agregar al suelo, $\%H$ corresponde al porcentaje de humedad esperado y ω_{Suelo} es la masa del suelo en gramos cuando está seco. Posteriormente, dividir la muestra en tres capas y compactar el suelo ejerciendo una fuerza de aproximadamente 1 kN en un disco con 12 cm de radio sobre cada capa de la muestra.

$$\omega_{Agua} = \frac{\%H * \omega_{Suelo}}{100} \tag{4.1}$$

3. Ubicar la varilla de aluminio en el centro de la probeta perpendicularmente a 1 cm de la superficie del suelo
4. Conectar la probeta de ensayo al GIT

5. Configurar el GIT para aplicar un impulso de tensión de 34 kV en polaridad positiva
6. Generar cinco impulsos y por cada uno obtener las señales de tensión y corriente, así como las condiciones ambientales
7. Cambiar la configuración del GIT para generar un impulso de tensión de 34 kV en polaridad negativa
8. Incrementar la tensión aplicada progresivamente en intervalos de 6 kV alternando entre cada serie de impulsos la polaridad hasta lograr el nivel de tensión al cual se produce disrupción en el suelo

4.1.2 Resultados

Experimentalmente fue posible observar que al inyectar corriente en el suelo se presenta un proceso de ionización y, por lo tanto, la relación V/I deja de ser un parámetro lineal. **Figura 4-4** muestra el comportamiento de las señales de tensión y corriente al inicio de la descarga en el suelo. Durante los primeros instantes de tiempo, la tensión se incrementa permitiendo la conducción de corriente a través del suelo hasta alcanzar el pico de tensión. Posteriormente, la tensión desciende exponencialmente mientras que la magnitud de corriente aumenta iniciando la descarga en el suelo.

Mientras avanza la descarga a través del suelo, la tensión continua su descenso de manera exponencial y la corriente aumenta hasta alcanzar su valor máximo cerca de los 7 µs como se muestra en **Figura 4-5**.

De acuerdo con la literatura [42], el final de la descarga en el suelo se caracteriza por la caída de la tensión hasta una magnitud diferente de 0 V conocida como tensión residual, mientras que la magnitud de la corriente es cercana a 0 A. Sin embargo, este resultado no pudo ser corroborado teniendo en cuenta la ventana de tiempo muestreada durante los ensayos.

Figura 4-4: Comportamiento de las señales de tensión y corriente durante el inicio de la descarga en el suelo

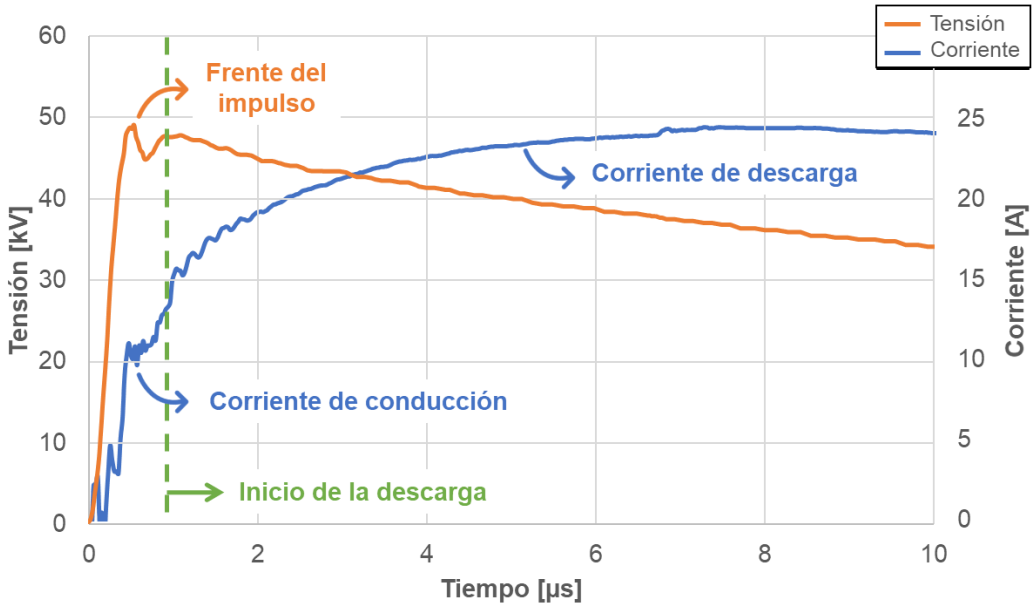
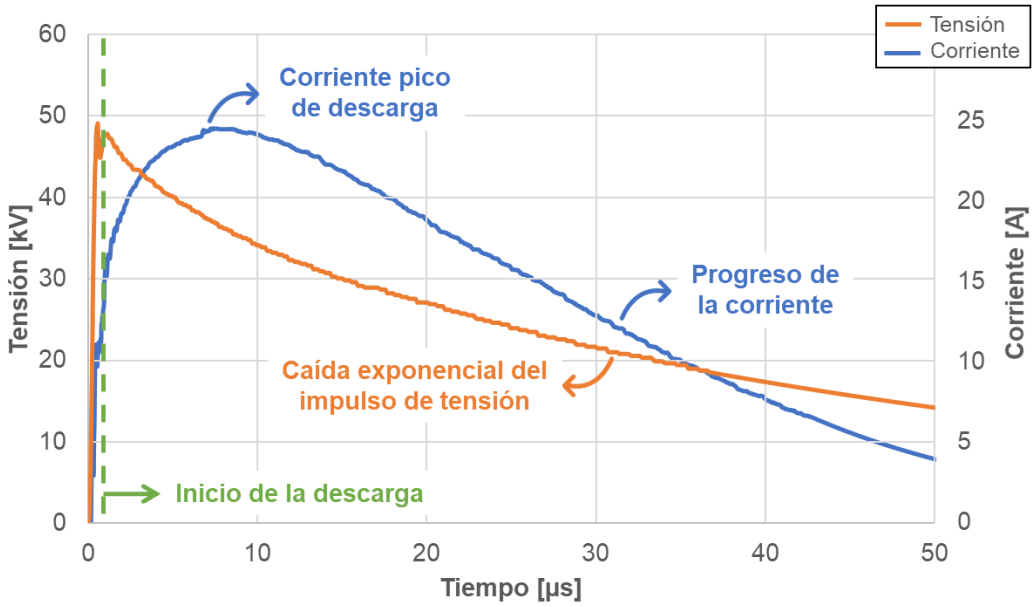


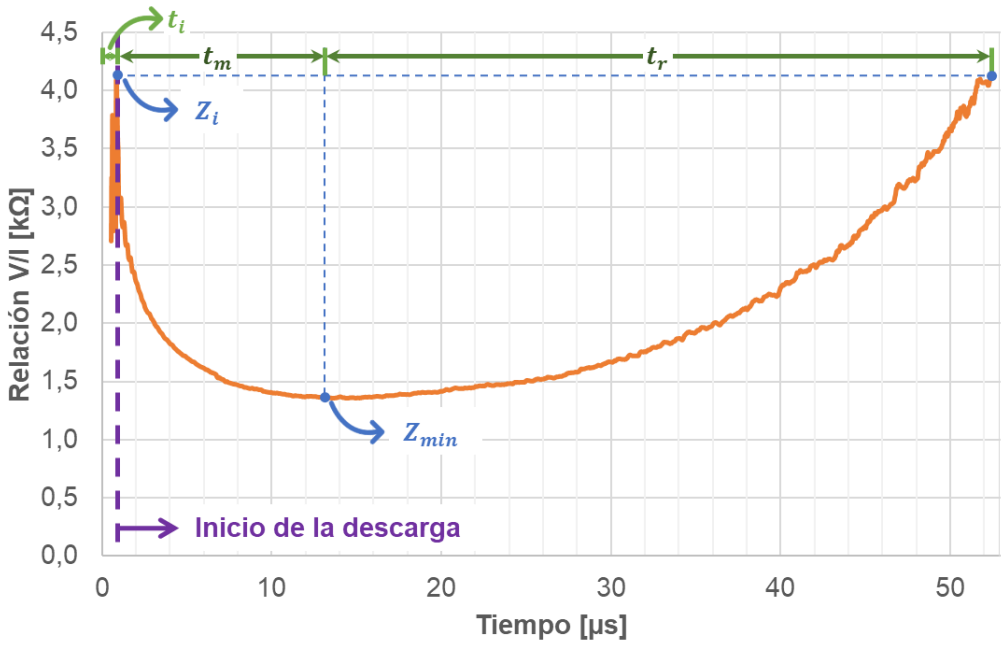
Figura 4-5: Comportamiento de las señales de tensión y corriente a lo largo de la descarga en el suelo



Al estimar el cociente entre la señal de tensión y corriente se obtiene la curva mostrada en **Figura 4-6**, esta curva muestra el comportamiento de la impedancia dinámica de la conexión a tierra cuando una corriente de rayo se transfiere al suelo, es decir, cuando el

electrodo no está enterrado en el suelo. En **Figura 4-6** se observa que en el instante del inicio de la descarga t_i (0,8 µs) la relación V/I del conjunto GAP y el suelo tiene un valor inicial $Z_i = 4{,}1\ \mathrm{k\Omega}$. Posteriormente, cuando se produce la ruptura del aire, la corriente inyectada en el suelo ioniza una pequeña región y, por lo tanto, la relación V/I cae hasta un valor mínimo $Z_{min} = 1{,}4\ \mathrm{k\Omega}$ en un tiempo t_m (13,7 µs). A partir de este momento, la resistencia permanece constante hasta el inicio del proceso de deionización cuando la relación V/I tiende a recuperar su valor inicial Z_i en un tiempo t_r (52,3 µs).

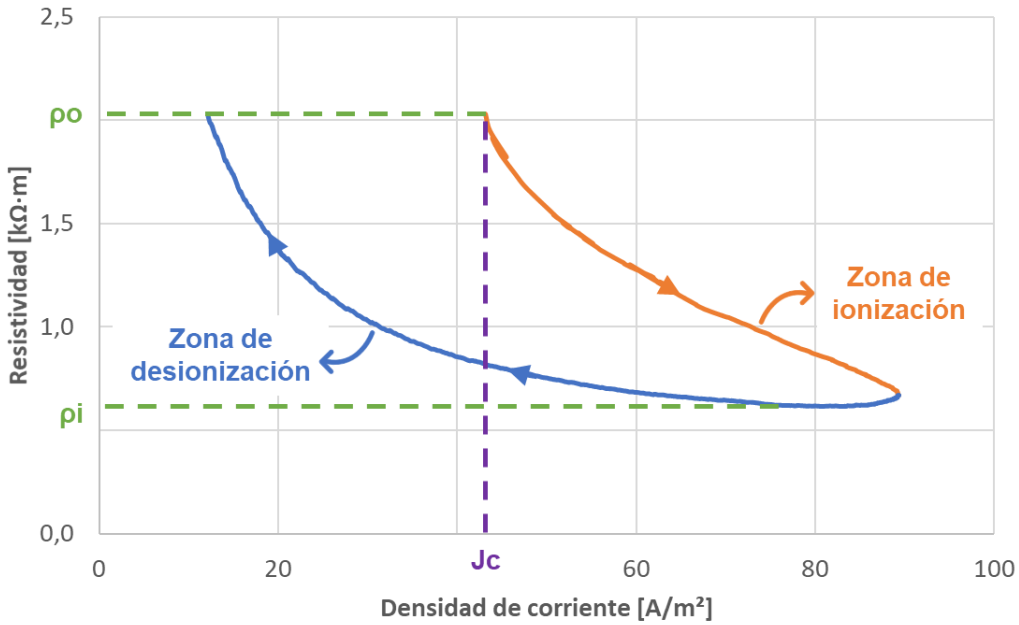
Figura 4-6: Curva resultante de la relación V/I



Para corroborar estos resultados con los presentados en la literatura (véase **Figura 2-4**), **Figura 4-7** presenta la relación entre la densidad de corriente y la resistividad de la muestra, la cual tiene un marcado efecto de histéresis debido a que la energía almacenada en el canal del arco no permite que la resistividad aumente rápidamente. Esta gráfica muestra que a partir del momento en que la densidad de corriente es mayor o igual al valor crítico, una porción del suelo se ioniza y, por lo tanto, la resistividad se reduce exponencialmente hasta alcanzar el pico de corriente. Por otra parte, mientras la corriente cae, la resistividad se mantiene prácticamente constante hasta que la densidad de corriente es menor al valor crítico. Desde este punto, la porción del suelo empieza a desionizarse aumentado la resistividad exponencialmente. Finalmente, en la gráfica

mostrada es posible confirmar que la resistividad mínima instantánea $\rho_i$ocurre después del pico de corriente.

Figura 4-7: Relación entre densidad de corriente y resistividad



A continuación, se presentan los resultados obtenidos para analizar el comportamiento de la relación V/I con la modificación de variables como la profundidad de enterramiento del electrodo de alta tensión, la tensión aplicada y su polaridad y, el contenido de agua en el suelo.

- **Profundidad de enterramiento del electrodo de alta tensión:** Para corroborar el comportamiento del GAP, se analizan los resultados obtenidos al variar la posición del electrodo de alta tensión como se muestra en **Figura 4-2**. La característica de la relación V/I de la muestra con una humedad de 12%, a la cual se le aplicaron impulsos de tensión de 52 kV en polaridad positiva, se muestran en **Figura 4-8**.

  Figura 4-8 muestra que el valor de la relación V/I disminuye conforme se entierra el electrodo de alta tensión en el suelo, lo cual se debe a la resistencia del arco que se incluye al separar perpendicularmente la varilla de la muestra. Adicionalmente,

se puede observar que el tiempo de recuperación es mucho más rápido cuando se adiciona al arreglo experimental un GAP de 1 cm.

Figura 4-8: Relación V/I obtenida con el cambio de profundidad del electrodo de alta tensión

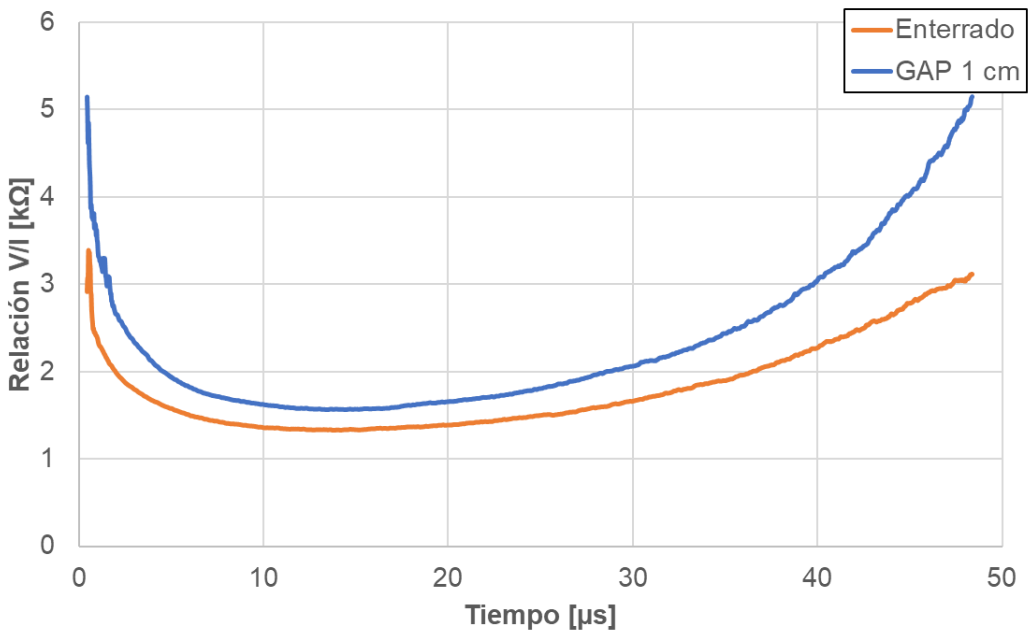
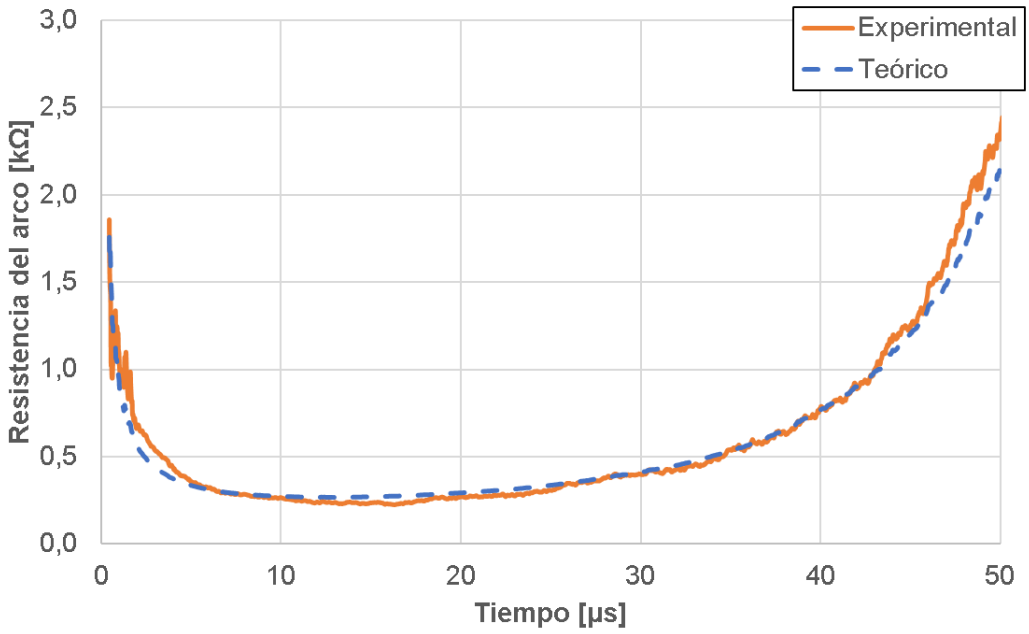


Figura 4-9 presenta la característica de la resistencia del arco, la cual fue calculada como la diferencia en cada instante de tiempo entre relación V/I con un GAP de 1 cm y con el electrodo enterrado. En esta figura se incluye la curva de la resistencia de arco calculada a partir de Ecuaciones (3.5) y (3.6). Esta gráfica muestra que a partir del momento en el que ocurre la disrupción en el aire, la resistencia del arco se reduce conforme se aumenta el área del canal hasta que se logra el pico de corriente. Por otra parte, mientras la corriente cae a cero, la resistencia del arco aumenta hasta que se extingue el arco.

Figura 4-9: Comparación entre la resistencia de arco obtenida experimentalmente y calculada teóricamente



- **Incremento de la tensión aplicada:** Para corroborar cómo aumenta la zona ionizada conforme se incrementa la tensión aplicada a la probeta de ensayo, se analizan los resultados obtenidos utilizando la muestra con una humedad de 12% y ubicando el electrodo de alta tensión perpendicularmente a 1 cm de la superficie del suelo. La característica de la relación V/I para impulsos de polaridad positiva se muestra en **Figura 4-10.**

Figura 4-10 muestra que el valor de la relación V/I disminuye cuando se incrementa la tensión aplicada a la probeta de ensayo, lo cual se debe a dos condiciones: Primero, la resistencia del arco disminuye conforme aumenta la corriente en el canal de la descarga. Segundo, la zona de ionización aumenta y, por lo tanto, la resistencia de un volumen más amplio se reduce. Adicionalmente, se puede observar que el tiempo de recuperación es mucho más rápido cuando la tensión aplicada es menor.

Para comprobar el comportamiento de la zona ionizada en **Figura 4-11** se presenta la variación del radio de ionización en el tiempo. Esta gráfica fue construida bajo

las suposiciones de que la corriente se distribuye en semiesferas concéntricas al punto de impacto de la descarga en el suelo y que el campo eléctrico crítico es de 4 kV/cm, de acuerdo con el valor sugerido por el CIGRE [40].

Figura 4-10: Relación V/I obtenida al incrementar la tensión aplicada a la probeta de ensayo

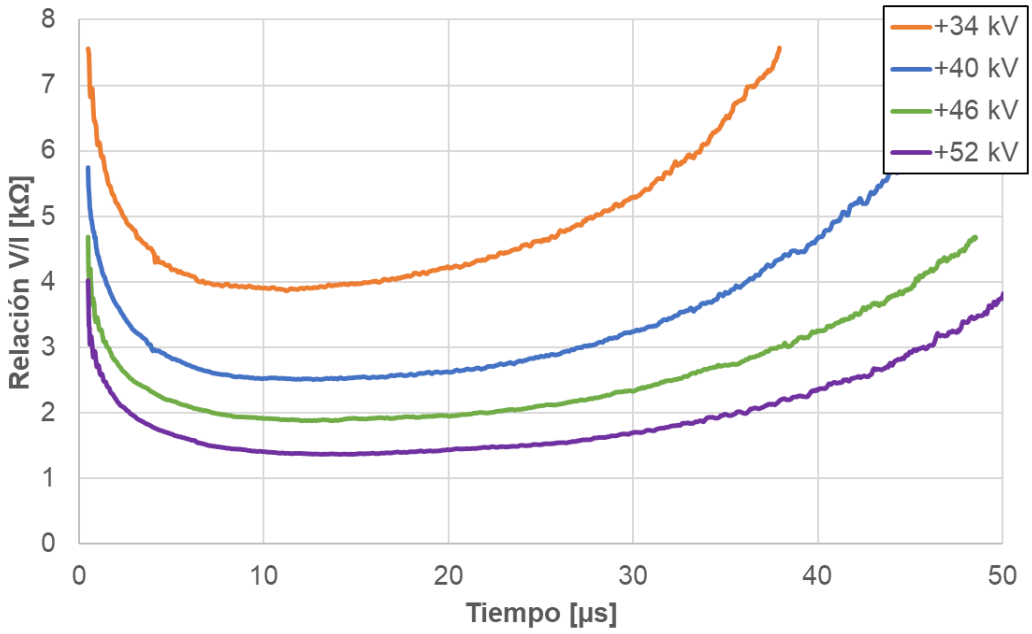


Figura 4-11: Variación del radio de ionización en el tiempo al incrementar la tensión aplicada a la probeta de ensayo

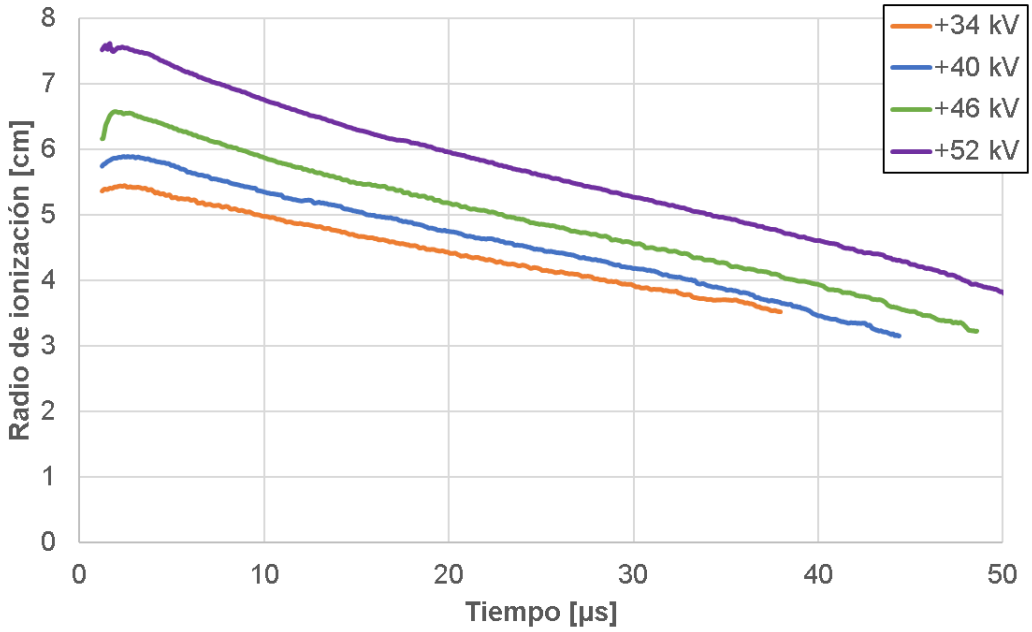
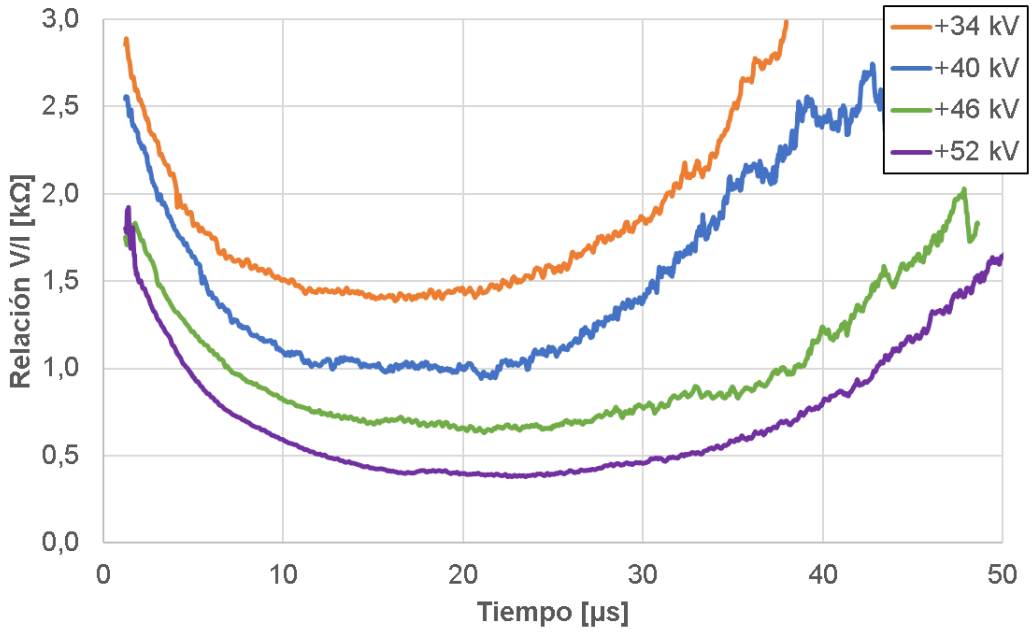


Figura 4-11 permite confirmar que el radio de ionización es mayor cuando la tensión aplicada se eleva, debido a que es más fácil superar el valor del campo eléctrico crítico y desencadenar el fenómeno de ionización. Igualmente, con esta gráfica se confirma que la zona de ionización disminuye mientras la corriente de impulso cae.

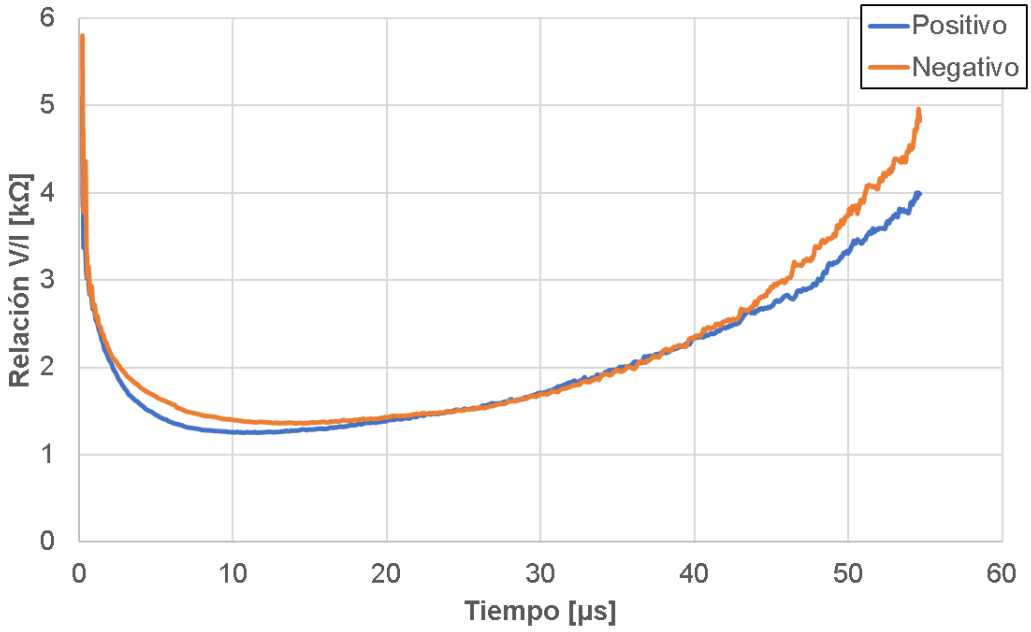
Finalmente, suponiendo que la resistividad se mantiene constante en la zona que no se ha ionizado y calculando la resistencia del arco, es posible determinar la relación V/I en la zona ionizada. **Figura 4-12** muestra la característica V/I en la zona ionizada al incrementar la tensión aplicada a la probeta de ensayo. Esta gráfica confirma que la resistividad del suelo ionizado siempre mantiene un porcentaje de la resistividad inicial durante una descarga atmosférica, lo cual es contrario al enfoque común que supone que la resistividad de la región de ionización disminuye instantáneamente al mismo valor que la del conductor de tierra (casi cero).

Figura 4-12: Variación de la relación V/I en la zona de ionización al incrementar la tensión aplicada a la probeta de ensayo



- **Cambio de polaridad de la tensión aplicada:** Para verificar la diferencia en la impedancia transitoria de puesta a tierra cuando se cambia la polaridad del impulso de tensión, se analizan los resultados obtenidos utilizando la muestra con una humedad de 12%, ubicando el electrodo de alta tensión perpendicularmente a 1 cm de la superficie del suelo y aplicando impulsos de tensión de 52 kV. La característica de la relación V/I con el cambio de polaridad no tiene diferencias significativas, como se muestra en **Figura 4-13**.

Figura 4-13: Variación de la relación V/I con el cambio de polaridad de la tensión aplicada a la probeta de ensayo



- **Aumento del contenido de agua en el suelo:** Bajo el objetivo de identificar la influencia de la humedad del suelo en el comportamiento de la impedancia transitoria de puesta a tierra, se analizan los resultados obtenidos variando el contenido de agua en el suelo de 8% a 12%, ubicando el electrodo de alta tensión perpendicularmente a 1 cm de la superficie del suelo y aplicando impulsos de tensión de 52 kV en polaridad positiva. La característica de la relación V/I con la variación del contenido de agua se muestra en **Figura 4-14.**

Figura 4-14: Variación de la relación V/I con el aumento del contenido de agua en el suelo

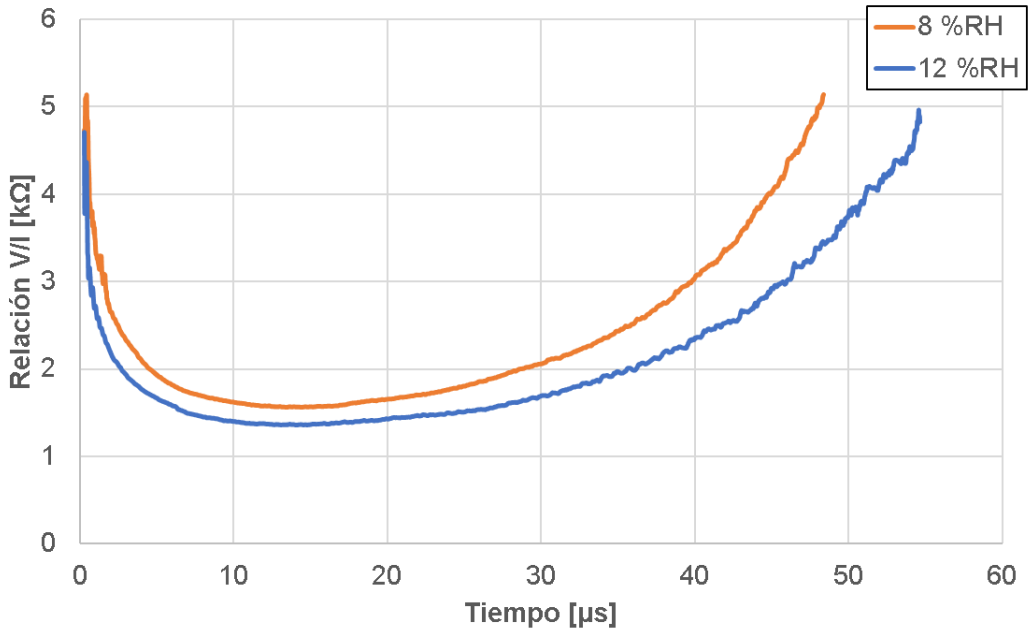


Figura 4-14 muestra que el valor de la relación V/I disminuye conforme se aumenta el contenido de agua en la muestra, lo cual se debe a que la conducción eléctrica en los suelos es esencialmente electrolítica, por lo tanto, cuando el contenido de humedad se aumenta, la resistividad de la muestra se reduce. Sin embargo, cuando el contenido de humedad supera el 22% la resistividad se ve poco afectada [43].

A partir de la caracterización realizada de la impedancia transitoria de puesta a tierra, en el siguiente capítulo se presenta la metodología y los resultados obtenidos al estimar la corriente transferida a un ser humano durante un accidente de rayo.

5. Estimación de la corriente transferida en un accidente de rayo

En este capítulo se presentan los resultados de la estimación de la corriente trasferida en un accidente de rayo utilizando un modelo del cuerpo propuesto en la literatura. La estimación se realiza mediante simulación con la ayuda del Software para análisis de transitorios *ATP-EMTP* e incluyendo el modelo de impedancia de puesta a tierra analizado en los capítulos anteriores.

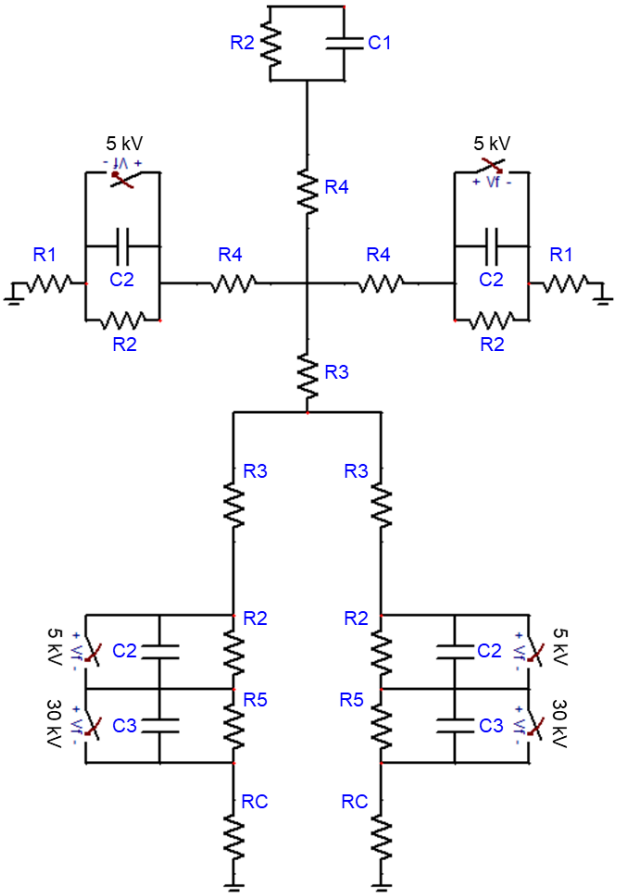
5.1 Modelo eléctrico del cuerpo humano

De acuerdo con la literatura, el cuerpo humano puede ser modelado como un circuito eléctrico compuesto principalmente por resistencias y condensadores, cuya impedancia equivalente puede aproximarse a 1000 Ω [44] [45]. En este documento, se utilizó el modelo mostrado en [45], el cual incluye la impedancia equivalente del zapato, tal como se muestra en **Figura 5-1**. **Tabla 5-1** presenta los parámetros eléctricos del modelo.

La resistencia de contacto del calzado en el terreno se determinó utilizando Ecuación (3.5). Donde: ρ es la resistividad del suelo y r_p es el radio del área de contacto del calzado con el terreno, la cual se supone como una plancha circular equivalente de 8 cm de radio.

$$R_C = \frac{\rho}{4r_p} \tag{5.1}$$

Figura 5-1: Modelo circuital del cuerpo humano [45]



Fuente: Adaptación de Román F., Alarcón A., Santamaría F. "*Analysis of a Lightning Accident in Gavle, Sweden*", 2005

Tabla 5-1: Parámetros eléctricos de modelo del cuerpo humano

Parámetro	Valor
R1	1 GΩ
R2	10 kΩ
R3	300 Ω
R4	200 Ω
R5	10 MΩ
C1	10 µF
C2	0,25 µF
C3	100 pF
RC	3125 Ω

5.2 Parámetros de simulación

Para la estimación de la corriente transferida a una persona durante un accidente de rayo, se realizaron las siguientes suposiciones:

- Conductividad inicial del terreno $\sigma_0 = 0{,}001\ \mathrm{S/m}$
- Campo eléctrico crítico $E_C = 4 \times 10^5\ \mathrm{V/m}$
- Densidad de corriente requerida para desencadenar el fenómeno de ionización $J_C = 400\ \mathrm{A/m^2}$
- Corriente de impulso:
  - Amplitud $I_k = 100\ \mathrm{kA}$
  - Tiempo de frente $t_f = 10\ \mu\mathrm{s}$
  - Tiempo de cola $t_c = 350\ \mu\mathrm{s}$
- Máximo radio de ionización $r_{cm} = 6{,}3\ \mathrm{m}$
- Separación entre pies $d_f = 1\ \mathrm{m}$
- Distancia entre punto de impacto y pie $d_r = 7{,}3\ \mathrm{m}$

Figura 5-2: Representación de escenario de simulación

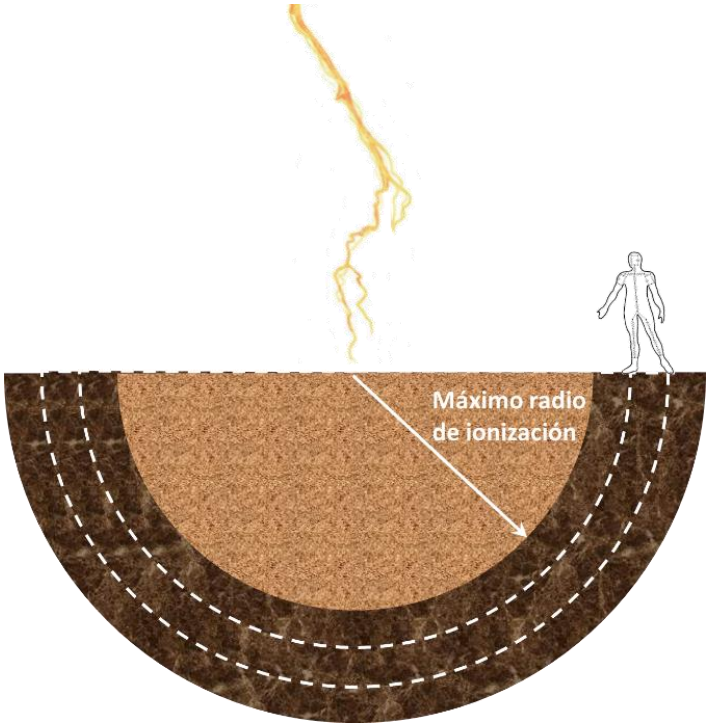
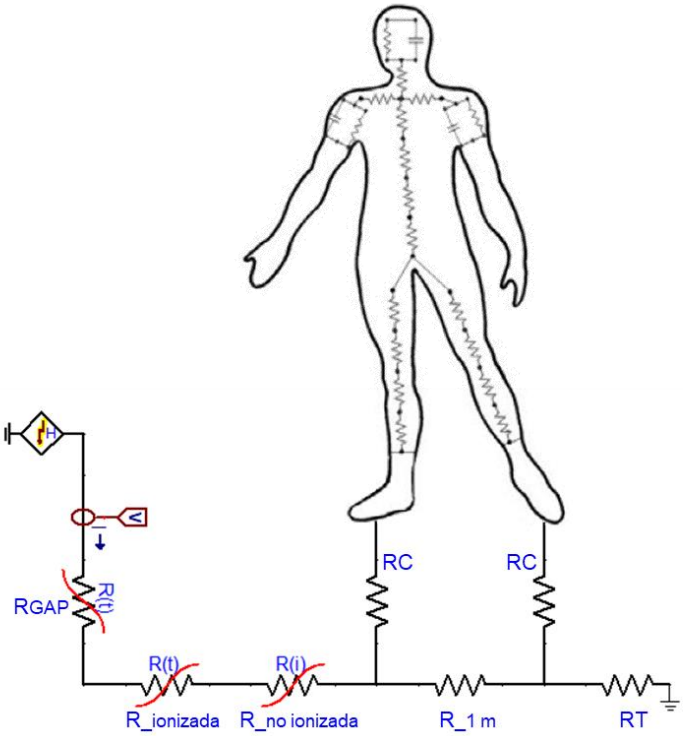


Figura 5-2 muestra gráficamente el escenario considerado para estimar la corriente transferida. **Figura 5-3** presenta el esquemático del circuito utilizado para modelar el escenario considerado.

Figura 5-3: Esquemático de escenario de simulación



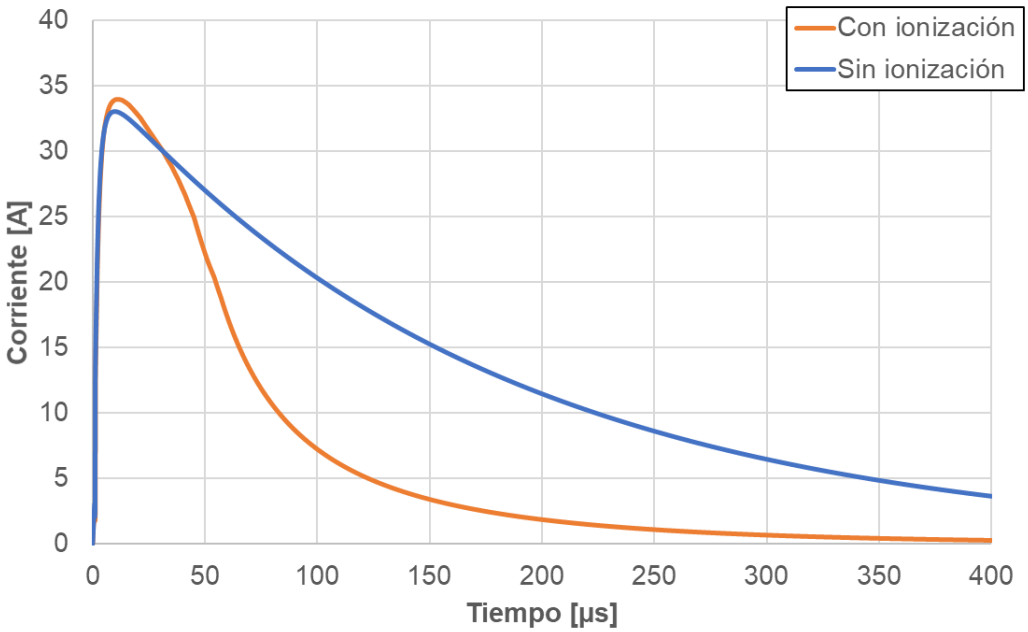
5.3 Resultados

Por medio de las simulaciones realizadas con el Software de análisis de transitorios *ATP-EMTP* fue posible obtener la forma de onda de la corriente transferida a un ser humano durante un accidente de rayo. **Figura 5-4** muestra el comportamiento de la corriente que recorre el cuerpo humano cuando la distancia entre el punto de impacto del rayo y el pie es de 7,3 m. Adicionalmente, en **Figura 5-4** se presenta la forma de onda de la corriente sin considerar el fenómeno de ionización.

Teniendo en cuenta los resultados presentados, es notable que, aunque la diferencia en el pico de corriente no supera el 3%, el tiempo de cola es mayor cuando se desprecia el fenómeno de ionización del terreno. Por lo tanto, la energía recibida será mayor cuando

no se considera la ionización. Esta hipótesis se confirmó al calcular la energía a partir de las curvas mostradas en **Figura 5-4**, de forma tal que la energía cuando se incluye la ionización es de 16,5 J, mientras que se duplica (32,1 J) cuando se deprecia este fenómeno.

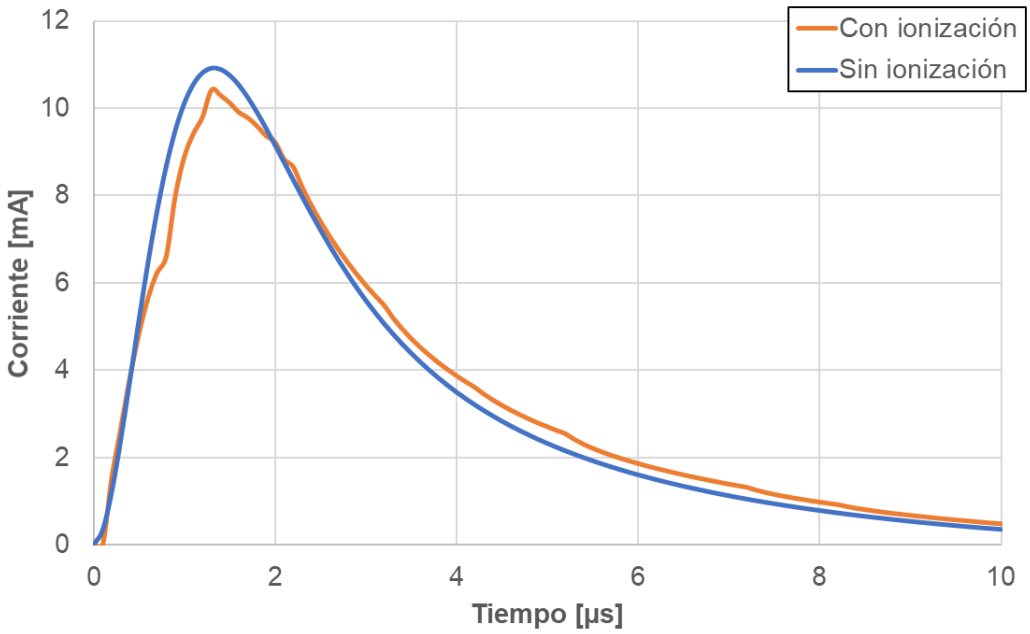
Figura 5-4: Forma de onda de la corriente transferida en un accidente de rayo a una persona ubicada a 7,3 m del punto de impacto



Finalmente, se calculó la distancia a la cual debe estar ubicada la persona del punto de impacto para que no corra ningún riesgo. **Figura 5-5 Figura 5-4**muestra el comportamiento de la corriente que recorre el cuerpo humano cuando la distancia entre el punto de impacto del rayo y el pie es de 135 m. Adicionalmente, en **Figura 5-5** se presenta la forma de onda de la corriente sin considerar el fenómeno de ionización.

Teniendo en cuenta los resultados presentados, es notable que, la diferencia en el pico de corriente no supera el 5% y ambas señales siguen la misma forma de onda. En consecuencia, se puede concluir que el fenómeno de ionización puede despreciarse cuando la persona está ubicada a una amplia distancia del punto de impacto de la descarga atmosférica.

Figura 5-5: Forma de onda de la corriente transferida en un accidente de rayo a una persona ubicada a 135 m del punto de impacto



6. Conclusiones

6.1 Conclusiones

Bajo el objetivo de estudiar el comportamiento de la impedancia transitoria de puesta a tierra para estimar la corriente de rayo que se transfiere a una persona durante una descarga eléctrica, a lo largo de este documento se hizo énfasis en el comportamiento no lineal de la relación V/I del suelo.

En el segundo capítulo se realizó una breve descripción de las características físicas y químicas del suelo. Adicionalmente, se realizó una introducción al comportamiento transitorio de la impedancia transitoria de puesta a tierra y se familiarizó al lector con los modelos utilizados por diferentes autores para describir la relación V/I del suelo. En el mismo capítulo, se presentaron los modelos desarrollados para estimar la resistencia del canal de la descarga.

El tercer capítulo se expusieron los resultados obtenidos en la fase de simulación, en la cual se utilizaron los Software de simulación electromagnética *Comsol Multiphysics* y de análisis de transitorios *ATP-EMTP* para establecer la respuesta de la impedancia de puesta a tierra. Como conclusión de este capítulo, se planteó un modelo que considera la resistividad de la tierra y el pico de la corriente de rayo.

En el cuarto capítulo se presentó la metodología y los resultados experimentales obtenidos. Por otra parte, se analizaron las diferencias en el comportamiento de la relación V/I con la modificación de variables como la profundidad de enterramiento del electrodo de alta tensión, la tensión aplicada y su polaridad y, el contenido de agua en el suelo.

Por último, en el quinto capítulo se presentaron los resultados de la estimación de la corriente transferida en un accidente de rayo utilizando un modelo del cuerpo humano propuesto en la literatura y con ayuda del Software de simulación para análisis de transitorios *ATP-EMTP*.

Con los resultados experimentales de este trabajo fue posible corroborar la hipótesis de Liew & Darveniza, una de las más ampliamente utilizadas para describir el comportamiento dinámico de las puestas a tierra. En general, los resultados experimentales presentados en este trabajo mostraron una reducción en la resistividad del suelo. Se verificó que los resultados experimentales lograron las resistividades residuales típicas en la región de ionización entre 2% y 47% propuestas en la literatura [19].

A partir de los resultados experimentales fue posible corroborar el comportamiento de la resistencia del arco, la cual se reduce a partir del momento en el que ocurre la disrupción en el aire hasta que se logra el pico de corriente Por otra parte, mientras la corriente cae a cero, la resistencia del arco aumenta hasta que se extingue la descarga.

Al analizar los resultados obtenidos con el incremento de la tensión aplicada a la probeta de ensayo, el valor de la relación V/I disminuye, lo cual se debe a dos condiciones: Primero, la resistencia del arco disminuye conforme aumenta la corriente en el canal de la descarga. Segundo, la zona de ionización aumenta y, por lo tanto, la resistencia de un volumen más amplio se reduce. Adicionalmente, se pudo observar que el tiempo de recuperación es mucho más rápido cuando la tensión aplicada es menor y que el cambio de polaridad de la tensión aplicada no genera diferencias significativas en la característica de la relación V/I.

Con los resultados obtenidos se pudo confirmar que el radio de ionización es mayor cuando la tensión aplicada se eleva, debido a que es más fácil superar el valor del campo eléctrico crítico y desencadenar el fenómeno de ionización. Igualmente, se confirmó que la zona de ionización disminuye mientras la corriente de impulso cae. Finalmente, se confirmó que la resistividad del suelo ionizado mantiene un porcentaje de la resistividad inicial durante una descarga atmosférica.

Con el análisis de los resultados obtenidos al variar el contenido de agua en el suelo, se corroboró que el valor de la relación $V/$I disminuye conforme se aumenta el contenido de agua en la muestra.

Al estimar la corriente transferida a una persona durante un accidente de rayo, se obtuvo un aumento del 50% en la energía recibida cuando no se tiene en cuenta el fenómeno de ionización en el suelo. Esta diferencia se debe a que el tiempo de cola de la corriente que atraviesa el cuerpo humano es menor cuando se incluye el comportamiento no lineal de la relación V/I del terreno. Sin embargo, cuando la persona se ubica en una zona segura, en lejanías al punto de impacto de la descarga atmosférica, no existen diferencias significativas al despreciar el efecto de la ionización en el suelo.

6.2 Recomendaciones

Para la validación del modelo abordado en este documento, se requiere de una evaluación más exhaustiva de la influencia de las condiciones atmosféricas en las propiedades físicas del suelo para poder dar una conclusión generalizada de este tema. Adicionalmente, es necesario incluir la dependencia de la frecuencia del impulso inyectado para lograr un modelo más completo de la impedancia transitoria de puesta a tierra. Finalmente, se sugiere como trabajo futuro una investigación experimental para la validación de los resultados aplicando impulsos normalizados de corriente (10/350 μs).

Bibliografía

[1] NASA Earth Observatory (EO), "Global Lightning Activity: Image of the Day," 2015. [Online]. Available: https://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=85600. [Accessed 19 February 2018].

[2] M. A. Cooper, C. J. Andrews and R. L. Holle, "Lightning Injuries," *Wilderness Medicine,* pp. 67-118, 2007.

[3] N. Navarrete-Aldana, M. A. Cooper and R. L. Holle, "Ligthning Fatalities in Colombia from 2000 to 2009," in *International Conference on Lightning Protection*, Shangai, China, 2014.

[4] N. Adekoya y K. B. Nolte, «Struck-by-Lightning Deaths in the United States,» *Journal of Enviromental Health,* vol. 67, nº 9, pp. 45-50, 2005.

[5] C. Cruz, E. Rentería and F. Román, "Statistics of the Colombian National Army," in *International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA)*, Belo Horizonte, Brasil, 2013.

[6] O. Díaz, F. Santamaría, A. Alarcón y F. Román, «Comportamiento de la impedancia de aterrizamiento de una víctima humana impactada por un rayo,» *Con-ciencias, Tecnura,* vol. 12, nº 23, pp. 32-45, 2008.

[7] J. Cidras, F. Otero y C. Garrido, «Nodal Frequency Analysis of Grounding Systems Considering the Soil Ionization Effect,» *IEEE Transactions on Power Delivery,* vol. 15, nº 1, pp. 103-107, 2000.

[8] Y. Liu, N. Theethayi, R. M. Gonzalez y R. Thottappillil, «The Residual Resistivity in Soil Ionization Region Around Grounding System for Different Experimental Results,» *IEEE International Symposium on EMC,* nº TH-PM-2-4, pp. 794-799, 2003.

[9] IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi, «GEOPORTAL - La información geográfica de Colombia,» 2018. [En línea]. Available: http://geoportal.igac.gov.co/. [Último acceso: 07 Mayo 2018].

[10] NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration, «Science on a Sphere,» [En línea]. Available: https://sos.noaa.gov/datasets/lightning-flash-rate/. [Último acceso: 07 Mayo 2018].

[11] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC, *Norma Técnica Colombiana NTC 4552,* Bogotá, Colombia, 2004.

[12] D. Aranguren, «Monitoreo y detección temprana de tormentas eléctricas,» Bogotá, Colombia, 2013.

[13] C. F. Ramírez, «Malla de tierra,» de *Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión*, Colombia, Mejía Villegas S.A., 1991, p. 545.

[14] Ministerio de Minas y Energía, *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE,* 2013.

[15] W. Jaroslaw, «Distribution of Step and Touch Voltages at Typical HV/MV Substation during Lightning,» de *Proceedings of the XIII International Conference on Electromagnetic Disturbances*, Bialystok, Polonia, Septiembre 2003.

[16] M. Uman, The Lightning Discharge, Volumen 39, Londres, Inglaterra: Academic Press, 1987.

[17] B. Dibner y B. Franklin, In Lightning, Londres, Inglaterra: R.H. Golde - Academic Press Inc, 1977.

[18] I. Bernard Cohen, «The Two Hundredth Anniversary of Benjamin Franklin's Two Lightning Experiments and the Introduction of the Lightning Rod,» *Proceedings of the American Philosophical Society,* vol. 96, nº 3, pp. 331-366, 1952.

[19] E. Nickson, «XV Sundry Papers Relative to an Accident from Lightning at Purfleet, May 15, 1777,» *Transactions of the Royal Society,* vol. 68, pp. 232-235, 1778.

[20] R. H. Golde, «The Lightning Conductor,» *J. Franklin Intitute,* vol. 283, nº 6, pp. 451-477, 1967.

[21] O. S. Peters, «Ground Connections for Electrical Systems,» *Technologic Papers of the Bureau of Standards,* nº 108, 1918.

[22] H. B. Dweight, «Calculation of Resistances to Ground,» *AIEE Transactions,* vol. 55, pp. 1319-1328, 1936.

[23] J. R. Eaton, «Grounding Electric Circuits Effectively,» *General Electrical Revision,* vol. 44, pp. 323-327, 1941.

[24] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, «Propiedades Físicas | Portal de Suelos de la FAO,» 2018. [En línea]. Available: www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/. [Último acceso: 17 Mayo 2018].

[25] V. M. Cabrera, «Studies of Ground Ionization and Lightning Protection of Power Lines,» Uppsala University, Uppsala, 1992.

[26] E. J. Rincón Ávila, «Estudio termo-eléctrico de la disrupción eléctrica en arena bajo impulsos tipo rayo,» Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2010.

[27] S. Visacro, «A Comprehensive Approach to the Grounding Response Lightning Currents,» *IEEE Transactions on Power Delivery,* vol. 22, nº 1, pp. 381-386, 2007.

[28] R. Kosztaluk, M. Loboda y D. Mukhedkar, «Experimental Study of Transient Ground Impedances,» *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,* Vols. %1 de %2PAS-100, nº 11, pp. 4653-4660, 1981.

[29] P. J. Pineda Parra, «Comportamiento dinámico de los suelos ante la aplicación de ondas de impulso de rayo en un electrodo concentrado de puesta a tierra,» Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2004.

[30] H. M. Towne, «Impulse Characteristics of Driven Grounds,» *General Electric Review,* pp. 605-609, 1929.

[31] P. L. Bellaschi, R. E. Arminggton y A. E. Snowden, «Impulse and 60-Cycle Characteristics of Driven Grounds II,» *AIEE Transactions,* vol. 61, pp. 349-363, 1942.

[32] G. M. Petropoulos y D. Eng, «The High-Voltage Characteristics of Earth Resistance,» *Jounal IEEE,* vol. 95, nº II, pp. 59-70, 1948.

[33] A. C. Liew y M. Darveniza, «Dynamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earths,» *Procedures IEEE,* vol. 121, nº 2, pp. 123-135, 1974.

[34] E. E. Oettle, «The Characteristics of Electrical Breakdown and Ionization Processes in Soil,» *Transactions of the SA Institute of Electrical Enginneers,* pp. 63-70, 1988.

[35] A. M. Mousa, «The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents into Concentrated Electrodes,» *IEEE Transaction on Power Delivery,* vol. 9, nº 3, pp. 1669-1677, 1994.

[36] N. Mohamad, A. Haddad y H. Griffiths, «Characterization of Ionization Phenomena in Soils under Fast Impulses,» *IEEE Transactions on Power Delivery,* vol. 21, nº 1, pp. 353-361, 2006.

[37] F. Santamaria y F. Román, «Experimental Study of a Submillimeter Spark-Gap,» *IEEE Transactions on Plasma Science,* vol. 41, nº 4, pp. 985-992, 2013.

[38] H. Bluhm, Pulsed Power Systems. Principles and Applications, 1 ed., Alemania: Springer, Power System Collection, 2006.

[39] J. A. Cristancho, C. Rivera, J. J. Pantoja y F. Román, «Nonfatal Lightning Injuries in Colombia: Case Reports,» de *International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA)*, Balneário Camboriú, Brasil, 2015.

[40] CIGRE Working Group on Lightning, «Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines,» 1991.

[41] L. Yaging, «Transient Response of Grounding Systems Caused by Lightning Modelling and Experiments,» Universitetstryckeriet, Uppsala, Suecia, 2004.

[42] C. A. Bernal Hernández y A. R. Ramos Alba, «Estudio experimental de la respuesta no lineal de un suelo de tierra vegetal ante impulsos de tensión tipo rayo usando un arreglo cilindrico coaxial,» Universidad Distrital "Francisco José de Caldas", Bogotá, Colombia, 2016.

[43] IEEE Power and Energy Society, *IEEE Std 80: "Guide for Safety in AC Substation Grounding",* 2013.

[44] C. Andrews y V. Cooray, «Electrical Aspects of Lightning Strike to Humans,» de *The Lightning Flash*, Londrés, Inglaterra, The Institution of Engineering and Technology, 2003, pp. 549-564.

[45] F. Román, A. Alarcón y F. Santamaría, «Analysis of a Lightning Accident in Gavle, Sweden,» de *VIII International Symposium on Lightning Protection*, São Paulo, Brasil, 2005.

[46] P. Chowduri, «Impulse Impedance Test on Laboratory Model Ground Electrodes,» *Proceedings of IEEE Transmission and Distribution,* vol. 150, nº 4, pp. 427-433, 2003.

[47] D. S. Gazzana, A. S. Bretas, G. A. D. Dias, M. Telló, D. W. P. Thomas and C. Christopoulos, "A Study of Human Safety Against Lightning Considering the Grounding System and the Evaluation of Associated Parameters," *Electric Power System Research,* no. 113, pp. 88-94, 2014.

[48] A. Geri, «Behaviour of Grounding Systems Excited by High Impulse Currents: The Model and its Validation,» *IEEE Transactions on Power Delivery,* vol. 14, nº 3, pp. 1008-1017, 199.

[49] H. D. Gómez y E. Velilla, «Modelación de puestas a tierra para evaluación de sobretensiones transitorias,» Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2002.

[50] M. Loboda y Z. Pochanke, «Experimental Study of Electric Properties of Soil With Impulse Current Injections,» *XVIII ICLP,* pp. 191-198, 1985.

[51] R. Montano, M. Becerra , V. Cooray, M. Rahman y P. Liyanage, «Resistance of spark channels,» *IEEE Transactions on Plasma Science,* vol. 34, nº 5, pp. 1610-1619, 2006.

[52] J. H. Montaña, «Puestas a tierra. Variación de los parámetros eléctricos del terreno con la frecuencia y Software para el cálculo de potenciales transitorios,» Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2006.

[53] B. Neknoul, P. Labie, F. X. Zgainski y G. Meunier, «Calculating the Impedance of the Grounding System,» *IEEE Transactions on Magnetics,* vol. 32, nº 3, pp. 1509-1512, 1996.

[54] J. J. Pantoja y F. Román, «Analysis of a Lightning Earthing System using Electromagnetic Simulations,» *International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA),* pp. 104-108, 2015.

[55] C. Portela, «Measurement and Modelling of Soil Electromagnetic Behavior,» *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compability,* vol. 2, pp. 1004-1009, 1999.

[56] R. Velazquez y D. Mukhedkar, «Analytical Modelling of Grounding Electrodes Transient Behaviour,» *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,* Vols. %1 de %2PAS-103, nº 6, pp. 1314-1322, 1984.

[57] S. Zequing, M. R. Raghuveer y H. Jingliang, «Influence of the Nature of Impulse Current Propagation in Soils on Transient Impedance Characteristics,» *IEEE Conference on Electrical Insulation and dielectric Phenomena,* pp. 739-742, 2000.

[58] J. J. Pantoja, F. Román, F. Amortegui y C. Rivera, «Lightning Grounding System of a Tal-Mast for Human Safety,» *Electric Power Systems Research,* vol. 153, pp. 119-127, 2017.

[59] J. He, R. Zeng y B. Zhang, «Impulse Characteristics of Grounding Devices,» de *Methodology and Technology for Power System Grounding*, Singapore, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2013.