



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Estudio de tensiones inducidas en líneas de transmisión usando modelos de escala reducida sobre dos terrenos de diferente resistividad

César Oswaldo Peralta Piernagorda

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá, Colombia
2014

Estudio de tensiones inducidas en líneas de transmisión usando modelos de escala reducida sobre dos terrenos de diferente resistividad

Ing. César Oswaldo Peralta Piernagorda

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título

de:

Magister en Ingeniería Eléctrica

Director:

Prof. Ing. Francisco Javier Amórtegui Gil

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Bogotá, Colombia

2014

*A mis padres, hermanos y mi sobrina
Victoria que los quiero mucho*

*A mis amigos, que también los quiero
mucho... para qué lo voy a negar...*

AGRADECIMIENTOS

Fueron muchas las personas que ayudaron en la realización de este trabajo y en la ejecución de tan extenuantes pruebas. Espero no se me queden muchos sin mencionar...

Agradezco al profesor Francisco Amórtegui por su apoyo, guía y enseñanzas, no solo en el ámbito profesional sino también en el personal.

Gracias a todos los que de una u otra forma me ayudaron con las pruebas, en las largas jornadas de montaje del canal de descarga, principalmente a Julián Peralta, Ing. Daniel Poveda, Isabel Niño, Ing. Jorge Rodríguez, Ing. Vanessa Quintero, Ing. Paola Galindo, Ing. Óswald Serna, Ing. Diana Benavides, Ing. Óscar Escobar, Álvaro Aponte, Diego Velandia, Daniel Rodríguez.

Por su ayuda en la búsqueda y estudio de métodos de cálculo al Ing. Daniel Poveda. Por todo el trabajo en la puesta en marcha del generador al Ing. Jorge Rodríguez.

Por su apoyo y trabajo en la organización de todos los oscilogramas y datos obtenidos en las pruebas, así como por ofrecerme siempre su ayuda, agradezco especialmente a Alejandra Castillo, Isabel Niño y Laura Niño.

Gracias al Ing. Gabriel Díaz del Castillo por la calibración del FCT y al Ing. Diego Muñoz por facilitarme los datos de sus mediciones y cálculos de la resistividad del terreno donde se realizaron las pruebas.

Al Grupo de Compatibilidad Electromagnética, especialmente al Ing. Francisco Román y el Ing. Francisco Santamaría por sus sugerencias y ayuda para la medición de la corriente de descarga.

Por sus aportes e ideas sobre el experimento, así como en el apoyo bibliográfico a Ing. Javier Herrera, Ing. Diana Jiménez e Ing. Martha Camargo.

En general, al Laboratorio de Ensayos Eléctricos Industriales – LABE, por todas las facilidades logísticas que otorgó para la ejecución de los ensayos

Resumen

En este proyecto se evaluó la magnitud de las tensiones inducidas en los sistemas de transmisión de energía eléctrica usando modelos a escala reducida debido a descargas atmosféricas a tierra: Se construyeron entre otros el canal de descarga del rayo a escala, línea aérea a escala y un generador de impulsos tipo rayo; se realizaron pruebas en planos de tierra metálicos y reales, se midieron las tensiones inducidas en la línea a escala por efecto de la corriente en el canal de rayo construido. Puesto que se usa un modelo a escala reducida es necesario generar señales de impulso eléctricos con valores de tensión de algunos kilovoltios y con frentes de onda rápidos, frentes de onda entre 5 ns y 50 ns. Igualmente se requiere de un sistema de medición adecuado para medir señales de este tipo.

Palabras clave: Descarga atmosférica, tensiones inducidas, modelo a escala reducida

Abstract

In this project, is evaluated the magnitude of induced voltages on power systems using reduced scale models due to lightning discharges on earth. Among others, were built scale lightning discharge channel, scale overhead line and a current impulse generator; Tests on earth planes real and metallic were made. Also, it was measured induced voltage on scale overhead line due to current on discharge channel. Since a scale model is used it is necessary to generate electrical pulse signals with voltages of some kilovolts and fast wave fronts, wave fronts from 5 ns and 50 ns. Also requires a suitable measuring system for measuring signals of this type.

Keywords: lightning, induced voltages, reduced scale model.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Introducción	1
1. TENSIONES INDUCIDAS DEBIDO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	5
1.1 Introducción	5
1.2 Sobretensiones debido a descargas atmosféricas cerca de las líneas	6
1.3 Algunos parámetros de importancia en el análisis de tensiones inducidas por descargas atmosféricas	9
2. ALGUNOS ENSAYOS A ESCALA REDUCIDA EN EL MUNDO Y ENSAYOS A ESCALA REAL	17
2.1 Modelo escala reducida Universidad Sao Paulo (Brasil) Piantini <i>et. al.</i> [3]	18
2.2 Modelo escala reducida Ishii <i>et. al.</i> (Japón) [4]	20
2.3 Modelo escala reducida Grossi (Brasil) [6]	22
2.4 Otros ensayos. Tensiones inducidas en línea de distribución durante descargas atmosféricas activadas por cohete Barker <i>et. al.</i> [8]	24
3. CONSIDERACIONES PARA ENSAYOS A ESCALA REDUCIDA, DEFINICIÓN DEL FACTOR DE ESCALA	27
4. CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS DEL SISTEMA A ESCALA REDUCIDA Y ENSAYOS PRELIMINARES	35
4.1 Canal de descarga.....	35
4.1.1 Efectos de la altura y la capacitancia en la velocidad de la corriente de descarga	37
4.1.2 Canal de descarga construido.....	41
4.2 Generador de impulsos de corriente y primeras pruebas	42
4.2.1 Primer generador construido.....	42
4.3 Segundo generador de impulsos de corriente	45
4.4 Definición método de medición corriente en el canal de descarga	49
4.4.1 Primer método de medición de corriente. Resistencia shunt.	49
4.4.1.1 Verificación de la medición de corriente por el canal	50
4.4.2 Medición de corriente con FCT (Fast Current Transformer)	53
4.5 Valores y límites de exposición a los campos electromagnéticos para personas durante las pruebas	53
5. ENSAYOS A ESCALA REDUCIDA SOBRE TERRENO REAL Y SOBRE PLACA METÁLICA	56
5.1 Montaje modelo escala reducida, primera medición de corriente del canal y tensión inducida en línea aérea	56
5.1.1 Impedancia característica línea aérea a escala reducida	61
5.2 Pruebas a escala reducida en terreno real y sobre placa metálica	62
5.3 Tensiones inducidas para configuración adyacente o alineada.....	64
6. COMPARACIÓN RESULTADOS MODELOS TEÓRICOS VS ENSAYOS ESCALA REDUCIDA	67
6.1 Comparación con primer modelo teórico	67
6.2 Comparación segundo modelo teórico.....	68

6.2.1	Algunas características del LIOV-Code	69
6.2.2	Resultados obtenidos simulaciones y mediciones	69
6.3	Análisis de la comparación de resultados	75
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
A.	Anexo: Compilación de resultados	78
	Bibliografía	83

Introducción

Uno de los fenómenos que más afecta negativamente a los sistemas eléctricos de distribución son las tensiones inducidas debidas a Descargas Eléctricas Atmosféricas que impactan en las cercanías de las líneas aéreas. Aunque los impactos directos son mucho más peligrosos para la integridad de los equipos que están conectados a estas redes, la mayor frecuencia con la que se presentan los impactos indirectos, junto a las magnitudes de las tensiones que pueden llegar a inducirse en los conductores, hacen de este fenómeno uno de los principales objetos de estudio en cuanto a causas de falla en equipos y a la degradación de la calidad de la energía eléctrica.

El trabajo de maestría que se presenta se basó en un estudio de los parámetros que influyen en las tensiones inducidas por descargas atmosféricas, así como también en los principales factores que se deben tener en cuenta para pruebas a escala reducida. Se realizó una revisión bibliográfica que tenía como primer objetivo, crear apropiación del tema por parte del autor para posteriormente adquirir criterios para la selección apropiada de artículos, libros y tesis que aportaran al desarrollo del presente trabajo investigativo. Se revisaron algunos trabajos de pruebas a escala reducida que se realizaron en otros países lo cual ayudó a adquirir una idea de las características de este tipo de pruebas y de posibles retos que iba ser necesario superar.

Para el presente trabajo, se construyeron todos los elementos para la ejecución de pruebas con modelos a escala reducida y se realizaron mediciones sobre estos modelos sobre terreno real y sobre terreno metálico. Se construyó el generador de impulsos tipo rayo con capacidad de generar ondas con tiempo de frente de

menos de 10 ns a más de 10 kV. Se construyó el canal de descarga del rayo usando una bobina de 10 m de larga y más de 30000 espiras, la línea aérea sobre la que se realizaban las mediciones de la tensión inducida así como también los sistemas de medida de corriente y tensión, los cuales fueron evolucionando con el tiempo y la realización de más pruebas sobre el modelo a escala reducida. También se probaron varios métodos para la elevación del canal de descarga de 10 m tales como el uso de poleas y cuerdas colgantes entre edificios y postes, también el uso de torres contenedoras del canal sostenidas por vientos fijados al piso.

Durante el transcurso de las pruebas, se encontraron problemas logísticos así como también en la generación y medición de las señales, problemas que difícilmente se mencionan en la bibliografía consultada. Dentro de los principales problemas que se tuvieron que solucionar así como detalles técnicos está el uso de un generador con alto consumo de energía, interferencias en la medición por los accionamientos internos de la UPS usada (ésta tuvo que alejarse más de 15 m del área de prueba), uso de sondas de la misma longitud para evitar diferencias en los tiempos de llegada de señales simultáneas, interferencia de elementos y construcciones cercanas al área de prueba, entre otros.

Se compararon los resultados de las mediciones con dos métodos matemáticos, uno planteado por Nucci *et. al* [7] y otro planteado por Saldanha *et. al.* [23]. Para el primer método fue necesario realizar una aproximación de la onda usada durante las pruebas al modelo matemático de Heidler *et. al.* [26] usado por Nucci *et. al.* [7].

Este documento se divide en 7 capítulos. En el primer capítulo se hace una presentación breve del trabajo investigativo relacionado con las tensiones inducidas en líneas aéreas por descargas atmosféricas así como de los principales factores que influyen en estas tensiones. En el segundo capítulo se hace un estudio de algunos ensayos a escala reducida realizados en otros países del mundo para el estudio de tensiones inducidas, también de una investigación

sobre tensiones inducidas en las que se activan las descargas atmosféricas usando cohetes lanzados a las nubes con un conductor conectado a tierra cerca a una línea aérea bajo estudio y desenergizada. El capítulo 3 presenta las principales consideraciones para ensayos a escala reducida y la definición del Factor de Escala. El capítulo 4 hace un recuento del trabajo realizado en la construcción de todos los elementos del modelo a escala reducida, incluyendo canal de descarga, línea aérea, generador de impulsos, sistemas de medida. El capítulo 5 presenta la ejecución y los resultados de las pruebas sobre terreno metálico y sobre terreno real. En el capítulo 6 se presenta una comparación entre mediciones hechas y resultados obtenidos por métodos matemáticos desarrollados por otros autores. Por último, en el capítulo 7 se describen las principales conclusiones del trabajo realizado.

1. TENSIONES INDUCIDAS DEBIDO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

1.1 Introducción

Las descargas atmosféricas son fenómenos naturales que afectan significativamente a los sistemas de distribución de energía eléctrica, un rayo que impacte directamente sobre una línea eléctrica es capaz de generar sobretensiones de cientos de kilovoltios y dependiendo de las protecciones que las líneas y sus equipos posean podría generar daños más o menos graves.

Las descargas atmosféricas que no impactan directamente a las líneas de transmisión y distribución, pero que caen cerca a éstas, generan ondas electromagnéticas que viajan a través del aire y de la tierra, estas ondas afectan a las líneas generando tensiones inducidas las cuales pueden ser de un valor relativamente alto, de tal forma que para el sistema será una sobretensión que afecta el funcionamiento normal de la línea y por ende puede generar una falla de sus elementos o del sistema.

Para el caso de rayos que impactan directamente sistemas de distribución sin protección según lo informa la *IEEE Power & Energy Society* [1], en los conductores de fase ocurre flameo la gran mayoría de las veces, así pues un pequeño rayo de solo 10 kA podría producir una sobretensión cercana a 2 MV, evidentemente esta sobretensión es mucho más alta que los niveles de aislamiento que tienen los sistemas de distribución de hasta 69 kV.

1.2 Sobretensiones debido a descargas atmosféricas cerca de las líneas

Tal como lo menciona la *IEEE Power & Energy Society* [1], se puede hablar de varias características que definen a las tensiones inducidas debido a descargas atmosféricas cerca de las líneas, muchas de las salidas de líneas de bajo nivel de aislamiento se deben principalmente a estas descargas cercanas, las tensiones inducidas tienen usualmente un ancho de pulso más corto que el pulso generado por una descarga directa, también tienen una tendencia a ser unipolares sobre todo si la descarga ocurre a un lado de la línea, incluso para terrenos con pérdidas (baja conductividad) se habla que la polaridad podría cambiar de un extremo de la línea al otro.

El tener adecuados modelos para realizar el acople electromagnético entre la onda generada por el rayo y la línea bajo análisis es un factor muy importante al momento de calcular y estimar las tensiones inducidas, la resistividad del terreno juega un rol muy importante cuando se está evaluando el nivel de protección que se usará en una línea de distribución que se verá afectada por tensiones inducidas, por ejemplo, un sistema de distribución sobre un terreno de baja resistividad podría tener un buen desempeño si se emplea un nivel de aislamiento de 300 kV, sin embargo si el mismo sistema, con las mismas probabilidades de tensiones inducidas y todos sus parámetros iguales excepto la resistividad del terreno, podría necesitar un nivel de aislamiento de 420 kV cuando su resistividad es igual a 1000 Ωm , es decir una alta resistividad.

Como punto de referencia al momento de iniciar un análisis de tensiones inducidas, se parte de una ecuación muy general planteada por Rusck, la cual a pesar que solo sirve para obtener el valor pico de la tensión, da un primer acercamiento en el desarrollo de los cálculos. La fórmula es la siguiente:

$$U_m = 30 \left[1 + \frac{v/c}{\sqrt{2-(v/c)^2}} \right] \left[\frac{h \cdot I_p}{d} \right]$$

Ecuación 1.1 Máxima sobretensión según IEEE Power & Energy Society [1]

De esta ecuación se tiene que:

U_m = Máxima sobretensión en el punto más cercano al punto de impacto [kV]

v = Velocidad de propagación de la corriente de retorno, usualmente es $c/3$ [m/s]

c = Velocidad de la luz 3×10^8 [m/s]

I_p = Pico de la corriente de retorno [kA]

h = Altura de la línea sobre el suelo [m]

d = Es la distancia lateral desde la línea horizontal hasta el punto de impacto de la descarga vertical

Esta ecuación tiene varias limitantes y consideraciones, por ejemplo está definida para un solo conductor de longitud infinita sobre un terreno conductor perfecto, la forma de onda es la generada por una corriente tipo paso, la velocidad de la onda es relativamente lenta comparada con la velocidad de la luz. Si se desea corregir un poco el efecto que tiene el uso de un terreno real con una resistividad más alta, lo usual es cambiar el valor de la altura de la línea sobre el suelo, esto se puede hacer haciendo uso de:

$$h_{efec} = h + \frac{1,5}{\sqrt{\rho}}$$

Ecuación 1.2. Altura efectiva de la línea teniendo en cuenta la conductividad del terreno según Darveniza [2]

Donde:

h_{efec} = Nueva altura efectiva de la línea

h = Altura real de la línea

ρ = Resistividad del terreno

Para el desarrollo de esta ecuación, Darveniza [2] analizó varios modelos existentes que trabajan con suelos ideales y otros que tienen en cuenta la

resistividad real del terreno. Cuando se trabaja y se analizan los problemas con terreno ideal ($\rho = 0 \Omega\text{m}$) los campos eléctrico y magnético no penetran en el suelo, se puede usar el método de las imágenes ubicando las cargas, la imagen de la corriente de retorno y la imagen del conductor que representa la línea aérea bajo estudio, a una distancia igual a su altura relativa a la superficie del suelo. Darveniza [2] resume los principales efectos de la resistividad del terreno en el análisis de las tensiones inducidas, a continuación se hace un recuento de estos:

-Teoría general de antenas indica que al no tener un suelo conductor perfecto, el campo magnético de la corriente de retorno en el suelo resistivo en la base de una antena vertical afecta a la distribución de corriente.

-En un suelo con conductividad finita, se presenta fenómenos de reflexión. Esta reflexión es descrita por los coeficientes de Fresnel. Estos coeficientes tienen dentro de sus parámetros efectos del ángulo de incidencia, la permitividad relativa, la resistividad del terreno y la frecuencia. Debido a esto no se puede usar la teoría básica de las imágenes, sería necesario ubicar imágenes complejas ubicadas a varias distancias debajo de la antena vertical. Si se restringen varios parámetros podría usarse la teoría general de las imágenes con muy pequeñas variaciones.

Dentro de las restricciones se tendría su uso para campos cercanos al punto de impacto del rayo (un par de kilómetros), otra limitación sería la resistividad del terreno usando valores máximos de resistividad $\rho = 1 \text{ k}\Omega\text{m}$. El campo eléctrico en dirección vertical y el campo magnético en dirección horizontal no se ven muy afectados por la resistividad del terreno. En términos generales se puede decir que una onda electromagnética viajando sobre la superficie de un terreno con pérdidas, perderá y entregará la energía que necesita el terreno para compensar las pérdidas del suelo.

-La resistividad del suelo tiene un efecto no despreciable en la generación y el valor del campo eléctrico en dirección horizontal, para terrenos perfectamente

conductores la componente horizontal de E es igual a cero en la superficie, sin embargo su valor va aumentando con la altura a medida que se aleja del suelo.

-Los parámetros de la línea cambian con la resistividad del terreno. La impedancia longitudinal de la línea cambia, la inductancia a tierra aumenta para terrenos resistivos, además aparece un efecto resistivo en el suelo. Una inductancia más alta significa en la mayoría de los casos tensiones inducidas más elevadas.

1.3 Algunos parámetros de importancia en el análisis de tensiones inducidas por descargas atmosféricas

Según la información recolectada por Cooray [25], los pasos que usualmente se siguen para la estimación de los campos generados por una descarga atmosférica en líneas aéreas son los siguientes:

- i) La especificación de la densidad de corriente \mathbf{J} (o la densidad de carga lineal ρ).
- ii) El uso de \mathbf{J} (o ρ) y la ecuación de continuidad para encontrar ρ (o \mathbf{J}).
- iii) El uso de \mathbf{J} para encontrar el potencial magnético \mathbf{A} y ρ para encontrar el potencial eléctrico ϕ .
- iv) El cálculo del campo \mathbf{E} usando \mathbf{A} y ϕ .
- v) El cálculo del campo \mathbf{B} usando \mathbf{A} .

Al hacer un intensivo y estricto uso de las ecuaciones de Maxwell, Cooray [25] logra obtener las expresiones completas para el campo eléctrico y el campo magnético, a continuación se muestra la expresión para el campo eléctrico:

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^{L'(t)} \frac{2-3\sin^2\alpha(z')}{R^3(z')} \int_{t_h}^t i(z', \tau - R(z')/c) d\tau dz' \\
 & + \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^{L'(t)} \frac{2-3\sin^2\alpha(z')}{cR^2(z')} i(z', t - R(z')/c) dz' \\
 & - \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^{L'(t)} \frac{\sin^2\alpha(z')}{c^2R(z')} \frac{di(z', t - R(z')/c)}{dt} dz' \\
 & - \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\sin^2\alpha(z')}{c^2R(z')} i(L', t - R(z')/c) \frac{dL'}{dt}
 \end{aligned}$$

Ecuación 1.3. Expresión para el campo eléctrico generado por una descarga atmosférica en dirección z a nivel del suelo

Donde:

$L'(t)$: Longitud del canal de descarga visto por el observador en el tiempo t

z' : Posición a lo largo del eje z con origen en la base del canal. Es una de las variables de integración.

t : Indica el tiempo

t_h : Tiempo para el cual el frente de onda ha alcanzado la altura z' por primera vez

$R(z')$: Distancia entre la posición real de la corriente de descarga y el punto de observación

$\alpha(z')$: Ángulo formado entre el eje z y la línea formada por $R(z')$ durante el ascenso de la corriente de retorno

τ : Tiempo al cual el observador ve el frente de la corriente de retorno a la altura z'

C : Velocidad de la luz

ϵ_0 : Permitividad del espacio vacío

A continuación, se presenta un esquema que representa la ubicación relativa de los diferentes elementos presentados en la anterior ecuación:

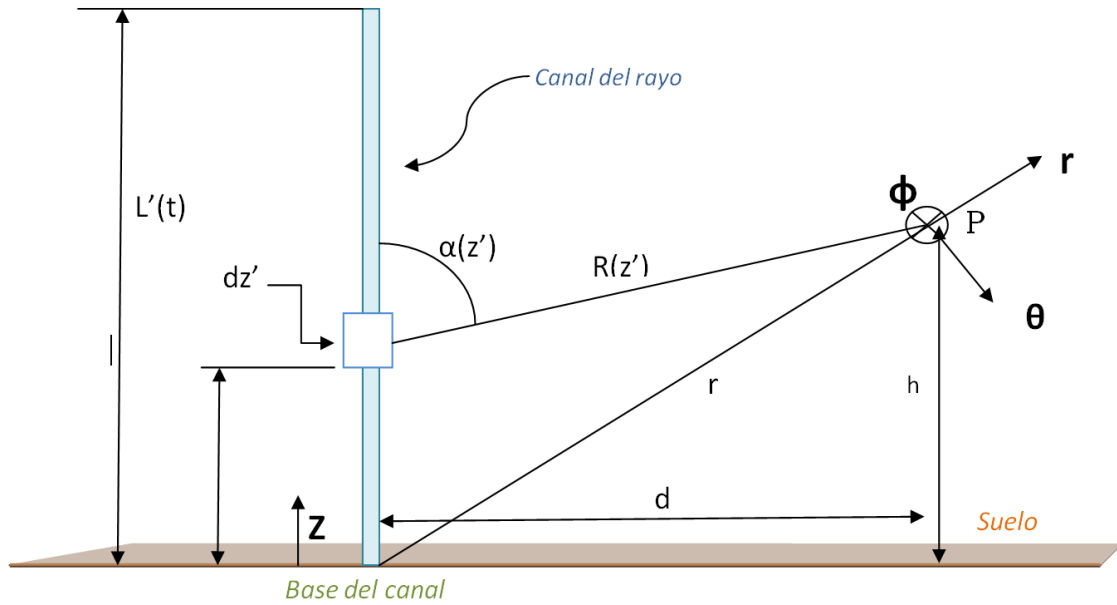


Figura 1.1 Geometría bajo análisis para cálculo de campo

Donde:

P es el punto de observación

d es la distancia horizontal entre el canal del rayo y el punto P

r es la distancia entre la base del canal del rayo y el punto p

h es la altura del punto P

En la ecuación 1.3 se destacan algunos elementos. El primer término con R^3 hace referencia al campo eléctrico denominado campo cercano, nótese el efecto de la distribución de la corriente en esta expresión; para tener en cuenta adecuadamente el efecto de la corriente, deben sumarse los efectos de ésta en el cálculo del campo eléctrico cercano, es por esto que se usa una integral para considerar su aporte adecuadamente.

El segundo término que hace referencia al que se conoce como campo inducido, es dependiente de R^2 . El tercer término dependiente de R , determina el campo conocido como campo lejano o radiado.

R es una expresión que dependerá de la posición de la corriente de retorno respecto al punto de observación. Es en esencia la distancia entre la corriente y el punto de medición.

Uno de los parámetros más importantes, es la expresión que se use para la corriente de descarga. Una de las expresiones más usadas es la planteada por Heidler *et. al.* [26]. Esta expresión tiene en cuenta el valor pico de la corriente, el tiempo de frente del impulso y el denominado tiempo de cola. También algunos factores que varían en unos límites definidos.

La corriente en la base del canal sería:

$$i(0, t) = \frac{I_0}{\eta} \times \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \times e^{-\frac{t}{\tau_2}}$$

Ecuación 1.4. Expresión para la corriente en la base del canal del rayo Heidler [26]

Donde:

I_0 : Valor pico corriente en la base del canal

η : Factor de corrección de la amplitud de la corriente.

t : Indica el tiempo

τ_1 : Tiempo de frente del impulso

τ_2 : Tiempo de cola del impulso

n : Factor de corrección ($2 \leq n \leq 10$)

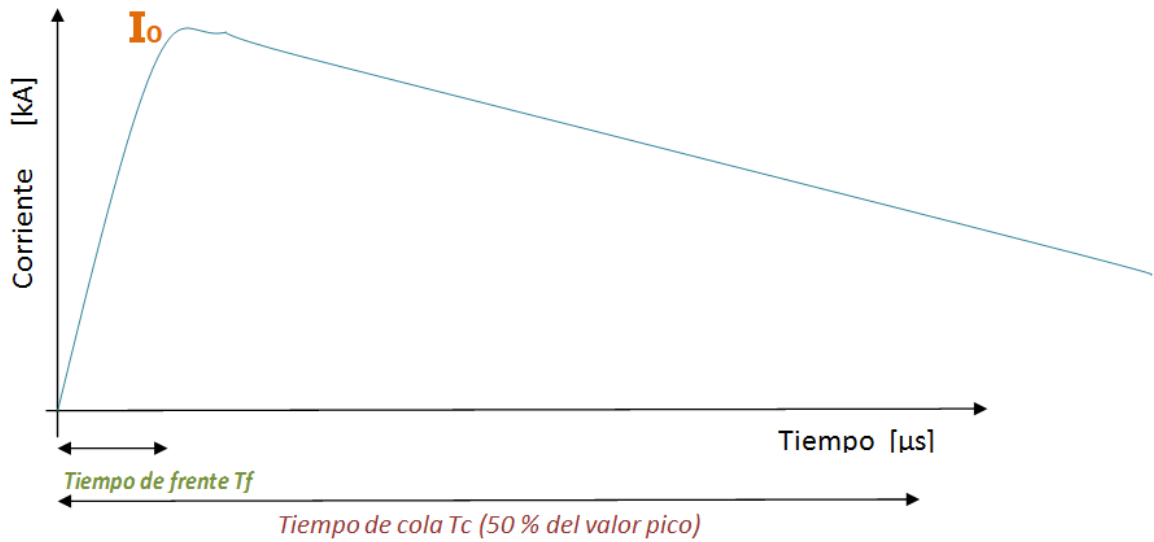


Figura 1.2 Forma de onda típica de la corriente de descarga según ecuación 1.4

Esta expresión será usada más adelante para los análisis teóricos propuestos en este trabajo.

Teniendo en cuenta la expresión de la corriente y la geometría del problema (**Ver Figura 1.1**), la expresión del campo eléctrico vertical quedaría así:

$$\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^{L'(t)} \frac{2-3 \sin^2\left(\tan^{-1}\left(\frac{d}{z'-h}\right)\right)}{\sqrt{z'^2+d^2}^3} \int_{t_h}^t \left(\frac{I_0}{\eta} \frac{\left(\frac{t-\frac{\sqrt{z'^2+d^2}}{c}}{\tau_1}\right)^n}{1+\left(\frac{t-\frac{\sqrt{z'^2+d^2}}{c}}{\tau_1}\right)^n} e^{-\frac{t-\frac{\sqrt{z'^2+d^2}}{c}}{\tau_2}} \right) d\tau dz'$$

$$+ \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^{L'(t)} \frac{2-3 \sin^2\left(\tan^{-1}\left(\frac{d}{z'-h}\right)\right)}{c\sqrt{z'^2+d^2}^2} \left(\frac{I_0}{\eta} \frac{\left(\frac{t-\frac{\sqrt{z'^2+d^2}}{c}}{\tau_1}\right)^n}{1+\left(\frac{t-\frac{\sqrt{z'^2+d^2}}{c}}{\tau_1}\right)^n} e^{-\frac{t-\frac{\sqrt{z'^2+d^2}}{c}}{\tau_2}} \right) dz'$$

$$-\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^{L'(t)} \frac{\sin^2\left(\tan^{-1}\left(\frac{d}{z'-h}\right)\right)}{c^2\sqrt{z'^2+d^2}} \frac{d}{dt} \left(\frac{I_0}{\eta} \frac{\left(\frac{t-\frac{\sqrt{z'^2+d^2}}{c}}{\tau_1}\right)^n}{1+\left(\frac{t-\frac{\sqrt{z'^2+d^2}}{c}}{\tau_1}\right)^n} e^{-\frac{t-\frac{\sqrt{z'^2+d^2}}{c}}{\tau_2}} \right) dz'$$

$$-\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\sin^2\left(\tan^{-1}\left(\frac{d}{z'-h}\right)\right)}{c^2\sqrt{z'^2+d^2}} \left(\frac{I_0}{\eta} \frac{\left(\frac{t-\frac{\sqrt{z'^2+d^2}}{c}}{\tau_1}\right)^n}{1+\left(\frac{t-\frac{\sqrt{z'^2+d^2}}{c}}{\tau_1}\right)^n} e^{-\frac{t-\frac{\sqrt{z'^2+d^2}}{c}}{\tau_2}} \right) \frac{dL'(t)}{dt}$$

Ecuación 1.5 Expresión para el campo eléctrico vertical

Donde:

$L'(t)$: Longitud del canal de descarga visto por el observador en el tiempo t

z' : Posición a lo largo del eje z con origen en la base del canal. Es una de las variables de integración.

t : Indica el tiempo

$R(z')$: Distancia entre la posición real de la corriente de descarga y el punto de observación

$\alpha(z')$: Ángulo formado entre el eje z y la línea formada por $R(z')$ durante el ascenso de la corriente de retorno

τ : Tiempo al cual el observador ve el frente de la corriente de retorno a la altura z'

c : Velocidad de la luz

d : Distancia horizontal entre el canal del rayo y el punto de observación

h : Altura del punto de observación

ϵ_0 : Permitividad del espacio vacío

C : Velocidad de la luz

Tal como puede apreciarse, las expresiones de campo son bastante complejas y requieren métodos de cálculo y solución que no son de fácil implementación. Se han desarrollado trabajos específicos para el cálculo de los campos y las tensiones inducidas que sean más sencillos de usar, como por ejemplo los planteados por Darveniza [2], Razzak[14], Saldanha [23], Pérez [27]. Algunos de estos métodos serán implementados en este trabajo como comparación de los resultados obtenidos en las mediciones realizadas.

2. ALGUNOS ENSAYOS A ESCALA REDUCIDA EN EL MUNDO Y ENSAYOS A ESCALA REAL

El uso de modelos a escala reducida para la representación de sistemas era una práctica comúnmente usada, sistemas de potencia a una escala menor eran implementados y se analizaba el efecto de perturbaciones transitorias sobre el sistema, los resultados obtenidos eran proporcionales a los que se presentarían en un sistema a escala real, de esta forma era posible estimar acertadamente el desempeño del sistema ante perturbaciones predefinidas.

Hoy en día son cada vez menos común la implementación de modelos a escala reducida para el análisis de sistemas, esto se debe principalmente al gran avance que se ha dado en el desarrollo de algoritmos para el cálculo y solución numérica de los sistemas así como al progreso en materia de procesamiento y hardware, lo cual ha reducido enormemente los tiempos de cálculo e iteración.

El análisis de tensiones inducidas usando modelos a escala reducida es una técnica que se ha usado en algunos países tal como lo han hecho Piantini *et. al.* [3] en Brasil, Ishii *et. al.* [4] y [5] en Japón, Grossi [6] en Brasil.

En Brasil se han hecho varios proyectos a escala reducida en los que el suelo se considera como conductor perfecto al usar placas metálicas para simular el efecto del terreno. Se usarán estos trabajos como guías para la implementación del sistema a escala reducida aquí en Colombia, para los dos casos, suelo ideal (metálico) y terreno real.

El análisis de las características en las pruebas desarrolladas por otros investigadores, será un factor importante al momento de seleccionar e implementar los elementos y configuraciones propias en los ensayos a escala reducida a implementar en este trabajo de maestría.

A continuación se hará un breve resumen de los sistemas implementados por Piantini *et. al.* [3], Ishii *et. al.* [4], y Grossi [6].

2.1 Modelo escala reducida Universidad Sao Paulo (Brasil) Piantini *et. al.* [3]

En este trabajo se planteó construir sistemas eléctricos de distribución complejos y comparar los resultados obtenidos con aquellos que se podían lograr con métodos numéricos.

Los sistemas eléctricos construidos son modelos a escala reducida los cuales son afectados por el equivalente a una descarga atmosférica reducida, se mide la tensión inducida en las líneas aéreas del modelo.

Se dice que el modelo construido es complejo por las topologías usadas, las cuales se asemejan a las presentes en sistemas de distribución aéreos reales, adicionalmente se usaron en las pruebas, elementos que simulan edificios cercanos a las líneas, estos edificios afectarán los fenómenos de inducción por la descarga atmosférica.

Para las diferentes pruebas realizadas, el suelo fue considerado como conductor perfecto al usar placas metálicas para todo el sistema. El método de cálculo usado es el LIOV-EMTP code [7]. Este código es un programa desarrollado en un marco internacional de cooperación que involucró a la Universidad de Bologna, el Instituto Federal de Tecnología Suizo y a la Universidad de Roma (La

Sapientia). El código está basado en las formulaciones sobre las leyes de Maxwell planteadas y definidas por Agrawal *et. al.* [11].

Para los ensayos realizados, escogieron un factor de escala igual a 50, el factor de escala es la relación existente para parámetros longitudinales, eléctricos y temporales entre el sistema real y el sistema a escala reducida, el factor puede aplicar directamente una variable (multiplicando), puede afectarlo inversamente (dividiendo) o no afectarlo. Por ejemplo un tiempo de frente del impulso tipo rayo de 10 μ s debería simularse con una onda que tenga un valor 50 veces menor, es decir 200 ns.

El canal de retorno del rayo fue simulado usando cable de cobre arrollado en un tubo para poder obtener así una velocidad de propagación de la corriente, en el canal, cercana al 11 % de la velocidad de la luz en el espacio vacío. A continuación se presentan algunas características del canal del rayo construido:

Tabla 2.1

Características del canal de retorno construido por Piantini <i>et. al.</i> [3]	
Longitud	12 m
Vueltas por metro	323
Diámetro conductor	0,7 mm
Diámetro tubo base arrollamiento	25,4 mm

Dentro de los equipos de medición usados se encuentran los siguientes:

- Osciloscopio con ancho de banda desde DC hasta 200 MHz y con 500 MSamples/s
- Osciloscopio con ancho de banda de 250 MHz y con 1 GSamples/s
- Puntas medición de tensión, con capacitancia de 13 pF

El sistema de distribución es simulado con conductores de cobre de 0,4 mm de diámetro, los conductores fueron montados en estructuras de PVC espaciadas

60 cm. La altura de los conductores de la red de distribución simulada fue de 20 cm.

Los autores concluyen que las pruebas hechas a escala reducida son un buen método para el estudio de situaciones de alta complejidad en las cuales estiman que los métodos de cálculo podrían presentar errores apreciables en las tensiones inducidas calculadas. Los autores no informan exactamente la forma de onda ni los valores de corriente usados, sin embargo indican que para una correcta implementación del modelo, se deben usar tiempos de frente cercanos a 60 ns y los niveles de corriente deberían ser de al menos algunos amperios, de tal forma que se pudieran tener resultados comparables con las mediciones.

2.2 Modelo escala reducida Ishii *et. al.* (Japón) [4]

Para este trabajo se realizaron pruebas a escala reducida de las tensiones inducidas sobre cable aéreo debidas a descargas atmosféricas (simuladas), una diferencia importante con el trabajo desarrollado por Piantini *et. al.* [3] es que las pruebas fueron hechas sobre terreno de conductividad finita.

Los autores indican que varias fórmulas para el cálculo de campos eléctricos generados por descargas atmosféricas no tienen la suficiente exactitud cuando se evalúan a menos de 5 km del punto de impacto en terrenos con conductividad finita por lo cual consideran conveniente hacer la evaluación usando un modelo a escala reducida. La influencia de la resistividad del terreno se estudia usando pruebas a una escala 1/20 sobre terreno con pérdidas. También aseguran medir el campo eléctrico horizontal y vertical cerca al denominado punto de impacto y así obtener de primera mano una relación entre estos.

Tabla 2.2

Características del canal de retorno construido por Ishii <i>et. al.</i> [4]	
Longitud	28 m
Diámetro conductor	0,5 mm
Diámetro tubo base arrollamiento	15 mm

El canal del rayo simulado fue suspendido por medio de un globo, igualmente usan alambre arrollado alrededor del tubo base, la parte superior del canal del rayo simulado está en circuito abierto.

La forma de onda de la corriente fue medida por medio de un transformador de corriente con rango de frecuencia de 8,5 kHz hasta 100 MHz. La velocidad de propagación de la onda de corriente en el canal es de 125 m/ μ s. La línea aérea fue simulada con un conductor de cobre de 0,5 mm de diámetro y 25 m de longitud y una altura de 0,5 m.

Para la línea usaron al final de ella una resistencia de 430 Ω o la dejaron en circuito abierto. Midieron la tensión en ambos extremos de la línea con puntas de tensión con una capacitancia de entrada de 20 pF, el ancho de banda de ellas es de DC hasta 100 MHz.

Los cálculos fueron hechos usando un modelo matemático hecho por Agrawal *et. al.* [11] y se describe brevemente en el trabajo de Ishii *et. al.* [4], al comparar los resultados obtenidos en las mediciones contra los obtenidos en los cálculos se encontró que hay una gran similitud entre ambos siempre y cuando en el modelo matemático se tenga en cuenta la resistividad del terreno; cuando no se tiene en cuenta la resistividad del terreno y se asume un suelo conductor perfecto en los cálculos, las diferencias en las magnitudes de tensión son bastante grandes, la tensión en terreno real puede ser 2 a 5 veces más grande a la predicha por un método de cálculo que tiene en cuenta el terreno como ideal.

2.3 Modelo escala reducida Grossi (Brasil) [6]

Para este trabajo de doctorado hecho en Brasil, se usó un sistema a escala reducida para ver y analizar los efectos que puede tener una descarga atmosférica que impacta directamente contra un edificio, encontrar las tensiones inducidas que se pueden generar al interior del edificio en los diferentes *loops* que haya dentro de la edificación.

Al igual que en el trabajo desarrollado por Piantini *et. al.* [3], se decidió hacer sobre un terreno “ideal” usando placas de cobre como base para los experimentos, varias de las pruebas se desarrollaron al interior del laboratorio de compatibilidad electromagnética de la Universidad de Minas Gerais.

El canal de descarga debe cumplir con ciertas características de tamaño, inductancia y capacitancia para lograr obtener una onda electromagnética que se propague a lo largo de él con una velocidad que se encuentre entre el 10 % y el 50 % de la velocidad de la luz, esta es la velocidad típica que se presenta en el canal de una descarga atmosférica. El canal de descarga utilizado finalmente fue uno fabricado como alambre arrollado alrededor de un tubo aislante, sin embargo la velocidad de propagación calculada para este canal fue el 8,33 % la velocidad de la luz, lo cual está levemente por debajo de las velocidades típicas de la propagación de la onda.

Tabla 2.3

Características del canal de retorno construido por Grossi [6]	
Longitud	2,92 m
Vueltas por metro	610
Diámetro conductor	0,5 mm
Diámetro tubo base arrollamiento	15 mm

El canal estaba en circuito abierto en la parte superior, las mediciones fueron realizadas de tal forma que no se midiera la tensión inducida ocasionada por

la corriente reflejada proveniente de la parte superior del canal. El factor de escala usado para las primeras pruebas fue de 1/100.

La autora afirma que según estudios hechos anteriormente por otros autores como es el caso de Rusck, la corriente de retorno es la etapa más importante en una descarga atmosférica, esta corriente es la que afecta más a la tensión inducida. El tiempo de frente de la onda de corriente inyectada es 47 ns, al pasar este tiempo a un sistema real sería como una corriente con un tiempo de frente de 4,7 μ s.

Como realizaron las pruebas al interior de un laboratorio no tenían totalmente claro que tanto afectarían las paredes de éste, sin embargo, la autora afirma que al comparar los resultados obtenidos con aquellos calculados en las simulaciones, encontraron que ambos eran muy similares por lo cual le permite inferir que no hubo mucha interferencia.

Para las simulaciones Grossi usó un código computacional basado en la teoría de Rusck hecho por otro brasilero de apellido Lopes [29], no se desarrolló un nuevo método de cálculo.

Tal como se mencionó anteriormente de forma breve, los resultados obtenidos fueron satisfactorios para la autora, encontrando similitud entre las tensiones esperadas y las tensiones medidas.

Estos ensayos de tensiones inducidas sobre cables son una parte del estudio llevado a cabo por la autora pues más adelante se enfatizó en las tensiones inducidas dentro de edificaciones cuando un rayo cae directamente en el edificio.

2.4 Otros ensayos. Tensiones inducidas en línea de distribución durante descargas atmosféricas activadas por cohete Barker *et. al.* [8]

En el mundo se han llevado a cabo ensayos sobre sistemas a escala real para analizar los efectos de las descargas atmosféricas en las líneas de distribución, en los cuales se dispone de una línea desenergizada y cerca de ella se generan descargas atmosféricas con la ayuda de un cohete que hace conexión entre la nube y tierra tal como lo realizaron Barker *et. al.* [8].

La idea general es que desde tierra se dispara un cohete que tiene en su extremo inferior un conductor conectado a tierra y cuando el cohete llega a la nube o sus cercanías se produce una descarga a través de la conexión eléctrica entre la nube y tierra.

Al tiempo que se producían las descargas, también se hacía medición de las tensiones inducidas entre fase y neutro, el campo eléctrico, el campo magnético y características de la corriente de descarga producida por el rayo activado por medio del cohete.

Según estudios anteriores por Master *et. al.* [10], la tensión inducida decae bastante al aumentar la distancia entre el punto de impacto de la descarga atmosférica y la línea de energía afectada. Estos estudios fueron desarrollados sobre una línea de prueba desenergizada y sobre la cual se tenían instalados sistemas de medición para campo eléctrico y tensión inducida. La línea usada, tenía una longitud de 460 m. Gracias a estas pruebas se evidenció que la tensión inducida era mayor para los casos en que el punto de impacto de la descarga se presentaba cerca del final de la línea. Con este trabajo se logró obtener información valiosa para el análisis de los parámetros que influyen en la tensión inducida, tales como la corriente del rayo, puntos de impacto relativos a la línea bajo estudio, tiempos de frente, campos eléctricos cerca de la línea, etc.

Gracias al trabajo desarrollado por Master *et. al.* [10] y en otros documentos, los ensayos hechos por Barker *et. al.* [8] se hicieron para distancias cortas relativas entre el punto de impacto de la descarga, esto con el fin de obtener valores de más fácil medición sobre la línea de pruebas; la distancia más corta desde el canal de descarga disparado hasta la línea aérea de pruebas es de aproximadamente 145 m. La línea de pruebas tiene una longitud de 682 m y estaba compuesta por dos conductores que equivalen a un conductor de fase y a un conductor de neutro.

Barker *et. al.* [8] aceptan que el método usado tiene algunas desventajas al momento de poder comparar los resultados obtenidos por ellos contra otras mediciones y simulaciones hechas en el mundo. Por ejemplo, indican que al ser una descarga “disparada” o activada artificialmente por medio de un cohete enlazando nube y tierra, la primera descarga es afectada por el cable que hizo la primera unión nube-tierra (el cual se evapora con el paso de esta primera corriente), la primera descarga es distorsionada y además las descargas subsiguientes, presentan una velocidad de retorno levemente superior a las primeras descargas, aun así se pueden poner a prueba de manera muy precisa los modelos matemáticos de cálculo.

Otra característica importante para el desarrollo de estas pruebas y que debe tenerse en cuenta para las pruebas a escala reducida, es el uso de resistencias al final de la línea aérea. Los autores usan resistencias de 455Ω conectadas entre lo que denominan cable de fase y el cable de neutro para evitar reflexiones indeseadas que posteriormente podrían generar problemas para interpretar los resultados y compararlos con trabajos realizados anteriormente. Un aspecto importante en este tipo de pruebas, es la ausencia de elementos propios de sistemas de distribución, no se instalaron equipos tales como transformadores, condensadores, descargadores y otros elementos similares.

De las pruebas realizadas, se evidenció que los valores obtenidos de tensiones son superiores a lo que se podría predecir al calcularlas por medio de la

teoría general planteada por Rusck en 1958 y que más adelante fue modificada por Darveniza [2] para tener en cuenta el efecto de la resistividad del suelo. Las tensiones medidas durante las pruebas eran aproximadamente 63 % superiores en valor pico a las predichas por la teoría de Rusck.

Tal como se había mencionado anteriormente, en estos experimentos se mide el campo eléctrico en las inmediaciones de la línea aérea. Los autores usan los datos obtenidos de campo eléctrico como valores de entrada en el modelo de acople de Agrawal *et. al.* [11] y así calculan la tensión inducida.

La comparación arroja resultados muy similares, demostrando de una u otra forma que los métodos de medición de tensión, campo eléctrico y campo magnético fueron adecuados. Cabe resaltar que Barker *et. al.* [8] no realizaron un cálculo de la tensión inducida usando directamente como parámetro de entrada la forma de onda de la corriente de descarga, la geometría propia del canal del rayo, el punto de impacto y la disposición de la línea u otros elementos que podrían ser tenidos en cuenta para calcular la tensión inducida con métodos disponibles en su momento como los descritos por Rachidi *et. al.* [12] y Anderson *et. al.* [13].

Actualmente, el método de Agrawal *et. al.* [11] es ampliamente aceptado y es usualmente utilizado como referencia para demostrar la aplicabilidad y buen desempeño de nuevos métodos Razzak *et. al.* [14], Martínez *et. al.* [15], Cooray *et. al.* [16] y también como base para modificaciones en estudios detallados y específicos en los cuales se tiene en cuenta el efecto de la conductividad finita del terreno.

3. CONSIDERACIONES PARA ENSAYOS A ESCALA REDUCIDA, DEFINICIÓN DEL FACTOR DE ESCALA

Tal como se ha mencionado en los anteriores capítulos, realizar ensayos a escala reducida es una herramienta que ha tenido un uso importante para el estudio y evaluación de sistemas dinámicos y estacionarios reales, en los cuales por alguna razón resulta impráctico o difícil llevar a cabo un estudio o afectación sobre el sistema como tal. Este es el caso de los análisis de tensiones inducidas en líneas aéreas de distribución, en los cuales no es sencillo disponer de un sistema real sobre el cual tener equipos de medición y aún más complicado no se tiene control sobre cuándo ocurrirán las descargas atmosféricas, dónde ocurrirán, la forma de onda de la corriente de descarga, el valor de la corriente, entre otros parámetros.

Para el presente trabajo, fue necesario construir y definir las características de los elementos que emularan a los verdaderos agentes que intervienen en el proceso de las tensiones inducidas en líneas aéreas por descargas atmosféricas como son canal de descarga, corriente de retorno, tiempo de frente, tiempo de cola, velocidad de propagación, línea aérea de energía, entre otros.

Varios autores han reunido información relevante al fenómeno de la descarga atmosférica, para el presente trabajo se tuvieron en cuenta principalmente los datos recogidos por Grossi [6] y *T&D Committee* [19]

Algunos de los parámetros importantes asociados con la descarga atmosférica se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3.1 Principales parámetros asociados a la descarga eléctrica atmosférica.

	MÍNIMO	MEDIO	MÁXIMO
Formación del canal de descarga			
Propagación paso a paso			
Longitud del paso, m	3	50	200
Intervalo de tiempo entre pasos, us	30	50	125
Velocidad media de propagación, m/s	1×10^5	$1,5 \times 10^5$	$2,6 \times 10^6$
Carga depositada en el canal, C	3	5	20
Propagación continua			
Velocidad de propagación, m/s	1×10^6	2×10^6	$2,1 \times 10^7$
Carga depositada en el canal, C	0,2	1	6
Corriente de retorno			
Velocidad de propagación, m/s	2×10^7	8×10^7	$1,6 \times 10^8$
Tasa de subida de corriente, kA/us	< 1	10	>80
Tiempo del pico de corriente, us	< 1	2	30
Valor de corriente pico, kA		10 - 20	110
Tiempo de semi caída de corriente, us	10	40	250
Longitud del canal, km	2	5	14
Diámetro del canal, cm	1,5	5	200

Los anteriores parámetros deben tenerse en cuenta al momento de seleccionar el factor de escala a usar en los ensayos a escala reducida. Por medio de este tipo de ensayos “reducidos” se busca reproducir de manera adecuada y acertada los fenómenos eléctricos que ocurrirían en un sistema real. Entre otras cosas, debe tenerse en cuenta:

-El ancho de banda de los equipos a usar; al trabajar con escala reducida, los tiempos típicos para el frente y bajada del impulso de corriente y tensión, serán más pequeños. Esto quiere decir que se requiere equipos con mayor ancho de banda porque la frecuencia relacionada con estos impulsos es mayor que en escala natural.

-Tamaño de los elementos a construir y disponibilidad de materiales; uno de los principales elementos de esta serie de experimentos a escala reducida es

el canal de descarga del rayo. El factor de escala debe permitir la construcción de un elemento que representa el comportamiento del canal de descarga, teniendo en cuenta que existen limitaciones para su construcción e instalación. Es impráctico tener un canal de descarga a escala reducida que tenga varias decenas de metros de longitud.

-Equipo de generación. Los tiempos de frente de las corrientes de rayo, tienen asociados tiempos cercanos a algunos microsegundos. Realizar ensayos a escala reducida requerirá por lo tanto que el generador esté en capacidad de producir impulsos más rápidos. Dependiendo del factor de escala se estarían manejando tiempos de frente de cientos de nanosegundos hasta un par de nanosegundos.

El factor de escala afectará entonces, directamente a varios parámetros asociados a las tensiones inducidas por descargas atmosféricas, basado en lo recopilado por Boaventura [17], se tendrá que el Factor de Escala FE mantiene una relación entre el modelo a escala reducida y el modelo real así:

Tabla 3.2 *Relación de los parámetros entre el modelo reducido y el sistema real*

Parámetro	Relación
Longitud	$L \text{ modelo} = FE \times L \text{ real}$
Tiempos	$T \text{ modelo} = FE \times T \text{ real}$
Conductividad	$\sigma \text{ modelo} = 1/FE \times \sigma \text{ real}$
Constante dieléctrica	$\epsilon \text{ modelo} = 1 \times \epsilon \text{ real}$
Permeabilidad magnética	$\mu \text{ modelo} = 1 \times \mu \text{ real}$
Longitud de onda	$\lambda \text{ modelo} = FE \times \lambda \text{ real}$
Velocidad de propagación	$V \text{ modelo} = 1 \times V \text{ real}$
Resistencia	$R \text{ modelo} = 1 \times R \text{ real}$
Reactancia	$X \text{ modelo} = 1 \times X \text{ real}$
Impedancia	$Z \text{ modelo} = 1 \times Z \text{ real}$
Capacitancia	$C \text{ modelo} = FE \times C \text{ real}$
Inductancia	$L \text{ modelo} = FE \times L \text{ real}$

Las anteriores relaciones son válidas cuando se define el FE de la siguiente forma:

$$\text{Factor de Escala: FE} = \text{Dimensión del modelo reducido} / \text{Dimensión real}$$

Un breve análisis de los valores típicos asociados a la descarga atmosférica, permitirán definir un Factor de Escala apropiado para la implementación de las pruebas a escala reducida.

- *Tiempo de frente:* Según la información recogida por Grossi [6] y Rakov [18], el tiempo que toma la corriente en llegar a su valor máximo tiene valores inferiores a 1 μs hasta valores que pueden llegar a 30 μs . También se describe el valor típico para este tiempo y es 2 μs . A continuación se muestran los posibles valores para tiempo de frente en el modelo reducido, teniendo en cuenta diferentes Factores de Escala:

Tabla 3.3. *Tiempo de frente del modelo para FE = 1/1000*

Factor de Escala	FE : 1/1000		FE : 1/100		FE : 1/10	
	<i>Real</i>	<i>Modelo reducido</i>	<i>Real</i>	<i>Modelo reducido</i>	<i>Real</i>	<i>Modelo reducido</i>
Tf máximo	30 μs	30 ns	30 μs	300 ns	30 μs	3000 ns
Tf medio	2 μs	2 ns	2 μs	20 ns	2 μs	200 ns
Tf mínimo	<1 μs	<1 ns	<1 μs	<10 ns	<1 μs	<100 ns

Un factor de escala FE = 1/1000 arroja tiempos de frente cercanos a 1 ns. El manejo de estos tiempos presentarían mayores dificultades para medirlos al compararlos con tiempos un poco mayores. Se dispone de osciloscopios con un muestreo aproximado de 1 GSample/s.

Teniendo en cuenta las especificaciones de los registradores disponibles, es aconsejable usar un factor de escala que permita obtener tiempos de frente

de varios nanosegundos. Con 5 ns ya se tendrían 5 puntos para representar la rampa de subida de la corriente de descarga a escala reducida.

- *Longitud canal de descarga:* Una característica importante de un rayo es el canal de descarga. Para diferentes ensayos de análisis y medición de tensiones inducidas, se ha dispuesto y usado canales de descarga verticales con alguna longitud apropiada tal como se ha visto con Piantini *et. al.* [3], Ishii *et. al.* [4], Grossi [6], Boaventura [17]. Al relacionar la longitud del canal en el sistema real y el modelo reducido, se tiene que:

Tabla 3.4. Longitud del canal de rayo según FE

Factor de Escala	FE : 1/1000		FE : 1/100		FE : 1/10	
	<i>Real</i>	<i>Modelo reducido</i>	<i>Real</i>	<i>Modelo reducido</i>	<i>Real</i>	<i>Modelo reducido</i>
Longitud canal máxima	14 km	14 m	14 km	140 m	14 km	1400 m
Longitud canal media	5 km	5 m	5 km	50 m	5 km	500 m
Longitud canal mínima	2 km	2 m	2 km	20 m	2 km	200 m

Un Factor de Escala FE = 1/10 obliga a tener longitudes del canal de descarga de varios cientos de metros, lo cual no podría lograrse con los recursos disponibles para el presente proyecto. Construir una torre de 200 m para albergar un arreglo de conductores, sería un trabajo bastante costoso y con complicaciones más allá del alcance de este trabajo.

- *Diámetro del canal de descarga:* Según la información de Grossi [6], el canal de descarga tendrá un diámetro tan pequeño como 1,5 cm y tan grande como 2 m. Como se verá más adelante, el canal de descarga está constituido por un alambre delgado arrollado sobre un cilindro aislante. El compendio de los diferentes diámetros que pueden usarse en la fabricación del canal en el modelo reducido dependiendo del factor de escala se muestra a continuación.

Tabla 3.5. *Diámetro del canal de rayo según FE*

Factor de Escala	FE : 1/1000		FE : 1/100		FE : 1/10	
	<i>Real</i>	<i>Modelo reducido</i>	<i>Real</i>	<i>Modelo reducido</i>	<i>Real</i>	<i>Modelo reducido</i>
Diámetro máximo del canal	200 cm	2 mm	200 cm	20 mm	200 cm	200 mm
Diámetro medio del canal	5 cm	0,05 mm	5 cm	0,5 mm	5 cm	5 mm
Diámetro mínimo del canal	1,5 cm	0,015 mm	1,5 cm	0,15 mm	1,5 cm	1,5 mm

El Factor de escala $1/1000$ presenta mayores complicaciones al momento de construir un canal de descarga al requerir una configuración de un par de milímetros hasta centésimas de milímetro.

Factores de escala de $1/10$ y $1/100$ presentan valores más apropiados para la construcción del arrollamiento que simulará el canal del rayo.

- *Altura de la línea aérea:* La altura de líneas aéreas pertenecientes a sistemas de distribución varía según las especificaciones técnicas de la empresa distribuidora de energía. Según la Especificación técnica ET202 [24] utilizada en Bogotá, los postes pueden tener una altura entre 10 m y 14 m. Para el análisis de relación con el factor de escala se usará una altura de 10 m.

Tabla 3.6. *Altura de la línea aérea según FE*

Factor de Escala	Sistema	
	Real	Modelo reducido
Altura de la línea FE = 1/1000	10 m	1 cm
Altura de la línea FE = 1/100		10 cm
Altura de la línea FE = 1/10		100 cm

Selección del factor de escala del factor de escala:

Teniendo en cuenta los parámetros anteriormente analizados en la construcción del modelo a escala reducida, se puede ver que usar factores de escala de $1/10$ y $1/1000$, producen algunas dimensiones de difícil medición, construcción y montaje, por lo tanto, se decidió tomar $1/100$ como el factor de escala a usar en las pruebas a escala reducida para el presente trabajo.

4. CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS DEL SISTEMA A ESCALA REDUCIDA Y ENSAYOS PRELIMINARES

A continuación se presentarán los diferentes elementos que componen el modelo a escala reducida y algunas consideraciones que se tuvieron en cuenta para su construcción. Este experimento surgió como parte de las ideas aportadas por el profesor Ing. Javier Herrera respecto al estudio de tensiones inducidas usando modelos a escala reducida.

4.1 Canal de descarga

El canal del rayo se construye teniendo en cuenta que debe cumplir con ciertos parámetros de inductancia y capacitancia por unidad de longitud, de tal forma que los parámetros obtenidos en el canal a escala reducida construido tengan valores análogos a los que tiene un canal de rayo real. Se siguen los lineamientos mencionados por Grossi [6] y Boaventura [17]

Con base en las anteriores consideraciones el factor de escala escogido fue de 1/100.

Con el factor de escala de 1/100 se necesitaría un canal del modelo reducido de longitud igual a 20 m (para que se encontrara dentro de los valores típicos relacionados en la Tabla 3.1), sin embargo para el desarrollo del proyecto se usó un canal de 10 m, esto debido a la gran dificultad de instalar y mantener erguido un canal de rayo de 20 m.

El canal del rayo del modelo consistirá en una bobina de 10 m de longitud con un diámetro de 4 mm aproximadamente, al tener 0,286 mm de diámetro el conductor a usar en la bobina, se tiene entonces 3496 vueltas por metro. La inductancia y capacitancia por unidad de longitud del canal del modelo se podrán determinar (tomando $l = 1\text{m}$):

Según Kuffel [20], la capacitancia de un arreglo de cilindros sería:

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \left[\frac{2l}{d} \sqrt{\frac{4s+l}{4s+3l}} \right]}$$

Ecuación 4.1 Capacitancia para configuración de cilindros

Donde:

s : Distancia entre el cilindro y un plano de tierra a diferente potencial

d : Diámetro del canal.

l : longitud del cilindro

ϵ : Permitividad del material, en este caso la del vacío

Al ser $s \ll l$, y el cilindro en posición vertical, se puede simplificar la ecuación a:

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left(\frac{1.15l}{d}\right)} = 9.83 \text{ pF}$$

Ecuación 4.2 Capacitancia simplificada para configuración de cilindros

Ahora, la inductancia para el canal del rayo será la definida por el arreglo del conductor sobre un cilindro aislante. Para un solenoide y teniendo en cuenta lo descrito por Kuffel [20], el valor de inductancia será:

$$L = \mu \frac{n^2 A}{l} = 193 \text{ } \mu\text{H}$$

Ecuación 4.3 Inductancia para configuración solenoide

Donde:

A : Área transversal del cilindro

n : Número de vueltas

l : longitud del cilindro

μ : Permeabilidad del material, en este caso la del vacío

Con estos valores de L y C se obtiene la siguiente velocidad de propagación:

$$v : 22,9 [m/\mu s]$$

La validez de estas ecuaciones fue verificada por Grossi [6], realizando pruebas a canales fabricados por ella, midiendo velocidad de propagación de la onda y la impedancia de los canales.

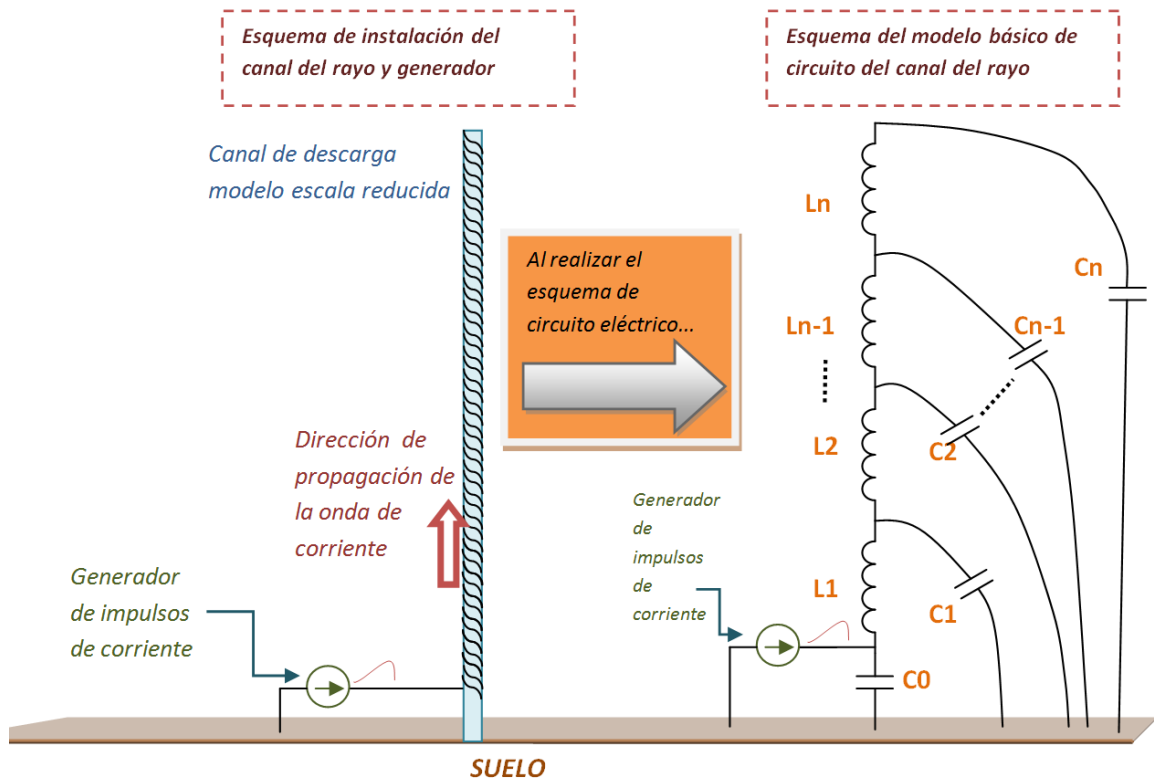
4.1.1 Efectos de la altura y la capacitancia en la velocidad de la corriente de descarga

La velocidad calculada se obtuvo asumiendo que la capacitancia del canal de descarga se mantenía constante para todo el canal, sin embargo esto no es necesariamente cierto si se tiene en cuenta que a medida que la onda de corriente asciende por el canal, estará cada vez más alejada del suelo. A continuación se hará un análisis del cambio en la capacitancia por efecto del ascenso de la corriente en el canal;

Para efecto de los ensayos a escala reducida, se ha asumido que durante su viaje por el canal, la principal aportante de campo electromagnético es la componente vertical de la corriente. El modelo de propagación usado es entonces el mismo usado por Piantini *et. al.* [3] donde se considera el canal de descarga como una línea de transmisión con una onda ascendiendo por ella. La construcción en hélice permite reducir la

velocidad de propagación de la onda haciendo uso de ambos elementos característicos de la línea, es decir inductivos y capacitivos. Afectar la velocidad de la onda, variando únicamente la inductancia, no es un método recomendado según los resultados que se obtuvieron por Fisher *et. al.* [30]

A continuación se presenta un esquema del modelo de circuito del canal del rayo. Con base en dicho modelo, se calcularán las capacitancias según la altura y a su vez la velocidad de propagación para cada una;



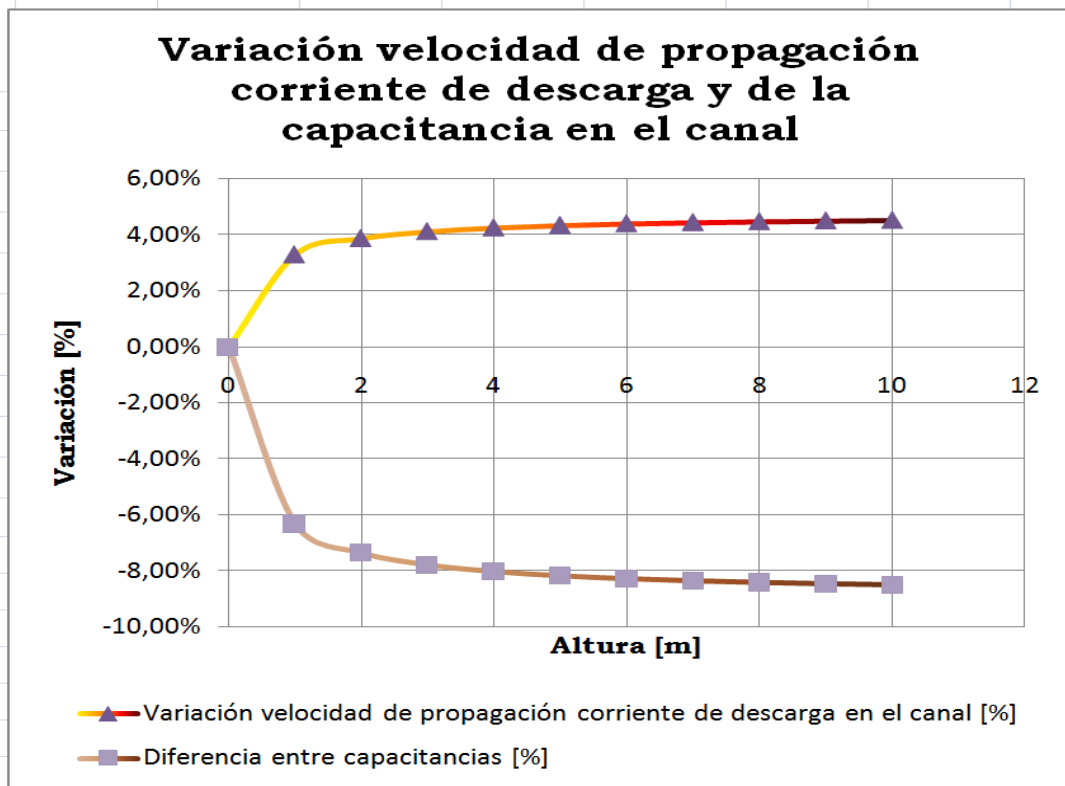
Gráfica 4.1 Representación de circuito eléctrico del canal de descarga.

En el esquema de circuito eléctrico solo se muestran algunos elementos LC, para cada elemento LC se calcula la velocidad de propagación de la onda de corriente.

Usando la expresión 4.1 se calculó la capacitancia para secciones de 1 m de longitud del canal. Los resultados son los siguientes:

s [m]	Capacitancia [pF]	Velocidad propagación [m/μs]
0	9,820	22,964
1	9,201	23,724
2	9,099	23,856
3	9,056	23,913
4	9,033	23,944
5	9,018	23,963
6	9,008	23,977
7	9,000	23,987
8	8,994	23,994
9	8,990	24,000
10	8,986	24,005

Tabla 4.1 Capacitancia y velocidad de propagación de la onda según la altura s . Al revisar las diferencias en porcentaje respecto al valor calculado inicialmente se tiene (valor inicial cuando $s = 0$ m):



Gráfica 4.2 Variación de C y v según la altura s en el canal del rayo

A medida que se aumenta la altura en el canal de descarga, la capacitancia disminuye, lo cual afectará la velocidad que pueda llegar a tener la onda a medida que viaja por la línea (canal de descarga). La máxima variación de capacitancia se presenta a la máxima altura bajo estudio. La variación es de -8,5 %. Para este mismo caso se presenta la variación máxima en la velocidad de propagación, la diferencia es de 4,5 % aproximadamente.

La variación se considera baja para los efectos y usos de la velocidad de descarga en el presente trabajo. Se puede afirmar que el aumento en la velocidad no afectará los resultados de los ensayos al considerar efectos tales como reflexiones de la onda, el aumento de velocidad no es tan grande como para tener una reflexión mucho antes de que se realicen las mediciones (algunas decenas de nanosegundo).

4.1.2 Canal de descarga construido

A continuación se presentan fotografías del canal construido:



Fotografía 4.1 Canal de descarga construido para pruebas a escala reducida

En la fotografía anterior, puede apreciarse el solenoide construido. Para protección mecánica del solenoide, se cubrió totalmente con una manguera transparente.



Fotografía 4.2 Canal de descarga construido para pruebas a escala reducida (detalle).

4.2 Generador de impulsos de corriente y primeras pruebas

El generador a usar en las pruebas debe estar en capacidad de generar impulsos de corriente con tiempos de frente de algunos nanosegundos cuando se conecta al canal de descarga.

En el transcurso de este proyecto se usaron dos distintos generadores que se describirán a continuación:

4.2.1 Primer generador construido

Para el primer generador, se usó un sencillo sistema de descarga como el que se muestra a continuación:

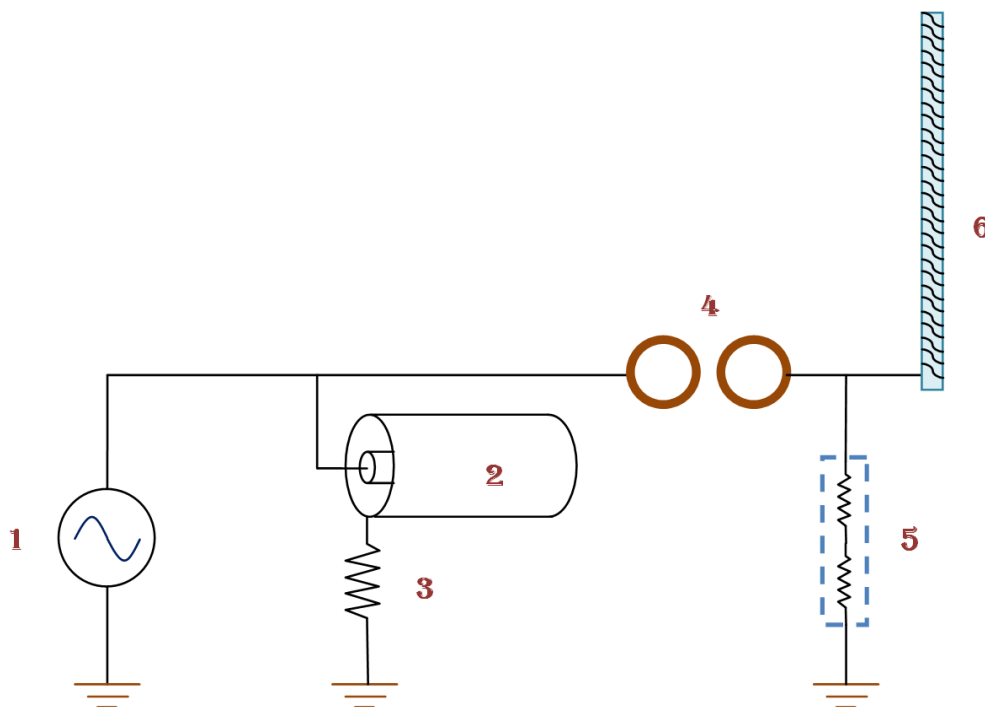


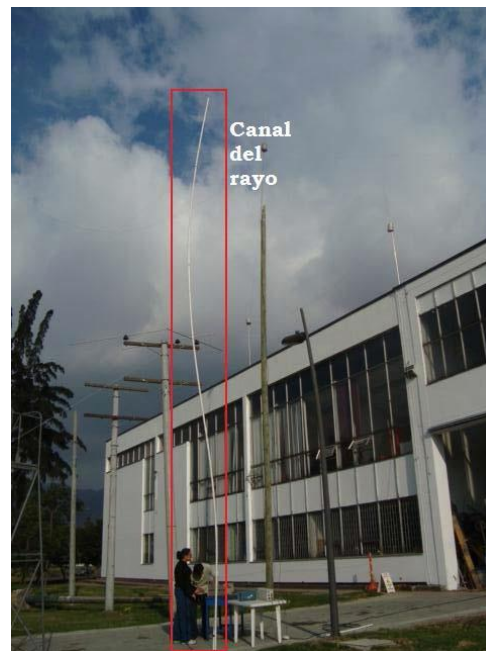
Figura 4.1 Disposición de elementos generador de impulso y bobina canal del rayo modelo reducido

Donde:

1. Fuente de alta tensión. Fuente marca Kikusui 5 kV, 60 Hz.
2. Condensador de carga. Cable coaxial de RG-8/U, cable de comunicación
3. Resistencia de carga 50 Ω .
4. Explosor
5. Punta de alta tensión Tektronix P6015A.
6. Canal del rayo.

Este fue el primer montaje en el cual, el primer objetivo era establecer los pasos necesarios para la instalación del canal de descarga, puesto que éste es una manguera de caucho con un arrollamiento de un cable de cobre delgado, no tiene las características mecánicas para mantenerse erguida sin el uso de elementos adicionales. Se usó un sistema de cuerdas que garantizaban que el canal se mantuviese verticalmente para los ensayos, la bobina que comprende el canal del rayo fue introducida en un tubo de PVC de $\frac{1}{2}$ pulg esto con el fin de dar fortaleza mecánica a la estructura. Se hicieron mediciones de tensión en la base del canal, aún no se disponía de un método apropiado para la medición de corriente.

A continuación se presenta una fotografía una vez se ha instalado el canal del rayo, se alistan los elementos de generación y medida:



Fotografía 4.3 Canal del rayo instalado

Un oscilograma que muestra la forma de la tensión aplicada al canal se muestra a continuación:

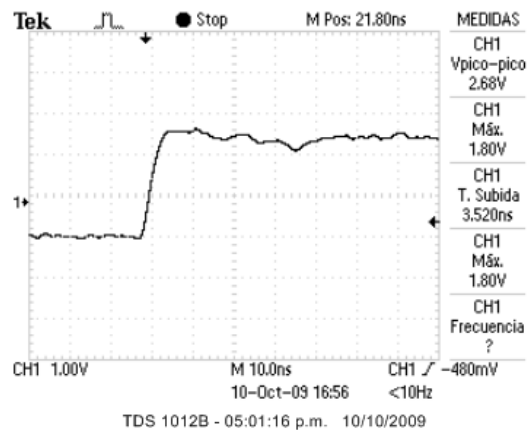


Figura 4.2 Onda de tensión típica aplicada al canal. (Tensión pico: 2,5 kV, tiempo de frente: 5 ns)

Este generador presentó algunos problemas para la ejecución de los ensayos con modelo a escala reducida. Estos problemas se detallarán en el siguiente capítulo.

4.3 Segundo generador de impulsos de corriente

El circuito generador de impulsos empleado para generar la onda tipo rayo a escala, está basado en el trabajo de grado de Quintero y Rodríguez [21] y la norma IEC61000-4-2 [22], el cual es un generador de descargas electrostáticas cuya forma de onda tiene tiempos de frente del orden de los décimos de nanosegundo. Este generador recoge la propuesta de la norma IEC61000-4-2 de un circuito que produzca impulsos de muy corta duración a partir de la descarga de un condensador cargado a alta tensión.

El generador consta de dos parte fundamentales, una fuente DC de alta tensión y el circuito carga y descarga. La fuente de alta tensión emplea un transformador tipo flyback (FBT) de equipos de televisión, cuya característica de reducido tamaño y capacidad de generar alta tensión (hasta 30 kV) lo hacen ideal para el funcionamiento del generador. Otra característica importante del Flyback es su tensión de salida DC gracias al rectificador interno que permite ser usada para alimentar directamente el circuito de carga y descarga.

El Flyback es un tipo especial de transformador de potencia relativamente baja pero que opera a frecuencias de kilo Hertz. Para el caso del generador empleado se utilizó un circuito de excitación del tipo ZVS (zero-voltage switching) por sus siglas en inglés, el cual permite alcanzar una frecuencia de alrededor de 16 kHz en el primario del *flyback* teniéndose en el secundario alta tensión DC (HV DC) mientras es alimentado con una fuente DC de baja tensión (alrededor de 12 V).

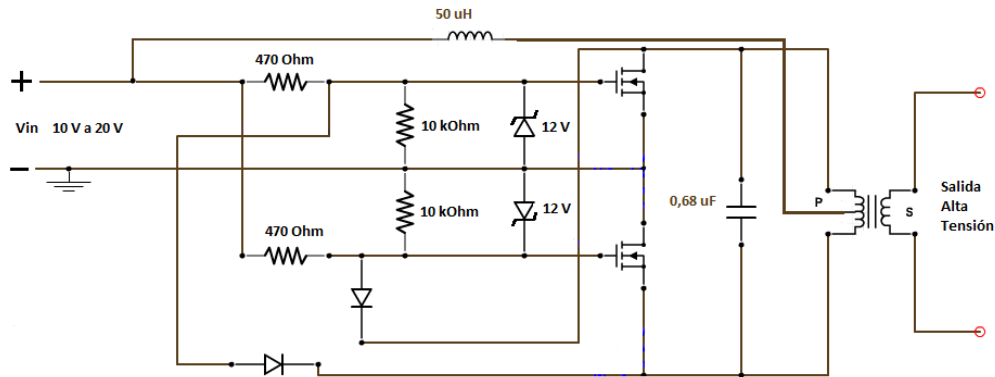


Figura 4.3 Esquema básico del circuito de baja tensión. La salida de alta tensión se hace a través del *flyback*

El circuito de carga y descarga del generador de pulsos hace uso del concepto de oscilador de relajación en el cual se busca un comportamiento repetitivo de carga del condensador que realiza la descarga para el impulso.

Está formado por dos condensadores de 0,69 nF y 0,33 nF conectados a través de una resistencia de 60 MΩ entre sí. El primer condensador (0,69 nF) se conecta de forma directa a la fuente de alta tensión de modo que siempre esté cargado y mantenga el nivel de tensión.

El segundo condensador (0,33 nF) se carga a través de la resistencia de carga (60 MΩ). El condensador de descarga (0,33 nF) está a su vez conectado a través de una resistencia de 330 Ω y una inductancia de 1 uH a un explosor (gap) de modo que al llegar al nivel de tensión disruptivo para el que se ajusta la distancia del gap, éste se descarga generando el impulso de corta duración característico del generador (Ver figura 4.4).

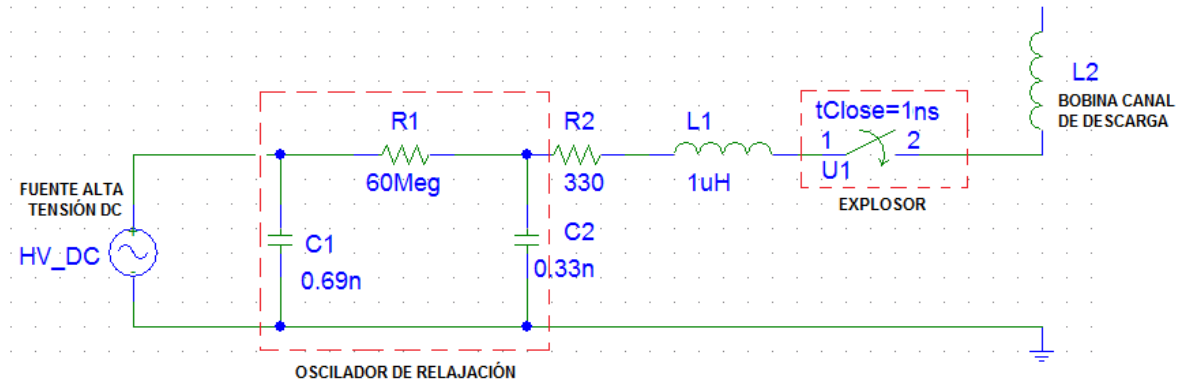


Figura 4.4 Esquema de circuito generador de impulsos implementado¹

Por el funcionamiento mismo del oscilador de relajación se garantiza que sea el condensador de menor capacidad quien realice la descarga y se tenga una tasa de repetición dada por la resistencia de carga y la capacitancia misma. Durante la realización de los ensayos la tensión de carga del condensador fue de alrededor de 12 kV.

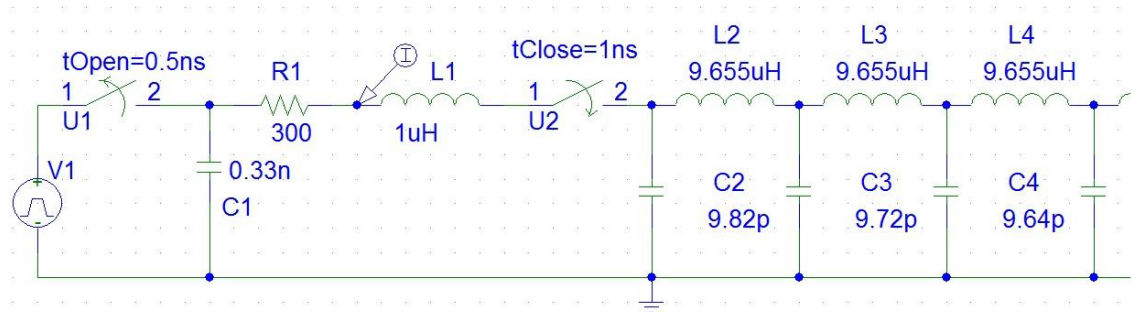


Figura 4.5 Etapa de disparo del generador de impulsos con carga.²

A partir de los valores estimados de capacidad e inductancia por unidad de longitud, se modeló el equivalente como se muestra en la figura 4.5. Éste mismo se colocó como carga al generador de impulsos obteniéndose la forma de onda que se muestra en la figura 4.6

¹ La Figura es una representación gráfica de los elementos usados, no se muestran las capacitancias al suelo de la bobina ni otros elementos similares

² Solo se muestran las primeras capacitancias a tierra propias de la bobina que comprende el canal de descarga a escala reducida

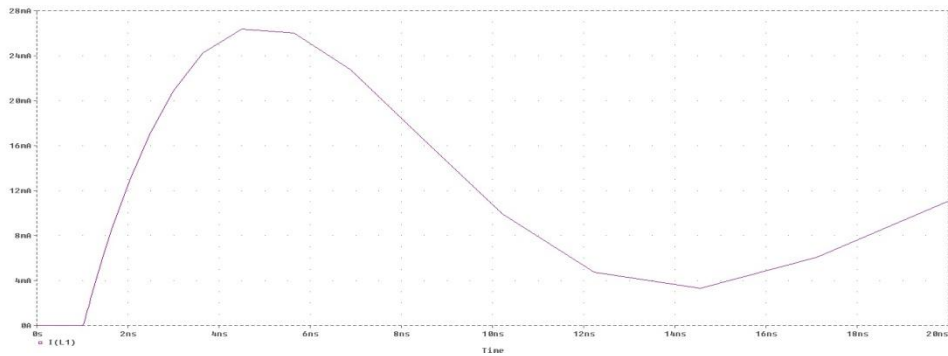


Figura 4.6 Forma de onda para el generador de impulsos.

Se debe decir que la forma de onda también está dada por la impedancia de carga que se le conecta al circuito, en este caso la bobina del canal de rayo y la capacitancia misma de la configuración.

A continuación se presenta una fotografía del generador implementado.



Fotografía 4.4 Generador de impulso

Para la descarga se usó el siguiente elemento:



Fotografía 4.5 Sistema de descarga usado

Este sistema de descarga presenta facilidad en el ajuste de la distancia entre electrodos gracias al uso de ejes roscados. Para la ejecución de las pruebas, se introdujo el *gap* en un cilindro de cobre ajustado exactamente al tamaño. El uso de este cilindro permitió reducir ruido en la señal de salida así como mejorar la reproducibilidad de las pruebas.

4.4 Definición método de medición corriente en el canal de descarga

4.4.1 Primer método de medición de corriente. Resistencia shunt.

Como método inicial de medición de corriente en el canal de descarga se usó una resistencia *shunt* con el canal de descarga, de tal forma que al medir la caída de tensión en ella se pueda calcular la corriente del canal.

Según el Factor de escala seleccionado (1/100) el tiempo de frente de la corriente en el canal debe ser de un valor cercano a los 10 ns. Teniendo esto en cuenta, es necesario construir una resistencia shunt con

bajo componente inductivo, puesto que para señales con tiempos de frente de onda tan rápidos los efectos inductivos pueden ser del mismo orden de magnitud e incluso mayores que el efecto resistivo con lo cual se haría una medición errónea de la corriente.

El modelo de resistencia shunt que ha mostrado mejor respuesta a frentes rápidos ha sido la construcción en “corona” de resistencias en paralelo, la resistencia usada en las primeras mediciones de corriente en el canal consistía en una resistencia de 50Ω .

4.4.1.1 Verificación de la medición de corriente por el canal

Se hicieron pruebas para verificar el buen comportamiento, repetibilidad y reproducibilidad de las mediciones de la corriente en el canal usando la resistencia shunt serie. Para ello se dispuso de un montaje del cual se presenta su diagrama de circuito a continuación:

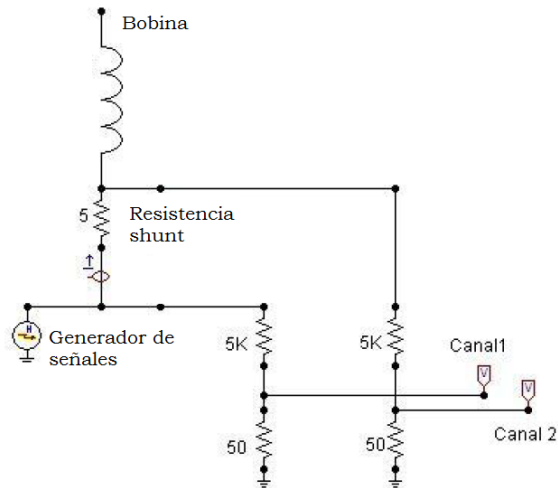


Figura 4.6 Diagrama de circuito usado para verificación medida de corriente con resistencia shunt

La corriente que circula por la bobina será determinada al medir la diferencia de tensión entre los dos terminales de la resistencia shunt. La diferencia de tensión entre los denominados Canal 1 y Canal 2 se muestra a continuación:

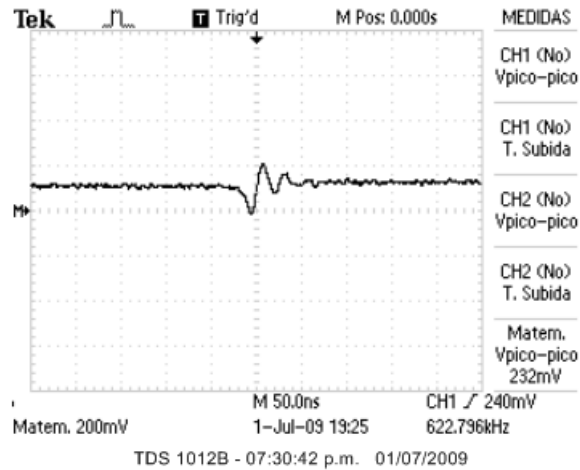


Figura 4.7 Diferencia de tensión entre Canal 1 y Canal 2 con bobina conectada

La diferencia de tensión entre los terminales de la resistencia shunt será:

$$V_{shunt} = (100 \text{ mV}) \times (100) = 10 \text{ V}$$

Entonces la corriente que circula por la bobina es:

$$I = 10/5 = 2 \text{ A}$$

Se desconectó la bobina para encontrar la corriente que pide el sistema en circuito abierto, se obtuvo la siguiente señal de tensión al restar Canal 1 y Canal 2:

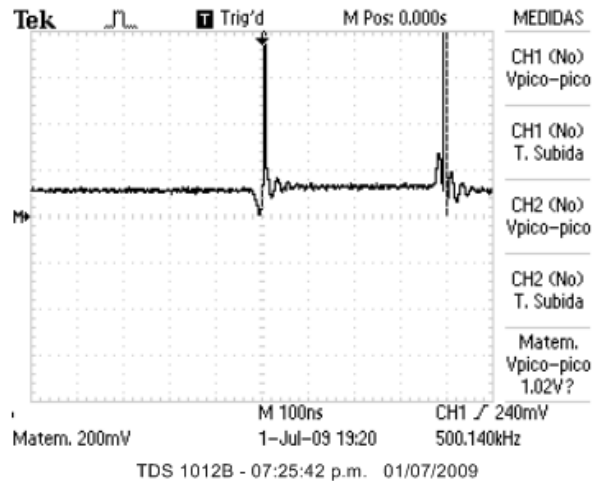


Figura 4.8 Diferencia de tensión entre Canal 1 y Canal 2 sin bobina conectada.

En el proceso de medición, se esperaba una caída poco apreciable en la tensión medida puesto que el sistema estaría en circuito abierto, sin embargo eso no sucedió, la forma de onda de la diferencia de tensión sin bobina es muy similar en forma y magnitud a la diferencia de tensión con bobina conectada, en esta ocasión aparece un pico de tensión que sale de la pantalla de medida, este pico no aparece en todos los pulsos medidos, aparece en algunas ocasiones pero no se presenta de manera constante. Al hacer un cálculo de la Impedancia característica de la bobina encontramos que:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{193,11 \mu H}{9,867 pF}} = 4424 \Omega$$

Si se hace un cálculo de la corriente que se espera pase por la bobina, solo haría falta el nivel de tensión al cual se alimenta, este es 40 V:

$$I_{bob} = \frac{40 V}{4424 \Omega} = 9,04 mA$$

Este valor calculado es muy diferente del medido usando la resistencia shunt.

Al hacer un nuevo montaje se miden valores diferentes de tensión y formas de onda, encontrando así que con el actual método de medición no es posible garantizar la repetibilidad y reproducibilidad de las mediciones bajo las aparentemente mismas condiciones. Se decide buscar un método alternativo para la medición de corriente.

4.4.2 Medición de corriente con FCT (Fast Current Transformer)

Debido a los problemas presentados al usar una resistencia shunt se indagó sobre una nueva forma para la medida de la corriente. La alternativa escogida fue el uso de una bobina denominada FCT. El Grupo de Compatibilidad Electromagnética de la Universidad Nacional propuso y facilitó éste FCT para las pruebas desarrolladas en este trabajo.

Las características generales del FCT son:

FCT: Fast Current Transformer, marca Bergoz Instrumentation. Modelo FCT-016 B. Frecuencia superior de corte -3 dB: 580 MHz. Frecuencia inferior de corte - 3 dB: <1,6 kHz. Tiempo de subida típico: 600 ps.

Para las medidas de corriente, se decidió medir directamente tensión a la salida del FCT con el osciloscopio Tektronix, por lo tanto, fue necesario realizar una calibración del FCT. Para la calibración se contó con la ayuda del Laboratorio de Ensayos Eléctricos Industriales “Fabio Chaparro” – LABE.

Para la calibración se uso el calibrador multifunciones Fluke 5500 A.

Se obtuvo una relación aproximada 1:2, es decir que cada voltio medido en el osciloscopio, equivale a 2 A.

4.5 Valores y límites de exposición a los campos electromagnéticos para personas durante las pruebas

El ICNIRP [31] define los valores máximos de exposición a campos electromagnéticos para personas. La información que suministra está

para un amplio rango de frecuencias, sin embargo no es totalmente claro el manejo que se debe dar fuentes de campo de tipo impulso. Aunque en la revisión que hace ICNIRP en [32] se habla sobre campos producidos por descargas atmosféricas, no deja claro el efecto de los campos electromagnéticos originados por éstas.

Para hacer la valoración de los campos electromagnéticos se tendrán en cuenta ciertas consideraciones. Los campos generados tienen tiempos de subida bastante cortos, lo cual en términos prácticos define los campos generados como de alta frecuencia. El trato que da el ICNIRP [31] a los campos electromagnéticos está siempre basado en definir que los campos son señales permanentes de alguna frecuencia dada. Para señales de impulso hace consideraciones también. Según ICNIRP [31] y [32], cuando se trata de impulsos, están hablando de señales con tiempos de duración cercanos a 30 μ s. Las señales que se trabajan durante las pruebas tienen una duración de cercana a los 30 ns.

Al ser señales de impulso, la ICNIRP define que la frecuencia asociada al impulso puede calcularse como $1/2T_p$, donde T_p es el tiempo del pulso. A medida que aumenta la frecuencia, los límites definidos de campo eléctrico y magnético tienen una tendencia a ir disminuyendo.

Se usará el menor tiempo obtenido durante las pruebas para así obtener la mayor frecuencia posible. Para un tiempo de frente de 7 ns se obtiene entonces una frecuencia asociada de aproximadamente 70 MHz. Para esta frecuencia el campo eléctrico máximo para nivel ocupacional es 2 kV/m y el campo magnético es 8 μ T (valores aproximados tomados de las gráficas de frecuencia [31]).

Teniendo en cuenta el circuito de alimentación usado en las pruebas a escala reducida, para calcular los campos electromagnéticos, se estimaron los campos eléctrico y magnético para un conductor horizontal de 2 mm de radio y a una altura de 5 cm del suelo. Se usó una tensión de 10 kV y

una corriente de 2 A, valores típicos obtenidos durante las pruebas. Se usó una distancia de 50 cm para la evaluación de los campos, esta es la mínima distancia posible que se tenía al momento de ocurrir una descarga de prueba.

El campo eléctrico estimado a 50 cm es 6,2 kV/m. El campo magnético estimado a 50 cm es 0,8 μ T.

Aunque el efecto de ondas pulsadas no está totalmente claro según el ICNIRP, es recomendable tener ciertas precauciones al momento de realizar pruebas de este tipo. Por ejemplo, una distancia de 2 m respecto al canal en el momento de energizar, sería suficiente para tener un campo eléctrico por debajo de 2 kV.

5. ENSAYOS A ESCALA REDUCIDA SOBRE TERRENO REAL Y SOBRE PLACA METÁLICA

5.1 Montaje modelo escala reducida, primera medición de corriente del canal y tensión inducida en línea aérea.

A continuación se presenta un esquema de los elementos utilizados y su conexión:

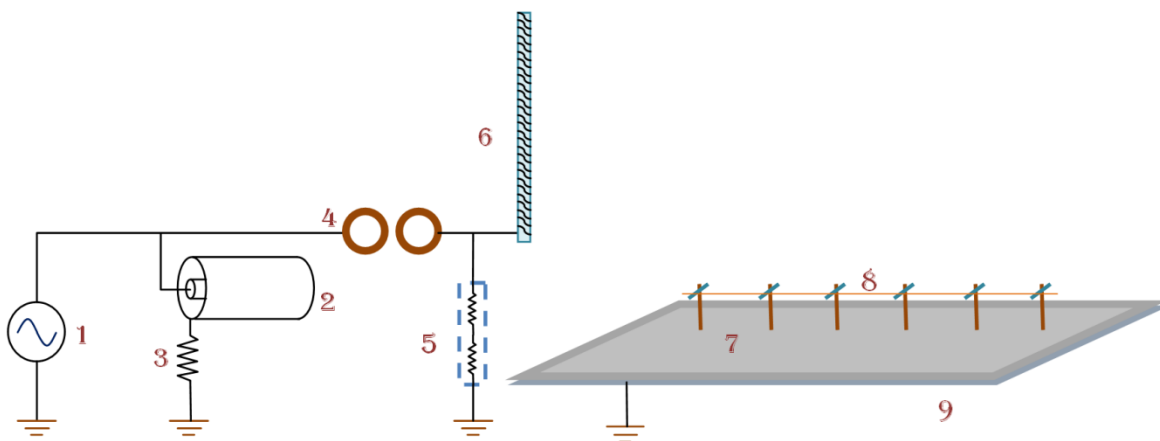


Figura 5.1 Esquema de los elementos usados durante las primeras pruebas a escala reducida

Donde:

1. Fuente de alta tensión. Fuente marca Kikusui 5 kV, 60 Hz
2. Condensador de carga. Cable coaxial de RG-8/U, cable de comunicación
3. Resistencia de carga 50 Ω

4. Explosor
5. Punta de alta tensión Tektronix P6015A
6. Canal del rayo
7. Modelo poste
8. Alambre 32 AWG
9. Placa de aluminio

Para este caso se usó una línea a escala reducida comprendida de un conductor calibre 32 AWG, los postes eran cilindros de plástico (pitillos) y se instalaron sobre una placa metálica de aluminio de 1 m de ancho por 7 m de largo.

En términos generales, se siguieron pautas definidas por Grossi [6] y Boaventura [17] en la implementación de los ensayos a escala reducida.

La gráfica de la corriente a la salida del generador es:

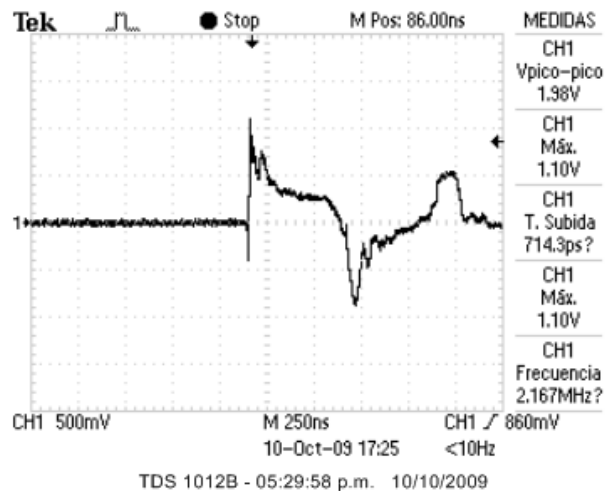


Figura 5.2. Onda de corriente a la salida del generador

La tensión inducida en la línea tiene una forma de onda como se muestra a continuación:

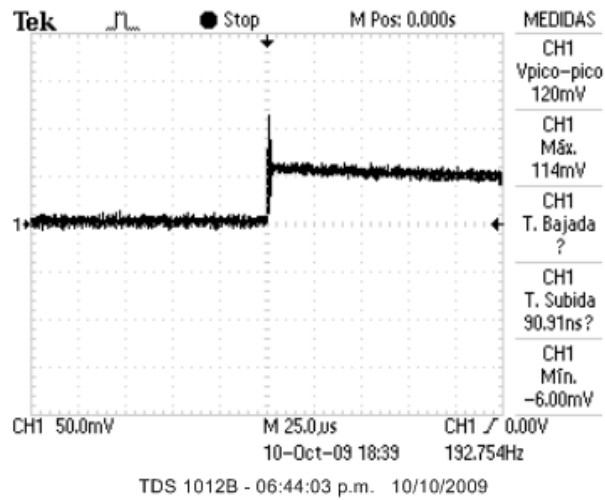


Figura 5.3. Onda de tensión inducida en la línea

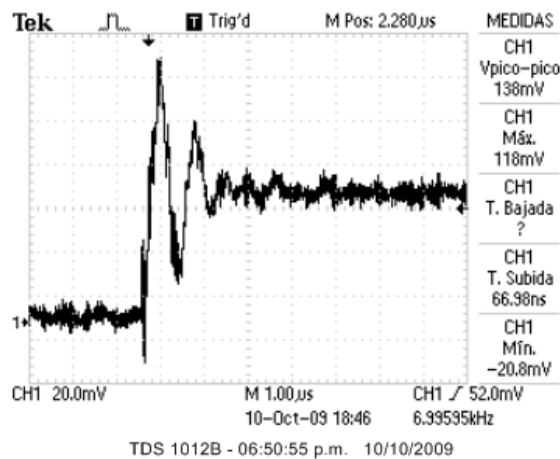


Figura 5.4 Onda de tensión típica inducida en línea. (menor escala de tiempo), distancia 6,8 m

Los tiempos de frente registrados para las mediciones de tensión inducida estaban entre 60 ns y 90 ns aproximadamente. La tensión era medida directamente en el osciloscopio con atenuación de 10X. La tensión que aparece sobre la línea sería equivalente a:

$$V_r = 116 \times 10 \text{ mV} = 1,16 \text{ V}$$

Donde la tensión medida en el osciloscopio es 116 mV aproximadamente, 10 es el nivel de atenuación de la sonda.

Para las anteriores mediciones se tenía una distancia entre el canal del rayo y la línea de 6,8 m.

Posteriormente se ubicó la línea de transmisión a una distancia de 4 m del canal del rayo. La tensión inducida a esta nueva distancia tenía la siguiente forma:

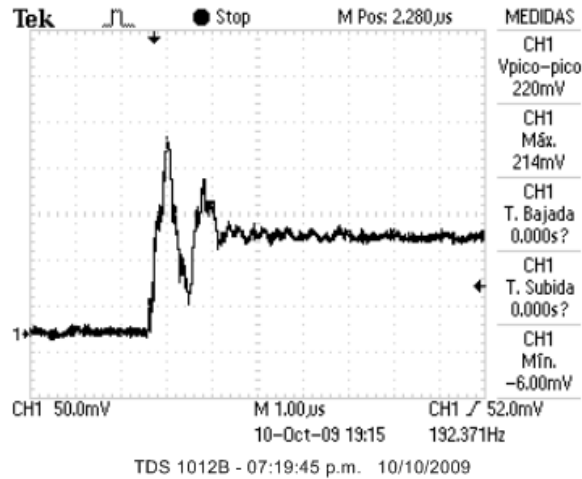


Figura 5.5 Onda de tensión típica inducida en línea, distancia 4 m.

La tensión medida era 210 mV aproximadamente, entonces al hacer el cálculo la tensión en la línea instalada es:

$$V_i = 210 \times 10 \text{ mV} = 2,10 \text{ V}$$

Para los dos casos anteriores, la tensión de la fuente de alimentación era 1,8 kV rms.

La relación entre las distancias de las líneas y la relación de los valores medidos de tensión son cercanos:

$$\frac{D1}{D2} = \frac{6.8 \text{ m}}{4 \text{ m}} = 1,7$$

$$\frac{V2}{V1} = \frac{210 \text{ mV}}{116 \text{ mV}} = 1,8$$



Fotografía 5.1 Disposición de los elementos para pruebas con modelo reducido

Dentro de los principales problemas que se encontraron con esta primera etapa está la baja repetibilidad y reproducibilidad de los impulsos generados, lo cual afecta y dificulta el análisis de datos. El primer generador de impulso que hacía uso de la fuente de alta tensión Kikusui, no garantizaba la repetibilidad de las señales.

Adicionalmente, este transformador consumía una potencia considerable. Los ensayos se hacían al aire libre y se requería el uso de una UPS con baterías de respaldo. El tiempo de autonomía de la UPS era mucho menor en las pruebas que se usaba el transformador Kikusui comparado con el tiempo de autonomía con el segundo generador construido.

5.1.1 Impedancia característica línea aérea a escala reducida

Un elemento importante al realizar las mediciones será la impedancia de la línea aérea a usar. Una línea en circuito abierto podría generar reflexiones de las señales. Dentro de las pruebas a realizar se usaron configuraciones con y sin resistencia equivalente al final de la línea.

Los parámetros usados para la el cálculo de la capacitancia y la inductancia de la línea son:

Altura de la línea: 10 cm

Radio del conductor: 0,02 cm

Al hacer uso de las ecuaciones de Maxwell para un terreno perfectamente conductor, se obtiene que la capacitancia y la inductancia para longitud de 1 m de cable es:

$$C = 4,47 \text{ pF}$$

$$L = 1,1 \text{ } \mu\text{H}$$

Al calcular la impedancia característica se obtiene:

$$Z_c = \sqrt{L/C} = \sqrt{\frac{1.1 \times 10^{-6} \text{ H}}{4.47 \times 10^{-12} \text{ F}}} = 496.07 \text{ } \Omega$$

5.2 Pruebas a escala reducida en terreno real y sobre placa metálica

Posteriormente se realizaron varios montajes y mediciones del sistema, dentro de los cambios más relevantes están el cambio en la dirección de la línea de transmisión la cual se dispuso de forma alineada con el canal del rayo, igualmente se optó por cambiar el lugar en el cual se realizaban las mediciones puesto que se tenía un sitio con varios objetos cercanos al montaje, entre los que se encontraban postes de concreto, postes metálicos y edificios. No se contaba con un método efectivo para evaluar el efecto de estos elementos cercanos.

Las primeras mediciones fueron hechas cerca del portón del Laboratorio de Ensayos Eléctricos Industriales – LABE. Las mediciones posteriores se llevaron a cabo en un terreno con césped bajo, frente al edificio de Biología de la Universidad Nacional de Colombia en el cual no habían elementos cercanos (por lo menos a 15 m del canal del rayo).



Fotografía 5.2 Preparación de los ensayos a escala reducida (Configuración alineada)

Tabla 5.2 Agrupación de las pruebas realizadas posición lateral

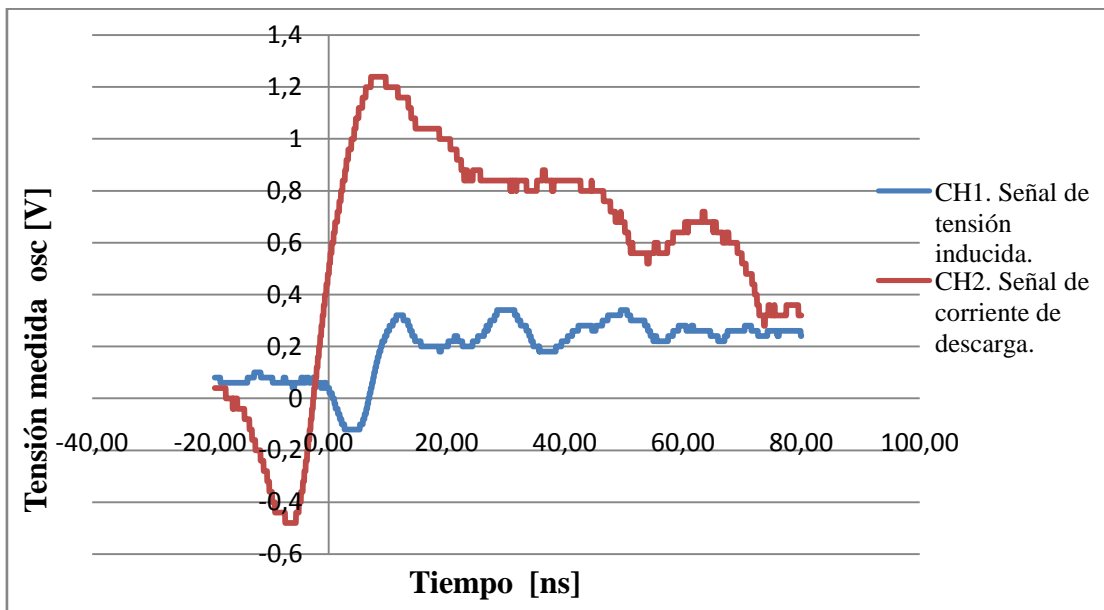
Mediciones a escala reducida											
Posición lateral											
Sobre placa metálicas						Sobre terreno real					
Sin resistencia al final de la línea			Con resistencia al final de la línea			Sin resistencia al final de la línea			Con resistencia al final de la línea		
Inicio de la línea	Mitad de la línea	Final de la línea	Inicio de la línea	Mitad de la línea	Final de la línea	Inicio de la línea	Mitad de la línea	Final de la línea	Inicio de la línea	Mitad de la línea	Final de la línea

Algunas gráficas de las tensiones inducidas medidas y la corriente aplicada al canal del rayo se presentarán en los siguientes numerales.

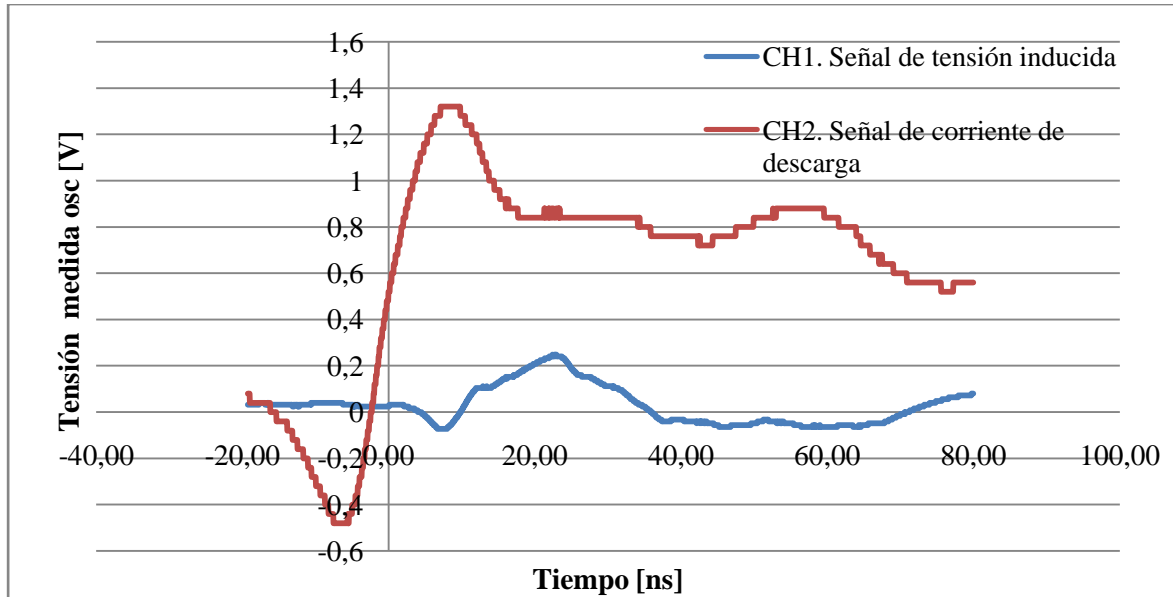
5.3 Tensiones inducidas para configuración adyacente o alineada

Algunas gráficas de la tensión inducida y la corriente inyectada se presentan a continuación.

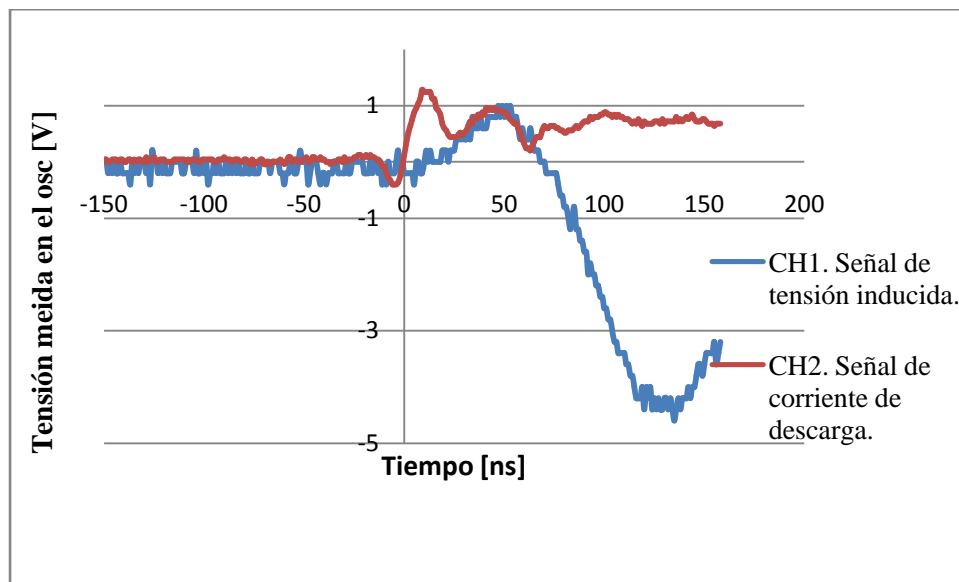
Gráfica 5.1. Tensiones medidas para Configuración alineada, terreno metálico, con resistencia, al inicio de la línea, número del oscilograma: 070



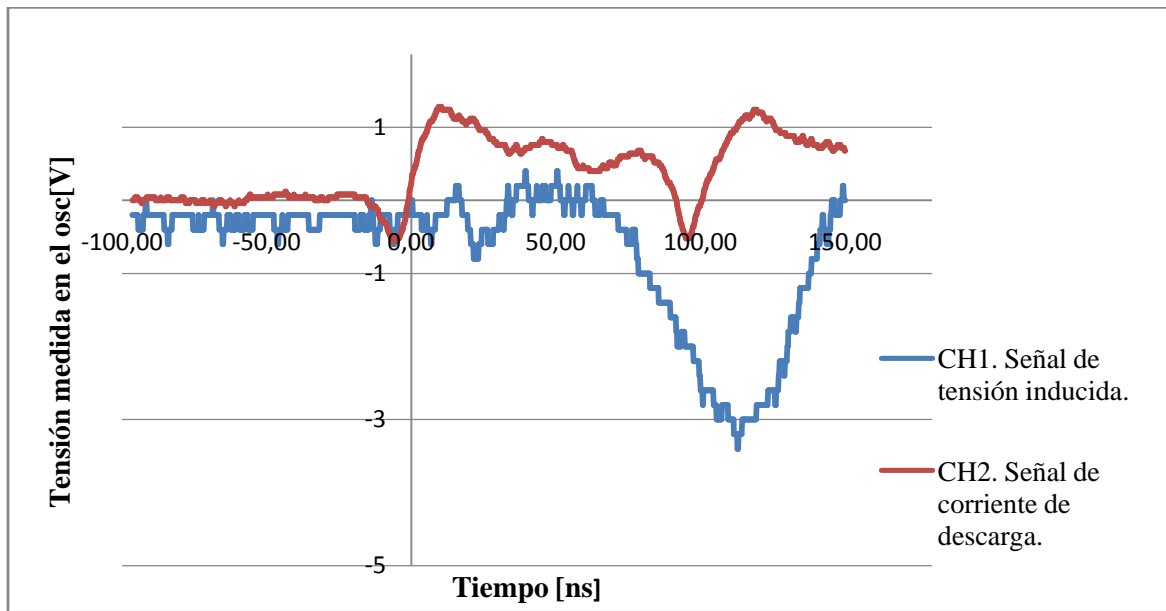
Gráfica 5.2. Tensiones medidas para Configuración alineada, terreno metálico, con resistencia, en la mitad de la línea, número del oscilograma: 073



Gráfica 5.3. Tensiones medidas para Configuración alineada, terreno real, con resistencia, al inicio de la línea, número del oscilograma: 100. Tensión azul, Corriente rojo.



Gráfica 5.4 Tensiones medidas para Configuración alineada, terreno real, con resistencia, al final de la línea, número del oscilograma: 095. Tensión azul, Corriente rosa.



5.3.1 Tabulación resultados obtenidos a escala real adyacente

Una compilación de los datos obtenidos y tabulados obtenidos se presenta en el Anexo A de este documento

6. COMPARACIÓN RESULTADOS MODELOS TEÓRICOS VS ENSAYOS ESCALA REDUCIDA

Para la comparación entre los resultados obtenidos, se han seleccionado algunos métodos que se encuentran actualmente disponibles dentro de la bibliografía existente. Las diferencias en las topologías y valores aplicados en otros experimentos a escala reducida como los de Piantini *et. al.* [3] e Ishii *et. al.* [4], no permiten hacer una comparación directa entre los resultados obtenidos por esos autores y las mediciones hechas en el presente trabajo, sin embargo, uno de los dos métodos teóricos de comparación es el mismo usado por Piantini *et. al.* [3] el LIOV Code Nucci *et. al.* [7] aplicado a la configuración usada en el presente proyecto.

6.1 Comparación con primer modelo teórico

El primer método usado, consiste en el desarrollado por Saldanha *et. al.* [23]. La configuración estudiada por los autores, es similar a la que se denomina lateral en el presente trabajo. Los autores realizan ciertas consideraciones para poder obtener la fórmula aproximada:

$$V_{PICO} = k \left(\sqrt{3} v^{1/3} I \sqrt{\rho/y} + \frac{30Ih}{y} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} v \frac{1}{\sqrt{1-\frac{1}{2}v^2}} \right) \right)$$

Ecuación 6.1 Tensión inducida según Saldanha *et. al.* [23]

Donde:

K = 0,85

I = Corriente del rayo

ρ = Resistividad del terreno

y = Distancia del punto de impacto del rayo a la línea

v = Velocidad de propagación relativa

h = Altura de la línea

Al usar esta fórmula se obtiene que:

Tabla 6.1 Simulación **caso 1** [23]

y	Vr	ρ	Kc	I	h	Vinducida (kV)
200	0,074	50	0,85	250	10	0,413
200	0,074	50	0,85	250	8	0,345

Esta tensión es inferior al valor medido para la configuración lateral, terreno real, mitad de la línea en un 29 %.

6.2 Comparación segundo modelo teórico

Como segundo método de comparación, se usó el LIOV-Code Nucci *et. al.* [7]

Este método aplica para las pruebas sobre placas metálicas.

6.2.1 Algunas características del LIOV-Code

Algunos parámetros como la velocidad de propagación de la corriente, atenuación de la corriente y elementos usados por el programa, no se cambiaron respecto a los que trae el LIOV-Code originalmente implementado.

Otros parámetros relacionados con la forma de onda de la corriente y la posición de los elementos si se variaron.

Hay una restricción y es la longitud mínima de la línea de transmisión. En el modelo a escala reducida usado para este proyecto, la longitud de la línea aérea es 3 m, lo cual equivale a 300 m en un sistema real. La mínima distancia a la cual compilaba LIOV-Code fue 1 km.

Los valores de tensión y de tiempo obtenidos en las mediciones, fueron divididos entre el factor de escala para poder hacer comparación con los resultados obtenidos en las simulaciones.

Para el cálculo de la tensión inducida en un cable aéreo, LIOV Code ejecuta dos rutinas de simulación. En la primera hace un cálculo de los campos electromagnéticos sobre la línea aérea bajo estudio. Estos datos son almacenados y usados para calcular la tensión inducida. Para ello usan el método de acople entre los campos y la línea descrito por Agrawal *et. al.* [11]. Genera una nueva serie de datos de la tensión inducida en los puntos que el usuario haya definido para analizar.

6.2.2 Resultados obtenidos simulaciones y mediciones

Los resultados obtenidos y parámetros usados se muestran a continuación:

Simulación caso 2

Simulación perpendicular, en terreno metálico con resistencia al final de la línea y el punto de medición ubicado en la mitad de la línea.

Grafica 6.1 de simulación y resultado de medición

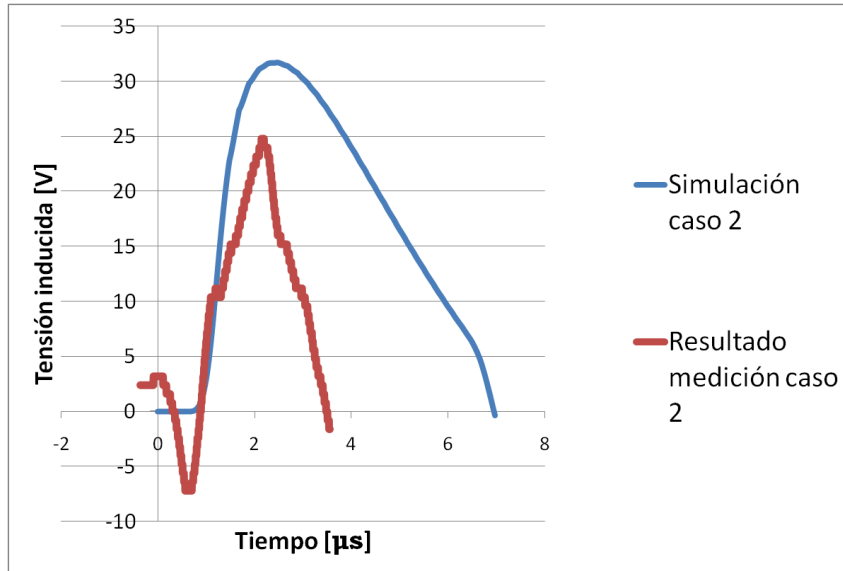


Tabla 6.2 Parámetros de entrada a LIOV Code Caso 2

Parámetros simulaciones en LIOV Code	Valor caso 2
H: height of the lightning channel [km]:	1
v: return-stroke velocity [x.10+8 m/s]:	1
I01[kA]	0,256
$\tau 11$ [μs]	0,77
$\tau 12$ [μs]	10
N1 parameters of the 1st Heidler cur :	5
I02[kA]	-0,14
$\tau 21$ [μs]	0,77
$\tau 22$ [μs]	100
N2 parameters of the 2nd Heidler cur :	5
ID[kA]	0
λ current decay constant [km]:	2
L: line length [km]:	1
h: line height [m]:	7
D1:	1
D2:	250
TMIN: 1st temporal window [μs]:	1
TMAX: maximum temporal window [μs]:	11
R0[Ω] line terminal resistance at y=0:	470
RL[Ω] line terminal resistance at y=L	470
Conductor diameter [cm]:	2
Distance from the left Termination [m]	150

Simulación caso 3.

Simulación lateral en terreno metálico con resistencia al final de la línea y el punto de medición ubicado en la mitad de la línea.

Grafica 6.2 de simulación o resultado de medición

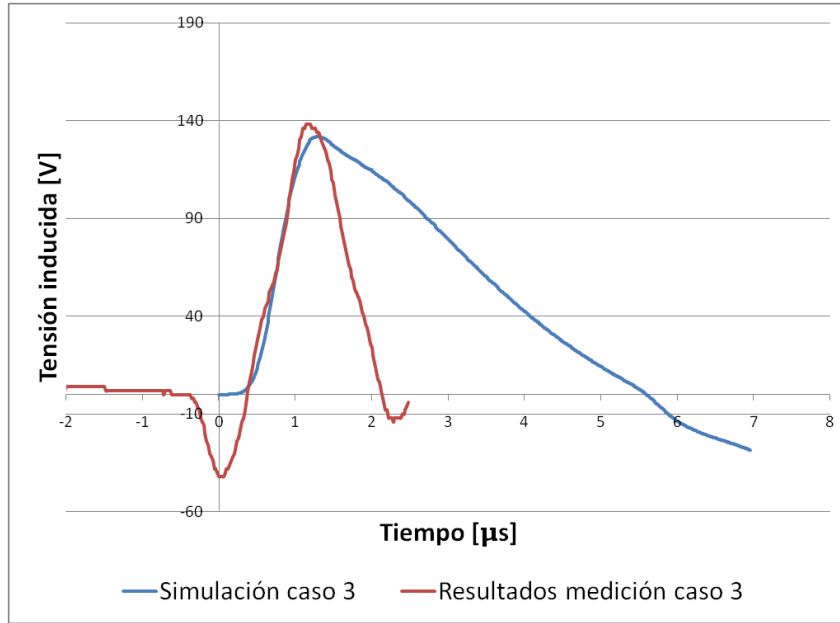


Tabla 6.3 Parámetros de entrada a LIOV Code Caso 3

Parámetros simulaciones en LIOV Code	Valor Caso 3
H: height of the lightning channel [km]:	1
v: return-stroke velocity [x.10+8 m/s]:	1
I01[kA]	0,256
τ_{11} [μ s]	0,77
τ_{12} [μ s]	10
N1 parameters of the 1st Heidler cur :	5
I02[kA]	-0,14
τ_{21} [μ s]	0,77
τ_{22} [μ s]	100
N2 parameters of the 2nd Heidler cur	5
ID[kA]	0
λ current decay constant [km]:	2
L: line length [km]:	1
h: line height [m]:	7
D1:	200
D2:	-150
TMIN: 1st temporal window [μ s]:	1
TMAX: maximum temporal window [μ s]:	11
R0[Ω] line terminal resistance at y=0:	470
RL[Ω] line terminal resistance at y=L	470
Conductor diameter [cm]:	2
Distance from the left Termination [m]	150

Simulación caso 4

Simulación perpendicular en terreno metálico con resistencia al final de la línea y con el punto de medición ubicado al inicio de la línea.

Grafica 6.4 Simulación y resultado de medición

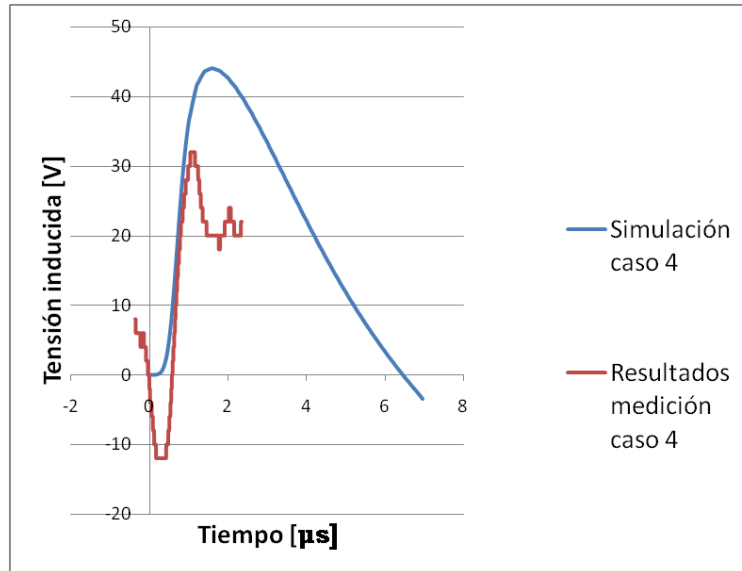


Tabla 6.4 Parámetros de entrada a LIOV Code Caso 4

Parámetros simulaciones en LIOV Code	Valor Caso 4
H: height of the lightning channel [km]:	1
v: return-stroke velocity [x.10+8 m/s]:	1
I01[kA]	0,248
τ_{11} [µs]	0,77
τ_{12} [µs]	10
N1 parameters of the 1st Heidler	5
cur :	
I02[kA]	-0,14
τ_{21} [µs]	0,77
τ_{22} [µs]	100
N2 parameters of the 2nd Heidler cur	5
ID[kA]	0
λ current decay constant [km]:	2
L: line length [km]:	1
h: line height [m]:	8
D1:	1
D2:	250
TMIN: 1st temporal window [µs]:	1
TMAX: maximum temporal window [µs]:	11
R0[Ω] line terminal resistance at y=0:	470
RL[Ω] line terminal resistance at y=L	470
Conductor diameter [cm]:	2

Simulación caso 5

Simulación paralela en terreno metálico con resistencia al final de la línea y con el punto de medición ubicado al final de la línea.

Grafica 6.5 Simulación y resultado de medición

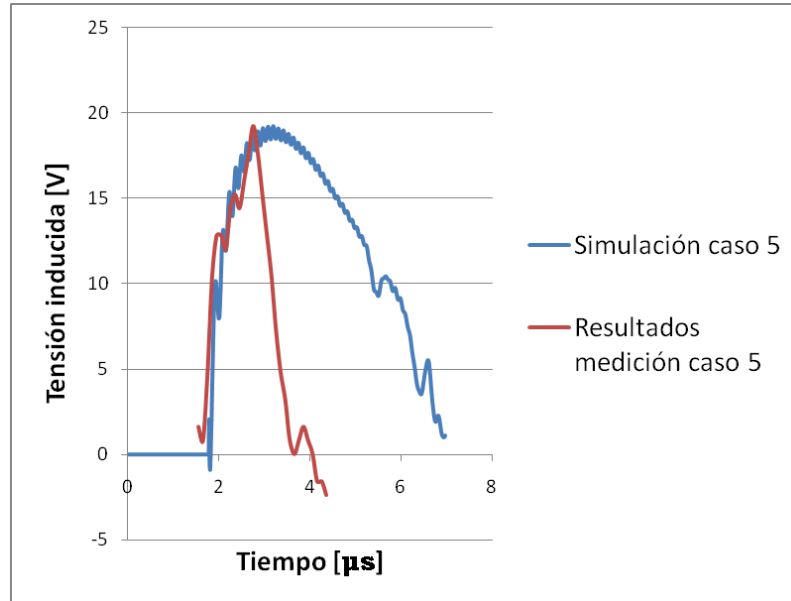


Tabla 6.5 Parámetros de entrada a LIOV Code Caso 5

Parámetros simulaciones en LIOV Code	Valor Caso 5
H: height of the lightning channel [km]:	1
v: return-stroke velocity [x.10+8 m/s]:	1
I01[kA]	0,248
$\tau 11[\mu s]$	0,77
$\tau 12[\mu s]$	10
N1 parameters of the 1st Heidler cur :	5
I02[kA]	-0,14
$\tau 21[\mu s]$	0,77
$\tau 22[\mu s]$	100
N2 parameters of the 2nd Heidler cur	5
ID[kA]	0
λ current decay constant [km]:	2
L: line length [km]:	1
h: line height [m]:	8
D1:	1
D2:	250
TMIN: 1st temporal window [μs]:	1
TMAX: maximum temporal window [μs]:	11
R0[Ω] line terminal resistance at y=0:	470
RL[Ω] line terminal resistance at y=L	470
Conductor diameter [cm]:	2
Distance from the left Termination [m]	150

Para poder hacer un uso efectivo del LIOV Code, fue necesario definir los parámetros de la forma de onda de la corriente de descarga. LIOV Code hace uso de una expresión con doble exponencial de la siguiente forma:

$$-\frac{I_2}{\eta} \times \frac{\left(\frac{t-0.5}{\tau_3}\right)^{n_2}}{1+\left(\frac{t-0.5}{\tau_3}\right)^{n_2}} \times e^{-\frac{t-0.5}{\tau_4}} + \frac{I_0}{\eta} \times \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1+\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \times e^{-\frac{t}{\tau_2}}$$

Ecuación 6.2 Expresión de la corriente usada en el LIOV Code.

Donde:

I_0, I_2 : Valor pico corriente en la base del canal para cada exponencial

η : Factor de corrección de la amplitud de la corriente.

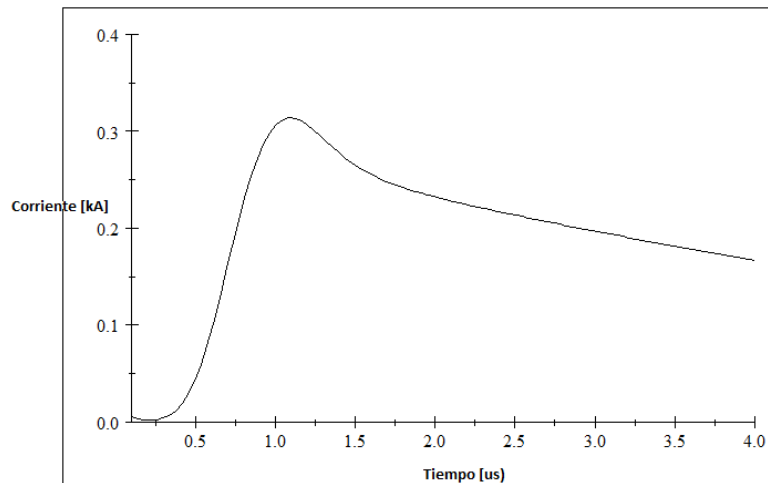
t : Indica el tiempo

$\tau_{1,3}$: Tiempo de frente del impulso

$\tau_{2,4}$: Tiempo de cola del impulso

n : Factor de corrección ($2 \leq n \leq 10$)

La forma típica de la corriente que se obtiene con esta expresión y con los parámetros usados en LIOV Code es la siguiente:



Gráfica 6.5 Forma típica de corriente usada en LIOV Code

6.3 Análisis de la comparación de resultados

En las gráficas de comparación de tensión inducida Vs. tensión calculada, puede apreciarse un comportamiento similar de las dos formas de onda en su pendiente de subida y valor pico. Es un comportamiento esperado dado que los dos principales parámetros que se controlaron durante las pruebas y las simulaciones fueron el tiempo de frente y el valor pico de la corriente de descarga. Según Herrera [28], el tiempo de frente de la corriente afecta tanto el valor pico de tensión, como la forma de onda de la tensión inducida, en términos generales el tiempo de frente de la tensión inducida, es proporcional al tiempo de frente de la corriente.

Adicionalmente, tenemos el efecto de la amplitud de la corriente. El valor de tensión inducida tiene una relación proporcional al valor pico de corriente. Por otra parte, el valor pico de corriente no tiene ningún efecto sobre la forma de onda de la tensión inducida.

Hay una diferencia en el tiempo de cola entre las dos señales (medida-simulada) que se presenta en todos los casos. Al analizar una posible causa para este cambio y teniendo en cuenta las características del fenómeno bajo estudio, se puede afirmar que la variación se debe a los cambios súbitos en la corriente presentados durante las pruebas. La corriente presentaba rápidas oscilaciones que no podían reproducirse en las simulaciones, estas oscilaciones se presentaban como respuesta natural del circuito total de carga y descarga, así como de la configuración propia de los elementos durante las pruebas. Tal como se analizó en el capítulo 4, se descarta que estas oscilaciones se produzcan por efectos de corrientes reflejadas desde la punta del canal de descarga usado.

El *offset* de tensión que se aprecia en algunas gráficas antes de generación del impulso, se atribuye a un aumento de la corriente previo a la descarga completa. Para todos los análisis se mantuvo como cero de tensión el valor definido durante las pruebas, es decir 0 V del osciloscopio.

Para una mejor aproximación, podrían tratarse en posibles trabajos futuros un método para eliminar las oscilaciones de la corriente inyectada.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

-Se construyó un modelo a escala reducida con factor de escala 1/100 que permitió medir satisfactoriamente la tensión inducida originada por corrientes de impulso, después de varios ensayos que dejaron experiencias valiosas.

-Se realizaron mediciones de tensiones inducidas sobre dos terrenos de diferente resistividad. Un terreno consistía en placas metálicas de aluminio y el segundo terreno real.

-La comparación de los resultados obtenidos con métodos numéricos existentes es satisfactoria. Para el caso de los resultados obtenidos en terreno metálico, las diferencias varían desde un 25% hasta menos de 5 % según la configuración. Para el caso de las mediciones en terreno real, se compararon los resultados obtenidos contra un método aproximado. Para este caso la diferencia fue de 29 % respecto al valor pico de tensión

-Como principales parámetros para la tensión inducida se buscó mantener constante el valor pico de corriente y tiempo de subida en el canal de descarga construido. Al comparar los tiempos de subida de la tensión inducida medida contra la tensión inducida simulada con LIOV-Code, se encontró que las diferencias con las pendientes son bajas.

-Se construyó un generador capaz de producir impulsos de corriente con tiempos de frente menores a 10 ns, el cual funciona con una fuente de alimentación de tan solo 12 V DC, lo que facilita continuar con este tipo de estudios.

-Para futuros trabajos, se podrían ampliar los parámetros de comparación entre las simulaciones y los resultados de las pruebas a escala reducida.

-Al analizar las diferencias de las tensiones inducidas según la resistividad del terreno, se demostró que las tensiones inducidas sobre terreno real presentan valores de tensión mayores a los que se pueden medir con terreno metálico. Adicionalmente estas tensiones tienen una polaridad negativa para los casos medidos. Dependiendo de la configuración, el aumento de tensión puede estar aproximadamente desde un 30 % hasta más de 1000 %.

-Se encontraron diferencias entre los tiempos de cola de la tensión inducida medida durante las pruebas y el tiempo calculado en las simulaciones, se considera que estas diferencias se deben a las oscilaciones en la corriente de prueba, oscilaciones que no se pueden tener en cuenta durante las simulaciones.

-Se desarrollaron y mejoraron habilidades de investigación por parte del autor de esta tesis así como también por parte del grupo de estudiantes e ingenieros que trabajaron en este proyecto. No se tiene referencia de ensayos similares en el país, por lo tanto se debieron asumir retos respecto a los equipos, montajes y procedimientos de ensayo. También se mejoraron la capacidad de medición de señales y la de modelamiento de fenómenos físicos.

A. Anexo: Compilación de resultados

A continuación se presenta la compilación de los principales resultados obtenidos en este trabajo. Para todos los casos se presentan los valores como fueron tomados por el osciloscopio de registro excepto que los valores de tensión y tiempo han sido multiplicados por 100 (inverso del factor de escala):

Tabla A1. Resultados mediciones en configuración adyacente terreno metálico

Sin resistencia	1	Señal de corriente [V]	116
		Tiempo pico de corriente [us]	0,576
		Tensión inducida[V]	66
		Tiempo pico tensión [us]	2,528
		Diferencia tiempos pico [us]	1,952
	2	Señal de corriente [V]	136
		Tiempo pico de corriente [us]	0,704
		Tensión inducida[V]	76
		Tiempo pico tensión [us]	2,128
		Diferencia tiempos pico [us]	1,992
	3	Señal de corriente [V]	112
		Tiempo pico de corriente [us]	0,636
		Tensión inducida[V]	50
		Tiempo pico tensión [us]	3,516
		Diferencia tiempos pico [us]	2,88
Con resistencia	1	Señal de corriente [V]	124
		Tiempo pico de corriente [us]	0,74
		Tensión inducida[V]	34
		Tiempo pico tensión [us]	4,94
		Diferencia tiempos pico [us]	4,2
	2	Señal de corriente [V]	128
		Tiempo pico de corriente [us]	0,628
		Tensión inducida[V]	22,4
		Tiempo pico tensión [us]	2,072
		Diferencia tiempos pico [us]	1,444
	3	Señal de corriente [V]	124
		Tiempo pico de corriente [us]	0,892
		Tensión inducida[V]	13,2
		Tiempo pico tensión [us]	1,48
		Diferencia tiempos pico [us]	0,588

Tabla A2. Resultados mediciones en configuración adyacente terreno real

Sin resistencia	1	Señal de corriente [V]	88
		Tiempo pico de corriente [us]	25,8
		Tensión inducida[V]	-176
		Tiempo pico tensión [us]	108,2
		Diferencia tiempos pico [us]	-82,4
	2	Señal de corriente [V]	108
		Tiempo pico de corriente [us]	6,2
		Tensión inducida[V]	-136
		Tiempo pico tensión [us]	104,2
		Diferencia tiempos pico [us]	-98
	3	Señal de corriente [V]	148
		Tiempo pico de corriente [us]	10,8
		Tensión inducida[V]	-32
		Tiempo pico tensión [us]	21,6
		Diferencia tiempos pico [us]	-10,8
Con resistencia	1	Señal de corriente [V]	128
		Tiempo pico de corriente [us]	9
		Tensión inducida[V]	-420
		Tiempo pico tensión [us]	116
		Diferencia tiempos pico [us]	-107
	2	Señal de corriente [V]	144
		Tiempo pico de corriente [us]	10
		Tensión inducida[V]	-400
		Tiempo pico tensión [us]	768
		Diferencia tiempos pico [us]	-758
	3	Señal de corriente [V]	116
		Tiempo pico de corriente [us]	7,2
		Tensión inducida[V]	-280
		Tiempo pico tensión [us]	108,4
		Diferencia tiempos pico [us]	-101,2

Tabla A3. Resultados mediciones en configuración lateral terreno metálico

Sin resistencia	1	Señal de corriente [V]	120
		Tiempo pico de corriente [us]	0,82
		Tensión inducida[V]	100
		Tiempo pico tensión [us]	3,90
		Diferencia tiempos pico [us]	3,08
	2	Señal de corriente [V]	120
		Tiempo pico de corriente [us]	0,92
		Tensión inducida[V]	132
		Tiempo pico tensión [us]	1,28
		Diferencia tiempos pico [us]	0,36
	3	Señal de corriente [V]	120
		Tiempo pico de corriente [us]	0,82
		Tensión inducida[V]	122
		Tiempo pico tensión [us]	2,32
		Diferencia tiempos pico [us]	1,50
Con resistencia	1	Señal de corriente [V]	124
		Tiempo pico de corriente [us]	0,76
		Tensión inducida[V]	46
		Tiempo pico tensión [us]	1,22
		Diferencia tiempos pico [us]	0,46
	2	Señal de corriente [V]	120
		Tiempo pico de corriente [us]	0,78
		Tensión inducida[V]	92
		Tiempo pico tensión [us]	1,84
		Diferencia tiempos pico [us]	1,06
	3	Señal de corriente [V]	144
		Tiempo pico de corriente [us]	0,92
		Tensión inducida[V]	130
		Tiempo pico tensión [us]	2,52
		Diferencia tiempos pico [us]	1,60

Tabla A4. Resultados mediciones en configuración lateral terreno real

Sin resistencia	1	Señal de corriente [V]	168
		Tiempo pico de corriente [us]	0,84
		Tensión inducida[V]	-144
		Tiempo pico tensión [us]	1,04
		Diferencia tiempos pico [us]	0,20
	2	Señal de corriente [V]	120
		Tiempo pico de corriente [us]	0,88
		Tensión inducida[V]	-36
		Tiempo pico tensión [us]	0,08
		Diferencia tiempos pico [us]	-0,80
	3	Señal de corriente [V]	112
		Tiempo pico de corriente [us]	0,56
		Tensión inducida[V]	-32
		Tiempo pico tensión [us]	0,92
		Diferencia tiempos pico [us]	0,36
Con resistencia	1	Señal de corriente [V]	108
		Tiempo pico de corriente [us]	0,70
		Tensión inducida[V]	-660
		Tiempo pico tensión [us]	11,30
		Diferencia tiempos pico [us]	10,60
	2	Señal de corriente [V]	120
		Tiempo pico de corriente [us]	0,80
		Tensión inducida[V]	-580
		Tiempo pico tensión [us]	16,80
		Diferencia tiempos pico [us]	16,00
	3	Señal de corriente [V]	128
		Tiempo pico de corriente [us]	0,80
		Tensión inducida[V]	-600
		Tiempo pico tensión [us]	11,50
		Diferencia tiempos pico [us]	10,70

Bibliografía

- [1] IEEE Power & Energy Society. (2010). IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines. 73.
- [2] Darveniza, M. (2007). A Practical Extension of Rusck's Formula for Maximum Lightning-Induced Voltages That Accounts for Ground Resistivity. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 22, NO. 1, enero 2007 , 605.
- [3] Piantini, A. (2007). A Scale Model for the Study of the LEMP Response of Complex Power Distribution Networks. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, Vol 22, NO 1, enero 2007, 710-720
- [4] Ishii, M. (1999). Experimental Study of Lightning-Induced Voltage on an Overhead Wire over Lossy Ground. *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY*, VOL. 41, NO. 1, febrero 1999.
- [5] Ishii, M. (1994). Lightning induced voltage on a overhead wire dependent on ground conductivity. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY* Vol 9, enero 1994. 109-118.
- [6] Grossi, M. Estudio y construcción de una antena para generar campos electromagnéticos similares a los campos generados por una descarga atmosférica. Tesis de doctorado. 15 de junio de 2000.
- [7] Nucci C.A. (2000). The Lightning Induced Over-Voltage (LIOV) code. Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE. 2417.
- [8] Barker P., Short T. "*Induced Voltage Measurements On An Experimental Distribution Line During Nearby Rocket Triggered Lightning Flashes*" *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 2, April 1996.
- [9] Borghetti A., Nucci C., Paolone M. "*An Improved procedure for the Assessment of Overhead Line Indirect Lightning Performance and Its Comparison with IEEE*

Std 1410 Method” IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 22, NO. 1, JANUARY 2007.

[10] Master M., Uman M., Beasley W., Darveniza M., *Lightning Induced Voltages on Power Lines – Experiment*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 9, September 1984.

[11] Agrawal A., Price H., Gurbaxani S., “*Transient Response of Multiconductor Transmission Lines Excited by a Nonuniform Electromagnetic Field*” IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. EMC-22, NO. 2, MAY 1980

[12] F. Rachidi, C. A. Nucci, M. Ianoz, C. Mazzetti “*Comparison of Two Coupling Models for Lightning-Induced Overvoltage Calculations*” 330 IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, January 1995

[13] J. Anderson, T. Short “*Algorithms for Calculation of Lightning Induced Voltages on Distribution Lines*” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, July 1993.

[14] S. Razzak, M. Rashid, M. Sarkar, S. Tamaki, M. Mortuza Ali “*Numerical Computation of Lightning Induced surges on Overhead Power Distribution Lines*” International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 2, No. 5, October, 2010.

[15] M. Martínez, J. Ramírez, L. Laffont, A. Da Silva “*Estudio de Sobretensiones Inducidas en Sistemas de Media Tensión*”

[16] V. Cooray, V. Scuka “*Lightning-Induced Overvoltages in Power Lines - Validity of Various Approximations Made in Overvoltage Calculations*” IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. 40, NO. 4, NOVEMBER 1998.

[17] W. Boaventura. “*Estudo da Tensão Induzida Em Linhas Aéreas por Descargas Atmosféricas Utilizando Técnicas de Modelo Reduzido*” Universidad Federal de Minas Gerais. 1990

[18] V. A. Rakov “*Lightning Phenomenology and parameters Important for EMC*” CEEM Dalian. 2006.

- [19] Lightning and Insulator Subcommittee of the T&D Committee “*Parameters of Lightning Strokes- A Review*” IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 20, NO. 1, JANUARY 2005
- [20] E. Kuffel, W. Zaengl, J. Kuffel “*High voltage engineering fundamentals*”
- [21] M. Quintero, E. Rodríguez. “*Construcción de sistema de prueba y medida de impulsos tipo descarga electrostática (DES)*” Universidad Nacional de Colombia, Trabajo de grado Ing. Eléctrica. 2012.
- [22] IEC61000-4-2. *Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test*. 2008
- [23] J. Saldanha, C. Barbosa, I. Lopes, W. Boaventura “*An Approximate Formula for the Peak Value of Lightning-Induced Voltages in Overhead Lines*” IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 25, NO. 2, APRIL 2010
- [24] CODENSA S.A. E.S.P. “*Especificación Técnica ET 202*”
- [25] V. Cooray “*The Lightning Flash*” The Institution of Electrical Engineers. United Kingdom. 2003
- [26] F. Heidler, J. Cvetic, V. Stanic “*Calculation of Lightning Current Parameters*” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 2, April 1999
- [27] E. Pérez. “*Avances en el modelamiento y experimentación de tensiones inducidas en redes de distribución*” Tesis de doctorado. Bogotá D.C. UNC. 2006
- [28] J. Herrera, E. Pérez, H. Torres “*Sensitivity analysis of induced voltages on distribution lines*” IEEE Bologna PowerTech Conference, 2003.
- [29] I. J. Lopes “*Estudo do Comportamento de um Condutor Multiaterrado frente a Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas*” Pós-Graduação em Engenharia Eléctrica da UFMG. 1990.
- [30] F. A. Fisher, J. G. Anderson, J. H. Hagenguth “*Determination of Lightning Response of Transmission Lines by Means of Geometrical Models*” AIEE Fall General Meeting, Chicago. 1959
- [31] ICNIRP “*Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (Up to 300 Ghz)*”. Published In: Health Physics 74 (4):494-522; 1998
- [32] ICNIRP “*Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz-300 GHz)*” 2009.