



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Caracterización preliminar del campo eléctrico radiado por rayo en zona tropical montañosa. Caso Manizales (Caldas)

I.E. Leonardo Aguirre González

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento Ingeniería Eléctrica, Electrónica y
Computación

Manizales, Colombia

2022

Caracterización preliminar del campo eléctrico radiado por rayo en zona tropical montañosa. Caso Manizales (Caldas)

I.E. Leonardo Aguirre González

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Eléctrica

Director (a):

Doctor, I.E., Camilo Younes Velosa

Codirector (a):

Doctor, I.E. Diego Fernando del Rio Trujillo

Línea de Investigación:

Descargas Eléctricas Atmosféricas

Grupo de Investigación:

Environmental Energy and Education Policy - E3p

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación

Manizales, Colombia

2022

Dedicatoria

*A mis hijos Violeta e Isaac, a mi esposa
Andrea, quienes son el motor de mi alma.*

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Leonardo Aguirre Gonzalez

Fecha 08/02/2022

Agradecimientos

En primer lugar, reitero mis más sentidos agradecimientos a mi familia, a mis hijos gracias doy por esperarme y tenerme paciencia en mis momentos difíciles; a mi esposa por impulsarme a iniciar este largo camino de investigación y aprendizaje. A mis padres por el apoyo y el ejemplo de vida que me dan a diario. Los Amo.

En segundo lugar agradezco enormemente a mis tutores el profesor Camilo y a mi compañero de pregrado y hoy Doctor Diego Fernando del Rio, por su apoyo, sus consejos y paciencia, sin ustedes esta historia no hubiera sido posible.

Y por último mis sinceros agradecimientos y reverencias a la universidad Nacional de Colombia por poner a disposición de la comunidad, oportunidades para brindar apoyo a los procesos investigativos que se llevan a cabo al interior de sus sedes.

Resumen

Caracterización preliminar del campo eléctrico radiado por rayo en zona tropical montañosa. Caso Manizales (Caldas)

El presente trabajo de tesis contiene la caracterización preliminar de las descargas eléctricas atmosféricas en zona montañosa para la ciudad de Manizales. Para desarrollar dicha caracterización, se diseñó y construyó un sistema de medición de bajo costo que consta de un sensor de placas paralelas, un circuito electrónico, un osciloscopio y un computador personal que se encarga de controlar el sistema a través de un software de adquisición desarrollado en el presente trabajo. También fue desarrollado un software adicional, el cual se encarga de procesar las señales de rayo adquiridas previamente obteniendo características de amplitud (Valores pico y sus relaciones, valor pico normalizado a 100 km), temporales (tiempos de cero al pico, cruces por cero). Se realizaron comparaciones con otros estudios realizados en zonas tropicales, mostrando variaciones importantes principalmente en los tiempos de frentes lento y rápido, así como los tiempos de 0-100% y 10-90%.

Palabras clave: Rayo, Antena de placas paralelas, Campo Eléctrico, circuito electrónico, osciloscopio, Buffer, caracterización.

Abstract

Preliminary characterization of the electric field radiated by lightning in a mountainous tropical zone. Manizales case (Caldas)

This thesis work contains the preliminary characterization of lightning discharges in mountain region such as the city of Manizales. To develop this characterization, a low-cost measurement system was designed and built, which consists of a flat plate sensor, an electronic circuit, an oscilloscope and a personal computer that is responsible for controlling the system through an acquisition software developed in the present work. Additional software was also developed, which is responsible for processing the previously acquired lightning signals, obtaining amplitude characteristics (peak values and their relationships, normalized peak value at 100 km), time (times from zero to peak, zero crossings). Comparisons were made with other studies carried out in tropical areas, showing important variations mainly in the times of slow and fast fronts, as well as the times of 0-100% and 10-90%.

Keywords: Lightning, Flat plate antenna, Electric field, electronic circuit, oscilloscope, Buffer, characterization.

1. Contenido

	Pág.
Resumen	XI
1. Contenido	XIII
Lista de figuras	XV
Lista de tablas	XVIII
1. Introducción y marco teórico	21
1.1 Antecedentes	23
1.2 Generalidades sobre el fenómeno del rayo	27
1.2.1 Las nubes de tormenta	28
1.2.2 Rayos nube - IC.....	29
1.2.3 Rayos nube tierra – CG	30
1.3 Campos electromagnéticos generados por rayos CG	32
1.4 Estudios recientes sobre los campos electromagnéticos radiados por rayo	36
2. Sistema de medida	39
2.1 Antena de placas paralelas	42
2.2 Circuito Electrónico	45
2.2.1 Diseño de la tarjeta de circuito impreso	49
2.3 Equipos de adquisición.....	50
2.4 Comportamiento del circuito electrónico.....	52
2.4.1 Prueba del circuito electrónico sin cables coaxiales.....	53
2.4.2 Comportamiento en frecuencia del sistema de captura.....	54
2.4.3 Comportamiento del sistema de captura ante impulsos rápidos	55
2.5 Calibración del sistema	56
2.6 Fuente de alimentación desarrollada.....	59
2.7 Sitio de instalación	62
2.8 Adquisición de señales.....	64
3. Resultados	67
3.1 Parámetros de la forma de onda	67
3.2 Pre-procesamiento de señales	70
3.3 Procesamiento de señales	71
3.3.1 Clasificación	73
3.3.1.1 Impactos positivos	74
3.3.1.2 Impactos negativos.....	75

3.3.1.3	Rompimiento Preliminar	76
3.3.1.4	Sin Clasificar	78
3.3.2	Estimación de la distancia de impacto.....	79
3.4	Características de los campos eléctricos radiados por la primera descarga de retorno de acuerdo a la distancia de impacto	82
3.5	Resultados obtenidos en Manizales, medición de parámetros campaña septiembre-diciembre 2020	87
3.6	Comparación de los resultados con otros estudios similares	91
3.6.1	Polaridad en función de los rangos de distancia.....	91
3.6.2	Valor pico inicial del campo eléctrico normalizado a 100 km	92
3.6.3	Amplitud del sobrepico de polaridad opuesta (OPO) con respecto al valor pico.....	92
3.6.4	Tiempo de ascenso de cero al pico	93
3.6.5	Tiempo de ascenso 10-90%.....	93
3.6.6	Duración del frente lento y del frente rápido	94
3.6.7	Tiempo de cruce por cero.....	94
3.6.8	Características de la derivada del campo eléctrico.....	95
4.	Conclusiones y trabajo futuro	97
4.1	Conclusiones	97
4.2	Trabajo futuro	100
Anexos.....	101
Anexo A:	Modulo de alimentación ininterrumpida	101
A1.	Diseño sistema de alimentación ininterrumpida	101
A2.	Código Arduino:.....	109
A3.	Precauciones, montaje y manteniendo	112
5.	Bibliografía.....	113

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Lugares con mayor DDT en Latinoamérica.	27
Figura 2. Tipos de rayos IC. a) Nube aire. b) Entre nubes. c) Dentro de la nube	28
Figura 3. Tipos de rayos CG.....	29
Figura 4. Proceso de formación del rayo.	32
Figura 5 Señales típicas cercanas (menor a 50 km) de campo eléctrico (izquierda) y magnético para la primera (línea solida) y subsecuentes (línea punteada) descargas de retorno.....	34
Figura 6. Señales típicas lejanas (mayores a 50 km) de campo eléctrico (izquierda) y magnético para la primera (línea solida) y subsecuentes (línea punteada) descargas de retorno.....	35
Figura 7. Ubicación sistema de medición de CE radiado por rayo.....	40
Figura 8. Componentes del sistema de medición de CE implementado para las campañas de medición 1 y 2.	41
Figura 9. Vistas de la antena de medición de campo eléctrico de placas paralelas diseñada.....	43
Figura 10. Corte transversal antena de placas paralelas.	43
Figura 11. Diagrama de bloques etapa de entrada del sistema de medida.....	47
Figura 12. Circuito Equivalente Antena, Cable Coaxial corto y Etapa de entrada circuito seguidor	47
Figura 13. Diagrama del circuito electrónico BUF634	48
Figura 14. Layout para fabricación de PCB BUF634	50
Figura 15. PCB para el BUF634 con sus componentes.....	50
Figura 16. Equipo Siglent 2304X facilitado por laboratorio UNAL Manizales	51
Figura 17. Equipo Tektronix TBS1102C adquirido para el proyecto Hermes 50922	51
Figura 18. Equipo OWON VDS6102 adquirido para el proyecto Hermes 50922.....	52
Figura 19. Esquema prueba circuito electrónico sin cables coaxiales.....	53

Figura 20. Comportamiento en la frecuencia de circuito electrónico. a) Ganancia, b) Fase	53
Figura 21. Esquema prueba del sistema de captura	54
Figura 22. Comportamiento en la frecuencia de sistema de captura. a) Ganancia, b) Fase	55
Figura 23. Respuesta del circuito ante Impulsos rápidos. Línea Cían: Entrada, Línea Amarilla: Salida, a) Positivo, b) Negativo.....	56
Figura 24. Esquema del montaje de calibración.....	57
Figura 25. Respuesta del sistema ante Impulsos rápidos. Línea Cían: Entrada, Línea Amarilla: Salida, a) 5V, b) 2.5V	57
Figura 26. Gráfica Factor de Calibración.....	58
Figura 27. Esquemático de la fuente de alimentación ininterrumpida.....	61
Figura 28. Fotografía del sistema de alimentación ininterrumpida.....	62
Figura 29. Zona de Ubicación de la antena	63
Figura 30. Vista en planta Ubicación de la antena	63
Figura 31. Antena y equipos del sistema de medida de CE	64
Figura 32. Estructura de las carpetas por día.....	65
Figura 33. Archivo LOG 15/10/2020.....	65
Figura 34. Forma de onda del campo eléctrico señalando los parámetros analizados. (a) parámetros de magnitud; (b) parámetros temporales.....	68
Figura 35. Proceso de tratamiento de las señales capturadas de CE	71
Figura 36. Nemotecnia de la codificación de las señales procesadas	72
Figura 37. Resultado preliminar de clasificación 12.049 señales SMCE 2020	74
Figura 38. Señal 50 RS Positivo registrado a 25.5 km de distancia.....	74
Figura 39. Señal 499 RS Positivo registrado a 37.4 km de distancia.....	75
Figura 40. Señal 475 RS negativo registrado a 73.1 km de distancia.....	76
Figura 41. Señal 74 RS negativo registrado a 107 km de distancia.....	76
Figura 42. Señal 238 características de rompimiento preliminar	77
Figura 43. Señal 705 características de rompimiento preliminar	77
Figura 44. Señal 8 Sin clasificar, exceso de ruido	78
Figura 45. Señal 566 Sin clasificar por saturación de la visualización	78
Figura 46. Impactos capturados por el SMCE 2020	81

Figura 47. Señales de campo eléctrico producido por flashes CG negativos en función de la distancia (a) (b) 0 – 30 km; (c) (d) 30 – 50 km; (e) 100 - 150 km; (f) 150 – 200 km.....	83
Figura 48. Señales de campo eléctrico producido por flashes CG positivos en función de la distancia (a) 0 – 30 km (b) 30 – 50 km; (c) (d) 50 - 100 km; (e) 15 – 150 (f) 150 - 200	85
Figura 49. Formas de onda del Evento 27092020_185453	87

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Puntos en Latinoamérica con de mayor DDT y su ubicación global.	26
Tabla 2. Especificaciones técnicas de los componentes del SMCE	41
Tabla 3. Características técnicas principales integrados seguidores.....	46
Tabla 4. Resumen equipos de adquisición usados	52
Tabla 5. Resultados de la prueba de calibración del SMCE	58
Tabla 6. Descripciones de los parámetros de las formas de onda a analizar	69
Tabla 7. Resultado preliminar de clasificación 12.049 señales SMCE 2020.....	73
Tabla 8. Datos suministrados por Keraunos.....	79
Tabla 9. Strokes capturados en función de la distancia al punto de impacto.....	80
Tabla 10. Información estadística de los parámetros de FRS negativos para Manizales Septiembre-Diciembre 2020.....	89
Tabla 11. Resultados de las mediciones FRS positivos en Manizales Septiembre- Diciembre 2020.....	89
Tabla 12. Media aritmética de los parámetros del CE de FRS negativos agrupados en rangos de distancia para Manizales Septiembre-Diciembre 2020	89
Tabla 13. Media aritmética de los parámetros del CE de FRS positivos agrupados en rangos de distancia para Manizales Septiembre-Diciembre 2020	90
Tabla 14. Flashes CG registrados en función de diferentes rangos de distancia.....	91
Tabla 15. Valor pico inicial del campo eléctrico normalizado a 100 km (E_{P_N}) – (V/m).....	92
Tabla 16. Amplitud del sobrepico de polaridad opuesta respecto al valor pico (E_{OP0}/E_p) – adimensional.....	93
Tabla 17. Tiempo de ascenso de cero al pico (0-100%) (t_{zp}) – Valores en μs	93
Tabla 18. Tiempo de ascenso 10-90% (t_{10-90}) – Valores en μs	93
Tabla 19. Duración del frente lento (t_{SF}) – Valores en μs	94
Tabla 20. Duración del frente rápido (t_{FT}) – Valores en μs	94
Tabla 21. Tiempo de cruce por cero (t_{zc}) – Valores en μs	95

Tabla 22. Valor pico de la derivada del campo eléctrico $(dE/dt)_p$ – Valores en V/m/ μ s....	95
Tabla 23. Ancho completo a media altura de la derivada de CE (FWHM) – Valores en μ s	95

1. Introducción y marco teórico

La caracterización del fenómeno del rayo en Colombia es uno de los procesos investigativos que lleva alrededor de 40 años de forma continua y de manera sistemática, logrando avances y aportes significativos tanto de manera local como internacional. Dichos aportes han permitido, por ejemplo, determinar que Colombia es uno de los países con mayor actividad de atmosférica (cantidad de rayos) de la región suramericana (Torres-Sánchez, 2002; Younes, 2002) e incluso del mundo, como ha sido corroborado recientemente por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA por sus siglas en inglés) (Albrecht et al., 2016).

Debido a la alta actividad de rayos en el país se tiene también una tasa de aproximadamente 2 muertes/millón de habitantes, mientras que para otros países de la región y de latitudes templadas oscilan entre 0.8 y 0.3 muertes/millón de habitantes (Cruz-Bernal et al., 2018), como también ocasiona pérdidas de varios millones de dólares por causa de las fallas en los sistemas eléctricos y de comunicaciones, por impactos directos o indirectos, estos últimos, generan inducción de campos electromagnéticos sobre dispositivos eléctricos y electrónicos (Cooray, 2010; Rakov & Uman, 2003; Torres-Sánchez, 2002).

De esta manera conocer y caracterizar mejor el fenómeno del rayo en Colombia es necesario para el desarrollo de sistemas de protección más eficientes y metodologías que ayuden a prevenir los eventos fatales que pueden originarse por este. El proceso de identificación de los diferentes parámetros del fenómeno se realiza con mediciones por impactos directos en torres instrumentadas pudiéndose obtener valores de corriente pico de la descarga de retorno (RS – Return Stroke por sus siglas en inglés), valores de carga y energía, o también se puede obtener a través de mediciones indirectas del campo eléctrico y magnético generados por el rayo. Los dispositivos para obtención de estas características son de alto costo los cuales pueden ser difíciles de adquirir para países en vía de desarrollo, pues los recursos son limitados. Por esta razón la presente tesis se

enfoca en caracterizar la descarga eléctrica atmosférica (rayo) en las ciudades de alta montaña, a través de un dispositivo de bajo costo.

De manera que el objetivo general de esta tesis es:

- Realizar una caracterización preliminar del campo eléctrico radiado por rayo en zona tropical montañosa. Caso Manizales (Caldas).

Y los objetivos específicos propuestos:

- Implementar un dispositivo de bajo costo que permita medir y almacenar las señales del campo eléctrico radiado por rayo de manera autónoma.
- Caracterizar las señales de campo eléctrico de la primera descarga de retorno.
- Comparar los registros de eventos capturados con aquellos reportados en otros estudios.

Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos en esta tesis, se siguieron los siguientes pasos:

En una etapa inicial se investigó acerca de los dispositivos comúnmente usados para este tipo de mediciones a nivel internacional, con especial atención en aquellos que se puedan construir e implementar a bajo costo, como lo son las antenas de placas y las antenas tipo látigo.

Se seleccionó un sistema de placas paralelas buscando componentes comerciales y de bajo costo.

Se diseñó y construyó un sistema de baterías que garantiza el funcionamiento autónomo del sistema.

Se realizaron pruebas de funcionamiento y calibración encaminadas a tener unas mediciones confiables.

Se desarrollaron scripts de control y almacenamiento de señales, de acuerdo al osciloscopio usado.

Puesta en funcionamiento y captura de dos campañas de medición, la primera de ellas en el segundo semestre de 2020 y la segunda en el primer semestre de 2021

Se desarrollaron scripts para procesamiento de las señales

Análisis y comparación con otros estudios de los resultados obtenidos.

1.1 Antecedentes

El profesor Horacio Torres en (Torres-Sánchez, 2010) documenta el interés de diversas culturas por el entendimiento del fenómeno del rayo, argumentando que “El rayo es un fenómeno meteorológico que desde épocas remotas ha sido de gran interés para las diferentes culturas que han habitado nuestros territorios, de ello se tienen evidencias desde la cultura Acadia y Griega con la interpretación del fenómeno del rayo y los escritos de Tales de Mileto sobre la piedra imán. El inicio de la investigación científica alrededor de las descargas eléctricas atmosféricas, fue a mediados del siglo XVIII con las investigaciones de Benjamín Franklin, pasando por Maxwell, Faraday y otros científicos que realizaron aportes al electromagnetismo. Posteriormente, avances importantes sobre el circuito eléctrico global permitieron identificar a principios del siglo XX las zonas de convección tropical profunda como de alta actividad atmosférica gracias a los estudios de C.T.R Wilson en 1920 y Whipple en 1929”.

A nivel mundial por diferentes autores, entre los que se destacan: Vladimir A. Rakov (M. A. U. and V. A. Rakov, 2005), Vernon Cooray (Cooray, 2015), Amitabh Nag (Nag & Rakov, 2014), Martin A. Uman (Thottappillil, 1993), entre otros, han realizado significativos aportes al entendimiento físico, caracterización, modelado y medición de diferentes aspectos y parámetros asociados al rayo.

En Colombia, a través de los años, se han desarrollado importantes aportes en diferentes aspectos asociados al rayo, liderados en gran parte por la Universidad Nacional de Colombia y sus grupos de investigación, iniciando con la elaboración del primer mapa de nivel cerámico en 1976, luego en 1990 con apoyo de Colciencias y el HIMAT, se elaboró el mapa de nivel cerámico que fue utilizado por un largo periodo en diseños de

ingeniería; actualmente se utiliza a través de la norma de protección contra descargas eléctricas atmosféricas NTC 4552, el mapa de nivel cerámico desarrollado por C. Younes en (Camilo Younes Velosa, 2002). En 1995, la Universidad Nacional adquirió un avanzado sistema de localización de rayos, el TSS-420 y con la ayuda de las mediciones realizadas por este sistema, Torres y Barreto obtuvieron el valor de la corriente pico aplicando diferentes modelos de corriente. En 1999 E. Pérez adelantó avances sobre el modelamiento del rayo para el cálculo de tensiones inducidas. En el 2002 aportes a la caracterización del fenómeno fueron hechos por C. Younes et al (Camilo Younes Velosa, 2002) con la información suministrada por la Red Colombiana de Medición y Localización de Descargas Atmosféricas - RECMA, la cual constaba de seis sensores LPATS Lightning Position and Tracking System, obteniendo parámetros utilizados para el diseño de sistemas de protección contra rayos -SIPRA- como la Densidad de Descargas a Tierra - DDT, polaridad, multiplicidad y valores pico de corriente. Además, la NASA con ayuda del LIS -Lightning Imaging Sensor y OTD - (The Optical Transient Detector) facilitaron información que permitió validar el funcionamiento de la RECMA. En el estudio hecho por C. Younes se corrobora lo anteriormente afirmado por autores internacionales y nacionales como son V. Rakov (V. Rakov, 2001) y H. Torres (Torres-Sánchez, 2010), donde se comprueba la hipótesis de que “los parámetros del rayo varían espacial y temporalmente”, visibilizando la necesidad de diferenciar espacialmente los estudios, buscando realizar puntales y mejores caracterizaciones del fenómeno.

En el 2006 C. Younes et al (Velosa, 2006) relaciona variables geográficas y meteorológicas con los parámetros del rayo, proponiendo una nueva metodología para la determinar la Densidad de Descargas a Tierra - DDT (GFD), utilizando la teoría de subconjuntos difusos, Younes introduce su nuevo método de cálculo como la Densidad difusa de descargas a tierra - DFDT (FGFD). En el mismo año E. Pérez realizó aportes en el modelado, cálculo y experimentación de tensiones inducidas por impactos indirectos en líneas de distribución. También en 2006, Vargas desarrolla un modelo de la descarga de retorno, aplicable tanto al líder escalonado (con tortuosidad y ramificaciones) como al líder dardo, en cual aporta al mejor entendimiento físico del fenómeno del rayo y su aplicación a los sistemas de protección externa, teniendo en cuenta por primera vez en la investigación mundial sobre rayos, la tortuosidad y sus ramificaciones (Vargas, 2006). En este tipo de estudios realizó aportes J. Pulgarín en 2010 et al (Pulgarín, 2010).

Debido a la ubicación geográfica de Colombia (zona tropical montañosa), y a que la mayor parte de centros poblados se encuentran ubicados sobre las cordilleras, y a su vez teniendo en cuenta que la gran mayoría de estudios sobre el rayo se han realizado para terreno plano y no tropical, E. Soto (2010) et al (Soto Ríos, 2010) desarrolló una metodología para determinar los campos electromagnéticos generados por el rayo para terreno montañoso y poder obtener con mayor exactitud las tensiones inducidas sobre líneas de distribución; posteriormente Soto en 2014 et al (Ríos, 2014) profundiza en sus estudios y evidencia la necesidad de ajustar y verificar desempeño de los actuales sistemas de detección de rayos en terreno no plano; en el mismo año D. Pérez (Perez Perez, 2014) hace afirmaciones sobre el desempeño de los sistemas de localización de rayos en Colombia, concluyendo que los sistemas con los que cuenta el país para la localización de rayos, tiene una confiabilidad baja, pues según el autor dichos sistemas ubican menos del 50% de los rayos que en realidad impactan la tierra en nuestro territorio.

También es de destacar los desarrollos hechos por Díaz-Cadavid (Diaz-Cadavid et al., 2011) (2011) y (Díaz Cadavid, 2014) (2014), con el fin de caracterizar la composición espectral del rayo utilizando mediciones de campo magnético horizontal en la ciudad de Manizales.

A nivel mundial estudios de instrumentación y medición de campo eléctrico radiado por rayo han sido desarrollados y mejorados a través del tiempo desde 1943 con el contador desarrollado por Forrest, pasando por Davis (1946), Schonland and Gane (1947,1948), Foldes (1951,1954), Lugeon (1953), Sullivan and Wells (1954,1957) (Horner, 1960), entre otros, pasando por R. A. Barham y D. Mackerras (1972) (D. MACKERRAS, 1972), Prentice (1975) (Prentice et al., 1975), Anderson (1984) (Anderson et al., 1984) teniendo mejorías a través del tiempo con la evolución de las herramientas electrónicas y computacionales disponibles hasta llegar a algunos más recientes aún basados en los mismos principios como el estudiado por Mackerras (2009) et al (Mackerras et al., 2009). Algunos estudios sobre mediciones de campo eléctrico radiado por rayo de los que se tiene información son: a nivel mundial en zona tropical, el realizado por Vernon Cooray (Cooray & Lundquist, 1985) en 1985; a nivel continental en zona subtropical se tiene el estudio desarrollado por la Universidad de Sao Paulo en 2015 (Rodriguez et al., 2015) con sistema de alerta por rayos basado en una antena sensor de campo eléctrico tipo látigo. A nivel local se cuenta con varios estudios de campo electrostático realizados

desde la Universidad Nacional de Colombia, en gran parte por medio del grupo PAAS-UN, entre los que se destacan los realizados a través de antenas de placas paralelas Briceño y Rondón (1996) y con molinos de campo Daniel Aranguren (2004, 2006, 2011) (Aranguren, 2011), Santamaría (2006) (Santamaria Piedrahita, 2006) y Jesús A. López (2011)(López Trujillo, 2011).

Estudios recientes (2016) de la Macroclimatología de la temperatura y de la Densidad de Descargas a Tierra DDT et al Schmunk (Robert B. Schmunk (NASA/GSFC GISS), 2016) y Albrecht (Albrecht et al., 2016) respectivamente, realizadas con la información recolectada por misiones de medición de la NASA, generan gran inquietud. Por su parte en el estudio realizado sobre la macroclimatología de la temperatura global de la superficie terrestre en el periodo comprendido entre 1880 y 2016, se observan bajas temperaturas desde 1880 y un leve incremento en 1940 con un retroceso hasta finales de los 70's, luego se evidencia un incremento constante de dicha temperatura a partir de 1980, manteniendo su característica ascendente hasta 2016 donde se ha llegado a valores pico históricos. Por otro lado el estudio sobre la Macroclimatología de la DDT arroja como resultados mapas de dicho parámetro a nivel global y localizado (ver Figura 1. Hotspots Latinoamérica) así como también un ranking mundial y latinoamericano de los puntos con mayores niveles de DDT (ver Tabla 1). En el estudio, denominan los primeros lugares de dicho ranking como "Hotspots" de DDT, es decir, lugares en el planeta que tienen elevados valores de DDT. En el segundo puesto en el Ranking Latinoamericano se encuentra Cáceres, el cual ocupa el cuarto lugar en el Ranking Mundial, en el tercer puesto del ranking latinoamericano está El Tarra que a su vez ocupa el puesto 7 en el Ranking Mundial y el cuarto puesto en el Ranking Latinoamericano lo ocupa Norcasia, la cual se ubica en el puesto 11 del Ranking Mundial.

Tabla 1. Puntos en Latinoamérica con de mayor DDT y su ubicación global.

Puesto Global	Densidad de Descargas a tierra [R/km2-año]	Latitud (°)	Longitud (°)	Lugar poblado más cercano	País
Sur América					
1	235.52	9.75	-71.65	Lago de Maracaibo (Lagunullas)	Venezuela
4	172.29	7.55	-75.35	Cáceres	Colombia
7	138.61	8.85	-73.05	El Tarra	Colombia
11	124.26	5.75	-74.95	Norcasia	Colombia
18	114.19	8.45	-74.55	Majagual	Colombia
25	105.73	8.15	-76.85	Turbo	Colombia
46	95.38	11.15	-72.95	Barrancas	Colombia
74	87.96	-17.25	-65.05	Chimoré	Bolivia

78	87.61	10.35	-70.95	El Corozo	Venezuela
136	77.01	10.45	-75.35	Santa Rosa	Colombia

Fuente: Adaptada de (Albrecht et al., 2016).

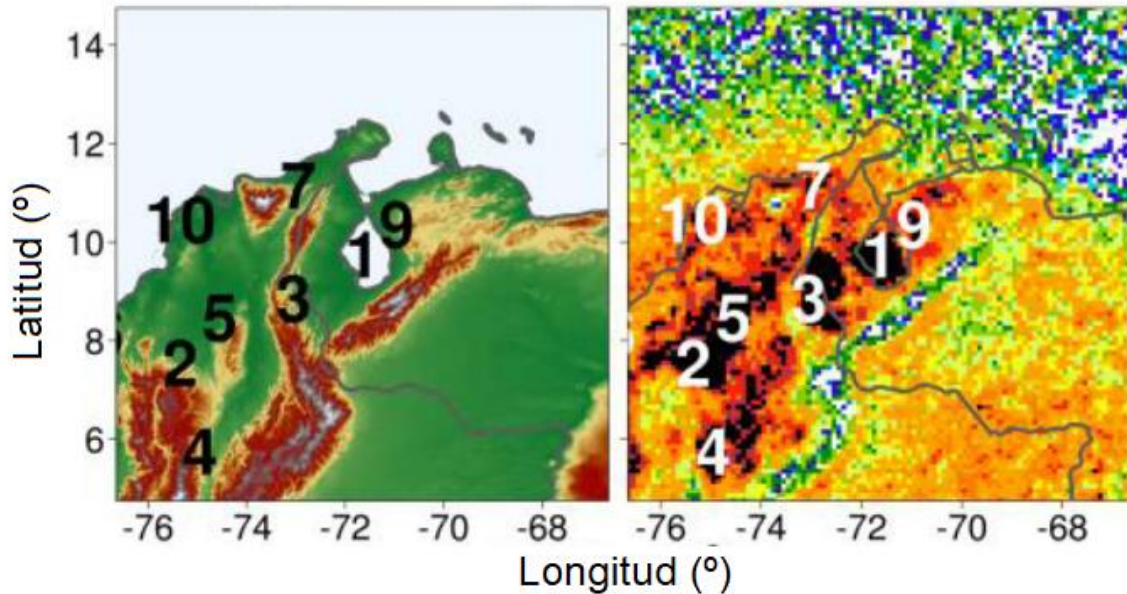


Figura 1. Lugares con mayor DDT en Latinoamérica.

Fuente: Adaptada de (Albrecht et al., 2016)

1.2 Generalidades sobre el fenómeno del rayo

El rayo es un fenómeno transitorio en el cual hay una gran transferencia de carga eléctrica. Los rayos están relacionados directamente con las nubes *Cumulonimbus*, sin embargo, también se ha encontrado que hay rayos presentes en las tormentas de arena o nieve, incendios forestales y en las erupciones volcánicas (Betz et al., 2008; V. A. Rakov & Uman, 2003; Torres-Sánchez, 2002).

1.2.1 Las nubes de tormenta

La estructura eléctrica de las nubes de tormenta fue establecida gracias a los procesos investigativos realizados y desarrollados por C.T.R Wilson (1920) (MacGorman & Rust, 1998). Wilson a través de mediciones de campo eléctrico logró determinar que las nubes de tormenta tenían dos centros de carga, uno negativo y otro positivo. Sin embargo, a través de mediciones realizadas por Simpson en 1930, logró confirmar la teoría de Wilson y además logró determinar que había un tercer centro de carga en algunas nubes de tormenta de polaridad positiva y que este no era de gran tamaño. De esta manera se estableció un modelo simplificado de la nube, el cual consta de un gran centro de carga positivo, uno negativo y por último un pequeño centro de carga positivo. Este modelo simplificado conocido como modelo tripolar de la nube aún sigue siendo empleado para explicar fenómenos tales como el rayo. En la actualidad se conoce que la nube no solo tienen tres centros de carga sino que tiene muchos otros centros de carga (Betz et al., 2008).

Las nubes *Cumulonimbos* producen tipos de rayos que pueden ser agrupados en dos categorías: los rayos que no involucran el suelo de la tierra rayos nube (*Intra – Cloud – IC*). Los rayos IC se dividen en tres categorías que son: a) Nube aire, b) Entre nubes y c) rayos dentro de la nube. La Figura 2 muestra los tipos de rayos IC. y los rayos que involucran el suelo de la tierra nube-tierra (*Cloud to Ground - CG*) . La Figura 3 muestra los tipos de rayos CG, los cuales se han clasificado en cuatro tipos: 1) descendente negativo, 2) ascendente positivo, 3) descendente positivo y 4) ascendente negativo.

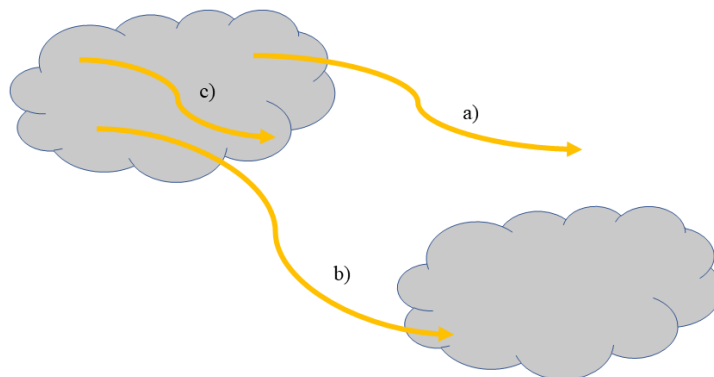


Figura 2. Tipos de rayos IC. a) Nube aire. b) Entre nubes. c) Dentro de la nube
Fuente: Elaboración propia

1.2.2 Rayos nube - IC

Los rayos IC son descargas que ocurren entre los dos grandes centros de carga sin tocar el suelo. Este tipo de rayos no son tan estudiados como lo son los rayos CG, debido a la dificultad que se tiene para realizar mediciones dentro de la nube. Sin embargo en los últimos años se ha realizado avances en la caracterización de este tipo de rayos a través de mediciones hechas usando redes de detección VHF (*Very High Frequency – por sus siglas en inglés*) (Vernon Cooray, 2015). El ciclo de vida de los rayos IC está dividido en dos fases: fase inicial (activa) y la fase final.

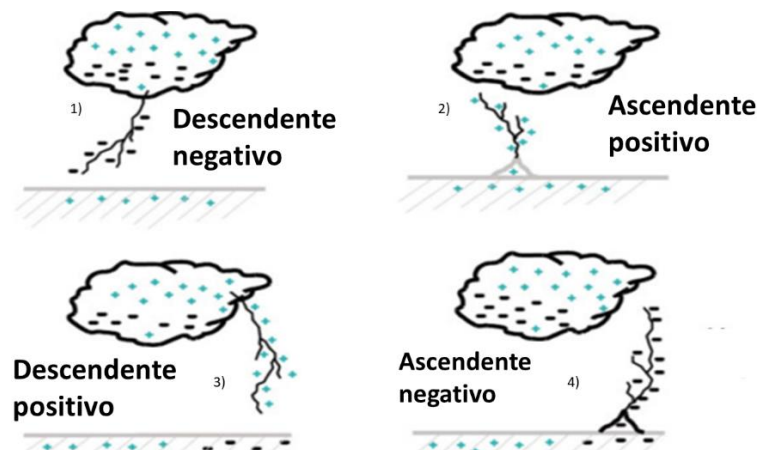


Figura 3. Tipos de rayos CG.
Fuente: Adaptada de (Vernon Cooray, 2015)

Los rayos nube se originan con descargas desde el centro de carga negativa hacia el centro de carga positiva, produciendo así un movimiento más o menos en dirección vertical. Este tipo de descargas forman un canal que alcanza algunos pocos kilómetros y puede llegar a tener una velocidad de propagación de aproximadamente 1.5×10^5 m/s. Luego que este canal vertical ha sido formado, se produce un desplazamiento horizontal formado por canales en la parte alta de la nube donde se encuentra el centro de carga positiva. Estos canales generados en los niveles superiores de la nube al parecer están relacionados con los cambios en el campo eléctrico causados por la transferencia de cargas desde los niveles inferiores. Se ha estimado que la densidad de carga para esta

fase activa oscila entre 1 – 4 C/km y la corriente eléctrica varía entre 37 y 640 A con una media de 130 A (V. A. Rakov & Uman, 2003; Vernon Cooray, 2015).

La fase final se caracteriza por la desconexión de los centros de carga positivo y negativo dentro de la nube, esta desconexión ocurre debido a la disminución de la conductividad generada por el canal entre los centros de carga.

1.2.3 Rayos nube tierra – CG

Los rayos nube tierra son los más estudiados debido al poder destructivo pues ocasionan incendios, problemas en los sistemas eléctricos y de comunicaciones, como también lesiones a los seres vivos. Los CG pueden ser de polaridad positiva y negativa, siendo los más comunes los negativos, se estima que cerca del 90% son de esta polaridad (V. A. Rakov & Uman, 2003), sin embargo se ha encontrado en algunos lugares de Colombia, como Nechí, que estos porcentajes difieren a los de otros lugares del mundo (Younes & Torres-Sánchez, 2010).

Los procesos físicos que describen la propagación de la descarga de retorno o rayo se dividen en: 1) encendido de la descarga (*Preliminary Breakdown – PB*) 2) líder escalonado (*stepped leader – SL*), 3) proceso de enlace (*Attachment process – AP*), 4) descarga de retorno (*Return Stroke – RS*) y 5) el líder dardo (*Dart Leader – DL*). No se conoce exactamente el proceso físico mediante el cual la carga almacenada en la nube de tormenta se transfiere a la tierra en forma de rayo. Existen varias teorías que tratan de explicar las diferentes etapas de una descarga, pero hasta ahora no existe una teoría única y comprobada con la que estén de acuerdo la totalidad de los investigadores.

A pesar de las diferencias teóricas y experimentales, la mayoría está de acuerdo en que una descarga eléctrica atmosférica generalmente se compone de las siguientes cinco etapas:

1. *Encendido de la de carga (Preliminary /Breakdonw)*: Las gotas de lluvia en diferentes estados (líquido, sólido y gaseoso) interactúan y chocan entre sí, generando zonas

que se van cargando positivamente en la parte superior de las nubes de tormenta, y negativamente en la parte inferior, debido a estas zonas de cargas separadas por aire, se genera campo eléctrico del orden de 7 a 10 kV/cm (Torres-Sánchez, 2002; M A Uman, 2001). Ver Figura 4 a y b.

2. *Líder escalonado (Stepped leader)*: Es el inicio de la primera descarga de retorno y corresponde a una serie de pasos discretos de transferencia carga (10 ó más Culombios de carga negativa), que avanza desde la nube. Cada paso es del orden de 1 μ s de duración y de decenas de metros de longitud, con una pausa entre pasos de 50 μ s y una velocidad promedio de bajada de 2×10^5 m/s. Al final del proceso de encendido de la descarga se tiene un canal cargado y con una diferencia de potencial que excede la rigidez dieléctrica del aire, propiciando así la ionización. Ver Figura 4 c, d y e.
3. *Proceso de enlace (Attachment process)*: Una vez que el líder escalonado se aproxima a tierra, desde los puntos más altos o con mayor probabilidad de impacto por su forma o carga, se inicia una descarga ascendente inducida que sale al encuentro del líder escalonado descendente y en el momento en que se encuentran se inicia la descarga de retorno. Ver Figura 4 f y g.
4. *Descarga de retorno (Return Stroke)*: Cuando a unas decenas de metros sobre la tierra, una de las descargas ascendentes de la tierra hace contacto con el líder escalonado que desciende, el líder se pone a potencial de tierra, y se presenta la primera descarga de retorno, quedando el camino nube-tierra totalmente ionizado. Esta primera descarga de retorno transporta corrientes del orden de los 30 kA, dependiendo del lugar donde impacte, con un tiempo de subida de unos pocos microsegundos. Estas altas corrientes se disminuyen al 50% en aproximadamente 50 μ s, y corrientes del orden de cientos de amperios pueden fluir hasta varios cientos de microsegundos. Ver Figura 4 h.
5. *Líder dardo (Dart leader)*: Este periodo se caracteriza por tener una intensa descarga corona de las gotas de agua, debido a la propagación de la onda ionizante dentro de la nube. Los líderes dardo usualmente se propagan de manera continua, sin escalonamientos, desde la nube hasta la tierra, usando el canal pre-ionizado, si el periodo entre la descarga de retorno y el líder dardo es corto, de lo contrario el líder dardo presentará tortuosidades a medida que se acerca a tierra. El líder dardo inicializa la segunda descarga y otras descargas subsecuentes, presentándose así

más de una descarga por rayo, definido dentro de los parámetros estudiados del rayo como multiplicidad. Ver Figura 4 j.

1.3 Campos electromagnéticos generados por rayos CG

La caracterización de los campos electromagnéticos generados por CG es de gran importancia para comprender mejor el comportamiento físico de la descarga, como también para mejorar las aplicaciones en ingeniería, como el desempeño o diseños de protecciones. El conocimiento de los campos generados permite la estimación de las sobrecorrientes y sobretensiones que pueden afectar diferentes tipos de estructuras tales como las líneas de distribución.

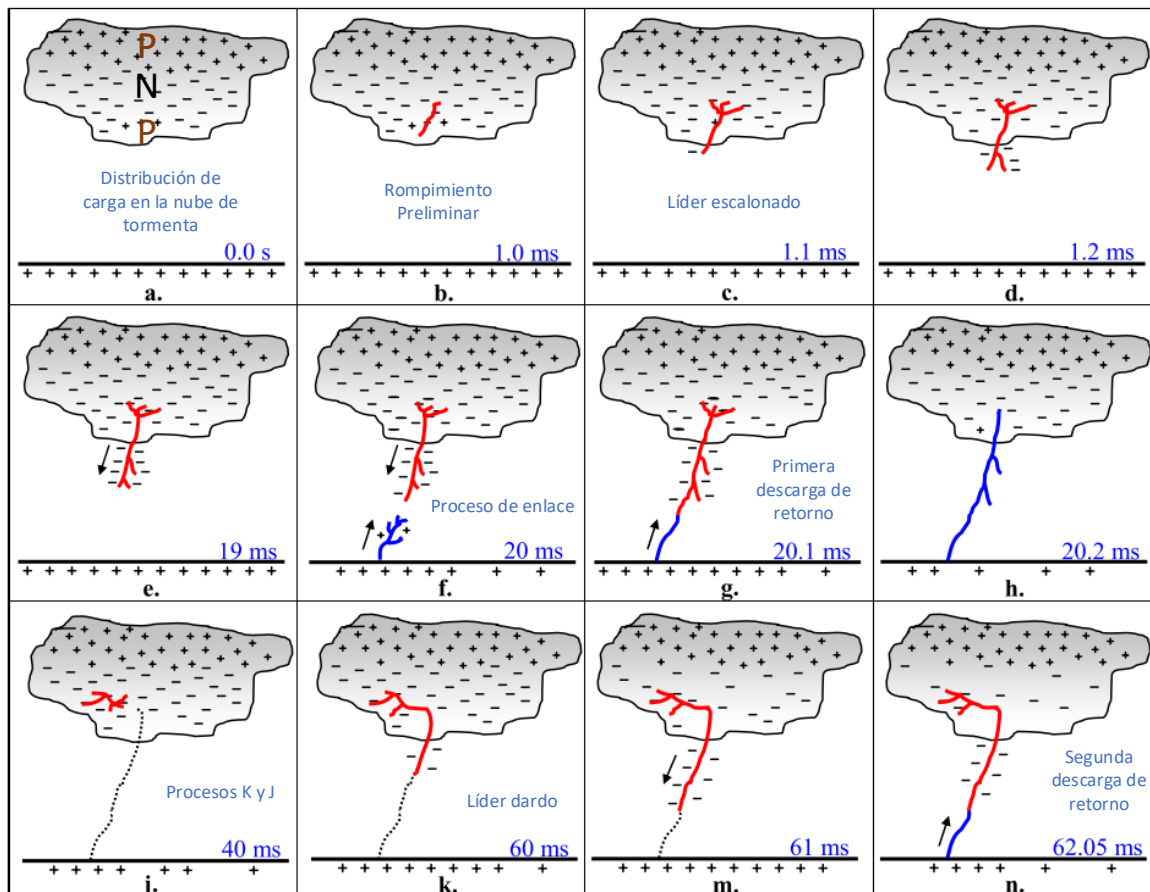


Figura 4. Proceso de formación del rayo.
Fuente: Adaptada de (Martin A. Uman, 1987)

Algunas características pueden ser identificadas por las mediciones cercanas al canal de la descarga. Por ejemplo, con mediciones de campo eléctrico es posible identificar procesos como el encendido de la descarga (PB), líder escalonado, líder dardo, corriente continua y componentes M y K. La Figura 5 muestra las señales “típicas” de campo eléctrico y magnético medidas de forma cercana a la descarga eléctrica atmosférica (distancia menor a 50 km). En la columna izquierda se muestra la señal de campo eléctrico y en la derecha las señales típicas de campo magnético. Las principales características que se pueden observar en la Figura 5 son a) un pico inicial; b) después del pico inicial viene una rampa de descenso lento que puede durar 100 μ s; c) luego en las señales lejanas (mayores a 50 km) se observa un cruce por cero, como se puede observar en la Figura 6.

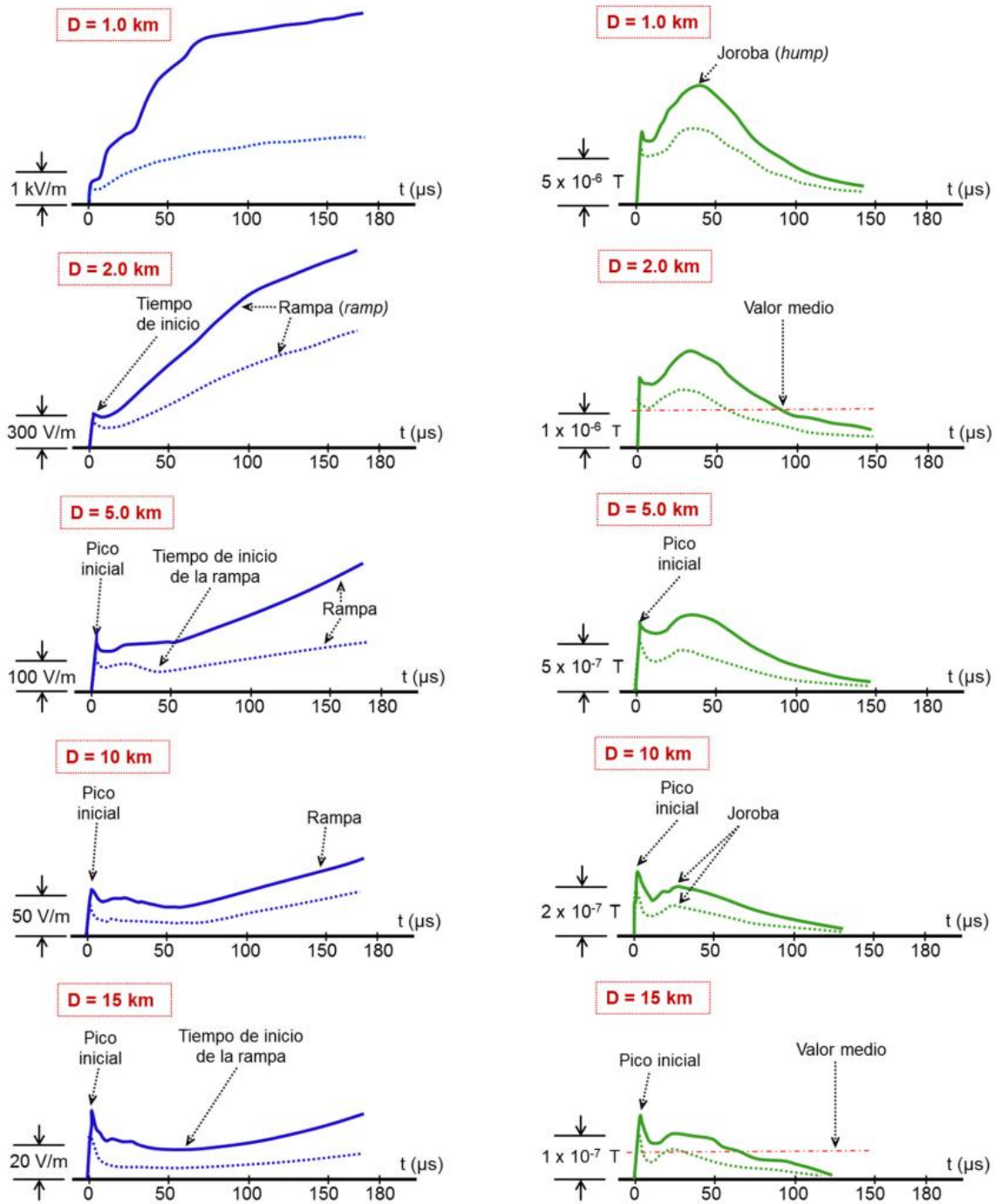


Figura 5 Señales típicas cercanas (menor a 50 km) de campo eléctrico (izquierda) y magnético para la primera (línea sólida) y subsiguientes (línea punteada) descargas de retorno.

Fuente: Tomado de (Rojas Cubides, 2018)

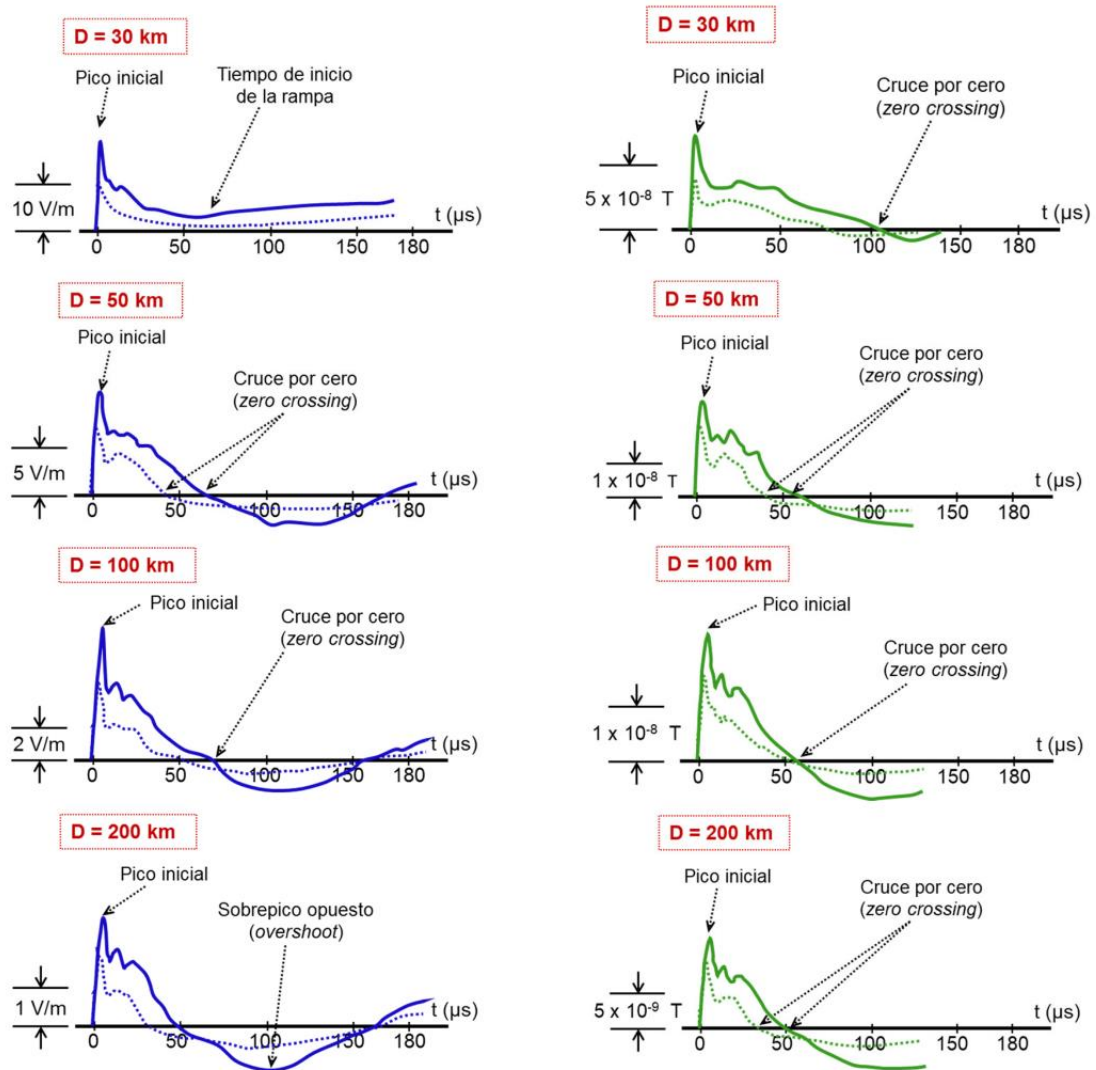


Figura 6. Señales típicas lejanas (mayores a 50 km) de campo eléctrico (izquierda) y magnético para la primera (línea sólida) y subsecuentes (línea punteada) descargas de retorno.

Fuente: Tomado de (Cubides, 2018)

1.4 Estudios recientes sobre los campos electromagnéticos radiados por rayo

Aunque no es reciente, en 1985, en zona tropical, V. Cooray por medio de una antena vertical, obtuvo señales de campo eléctrico radiado por rayo en Sri Lanka y los comparó con mediciones en otras latitudes de otros autores de la época. Este artículo es fundamental para comparar los resultados que se obtengan, pues hasta el momento es de los pocos encontrados en la literatura, que sus mediciones hayan sido realizadas en zona tropical y a su vez que hubiesen sido captados mediante una antena vertical.

En la literatura reciente encontramos estudios como los realizados en zona subtropical por la Universidad de Sao Paulo et al (Rodríguez et al. 2015). Dicha Universidad a través de su laboratorio STORM-T, desarrolló un sistema de alerta por rayos, el cual puede detectar rayos intra-nube y nube-tierra y es usado para predecir la ocurrencia de rayos nube tierra

En Colombia se ubica un estudio sobre Sistemas de Alerta de Tormentas (SAT) del año 2015 realizado por Carlos Alberto Cruz, en el marco de su tesis de maestría, el cual realizó un análisis documental del riesgo por rayo en diferentes partes del país, sin SAT y con SAT. En 2014 en su tesis de maestría, Juan Carlos Inanpués analizó la integración de los SAT en redes inteligentes.

También en 2015 el profesor de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Luis Fernando Diaz C en (Díaz Cadavid 2014), realizó una caracterización del pulso electromagnético radiado por rayo, realizando mediciones de campo magnético por medio de diferentes tipos de antenas, encontrando que la mayor parte de la energía de los pulsos que obtuvo derivados de los rayos, se encuentran en las bajas frecuencias (menores a 10kHz), lo cual se aspira comprobar.

Se han realizado varios estudios nacionales y regionales con mediciones de campo electrostático, por medio de implementaciones con molinos de campo como los realizados por Jesús López (2011) (López Trujillo 2011), Aranguren (2004, 2006, 2011), o con antenas de placas paralelas Francisco Santamaría (2006) (Santamaria-Piedrahita 2006), Herbert Rojas (2018) (Enrique and Cubides 2018) y Javier Herrera y Camilo Younes (2020) (Herrera Murcia and Velosa 2020). En (Adonis F.R. Leal et al., 2018) se

presentó y discutió un sistema de bajo costo para medir las formas de onda del campo eléctrico del rayo, así como, su calibración y un ejemplo de su aplicación a las mediciones remotas de la amplitud de la corriente del rayo en zona tropical Brasileña.

Adonis y Rakov en (Adônis Ferreira Raiol Leal et al., 2018) exponen diferentes aspectos que pueden influir en las mediciones del campo eléctrico radiado por rayo y resaltan la importancia de realizar una adecuada calibración de los sistemas cuando se requiere estimar de manera precisa la corriente del rayo. Concluyen que el factor de calibración cambiará para diferentes ubicaciones donde se instalan los sensores de campo eléctrico de iguales características constructivas. Posteriormente en (Adonis F.R. Leal et al., 2019), presentaron una metodología para estimar la distancia del rayo -CG a partir de mediciones de campo E utilizando una sola estación implementando técnicas de Machine-Learning. Éstos mismos autores en (Adonis F.R. Leal & Rakov, 2021), presentaron un nuevo enfoque para la caracterización de las formas de onda del campo eléctrico de rayos CG utilizando una base de datos con más de 7000 formas de onda de campo eléctrico RS negativas, que se registraron en Florida agrupando las características de las señales de acuerdo a la distancia de impacto (10 – 500 km).

2. Sistema de medida

En el presente capítulo se documenta el desarrollo del objetivo específico número 1, el cual consiste en el desarrollo de un sistema conformado por una antena de placas paralelas, circuito de control, osciloscopio y almacenamiento de señales de campo eléctrico radiado por rayo, con el cual se logró realizar la campaña de medición entre los meses de septiembre a diciembre del año 2020 y marzo – abril 2021.

Se utilizaron como referencia para la construcción y el desarrollo del sistema de medición de campo eléctrico, estudios reportados por la comunidad científica internacional, tales como: D. Mackerras en Australia (1985, 2009) (Mackerras, 1985; Mackerras et al., 2009), Veron Cooray en Sri Lanka (1986, 2014) (Cooray & Lundquist, 1985), Galvan y Fernando en Suecia (2000) (Fernando, 2000), Baharudin en Suecia (2014) (Zikri Abadi Baharudin, 2014), entre otros; y del ámbito local se destacan los trabajos realizados con antenas de placas paralelas al interior de los grupos de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia en sus diferentes sedes como son los realizados en Bogotá por SantaMaría (2014) (Santamaria Piedrahita, 2006), Rojas (2018) (Rojas Cubides, 2018), Niño (2019) (Niño, 2019), Granados (2019) (Granados Vivas, 2019) y en Medellín por Herrera y Younes (2020) (Herrera Murcia & Velosa, 2020).

Con el fin de tener estudios cercanos y citados en la bibliografía actual para el desarrollo del sistema de medición y captura de señales, se tomó como referencia el sistema desarrollado por Herrera y Younes (Herrera Murcia & Velosa, 2020), el cual a su vez es basado principalmente en las sugerencias y experiencias de los estudios Galván y Fernando (2000) (Fernando, 2000). Se buscó actualizar el sistema utilizando circuitos integrados y componentes comerciales ya que el integrado utilizado por las fuentes es de difícil y costosa adquisición ya que se encuentra discontinuado desde el año 2008.

El sistema de medición de campo eléctrico radiado por rayo implementado fue instalado para las campañas de medición 1 y 2, por temas de pandemia en el lugar de residencia

del autor de esta tesis, el cual se ubica al noroccidente de la ciudad de Manizales, a las afueras de la misma, dentro del área metropolitana. Las coordenadas de ubicación del sistema de medida de campo eléctrico radiado por rayo son Latitud: 5.089361°N y Longitud: $75.543087^{\circ}\text{W}$, la cota de terreno es de 1760 m.s.n.m y la altura de instalación es de 8 metros aproximadamente. En la Figura 7 se muestra la ubicación del sistema de medición en cuestión.

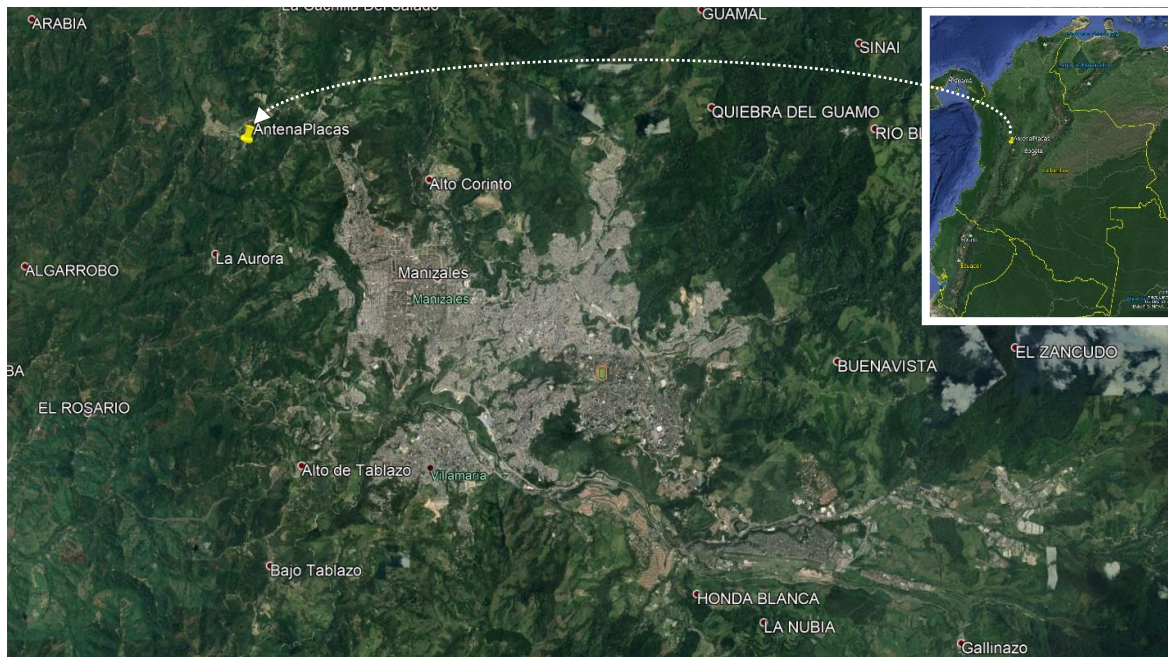


Figura 7. Ubicación sistema de medición de CE radiado por rayo
Fuente: Google Earth® – Adaptado por el autor

El sistema desarrollado se muestra en la Figura 8, el cual está compuesto por una antena de placas paralelas, cable coaxial corto, circuito electrónico (Seguidor - Buffer), fuente AC/DC (inicialmente fuente de laboratorio y posteriormente banco de baterías con carga autónoma), cable coaxial largo, osciloscopio, PC y estampa de tiempo (inicialmente servidor SNTP y posteriormente se implementó un GPS usb). En la Tabla 2 se muestran las especificaciones técnicas de los componentes que conforman la estación de medición desarrollada.

Se logró construir un sistema de medida de bajo costo con una mejora al diseño del circuito de control del sistema de medida, alimentado desde una fuente DC con baterías de plomo que permiten una autonomía de 6 horas al sistema de medida. Se logra construir un sistema de medición de CE de bajo costo, un sistema de este tipo tiene un

valor comercial del orden de las decenas de miles de dólares; el sistema construido tiene un valor que oscila entre los 1.500 y 1.200 dólares siendo el osciloscopio el que genera la diferencia entre los costos.

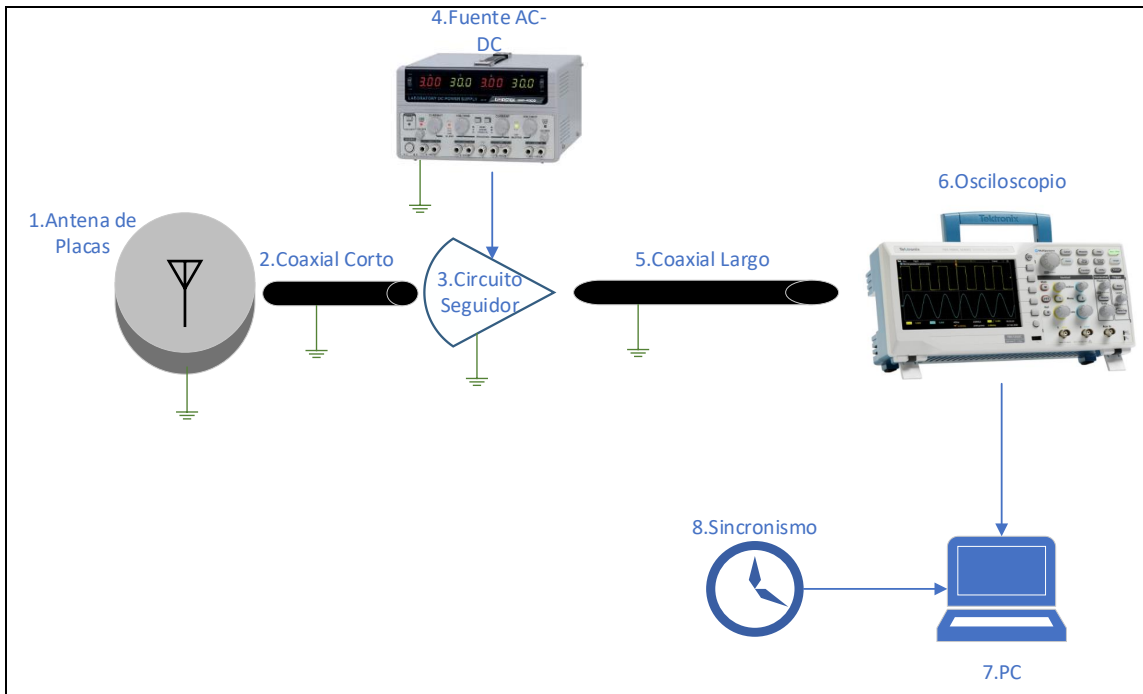


Figura 8. Componentes del sistema de medición de CE implementado para las campañas de medición 1 y 2.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Especificaciones técnicas de los componentes del SMCE

Ítem	Nombre	Especificación técnica
1.	Antena de placas paralelas	Material: Acero Inoxidable de 2mm Geometría: Circular Diámetro placas: 45cm Separación placas: 2cm
2.	Cable coaxial corto	Referencia: RG 58. Impedancia: 50Ω Capacitancia: 103pF/m Longitud: 60cm Marca: Wel Spec
3.	Circuito Electrónico	Integrado Buffer: BUF634 Ancho de Banda: 100MHz Impedancia de entrada: 180MΩ Tasa de Crecimiento: 3750V/μs Voltaje de polarización: +12V, -12V
4.	Fuente AC-DC	Campañas de medición 1 y 2 Marca: GwInstek Referencia: GPS-4303

Ítem	Nombre	Especificación técnica
		Prototipo Final Banco de Baterías controlado por Arduino. Cantidad Baterías: 4 Capacidad por Batería 4.5Ah
5.	Cable coaxial largo	Referencia: RG 58. Impedancia: 50Ω Capacitancia: 103pF/m Longitud: 8.8m Marca: Wel Spec
6.	Osciloscopios	Campaña de medición 1 Marca: Siglent Referencia: SDS2304X Canales: 4 Ancho de Banda: 300MHz Muestreo Máximo: 2GSa/s
		Campaña de medición 2 Marca: Tektronix Referencia: TBS1102C Canales: 2 Ancho de Banda: 100MHz Muestreo Máximo: 1GSa/s
		Prototipo Final Marca: Owon Referencia: VDS6102A Canales: 2 Ancho de Banda: 100MHz Muestreo Máximo: 1GSa/s
7.	Computadores	Campañas de medición 1 y 2 Marca: ASUS Referencia: ROG
		Prototipo Final Marca: Intel Referencia: Mini PC
8.	Sincronismo de tiempo	Campañas de medición 1 y 2 Servidor SNTP Servidor: co.pool.ntp.org
		Prototipo Final GPS MakerFocus Referencia: SKU:EZ-0048 PPS: SI

Fuente: Elaboración propia

2.1 Antena de placas paralelas

Para la realización del presente trabajo de tesis se implementó una antena análoga a la construida en (Herrera Murcia & Velosa, 2020). Esta antena tiene dimensiones y características similares a los desarrollados por varios autores de la comunidad científica internacional (Cooray, 2008; Edirisinghe et al., 2001; Fernando, 2000), entre otros.

La antena consiste en un arreglo dos placas paralelas al plano de tierra, circulares de 45 cm de diámetro, separadas entre si 2 cm; en acero inoxidable 304 de 2 mm de

espesor con separadores de polietileno entre las placas. En la Figura 9 se muestran vistas isométricas del modelo de la antena y en la Figura 10 se muestra un corte transversal de la antena con sus respectivas dimensiones y algunos detalles constructivos

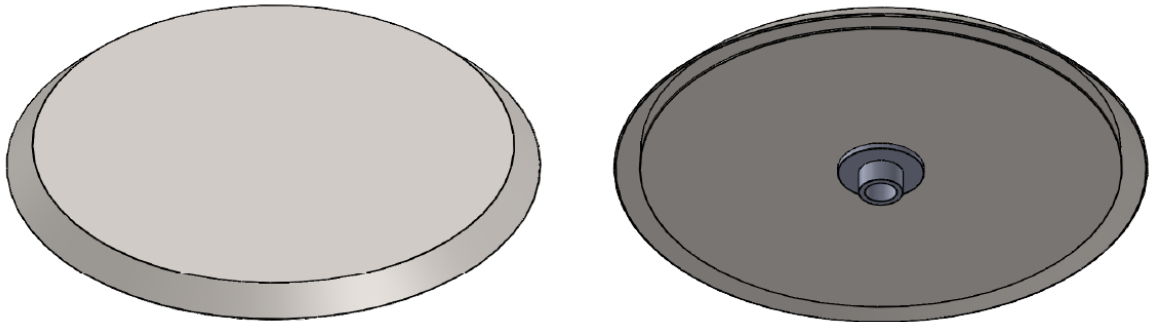
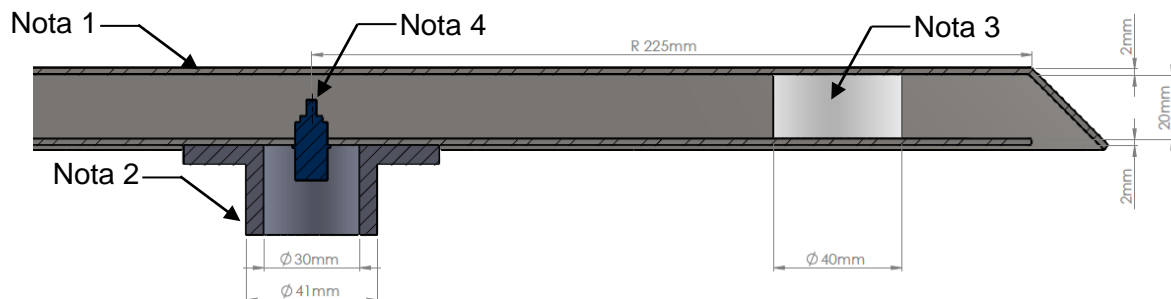


Figura 9. Vistas de la antena de medición de campo eléctrico de placas paralelas diseñada.

Fuente: Elaboración propia



Nota 1: Material de construcción: acero inoxidable 304.

Nota 2: Acero Inoxidable.

Nota 3: Material: polietileno UHMW.

Nota 4: Conector BNC. El pin central del conector fue conectado a la placa superior.

Figura 10. Corte transversal antena de placas paralelas.

Fuente: Elaboración propia

En el caso de las mediciones del campo eléctrico generado por rayo realizadas mediante el uso de una antena de placas paralelas, es aplicable la teoría cuasiestática debido a que la longitud de onda de la señal medida es mucho más grande que el tamaño de la antena. Por tanto, se puede utilizar la Ley de Gauss, que vincula la carga en una región o en una superficie al campo eléctrico. (Edirisinghe et al., 2001)

De la ley de Coulomb se tiene,

Campo Eléctrico $E = \frac{F}{Q} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^2}$ (1)

Densidad de Flujo Eléctrico $D = \frac{Q}{4\pi r^2} = E\epsilon_0\epsilon_r$ (2)

De acuerdo con la Ley de Gauss,

$$\int D \cdot ds = Q \rightarrow D \cdot S = Q \quad \therefore S \text{ es el área de la placa} \quad (3)$$

Reemplazando en (2),

Campo Eléctrico Normal $E_n = \frac{Q}{\epsilon_0\epsilon_r S}$ (4)

La diferencia de potencial entre la placa y tierra es:

$$V_g = - \int E_n \cdot dx = \frac{Q \cdot d}{\epsilon_0\epsilon_r S} \rightarrow V_g = E_n \cdot d \quad (5)$$

Lo anterior indica que el voltaje V_g es proporcional al cambio en el campo eléctrico normal a la antena.

Dado que la antena se comporta por un capacitor,

$$Q = V_g \cdot C \quad \& \quad Q = \int i \cdot dt \quad (6)$$

Reemplazando en (4)

$$V_g = \frac{\epsilon_0\epsilon_r S}{C} \cdot E_n$$

La diferencia de potencial entre la placa y tierra depende de la componente normal del campo eléctrico.

La capacitancia de la antena está dada por:

$$\text{Capacitancia Antena Placas} \quad C = \frac{Q}{\varepsilon_0 \varepsilon_r S} \quad (7)$$

En función de sus geometría y dimensiones, la capacitancia tiene un valor teórico dado por:

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} \quad (8)$$

$$\varepsilon = \text{Permetividad de aislante} = k * \varepsilon_0 \therefore k = 1 \text{ aire y } \varepsilon_0 = 8.854 * 10^{-12} \frac{F}{m}$$

$$A = \text{Área de las placas y } d = \text{Separacion entre placas}$$

El diámetro de la antena de placas es de 45cm y su separación es de 2cm por lo tanto se tiene una capacitancia calculada de 70.4pF.

2.2 Circuito Electrónico

Para el correcto diseño del dispositivo electrónico debe realizarse un adecuado acople de impedancias, lo cual se logra con la utilización del integrado BUF634, el cual además de seguir la señal con ganancia unitaria, al estar entre la antena y el osciloscopio, se encarga de acoplar la impedancia de la antena, con la impedancia de entrada del osciloscopio, mediante la selección de componentes pasivos, con el fin de minimizar reflexiones y/o distorsiones de las señales capturas. El integrado propuesto es una alternativa comercial y de fácil adquisición al integrado LH0033, el cual fue propuesto por V. Cooray (Cooray, 2008) utilizado internacionalmente por un gran número de autores y en el ámbito local por Herrera y Younes en (Herrera Murcia & Velosa, 2020), este integrado no fue posible implementarlo ya que fue descontinuado por el fabricante. También se ha utilizado el integrado BUF602 en Colombia por Rojas y otros autores pertenecientes a la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá (Niño, 2019; Rojas Cubides, 2018; Santamaria Piedrahita, 2006), a este integrado el fabricante cambió las

características de alimentación cambiando de +-12Vcd a +-6Vdc, por lo cual no fue posible utilizarlo para el propósito de este trabajo de tesis.

Debido a que el integrado LH0033 como se comentó anteriormente fue discontinuado y por lo tanto su adquisición es difícil y costosa, se decidió buscar una actualización con componentes comerciales buscando una similitud en sus características técnicas y comportamiento. Se realizaron pruebas con los integrados BUF6534, BUF602, MSK0033, OP633, LT1815, LMH6559 y OPA354, encontrando un comportamiento aceptable con el BUF634. En términos de ancho de banda pues a pesar de tener un ancho de banda menor al LH0033, es adecuado dado que para el propósito de esta tesis la mayor parte de la información del fenómeno del rayo se encuentran por debajo del límite de diseño del integrado seleccionado. En cuando a impedancias de entrada y salida se tiene un valor alto de impedancia de entrada y un valor bajo de impedancia de salida, con el fin de no tener distorsión en las señales capturadas. En términos de tensión de alimentación, se tienen mejores características que los otros dispositivos probados. En la Tabla 3 se muestra un resumen de las principales características de los integrados mencionados extraídas de sus hojas de datos.

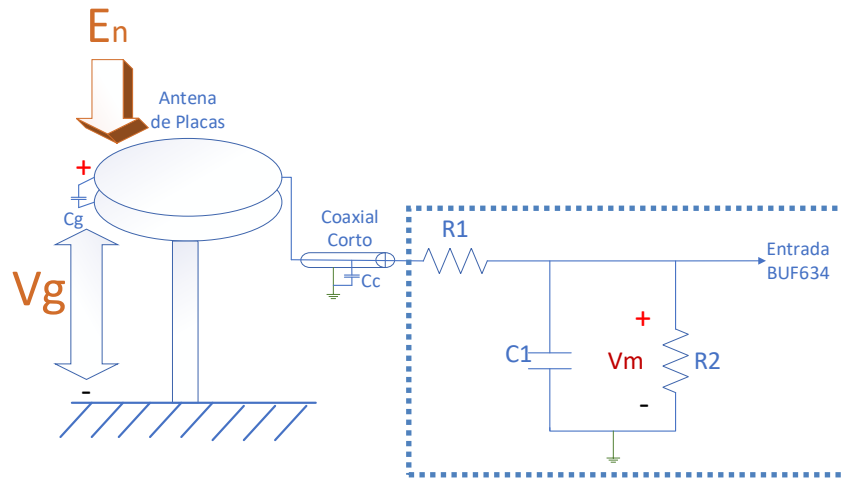
Tabla 3. Características técnicas principales integrados seguidores

Integrado	LMH0033	BUF602	BUF634	MSK0033	OP633	LT1815	LMH6559	OPA354
Ancho de Banda	1000MHz	1000MHz	210 MHz	140MHz	260Mhz	220MHz	1750MHz	1000MHz
Rin	1.00E+11	1M	180M	1.00E+12	1.5M	5M	200k	1.00E+13
Rout	6	1.4	7		5	0.2	1.2	0.05
Max Vs+	12	6	18	20	12	5	5	5.5
Min Vs-	-12	-6	-18	-20	-12	-5	-5	-2.5
Slew Rate	1500V/ms	8000V/ms	3750V/μs	1500V/μs	2500V/ms	1500V/μs	4580V/μs	150 V/μs

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 11 se muestra el diagrama de bloques correspondiente a la etapa de entrada del sistema implementado hasta el circuito electrónico (región punteada) y en la Figura 12 se muestra su circuito equivalente. La componente vertical del campo eléctrico E_n representa la componente vertical del campo eléctrico radiado por rayo. La tensión inducida entre la placa superior y tierra es V_g , y C_g es la capacitancia de la antena, calculada en el apartado anterior.

Figura 11. Diagrama de bloques etapa de entrada del sistema de medida



Fuente: Elaboración propia

Entre la antena de placas y el circuito electrónico se conecta un cable coaxial corto (60 cm), dicho cable es de marca Wel Spec® y tiene una capacitancia por unidad de medida de 103 pF/m, por lo que se espera una capacitancia de 60 pF aproximadamente en dicho cable coaxial, representado como C_c en las figuras Figura 11 y Figura 12. Los componentes pasivos R_1 , C_1 y R_2 son conectados a la entrada del seguidor BUF634, cuyos valores se especificarán a continuación: C_1 es el condensador utilizado como elemento eléctrico para medir el campo eléctrico a través de la medición de los cambios en la diferencia de potencial V_g entre la antena de placas paralelas y el plano de tierra.

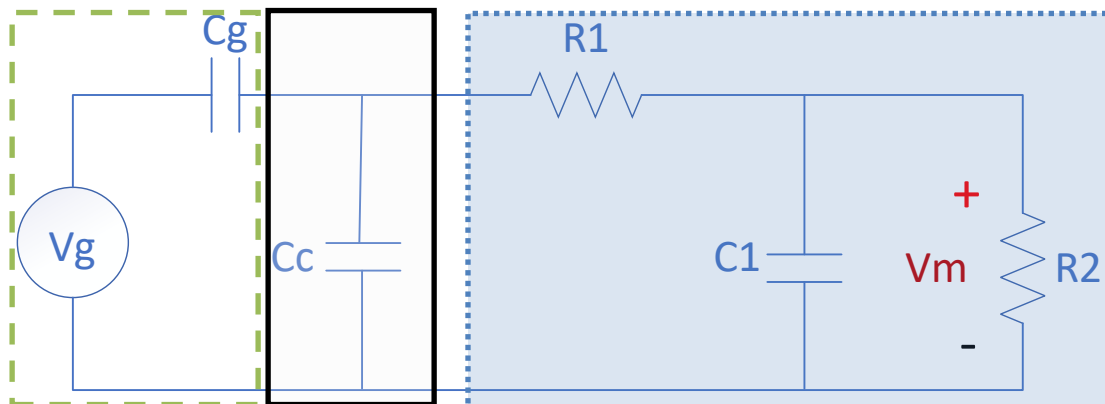


Figura 12. Circuito Equivalente Antena, Cable Coaxial corto y Etapa de entrada circuito seguidor

Fuente: Elaboración propia

Se utilizó un condensador C1 de 50 pF el cual se conecta en paralelo con una resistencia R2 de alto valor que controla la constante de tiempo de caída $T=C1.R2$. Dado que la impedancia de entrada del amplificador de búfer es muy alta (del orden de 180 MΩ), se utilizó una resistencia de 10 MΩ en R2. La resistencia R1 de 50 Ω se utiliza en la entrada del circuito eléctrico para acoplar la impedancia característica del cable coaxial que une la antena y el circuito eléctrico con el fin de evitar reflexiones en las señales capturadas.

Ahora, según el análisis del circuito equivalente de Thevenin se obtiene la relación entre la señal de salida V_m y la señal de entrada V_g ,

$$\text{Ganancia} \quad \frac{V_m}{V_g} = \frac{sC_g R_2}{1 + s(R_1 + R_2) \cdot (C_g + C_c) + sF_1} \quad (9)$$

$$F_1 = RC[1 + sR_1(C_g + C_c)], \text{ con } s = 2\pi f \quad (10)$$

$$\text{Constante Tiempo decaimiento} \quad \tau = (C_1 + C_g + C_c) \cdot R_2 \quad (11)$$

Reemplazando valores en (11), tenemos una constante de tiempo de 1.8 ms.

La Figura 13 muestra el diagrama de los componentes del sistema de medida desde la antena de placas hasta la entrada del osciloscopio haciendo uso del dispositivo tipo búfer BUF634.

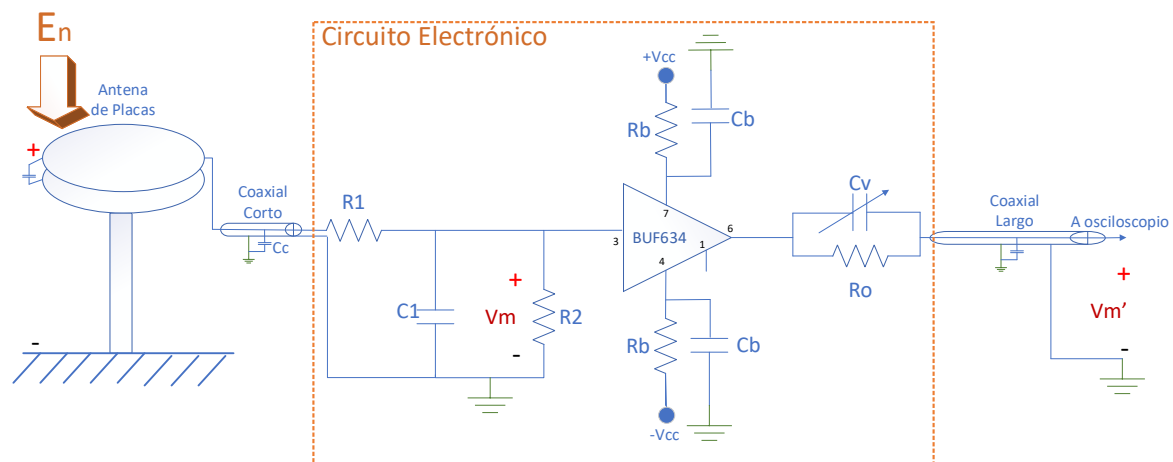


Figura 13. Diagrama del circuito electrónico BUF634
Fuente: Elaboración propia

2.2.1 Diseño de la tarjeta de circuito impreso

Se siguieron las recomendaciones que el fabricante Texas Instrument® plasma en la hoja de datos del integrado BUF634 (Instrument, 2019), algunas de las principales características se muestran en la Tabla 4. El circuito y sus componentes se muestra en la Figura 13, las conexiones de la fuente de alimentación se conectan con dos condensadores cerámicos de alta frecuencia ($10 \mu\text{F}$, C_b en la Figura 13). Se colocaron lo más cerca posible los pines de la fuente de alimentación del Integrado búfer para el desacoplamiento de alta frecuencia. Para proteger el circuito de daños debido a corrientes excesivas, se agregó una resistencia en serie con los pines de la fuente de alimentación (resistencias de 100Ω : R_b en la Figura 13). Con el fin de evitar reflexiones y distorsiones derivadas del comportamiento de los cables coaxiales con las componentes de alta frecuencia, es importante hacer coincidir la carga, con la impedancia característica del cable coaxial. Se usó una resistencia de 43Ω (R_o en la Figura 13) como la resistencia en serie a la salida del búfer, dado que la impedancia de salida del BUF634 es 7Ω (configuración pin 1 desconectado para un BW de 35 MHz), la resistencia de salida total del circuito electrónico es de 50Ω . Por lo tanto, podemos usar fácilmente un cable coaxial de 50Ω como línea de transmisión de señal para enviar las señales a la unidad de grabación. Para optimizar la respuesta de pulso de los circuitos, se conectó un condensador variable de 60 pF (C_v en la Figura 13) en paralelo con la resistencia de salida R_o .

Una vez calculados y probados los componentes electrónicos se procedió a realizar la fabricación de la tarjeta de circuito impresa del circuito seguidor; en la Figura 14 se muestra el layout con sus pistas y capas, y en la Figura 15 se muestra una fotografía del circuito con sus componentes soldadas.

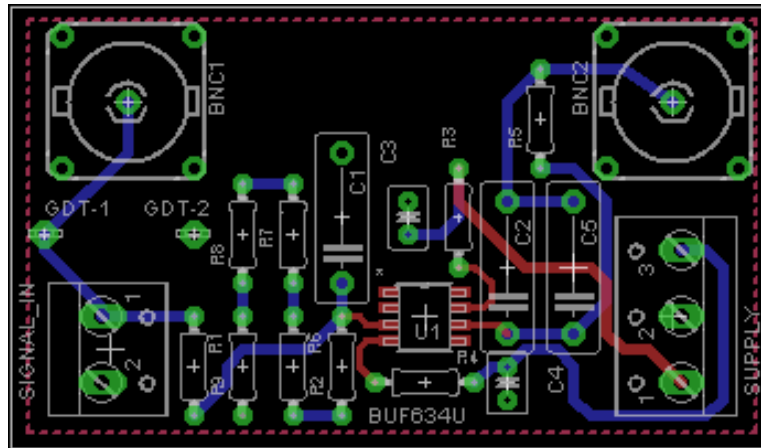


Figura 14. Layout para fabricación de PCB BUF634
Fuente: Elaboración propia

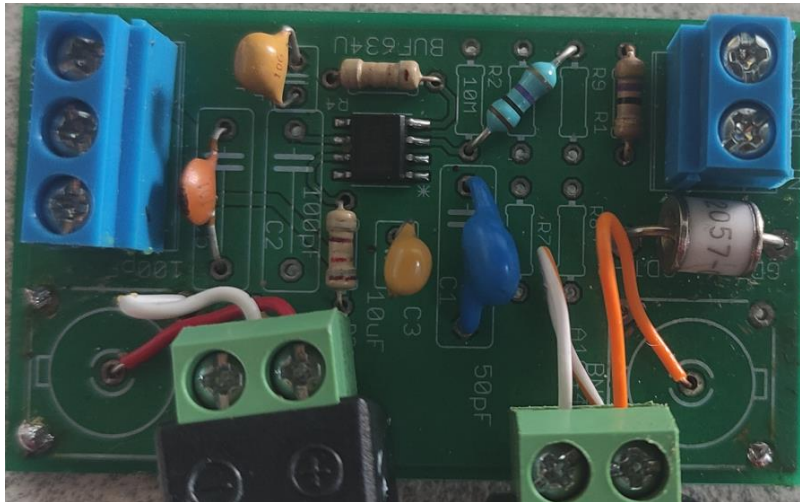


Figura 15. PCB para el BUF634 con sus componentes
Fuente: Elaboración propia

2.3 Equipos de adquisición.

Debido a que la presente tesis tiene dentro de sus objetivos la implementación de un dispositivo de bajo costo, se han utilizado para llegar a la meta varios dispositivos de captura. El primero de ellos fue un osciloscopio Siglent SDS 2304X (ver Figura 16) de cuatro canales, un ancho de banda de 300 MHz, una frecuencia de muestreo máxima de 2 GSa/s y una impedancia de entrada conformada por una resistencia de 1 MΩ en paralelo con una capacitancia de 18 pF, equipo facilitado por el laboratorio de electricidad

y electrónica de la Sede Manizales. Con este dispositivo se logró llevar a cabo la configuración y pruebas iniciales del sistema de medida construido, así como la primera campaña de medición desarrollada entre septiembre y diciembre de 2020.

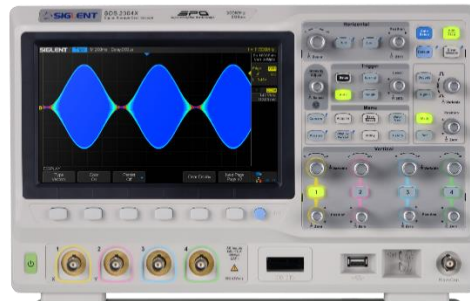


Figura 16. Equipo Siglent 2304X facilitado por laboratorio UNAL Manizales

Derivado de la participación en el proyecto Hermes 50922 se logró obtener apoyo económico para la presente tesis, y con dichos recursos se adquirieron dos osciloscopios económicos, el primero de ellos es un osciloscopio Tektronix TBS1102C mostrado en la Figura 17, el cual tiene dos canales y posee un ancho de banda de 100 MHz, una frecuencia de muestreo máxima de 1 GSa/s y una impedancia de entrada conformada por una resistencia de 1 M Ω en paralelo con una capacitancia de 14 pF. Con este equipo se realizó la segunda campaña de medición, la cual fue llevada a cabo durante los meses de marzo y abril de 2021.



Figura 17. Equipo Tektronix TBS1102C adquirido para el proyecto Hermes 50922

El segundo equipo de adquisición adquirido fue un osciloscopio de PC marca OWON de referencia VDS6102A (ver Figura 18), el cual tiene iguales características en cuanto a número de canales, ancho de banda y frecuencia de muestreo que el Tektronix anteriormente referenciado. Tiene una impedancia de entrada conformada por una resistencia de 1 M Ω en paralelo con una capacitancia de 15 pF. Este equipo es más

sencillo y económico que el Tektronix de conexión tipo USB buscando que el sistema en conjunto tenga un costo menor.



Figura 18. Equipo OWON VDS6102 adquirido para el proyecto Hermes 50922

En la Tabla 4 se muestra el resumen de las principales características técnicas de los equipos de adquisición usados en el presente trabajo de tesis.

Tabla 4. Resumen equipos de adquisición usados

Marca	Siglent	Tektronix	Owon
Referencia	SDS2304X	TBS1102C	VDS6102A
Canales	4	2	2
Ancho de Banda	300 MHz	100 MHz	100 MHz
Muestreo Máximo	2 GSa/s	1 GSa/s	1 GSa/s
Costo (USD)	Préstamo	\$ 1.030	\$ 603
Usado en	Campaña de Medición 1	Campaña de Medición 2	Prototipo Final

Fuente: Elaboración propia

2.4 Comportamiento del circuito electrónico

Con el fin de evaluar el comportamiento tanto del circuito aislado sin cables coaxiales como del sistema completo, se realizaron las pruebas que se describen a continuación, las cuales en primera instancia se analiza el comportamiento en frecuencia del circuito electrónico sin cables coaxiales, la segunda incorpora los cables coaxiales y la tercera muestra la respuesta del sistema ante impulsos rápidos de tensión.

2.4.1 Prueba del circuito electrónico sin cables coaxiales

La prueba se realizó al circuito electrónico excluyendo los cables coaxiales, utilizando como señal de entrada una onda cuadrada de 10 Vpp, variando la frecuencia en un rango ente 1 Hz y 25 MHz. El equipo utilizado para prueba fue un generador de funciones marca GwInstek AFG-2125 de 25 MHz de ancho de banda y una frecuencia de muestreo de 20 MSaA/s. Un esquema del montaje se muestra en la Figura 20 y en la Figura 22 se muestran las gráficas de Magnitud de la relación V_{in}/V_{out} (Ganancia) y su respectiva fase, ambas en función de la frecuencia.

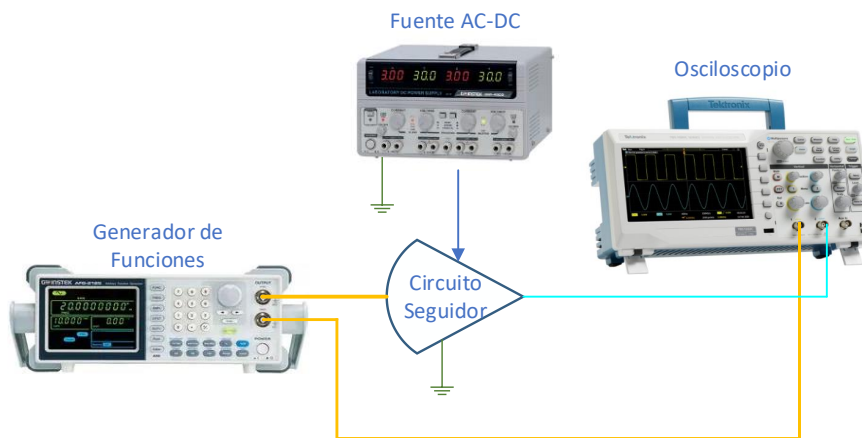


Figura 19. Esquema de prueba circuito electrónico sin cables coaxiales
Fuente: Elaboración propia

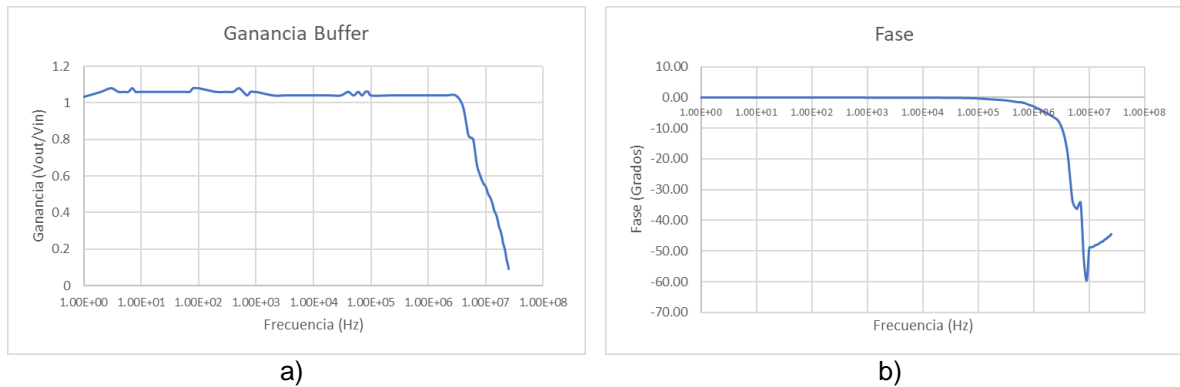


Figura 20. Comportamiento en la frecuencia de circuito electrónico. a) Ganancia, b) Fase
Fuente: Elaboración propia

De las pruebas realizadas y sus resultados pudimos evidenciar que el circuito tiene una ganancia cercana a la unidad en el rango de frecuencias inferiores a 3 MHz (punto en el cual se inicia la atenuación en la señal de salida) con una media de 1.06 y una

desviación estándar de 1.36% para el rango de frecuencia mencionado; por su parte en el comportamiento de fase del circuito se tiene un comportamiento lineal y sin desfase considerable para las frecuencias inferiores a 1 MHz, con una media de 0.3° y una desviación estándar de 69.04% para las frecuencias menores a 1 MHz.

2.4.2 Comportamiento en frecuencia del sistema de captura

Al igual que en apartado anterior se realizó una prueba de similares características, consistente en la inyección de una señal de prueba cuadrada de 10 Vpp, variando la frecuencia con el fin de observar el comportamiento del sistema de captura incluyendo los cables coaxiales. El esquema implementado para la prueba se muestra en la Figura 21.

Con el fin de tener una equivalencia y representar el comportamiento de la antena, se utilizó una capacitancia de 70 pF (C en la Figura 21), en reemplazo de la antena.

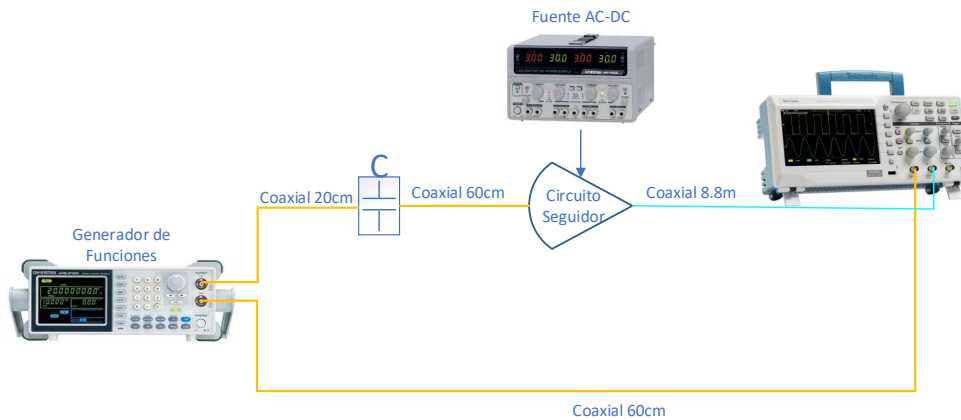
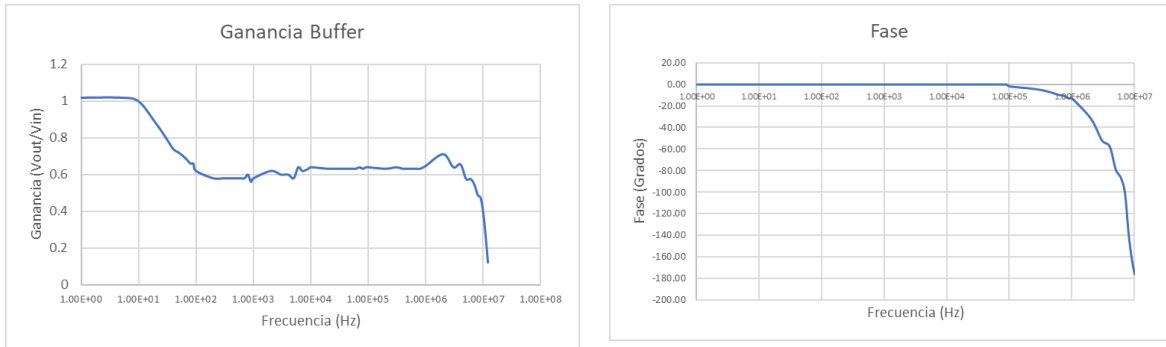


Figura 21. Esquema de prueba del sistema de captura
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 22 se muestra el comportamiento obtenido al aplicar la prueba, encontrando que el sistema tiende a atenuar la señal inyectada, esto se debe a que el circuito RC formado por la resistencia de 10 M Ω y la capacitancia equivalente vista a la entrada del integrado BUF634 (C_g+C_c+C) actúan como una carga para el generador de señales. Se observa un comportamiento lineal en la relación V_{out}/V_{in} entre los 100 Hz y 1 MHz, cuyo valor promedio es de 0.617 y una desviación estándar de 2.51% para el rango de frecuencias mencionado. El valor promedio de relación V_{out}/V_{in} es el factor del circuito

electrónico (deff). En el comportamiento de fase, se observa un comportamiento lineal en el mismo rango de frecuencias que para la ganancia, con un valor promedio de 1.69° .



a)

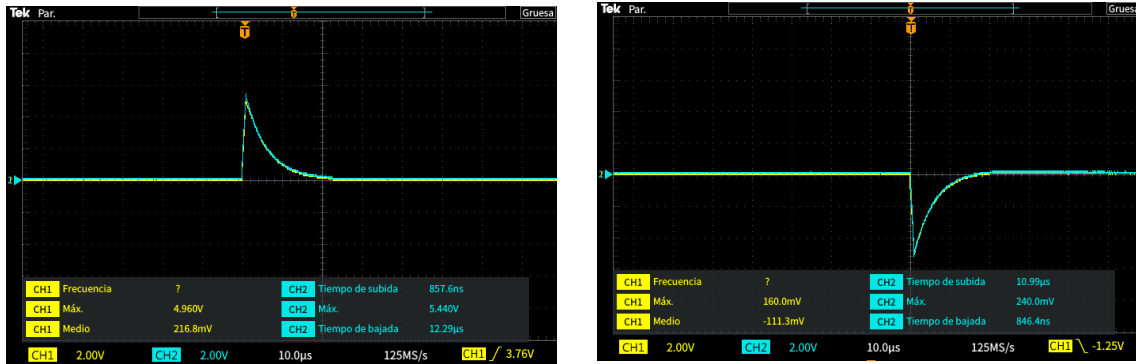
b)

Figura 22. Comportamiento en la frecuencia de sistema de captura. a) Ganancia, b) Fase
Fuente: Elaboración propia

2.4.3 Comportamiento del sistema de captura ante impulsos rápidos

Utilizando el mismo esquema para la prueba anterior, se realizaron pruebas para determinar el comportamiento del sistema de captura incluyendo los equipos de registro y cables coaxiales, inyectando impulsos rápidos de tensión de características temporales similares a los impulsos generados por rayos nube-tierra.

Utilizando la función USB del generador de señales, se generan impulsos de tensión con un valor pico de 5 V, un tiempo de subida teórico de 800 ns y un tiempo de cola teórico (al 50%) de 12 μ s. Durante la prueba se inyectaron impulsos de diferente amplitud y polaridad y se analizó el valor pico, el tiempo de frente y el tiempo de cola de las señales de entrada (in) y salida (out) del sistema de medición.



a) b)
 Figura 23. Respuesta del circuito ante Impulsos rápidos. Línea Cían: Entrada, Línea Amarilla: Salida, a) Positivo, b) Negativo
 Fuente: Elaboración propia

2.5 Calibración del sistema

La calibración de la antena y el sistema completo se realizó en el sitio donde se encuentra instalada, con el fin de tener un sistema calibrado y confiable, reduciendo posibles inconvenientes que pueda ocasionar calibrar en laboratorio e instalar en una ubicación con condiciones no ideales.

Se aplicaron impulsos rápidos de tensión a un arreglo de placas paralelas entre las cuales fue ubicada la antena de medición de campo eléctrico. En este caso se utilizaron valores de tensión no superiores a los 10 Vpp, puesto que éste es el valor máximo del generador de señales disponible. El arreglo de placas se ubicó lo más cerca posible a la antena; esto con el fin de generar tensiones inducidas de magnitud representativa debidas a los campos eléctricos generados. Un esquema del montaje de calibración se muestra en la Figura 24.

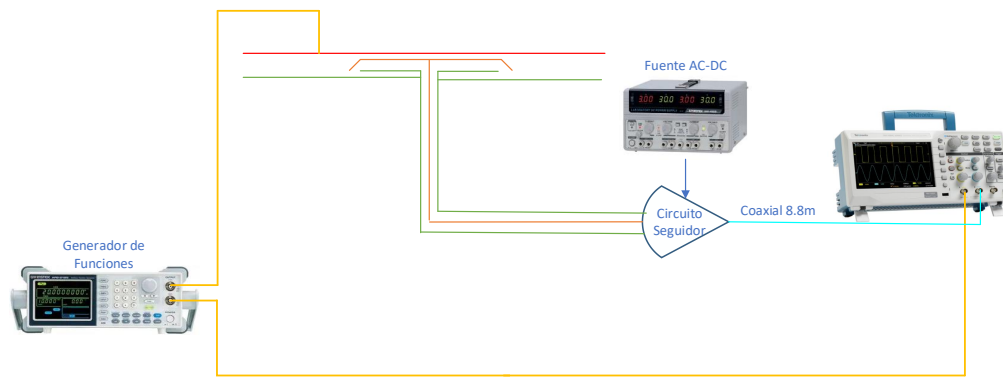


Figura 24. Esquema del montaje de calibración
Fuente: Elaboración propia

Las formas de las ondas de tensión aplicadas fueron similares a las inyectadas en la prueba de comportamiento del circuito ante impulsos rápidos, cuyos tiempos de frente fueron del orden de los 800 ns, típicos en fenómenos asociados a descargas eléctricas atmosféricas. La Figura 25 se muestran dos de las formas de onda capturadas en el proceso de calibración.



a)

b)

Figura 25. Respuesta del sistema ante Impulsos rápidos. Línea Cían: Entrada, Línea Amarilla: Salida, a) 5 V, b) 2.5 V
Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5 se muestra el listado de mediciones realizadas en el proceso de calibración.

Tabla 5. Resultados de la prueba de calibración del SMCE

Tensión en la Fuente (Vp)	Tensión en la Entrada (Vp)	Tensión en la Salida (Vp)
0.25	0.36	1.56
0.75	0.84	1.7
1.25	1.4	2.08
1.75	1.92	2.24
2.25	2.44	2.44
2.75	3.12	2.56
3.25	3.68	2.8
3.75	4.16	3.08
4.25	4.72	3.16
4.75	5.2	3.28

Fuente: Elaboración propia

Una vez tabulados los datos, se procede a realizar la gráfica Vin vs Vout con el fin de determinar el factor del sistema.

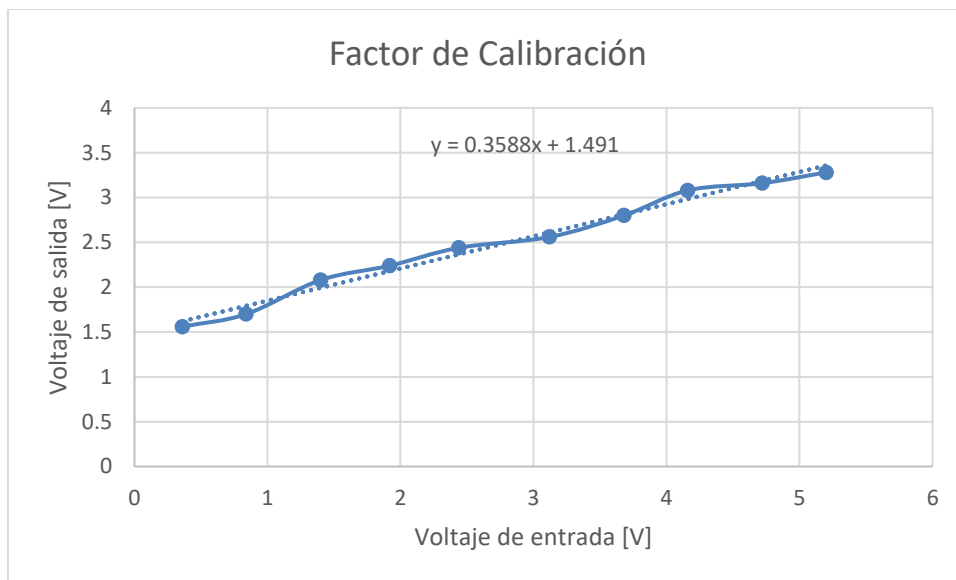


Figura 26. Gráfica Factor de Calibración

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados de las pruebas el factor de calibración inicial (F_e) corresponde a 0.359V por cada voltio de entrada.

Aplicando las recomendaciones de (Fernando, 2000), se procede a calcular el factor del SMCE.

$$\text{Factor del sistema preliminar} \quad F_{\text{sistema}} = \frac{1}{F_e} * \frac{1}{d_{\text{eff}}} \quad (12)$$

Reemplazando valores en (12), tenemos una Factor de sistema preliminar de 4,517. Debido a que el presente proyecto realizó una calibración en sitio mediante inyección impulsos de tensión, desconociendo el valor de CE producido por estos impulsos, la metodología usada contempló un ajuste a dicho factor en la etapa de caracterización de acuerdo a la distancia y teniendo en cuenta las formas de onda típicas de los CE radiados por rayo sugeridas inicialmente por Uman y otros desde 1979 (Y. T. LIN, M. A. UMAN, J. A. TILLER, 1979). Luego de realizar una serie de pruebas se asumió afectar el factor de sistema preliminar por un factor de 5, quedando un factor de sistema de 22.585, con el cual las amplitudes de los eventos muestran concordancia con las formas de onda base mencionadas. Es importante para trabajos futuros realizar un proceso de calibración con impulsos de CE de valores conocidos, con el fin de tener un mejor reflejo del evento, siendo de mayor importancia en los casos en los cuales se requiera conocer con mayor exactitud la corriente del canal del rayo.

Finalmente, en la Figura 35 se presenta el diagrama de flujo del sistema en cual se sintetizan los pasos realizados para la adquisición y procesamiento de las señales, en el Capítulo 3 se amplía el detalle de las etapas realizadas.

2.6 Fuente de alimentación desarrollada

En etapas iniciales del proyecto se identificó un gran inconveniente con el sistema cuando se presentaban descargas cercanas o cuando por alguna otra razón se suspendiera el servicio de energía de la red de distribución, pues la fuente que alimentaba en su momento el circuito y el osciloscopio se apagaban.

Con el fin de construir un dispositivo que solucionara estos inconvenientes para el sistema, se diseñó y construyó un sistema de alimentación ininterrumpida, la cual consta de cuatro baterías de Plomo-Acido de 12V y dos cargadores para este tipo de baterías, controladas por Arduino y una serie de relés que le permiten conmutar la tensión de salida hacia las baterías que se encuentren cargadas y suministrar carga a las que lo requieran, garantizando siempre el suministro de tensión de $\pm 12V$ al circuito de acople y con una salida adicional de $+12V$ a la cual se conecta un Mini-PC Intel con su respectiva pantalla. Al sistema requerir de tensión de polaridad negativa, se utilizó un módulo TC7660S, el cual es un convertor de voltaje (Charge Pump) y permite suministrar $-12V$ al circuito de acople.

En la Figura 27 se muestra el esquemático del circuito y en la Figura 28 se muestra una fotografía del módulo construido. En el "Anexo A: Modulo de alimentación ininterrumpida" se documentan los detalles del diseño, código Arduino y se plasman algunas precauciones de montaje y mantenimiento.

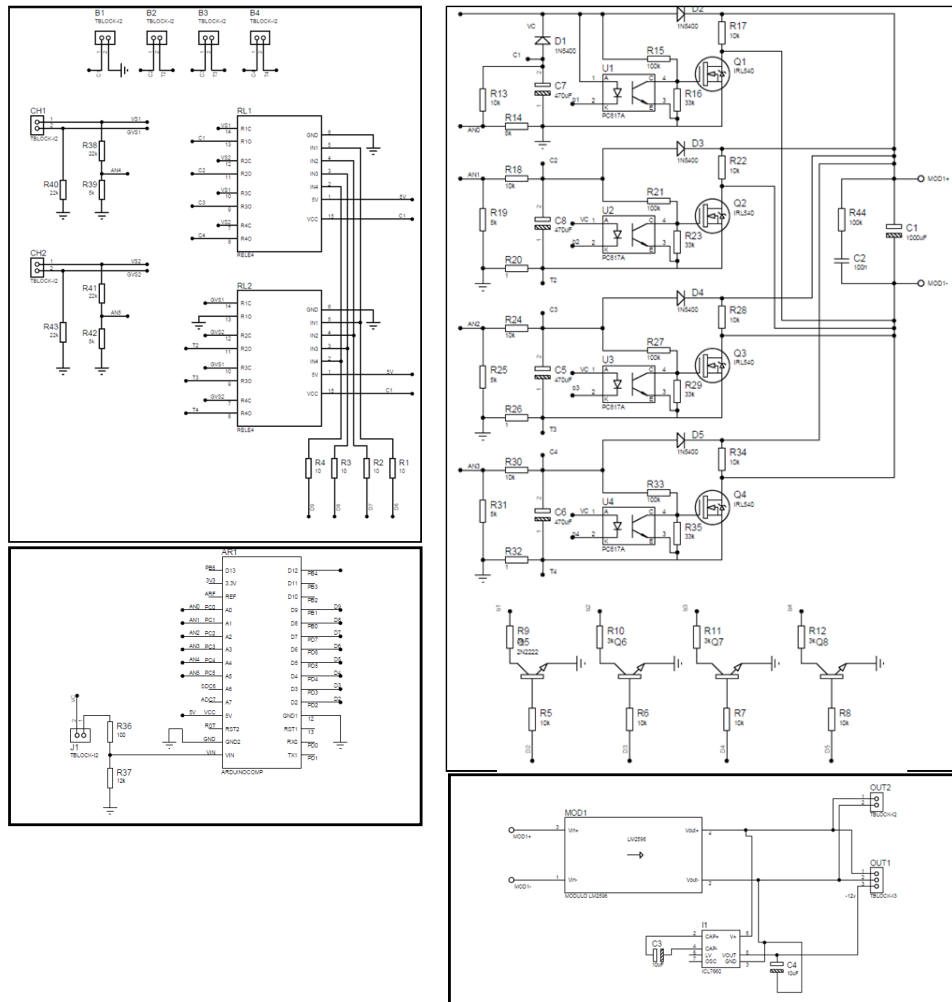


Figura 27. Esquemático de la fuente de alimentación ininterrumpida
Fuente: Elaboración propia

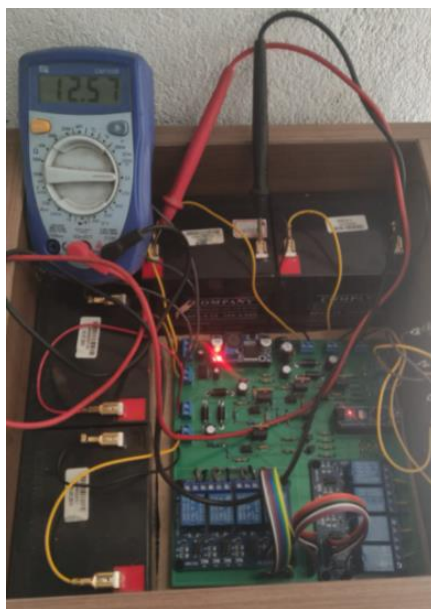


Figura 28. Fotografía del sistema de alimentación ininterrumpida
Fuente: Elaboración propia

2.7 Sitio de instalación

Como se mencionó al principio de este capítulo, el sistema de medición de campo eléctrico radiado por rayo implementado fue instalado para las campañas de medición 1 y 2, al noroccidente de la ciudad de Manizales, a las afueras de la misma, en una vivienda rural con un piso por el frente y tres pisos por la parte trasera. Las coordenadas de ubicación del sistema de medida de campo eléctrico radiado por rayo son Latitud: 5.089361°N y Longitud: $75.543087^{\circ}\text{W}$, la cota de terreno es de 1760 m.s.n.m y la altura de instalación sobre el terreno es de 8 metros aproximadamente, ya que se encuentra ubicada en la parte posterior de la vivienda a tres pisos del nivel del suelo. La antena lleva instalado muy cerca de ella el circuito seguidor de acople.

En inmediaciones a la antena no hay construcciones de mayor altura que puedan interferir o alterar las mediciones, existe un cultivo de eucaliptos de altura considerable a unos 20 metros de la vivienda en dirección hacia noroccidente. En la Figura 29 se muestra una vista isométrica de la zona donde puede observarse la topografía quebrada y la vegetación abundante de la zona y en la Figura 30 se muestra una vista en planta de la ubicación de la antena.

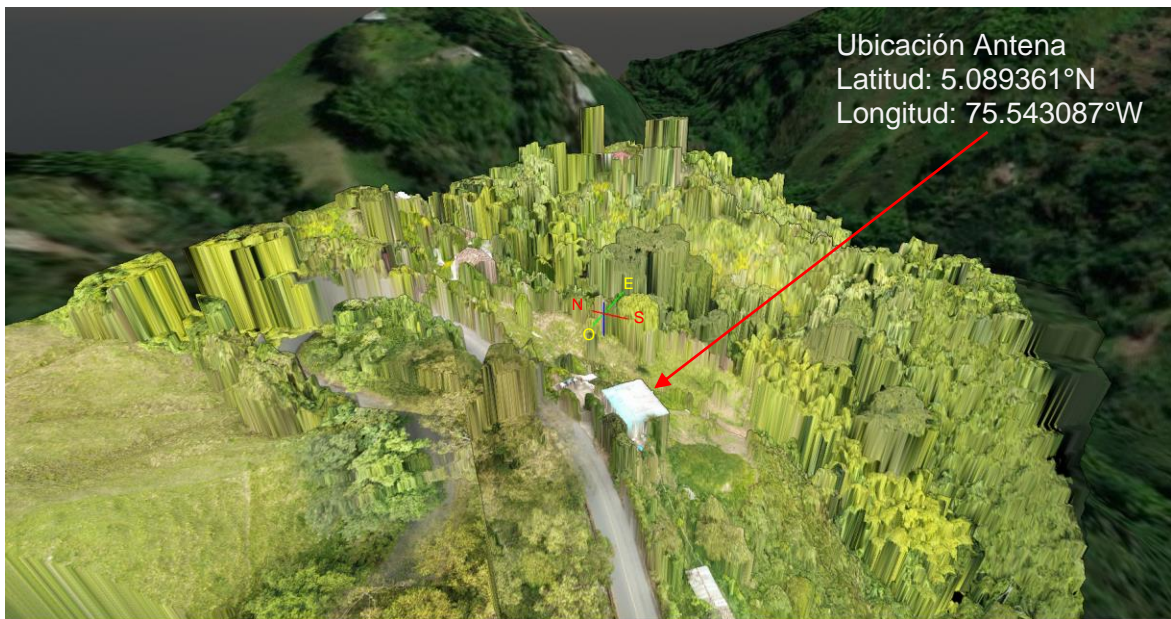


Figura 29. Zona de Ubicación de la antena
Fuente: Elaboración propia

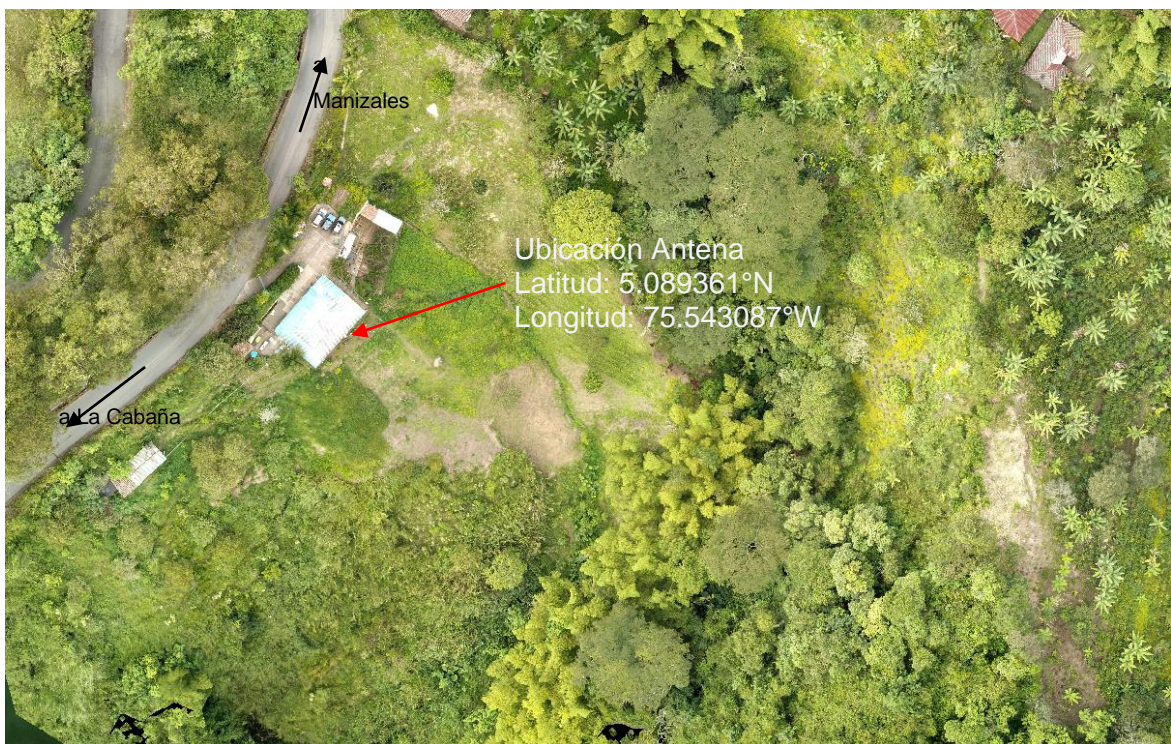


Figura 30. Vista en planta Ubicación de la antena
Fuente: Elaboración propia

El equipo de captura (osciloscopio), la fuente y el computador en el cual se almacenan los registros se ubican dos pisos más abajo de donde se encuentra ubicada la antena, en la Figura 31 se muestran fotografías de la ubicación de la antena y de los equipos que conforman el sistema de medición de campo eléctrico radiado por rayo.



Figura 31. Antena y equipos del sistema de medida de CE
Fuente: Elaboración propia

2.8 Adquisición de señales

Se desarrollaron tres scripts en Python para adquisición y almacenamiento de señales, uno para cada osciloscopio usado en el proyecto (Siglent 2304X, Tektronix TBS1102C y OWON VDS6102). El principio de funcionamiento de los scripts de adquisición y almacenamiento de señales consiste en utilizar desde Python, la librería PyVISA, la cual hace de interfaz entre Python y el protocolo de comunicación con instrumentos VISA, éste último emplea comandos básicos de comunicación con instrumentos (Read, Write y Query) para su interacción con los instrumentos de captura; en la cual se envían comandos de configuración al osciloscopio como lo son: hora, fecha, tiempos de muestreo, tiempo por división, escala y ubicación de la señal en pantalla, así como la configuración de disparo del trigger. El cual es de tipo ventana y dispara si encuentra una señal que supere los límites establecidos entre $+800\text{mV}$ por encima o por debajo del nivel de referencia de la señal, con una posición horizontal acorde a la escala de tiempo establecida para que la señal capturada pueda verse centrada en la pantalla.

El script, una vez configura el osciloscopio, por medio de un comando Query queda a la espera de un disparo del equipo de captura para iniciar la secuencia de almacenamiento.

Basados en la fecha del evento, el software de adquisición está configurado para que almacene en una carpeta por día, en ella se crea un archivo de texto con la consolidación de los registros diarios en formato TXT; para cada evento registrado el script almacena dos archivos por señal (un pantallazo del osciloscopio en formato PNG y un archivo de texto ISF con la información de la señal de cada canal activo en el dispositivo de captura).

En la Figura 32 se muestra la estructura de las carpetas y en la Figura 33 se plasma una parte del archivo de registro diario (LOG) del día 15/10/2021.

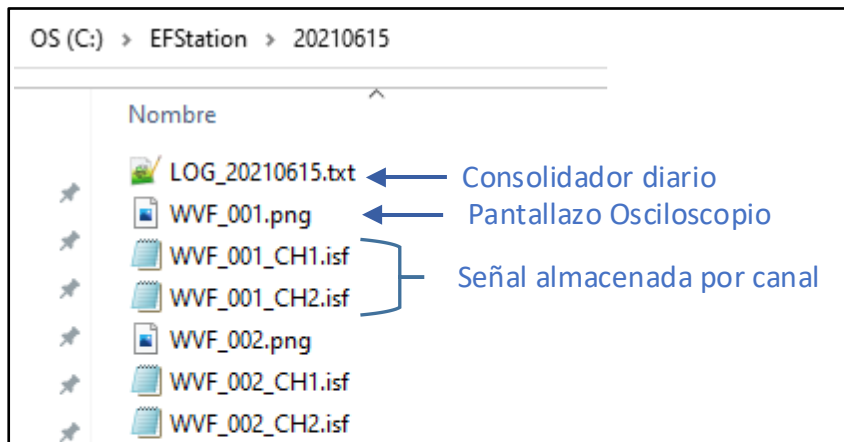


Figura 32. Estructura de las carpetas por día
Fuente: Elaboración propia

1	Num,	Fecha	Hora
2	001,	15-Oct-2020	06:43:41
3	002,	15-Oct-2020	06:46:44
4	003,	15-Oct-2020	06:47:30
5	004,	15-Oct-2020	06:48:20
6	005,	15-Oct-2020	06:49:39
7	006,	15-Oct-2020	06:51:00
8	007,	15-Oct-2020	06:53:37
9	008,	15-Oct-2020	06:55:09
10	009,	15-Oct-2020	06:55:48
11	010,	15-Oct-2020	07:14:05
12	011,	15-Oct-2020	07:23:03
13	012,	15-Oct-2020	07:26:02
14	013,	15-Oct-2020	07:27:26

Figura 33. Archivo LOG 15/10/2020
Fuente: Elaboración propia

3. Resultados

El estudio localizado de las características de las descargas eléctricas atmosféricas es de gran importancia para la comunidad científica internacional ya que algunos parámetros como la densidad de descargas a tierra, la corriente y la polaridad tienen dependencia de la ubicación geográfica y por ende las condiciones climáticas de la zona objeto de análisis (Camilo Younes Velosa, 2002).

En el presente capítulo se documenta el desarrollo de los objetivos específicos dos y tres, los cuales consisten en “Caracterizar las señales de campo eléctrico de la primera descarga de retorno (FRS)” y “Comparar los registros de eventos capturados con aquellos reportados por otros estudios en la literatura científica internacional” respectivamente. Las principales características que se procesaron fueron las asociadas a la polaridad de los impactos y características de la forma de onda y temporales como se mostrará a continuación.

La ciudad de Manizales se ubica en zona tropical montañosa sobre la cordillera central, a una altura de 2150 m.s.n.m, clima templado-frio (entre 14°C – 22°C) con una media de 16°C (Fuente: <http://bart.ideam.gov.co/cliciu/manizal/temperatura.htm>), un nivel de humedad entre 80% y 87% y una precipitación mensual variable (entre 128mm y 251mm) (Fuente: <http://bart.ideam.gov.co/cliciu/manizal/tabla.htm>); es importante tener los parámetros meteorológicos de la zona donde se realizaron las campañas de medición reportadas en el presente trabajo de tesis, con el fin de establecer semejanzas o diferencias con otros lugares en los que se hallan reportado estudios de este tipo.

3.1 Parámetros de la forma de onda

La totalidad de datos examinados en esta tesis fueron delimitados usando una ventana de tiempo de 700 μ s, con un pre-trigger de 100 μ s con respecto al pico inicial de la señal. Esta ventana permite trabajar con registros que posean igual número de muestras y

facilita la identificación de las características más relevantes de la forma de onda. Para esta investigación se adoptaron los parámetros analizados y documentados por Rojas (Rojas Cubides, 2018) quien combinó los parámetros analizados por (Haddad et al., 2012) y (Wooi et al., 2016), con lo cual, para cada return stroke se identificaron 4 parámetros de magnitud (E_P , E_{SL} , E_{OPO} y E_{SMO}) y 7 parámetros temporales (t_{ZP} , t_{SF} , t_{FT} , t_{ZC} , t_{OPO} , t_{SMO} , t_{10-90}), los cuales se ilustran en la Figura 34, y en la Tabla 6 se presenta las descripciones dadas a cada uno de estos parámetros.

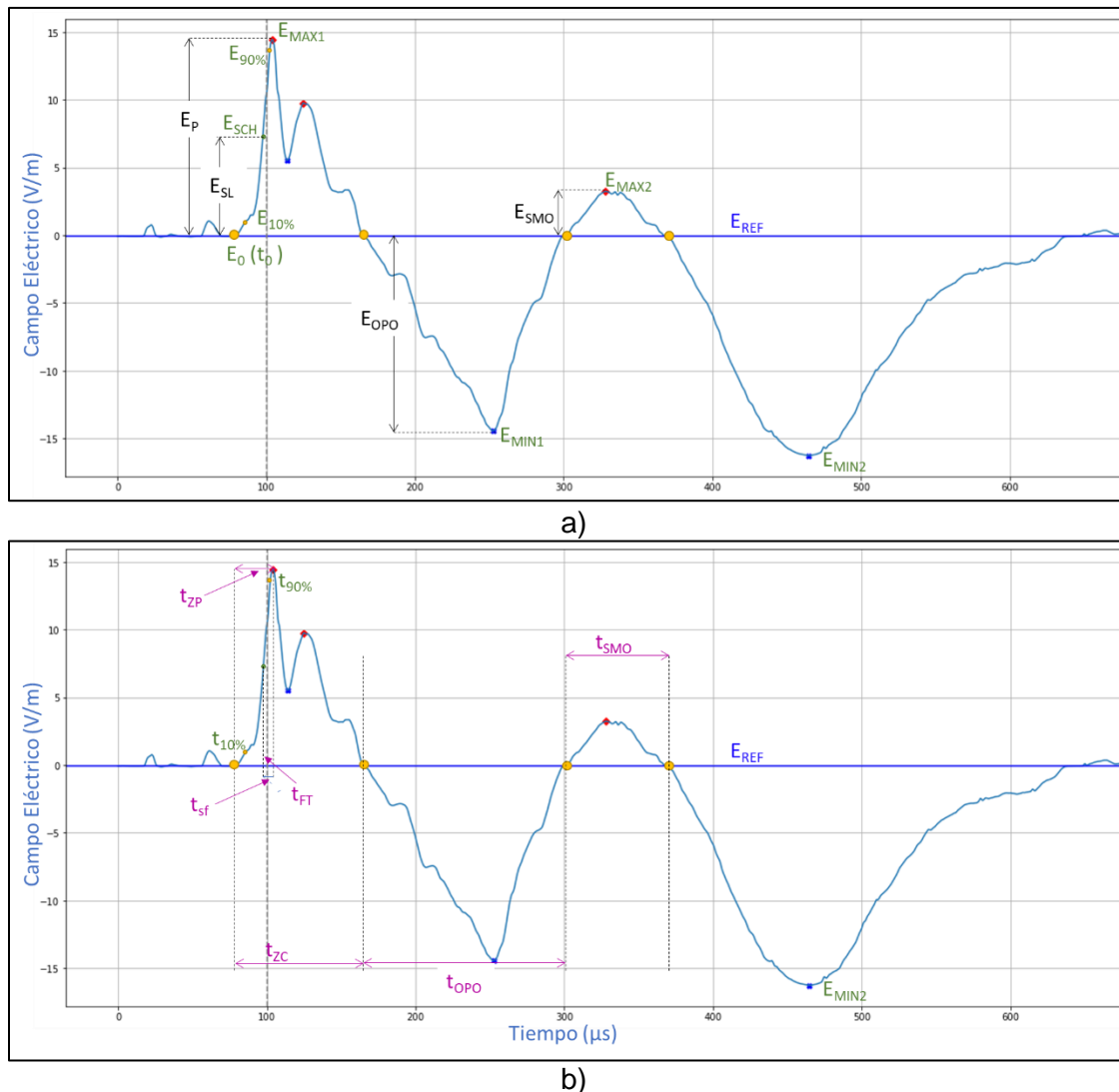


Figura 34. Forma de onda del campo eléctrico señalando los parámetros analizados. (a) parámetros de magnitud; (b) parámetros temporales

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta los parámetros mostrados en la Figura 34, el valor de referencia (E_{REF}) fue asumido como el valor del campo eléctrico de fondo que permanece durante algunas decenas de microsegundos antes de que aparezca el return stroke.

Tabla 6. Descripciones de los parámetros de las formas de onda a analizar

Variable	Nombre	Descripción
E_P	Campo Eléctrico Pico	Valor pico del campo eléctrico, se calcula como la resta entre E_{max1} y E_{ref} .
E_{SL}	Campo Eléctrico de mayor cambio de pendiente	Valor del campo eléctrico de la sección con mayor pendiente (primer ascenso o descenso*), se calcula como la resta entre E_{SCH} y E_{REF} .
E_{OPO}	Amplitud del sobre pico de polaridad opuesta	Primer valor máximo (positivo o negativo*) posterior al primer cruce por cero. Posee polaridad opuesta al pico inicial de la señal (E_{max1}). Se mide con respecto al valor de referencia (E_{ref}).
E_{SMO}	Amplitud del sobrepico de similar polaridad	Primer valor máximo (positivo o negativo*) posterior a la zona OPO y con polaridad similar al pico inicial de la señal. Se mide con respecto al valor de referencia (E_{ref})
t_{ZP}	Tiempo de ascenso de cero al pico (0-100%)	Lapso que recorre la forma de onda desde el punto de deflexión inicial (punto cero: E_0) sobre el nivel de referencia (E_{ref}) hasta el pico inicial de la señal (E_{max1})
t_{SF}	Duración del frente de ascenso lento	Duración de la porción inicial de la señal (generalmente de forma cóncava) que va desde el punto E_0 hasta donde la señal cambia abruptamente de pendiente (E_{sch})
t_{FT}	Duración del frente de ascenso rápido	Transición que va desde el momento en que finaliza el frente lento (E_{sch}) hasta el pico inicial de la señal (E_{max1})
t_{ZC}	Tiempo de cruce por cero	Lapso que va desde el punto cero (E_0) hasta el primer cruce por el nivel de referencia (E_{max1}) posterior al pico inicial de la señal (E_{ref})
t_{OPO}	Duración del sobre pico de polaridad opuesta	Tiempo transcurrido entre el cruce por cero (t_{zc}) y el primer cruce por el nivel de referencia después del valor máximo del sobre pico de polaridad opuesta (E_{opo})
t_{SMO}	Duración del sobre pico de similar polaridad	Tiempo transcurrido entre la finalización del OPO y el primer cruce por el nivel de referencia después del valor máximo del sobre pico de similar polaridad (E_{smo})
t_{10-90}	Tiempo de ascenso (10-90%)	Lapso que toma la forma de onda para ir del 10% al 90% del pico inicial de la señal E_{max1}

Fuente: Adaptada de (Rojas Cubides, 2018)

3.2 Pre-procesamiento de señales

Como se ha mencionado anteriormente en el presente trabajo de tesis se realizaron dos campañas de medición, la primera de ellas en el último semestre (septiembre-diciembre) del año 2020 con 15.620 señales y la segunda de ellas en el primer semestre del año 2021 (Marzo-Abril) con 2.519 señales capturadas. Para el presente trabajo se procesaron las señales del año 2020, las cuales fueron capturadas utilizando ventanas de tiempo cortas de 700 μ s y 1400 μ s.

El pre-procesamiento de las señales contempla los siguientes pasos:

1. Unificación de base de datos: Se unen los archivos de texto que se almacenan en las carpetas de cada día para generar una base de datos con la totalidad de las señales almacenadas para un total de 15.620 señales almacenadas para la campaña medición del año 2020.
2. Eliminación de las señales sin información o invalidas: Algunas señales capturadas corresponden a variaciones electrostáticas muy leves que no corresponden a eventos eléctricos atmosféricos, por lo cual se valida que algunos parámetros de la señal almacenada cumplan con las condiciones: varianza mayor a 0.00016, moda diferente de cero y a su vez que la señal tenga más de 150 mVpp. Las señales que no cumplan con estas condiciones son descartadas. Luego de esta discriminación quedan un total de 12.049 señales con información para procesamiento.

En la Figura 35 se muestra en un diagrama de bloques los pasos realizados para la caracterización de las señales capturadas por el sistema de medición de campo eléctrico construido.

3.3 Procesamiento de señales

Posterior a la etapa de pre-procesamiento, se procede a procesar cada una de las señales con el fin de etiquetar el evento, así como la identificación y medida de algunas características mediante scripts en Python, tomando periodos de tiempo de 700 μ s en las cuales se analizan variables de magnitud, temporales y de la derivada (valor pico de la derivada $(dE/dt)_p$ y el ancho completo a media altura (FWHM)) para los impactos positivos y negativos obtenidos en la campaña de medición No. 1. Posteriormente por medio de un script en Visual Basic bajo entorno Excel se estima la distancia del impacto utilizando como insumo fundamental los datos suministrados por Keraunos®.

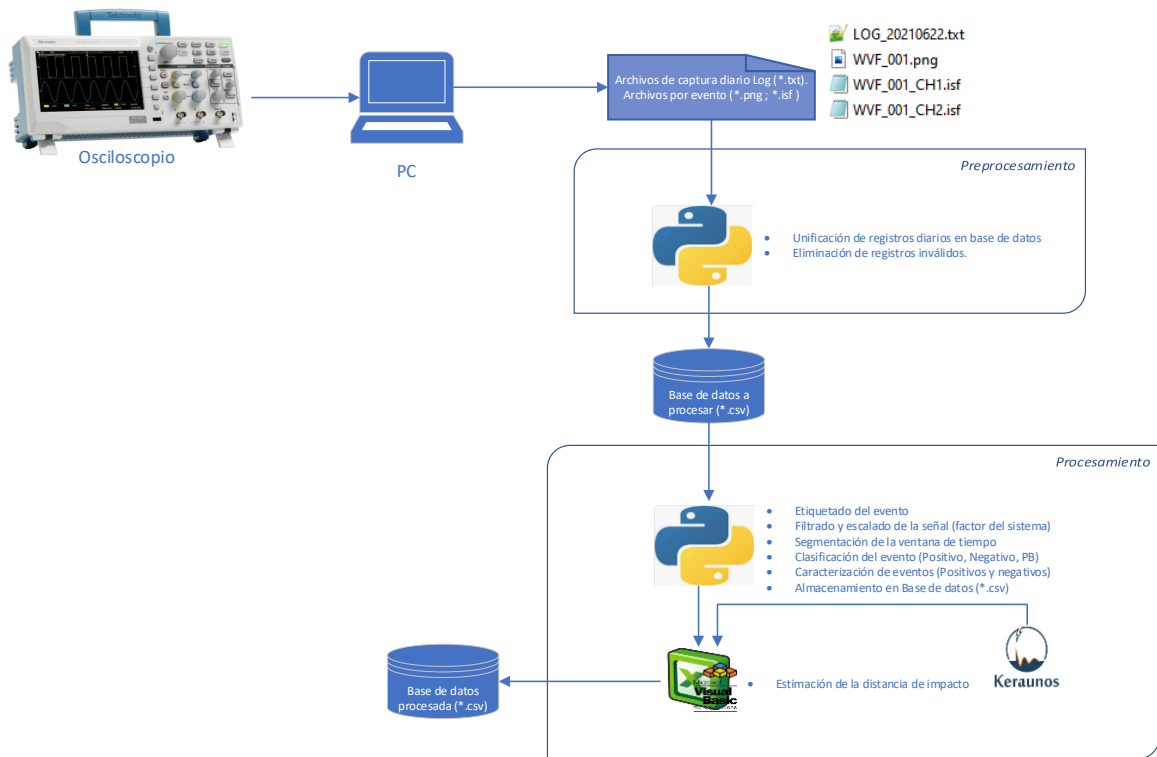


Figura 35. Proceso de tratamiento de las señales capturadas de CE
Fuente: Elaboración propia

El procedimiento de procesamiento mostrado en la Figura 35 inicia por el etiquetado del evento, en donde a partir de la ubicación en la base de datos (numeración consecutiva), la fecha y la hora del evento se construye el código para etiquetar la señal, como se muestra a continuación en la Figura 36:



Figura 36. Nemotecnia de la codificación de las señales procesadas
Fuente: Elaboración propia

Paso siguiente se procede a realizar el filtrado de la señal, para lo cual se lee la información almacenada en archivos codificados (*.isf), de donde se extrae el vector de voltajes en el tiempo objeto de análisis para ser procesado. Se implementó un filtro gaussiano similar al usado en (Rojas Cubides, 2018) con una desviación estándar del kernel de 1200 (sigma). Dicho filtro presenta muy buenos resultados eliminando ruidos periódicos y distorsiones de la forma de onda, pero en ocasiones suaviza en exceso la señal, por lo que se calcula el error medio cuadrático (Es el promedio de los errores al cuadrado, es decir, la diferencia entre el estimador y lo que se estima) y el coeficiente de correlación Pearson (mide la relación estadística de dos variables continuas) con el fin de determinar que tanto se está alterando la información original de la señal capturada con el proceso de filtrado. Luego, se escala la señal utilizando como referencia los máximos y mínimos de la señal original y por último se aplica el factor del sistema obtenido en la sección 2.5 Calibración del sistema, a la serie de datos de voltajes en el tiempo con el fin de obtener la equivalencia de la variación del Campo Eléctrico en Voltios por metro.

4. Se segmenta la señal en caso de ser necesario dejando ventanas de tiempo de 700 μ s y caracterizar los impactos mediante las métricas establecidas en la sección 3 Parámetros

de la forma de onda. Se ubican los máximos y mínimos de la señal mediante la función de Python FindPeaks, estableciendo sus tiempos de ocurrencia, con el fin de realizar validaciones y condicionales para establecer su caracterización y clasificación.

4.1.1 Clasificación

El proceso de clasificación inicialmente verifica si la señal puede corresponder a un impacto positivo o negativo cercano, basado en los cruces por cero que deben ser nulos para estos casos y en la polaridad del primer máximo (impacto negativo cercano) o primer mínimo (impacto positivo cercano).

El clasificador implementado identifica si el impacto es positivo, negativo o si tiene características de rompimiento preliminar; adicionalmente se estableció un estado denominado SIN CLASIFICACION, en el cual se agrupan aquellas señales que por razones relacionadas con sus valores de Coeficiente de Correlación de Pearson (deformación luego de filtrado), o por tener características en su forma de onda que hacen difícil aplicar las métricas establecidas para la caracterización, así como aquellas que presentan ruido excesivo. En la Tabla 7 se muestran las cantidades de señales clasificadas y en la Figura 37 se muestra en porcentajes la clasificación preliminar de las 12.049 señales que se conservan luego de la etapa de pre-procesamiento.

Tabla 7. Resultado preliminar de clasificación 12.049 señales SMCE 2020

Clasificado	Cantidad	Porcentaje
Negativos	6372	52.9%
Positivos	6.89	5.7%
Rompimiento Preliminar	388	3.2%
Sin Clasificación	4.600	38.2%
Totales	12.049	100%

Fuente: Elaboración propia

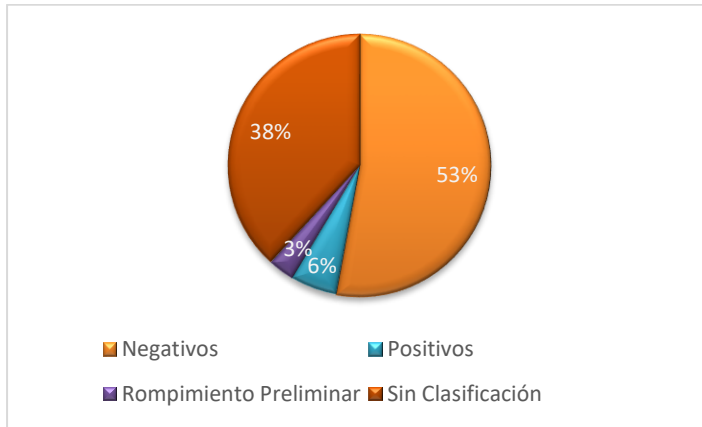


Figura 37. Resultado preliminar de clasificación 12.049 señales SMCE 2020
Fuente: Elaboración propia

4.1.1.1 Impactos positivos

Como se mencionó en el primer capítulo, un impacto positivo es aquel que moviliza carga negativa a tierra, por lo que su característica principal es su presencia marcada en el semiciclo negativo del eje coordenado. En la Figura 38 y Figura 39 se muestran un par de eventos clasificados como positivos, el primero de ellos (evento numero 50) según información de Keraunos, tiene una corriente de 16.8 kA, se presentó a una distancia de 25.5km de la ubicación de la antena y tiene una diferencia con la estampa de tiempo de Keraunos de 0.093 segundos; el segundo impacto positivo mostrado (evento numero 499) según información de Keraunos, tiene una corriente de 26.8 kA, se presentó a una distancia de 37.4 km de la ubicación de la antena y tiene una diferencia con la estampa de tiempo de 0.002 segundos.

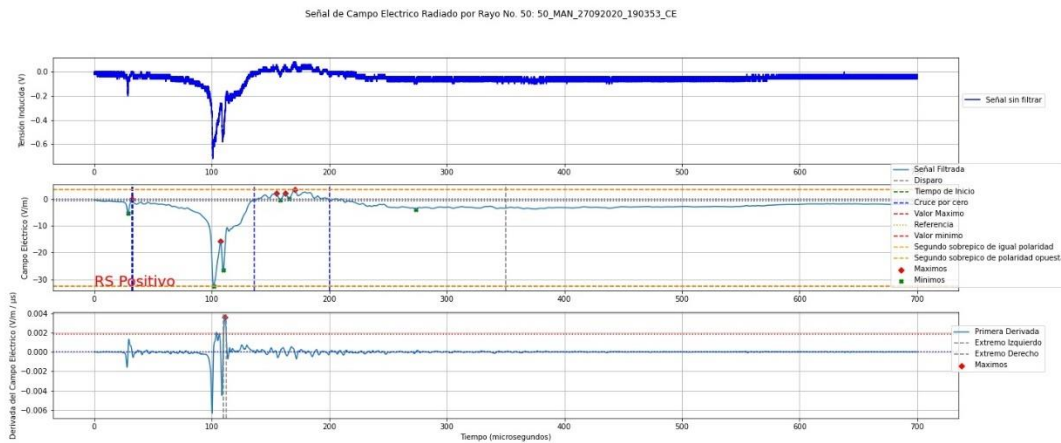


Figura 38. Señal 50 RS Positivo registrado a 25.5 km de distancia

Fuente: Elaboración propia

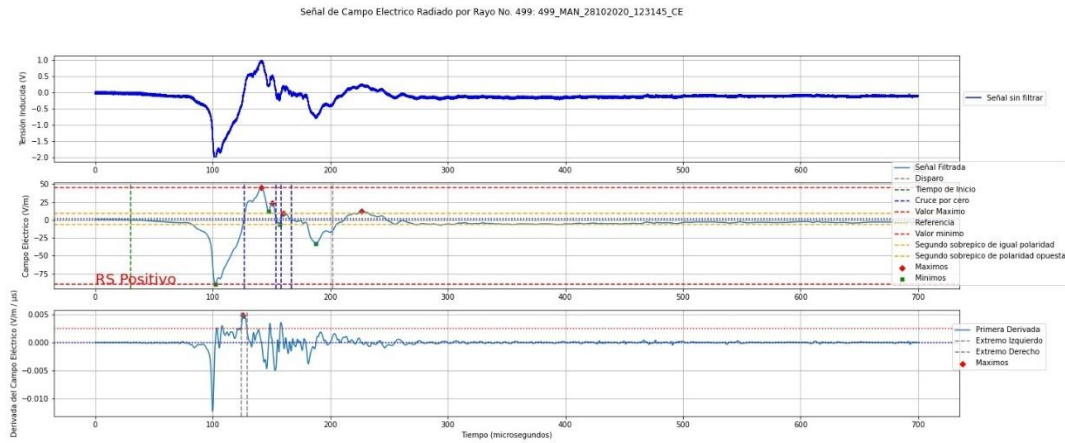


Figura 39. Señal 499 RS Positivo registrado a 37.4 km de distancia

Fuente: Elaboración propia

4.1.1.2 Impactos negativos

Como se mencionó en el primer capítulo, un impacto negativo es aquel que moviliza carga positiva a tierra, por lo que su característica principal es su presencia marcada en el semiciclo positivo del eje coordenado. En la Figura 38 y Figura 39 se muestran un par de eventos clasificados como negativos, el primero de ellos (evento numero 475) según información de Keraunos, tiene una corriente de -6.4 kA, se presentó a una distancia de 73.1 km de la ubicación de la antena y tiene una diferencia con la estampa de tiempo de Keraunos de 0.006 segundos; el segundo impacto negativo mostrado (evento numero 74) según información de Keraunos, tiene una corriente de -77.2 kA, se presentó a una distancia de 107 km de la ubicación de la antena y tiene una diferencia con la estampa de tiempo de 0.004 segundos.

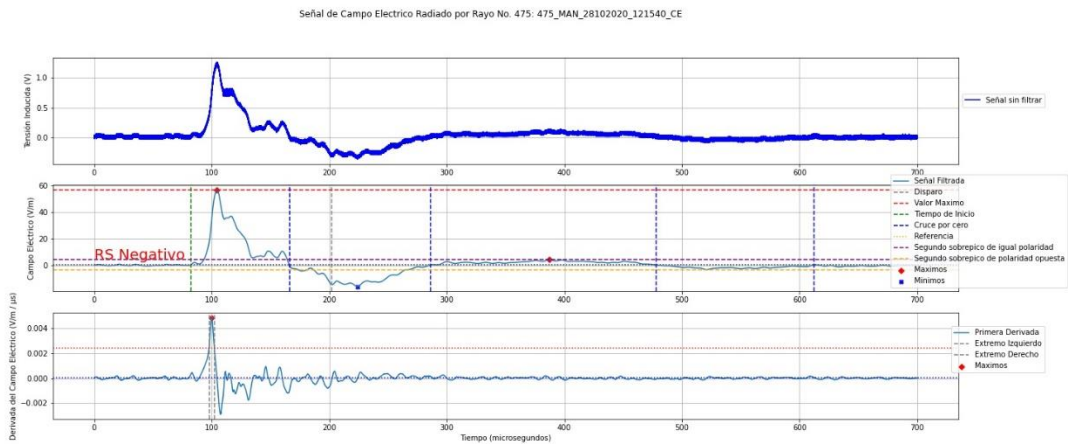


Figura 40. Señal 475 RS negativo registrado a 73.1 km de distancia

Fuente: Elaboración propia

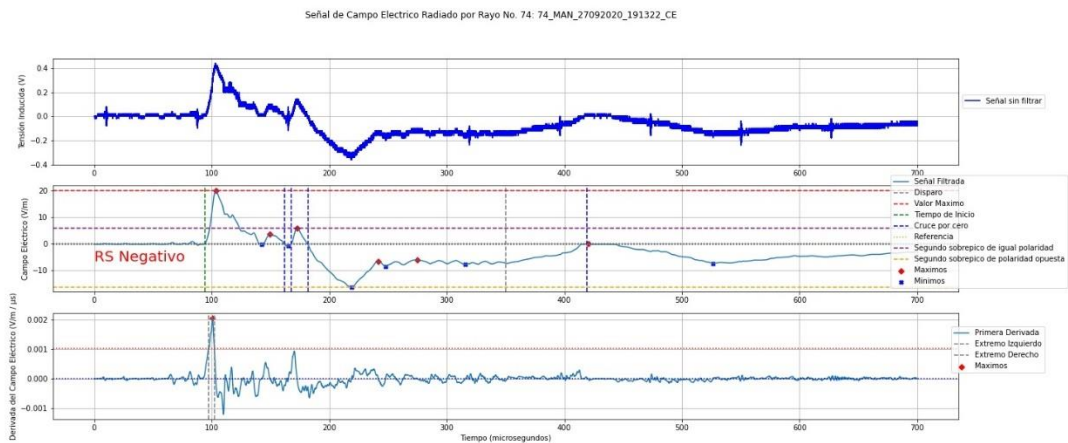


Figura 41. Señal 74 RS negativo registrado a 107 km de distancia

Fuente: Elaboración propia

4.1.1.3 Rompimiento Preliminar

En el capítulo 1 se mencionaron las fases que componen la formación del rayo, entre las que se encuentra el *Preliminary Breakdown* o *Encendido de la de carga*, la cual es un evento que ocurre previo a la tormenta eléctrica y se caracteriza principalmente por tener tren de pulsos bipolares de alta frecuencia o sobre picos bipolares bien espaciados. Este

evento está relacionado con el primer momento en el que se inicia el rompimiento eléctrico al interior de la nube (Z. A. Baharudin et al., 2012).

Aunque este tipo de eventos no hacen parte del alcance del presente trabajo de tesis, se tienen 388 señales que poseen las características propias del rompimiento preliminar, lo cual muestra que el sistema de medición puede registrar y el software puede diferenciar este tipo de eventos. En las figuras Figura 42 y Figura 43 se muestran un par de ejemplos de señales características de rompimiento preliminar.

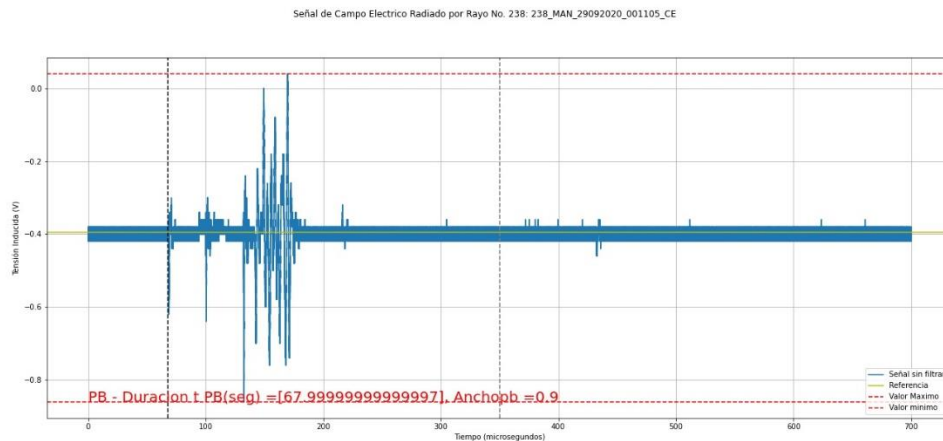


Figura 42. Señal 238 características de rompimiento preliminar

Fuente: Elaboración propia

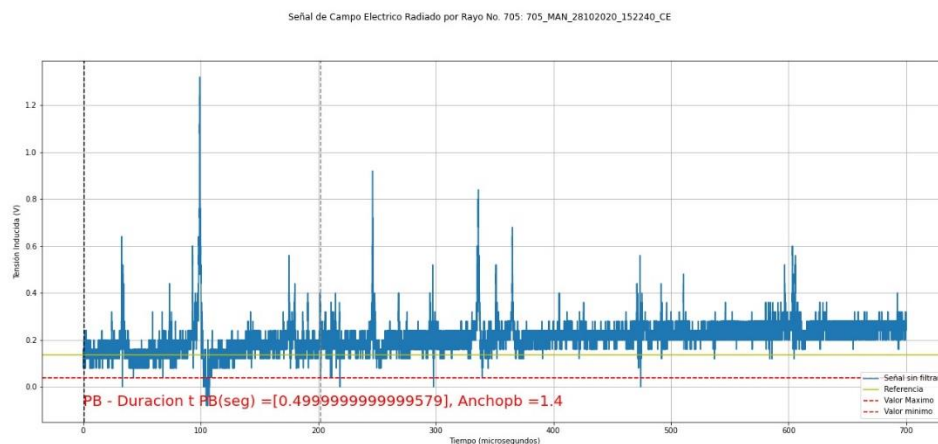


Figura 43. Señal 705 características de rompimiento preliminar

Fuente: Elaboración propia

4.1.1.4 Sin Clasificar

El clasificador “Sin Clasificar”, fue creado con el fin de agrupar las señales que por alguna razón no tenían una buena respuesta al script de procesamiento. Como un posible trabajo futuro, es posible mejorar el script de filtrado y clasificación, con el fin de buscar eventos dentro de este clasificador. En las figuras Figura 44 y Figura 45 se muestran dos ejemplos de este tipo de señales.

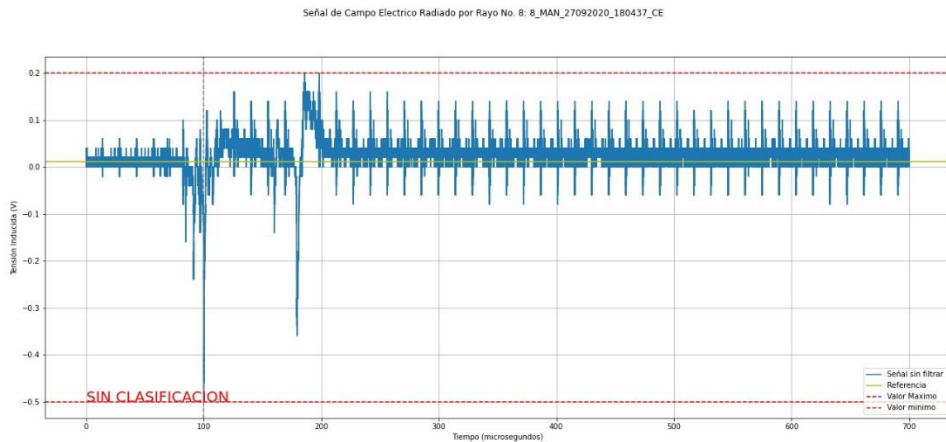


Figura 44. Señal 8 Sin clasificar, exceso de ruido

Fuente: Elaboración propia

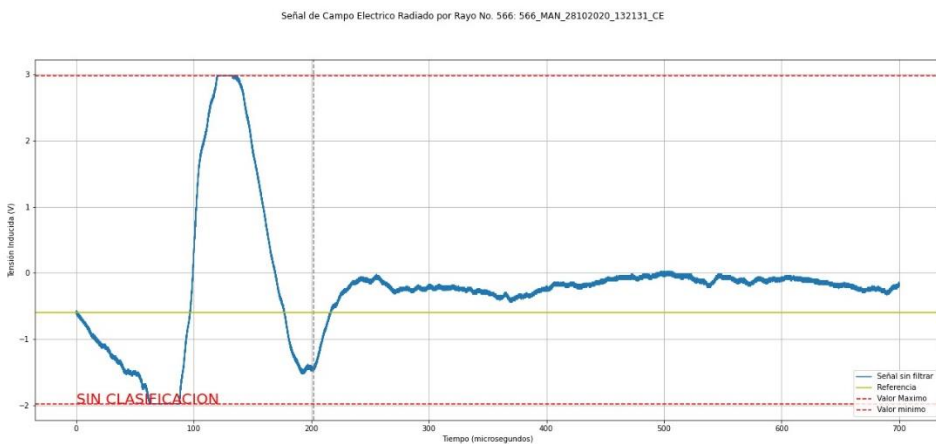


Figura 45. Señal 566 Sin clasificar por saturación de la visualización

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Estimación de la distancia de impacto

La estimación de la distancia de impacto de los eventos registrados se realizó utilizando como fuente la información facilitada de la red de localización de rayos de propiedad de Keraunos®, quienes han facilitado su información al grupo de investigación E3P en varias ocasiones. Partiendo de la estampa de tiempo almacenada por el SMCE, se implementó un script en VBA en entorno Excel, el cual recorre la base de datos de eventos almacenados por el SMCE y compara cual es el evento más cercano en el tiempo dentro de la información suministrada por Keraunos® y trae la información de dicho evento cercano en el tiempo, los datos suministrados por Keraunos® se adicionan a la base de datos en procesamiento, los campos de interés se relacionan en la siguiente tabla.

Tabla 8. Datos suministrados por Keraunos

Fecha	Latitud	Longitud	Corriente (kA)	Altitud (km)	Tipo	Error(km)
2020-09-27 00:00:36.833	5.0459	-75.8099	22.7	11.9	2	0.116
2020-09-27 00:00:36.834	5.0543	-75.6729	6.7	0	1	0.589
2020-09-27 00:00:36.859	5.048	-75.7938	-28.2	0	1	0.271
2020-09-27 00:01:16.202	5.616	-75.7443	-8.7	0	1	0.319
2020-09-27 00:01:16.221	5.5956	-75.7379	15.1	0	1	0.424
2020-09-27 00:01:33.017	5.9577	-75.0129	-42.7	0	1	0.208
2020-09-27 00:01:54.020	5.6186	-75.7059	-23.6	0	1	0.191
2020-09-27 00:01:54.388	5.6389	-75.7472	5.4	0	1	1.043
2020-09-27 00:01:54.389	5.5306	-75.7021	-29.9	0	1	0.25
2020-09-27 00:01:54.390	5.5886	-75.7935	-14	0	1	0.678
2020-09-27 00:02:50.394	5.0453	-75.8233	9.2	0	1	0.599
2020-09-27 00:02:50.398	5.0544	-75.801	-82.7	13.3	2	0.245
2020-09-27 00:03:27.284	5.7807	-75.0246	6.9	0	1	0.138
2020-09-27 00:04:25.987	5.895	-75.0356	8.1	0	1	0.074
2020-09-27 00:05:03.721	5.5903	-75.6986	-18.6	13.2	2	0.091
2020-09-27 00:05:03.725	5.594	-75.6913	5.1	0	1	0.266
2020-09-27 00:05:04.006	5.5788	-75.6889	-32.6	0	1	0.635
2020-09-27 00:05:04.072	5.6202	-75.7409	-12.8	12	2	0.138
2020-09-27 00:05:18.496	5.8196	-75.0655	-43.1	0	1	0.207

Fuente: Keraunos®

Posteriormente se calcula la distancia del impacto a la antena, utilizando las coordenadas geográficas del impacto (IMP) y la coordenada de la antena (SM) usando la siguiente expresión de matemáticas geodésicas:

$$D = R_e * \cos^{-1}[\sin \theta_{SM} \cdot \sin \theta_{IMP} + \cos \theta_{SM} \cdot \cos \theta_{IMP} \cdot \cos(\phi_{SM} - \phi_{IMP})] [km] \quad (13)$$

Donde R_e representa el radio de la tierra, 6.378,14 km., θ representa la latitud y ϕ representa la longitud. Los subíndices IMP corresponden al impacto registrado por Keraunos y los subíndices SM son correspondientes a la ubicación del sistema de medición de campo eléctrico.

Se eliminan los registros que tengan una diferencia con la estampa de tiempo del evento de ± 500 ms, así como los eventos que estuvieran reportados en la base de datos de Keraunos como eventos entre las nubes. Luego de estas discriminaciones y con la idea de analizar las descargas a tierra (return strokes), quedan 1.292 señales, sobre las cuales se realizará la caracterización. En la Figura 46 se muestra la ubicación de los puntos de impacto de las señales de campo eléctrico, y en la Tabla 9 se muestra la cantidad de impactos capturados con el sistema implementado, según su polaridad y sus rangos de distancia entre el punto de impacto del stroke y la ubicación de la antena.

Tabla 9. Strokes capturados en función de la distancia al punto de impacto

Tipo de Strokes	Rangos de distancia (km)				Total
	0-50	50-100	100-150	150-200	
Negativos	152 (13%)	585 (51%)	400 (35%)	19 (2%)	1156
Positivos	34 (25%)	71 (52%)	30 (22%)	1 (1%)	136
	186	656	430	20	1292

Fuente: Elaboración propia



Figura 46. Impactos capturados por el SMCE 2020
Fuente: Elaboración propia

4.2 Características de los campos eléctricos radiados por la primera descarga de retorno de acuerdo a la distancia de impacto

Una vez clasificadas las señales almacenadas y estimada la distancia de impacto, se procedió a comparar las características de los campos eléctricos capturados con aquellos descritos en el apartado 1.3 Campos electromagnéticos generados por rayos CG, en donde se expusieron las formas de onda características de los campos eléctricos según su distancia entre el punto impacto y la ubicación de la antena del SMCE. Estas formas de onda se han venido estudiando por diferentes autores de la comunidad científica internacional.

Para los registros obtenidos en el presente trabajo de tesis, se analizaron las formas de onda del campo eléctrico producido por flashes CG negativos y positivos. En ambos casos, se adoptó el signo convencional de electricidad atmosférica, de manera que, los strokes de polaridad negativa producirán un cambio positivo en el campo eléctrico y viceversa. Teniendo en cuenta el alcance del sistema de medición (hasta 200 km) y la información obtenida de la red de Keraunos, con el fin de encontrar similitudes en los mismos términos que se plantean las características de las señales, dichas formas de onda se agruparon en seis rangos de distancia: 0-30 km, 30-50 km, 50-100 km, 100-150 km, 150-200 km y 200-250 km. Todas las distancias fueron calculadas usando (13) y tomando como referencia el punto de ubicación del sistema de medición. Los resultados de esta validación para los flashes de ambas polaridades se muestran en las Figuras Figura 47 y la Figura 48.

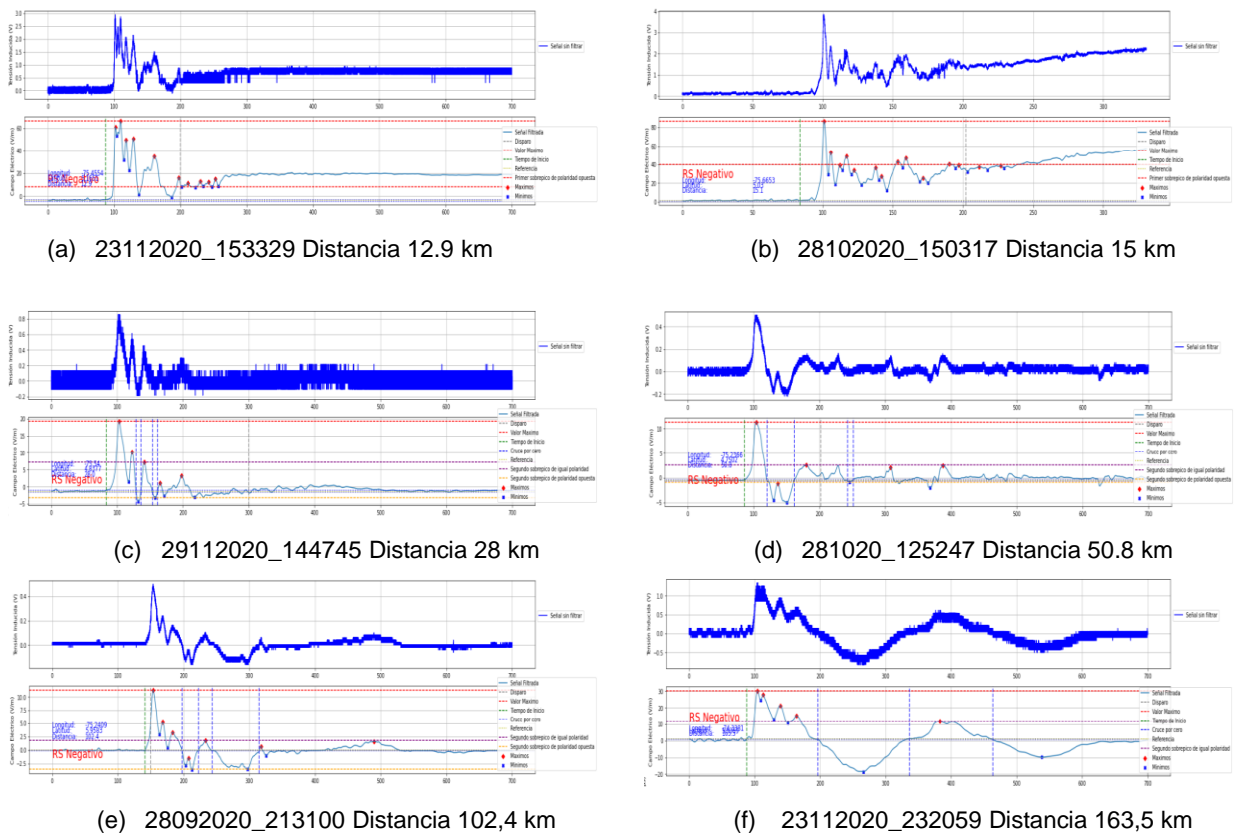


Figura 47. Señales de campo eléctrico producido por flashes CG negativos en función de la distancia (a) (b) 0 – 30 km; (c) (d) 30 – 50 km; (e) 100 - 150 km; (f) 150 – 200 km
Fuente: Elaboración propia

Se encuentran similitudes entre las señales capturadas y las señales típicas de CE radiado por rayo, como lo es el ascenso rápido, seguido por una rampa característica de las componentes electrostáticas de los return strokes con distancias menores a los 50 km, dicha rampa es mucho más pronunciada para los CE registrados a menos de 30 km. En términos de amplitud del pico inicial, para las distancias entre los 10 km y los 15 km, se espera tener amplitudes de entre los 40 V/m y los 60 V/m (ver Figura 5 y Figura 47 (a) y (b)) y las señales capturadas presentan una amplitud entre 60 y 90 V/m. En el rango de distancias de 30 a 50 km, se esperan amplitudes del pico inicial de la primera descarga de retorno de entre 10 y 20 V/m; en el presente estudio se obtuvieron valores de entre los 15 y los 20 V/m (ver Figura 6 y Figura 47 (c) y (d)). Teniendo en cuenta las amplitudes obtenidas para distancias menores a los 50 km, se tienen valores cercanos a los típicamente conocidos por la comunidad científica internacional, por lo que nos lleva a pensar que el factor del sistema es adecuado para los rangos de distancia mencionados.

En el rango entre 50 y 200 km, se observa claramente un semiciclo inicial compuesto por un ascenso rápido seguido por una rampa descendente, luego un primer cruce por cero y finalmente uno o dos cambios de polaridad adicionales. Las formas de onda de los campos intermedios y lejanos muestran un comportamiento oscilatorio, que, junto con el cambio de polaridad, se vuelve más pronunciado cuando la distancia del flash excede los 100 o 150 km.

El valor máximo del campo eléctrico tiende a disminuir a medida que aumenta la distancia, mientras que la magnitud de los semiciclos que aparecen después del primer cruce por cero tiende a aumentar. En el rango de los 50 a los 100 km, se esperan amplitudes típicas de entre los 10V/m y 5 V/m, en los registros analizados se presentaron amplitudes del primer sobrepico de aproximadamente 11 V/m. En el rango de distancias mayores a los 100 km, se esperan amplitudes pico alrededor de 2 V/m y en el presente estudio se obtuvieron amplitudes para este rango de distancias entre 10 y 30 V/m, por lo que se puede afirmar que el factor de sistema asumido no es adecuado para el rango de eventos superiores a los 150km de distancia a la antena de medición.

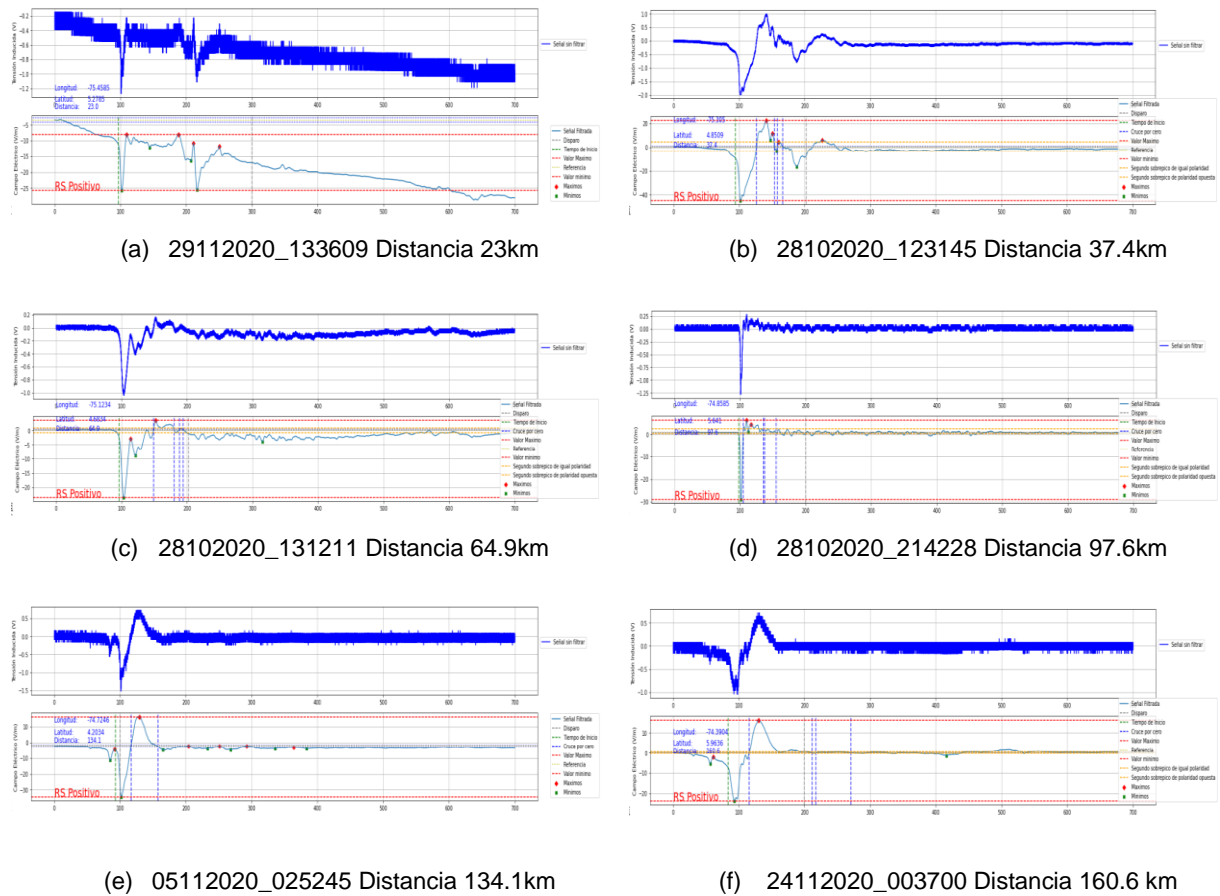


Figura 48. Señales de campo eléctrico producido por flashes CG positivos en función de la distancia (a) 0 – 30 km (b) 30 – 50 km; (c) (d) 50 - 100 km; (e) 15 – 150 (f) 150 - 200 Fuente: Elaboración propia

Para el caso de los campos eléctricos producidos por flashes CG positivos mostrados en la Figura 48, se encuentra un comportamiento similar al de su contraparte negativa. Se observa la componente estática típica de los campos cercanos (menos de 50 km), la rampa ascendente y el cruce por cero relacionado con los strokes intermedios y lejanos (más de 50 km) y, finalmente, las oscilaciones con cambios de polaridad después del cruce por cero para los campos lejanos (más de 100 km). En términos de amplitudes del primer sobre pico, se tiene un comportamiento similar al presentado en los rayos negativos, en donde las señales analizadas presentan similitudes en el rango de distancias menores a los 100km, a medida que aumenta de este valor la distancia de impacto, las amplitudes se espera que sean menores a las que se presentaron en este apartado.

Se puede afirmar teniendo en cuenta el análisis presentado que el sistema tiene un comportamiento confiable para los impactos que puedan presentarse a menos de 100 km de la antena de medición, más allá de este valor se tendrían sobre estimaciones en las amplitudes del CE radiado por los eventos atmosféricos objeto de investigación en este documento.

4.3 Resultados obtenidos en Manizales, medición de parámetros campaña septiembre-diciembre 2020

En el presente apartado se muestran de manera general los resultados luego del proceso de procesamiento de las señales en donde se realizó la medición de los parámetros establecidos en el apartado “3.1

Parámetros de la forma de onda”, de donde se seleccionan los parámetros para la aplicación del análisis estadístico de la información, los cuales se agrupan en 11 parámetros de magnitud y 7 temporales, así como 2 parámetros adicionales asociados a la derivada de CE. Los parámetros adicionales son el valor pico de la derivada (dE/dt)_p y el ancho completo a media altura (FWHM), en la Figura 49 se muestra una señal procesada con su respectiva derivada y se identifica con una línea horizontal punteada el FWHM. Este apartado es basado en la metodología propuesta por Rojas y llevada a cabo en su tesis doctoral (Rojas Cubides, 2018).

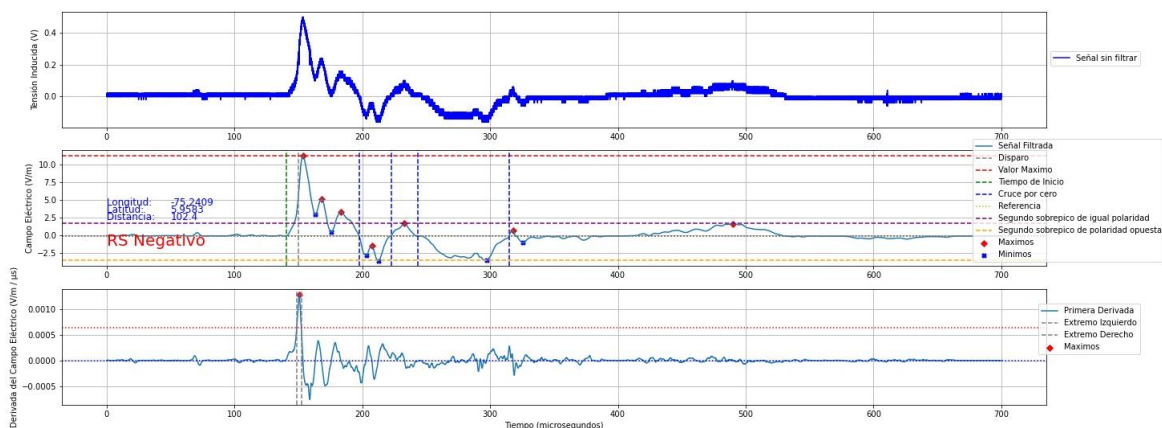


Figura 49. Formas de onda del Evento 27092020_185453
 Imagen Superior: Señal original de Tensión inducida. Imagen central: Señal de CE filtrada y escalada. Imagen Inferior: Derivada de CE.
 Fuente: Elaboración propia

El FWHM es empleado en lugar del tiempo de ascenso de cero al pico o de la pendiente de la derivada ya que considera el frente y la cola de la forma de onda. Por esta razón, algunos estudios afirman que el FWHM es un parámetro tan importante como la derivada

de la corriente o del campo eléctrico de un stroke (Wooi et al., 2016), (Willett & Krider, 2000).

Para facilitar el análisis, algunos parámetros de magnitud fueron normalizados en función de su respectivo valor pico inicial (E_p). Estos parámetros fueron: la amplitud del frente de ascenso de lento (E_{sl}/E_p), la amplitud del sobrepico de polaridad opuesta (E_{op}/E_p). Así mismo, el valor pico del campo eléctrico fue normalizado a una distancia de 100 km usando la siguiente relación (Y. T. LIN, M. A. UMAN, J. A. TILLER, 1979):

$$\text{Campo eléctrico pico normalizado a 100km} \quad E_{p,N(100km)} = E_p \times \frac{\text{Distancia desde el sistema de medición (km)}}{100km} \quad (14)$$

Cada parámetro se analizó por medio de seis indicadores matemáticos: el número de strokes examinados (N), el valor mínimo (Min), el valor máximo (Max), la media aritmética (MA), la media geométrica (MG) y la desviación estándar (DE). Esta combinación entre parámetros e indicadores permitirá establecer el comportamiento de las formas de onda en función de la distancia, y facilitará la comparación de los resultados obtenidos en el presente estudio con trabajos presentados en otras regiones del mundo.

La Tabla 10, presenta la información estadística de los FRS de la campaña septiembre-diciembre 2020 llevada a cabo en la ciudad de Manizales para impactos negativos con un total de 1156 muestras y en la Tabla 11 se presenta la correspondiente a los impactos positivos, con un número de muestras de 136. Se observa que para los FRS negativos se capturaron eventos ocurridos entre 1.8 km y 166 km de distancia, con valores de campo pico de entre 2.9 y 123 V/m. Por su parte los FRS positivos capturados se presentaron a distancias entre los 12 y los 160 km con valores de CE pico de entre 2.6 y 154 V/m.

Las tablas Tabla 12 y Tabla 13, presentan la Media aritmética de los parámetros del CE de FRS agrupados en rangos de distancia para Manizales en la campaña de medición realizada entre septiembre y diciembre de 2020, la primera de ellas para los FRS negativos y la segunda para los FRS positivos. En el siguiente apartado se realizarán las comparaciones con otros estudios a partir de la información contenida en dichas tablas.

Tabla 10. Información estadística de los parámetros de FRS negativos para Manizales Septiembre-Diciembre 2020

N = 1156		Características de magnitud								Características temporales						Derivada		
Parámetro=	Distancia (km)	Ep (V/m)	EpN (V/m)	Esf (V/m)	$\frac{Esf}{Ep}$	Eopo (V/m)	$\frac{Eopo}{Ep}$	Esmo (V/m)	$\frac{Esmo}{Ep}$	T0a100 (µs)	T10A90 (µs)	tsf (µs)	tft (µs)	tzc (µs)	topo (µs)	tsmo (µs)	(dE_dt)p (V/m/µs)	FWHM (µs)
Min	1.81	2.92	0.40	7.44	-1.63	-62.20	-1.56	6.53	-1.48	2.56	2.05	0.11	0.95	4.90	1.00	1.16	0.41	5.18
Max	166.37	153.69	134.40	87.63	1.04	77.34	0.97	42.04	0.97	10.59	8.47	5.88	4.71	498.51	306.17	16.62	27.04	49.71
MA	85.79	29.30	25.16	13.39	0.45	-8.18	-0.28	4.38	0.16	13.33	10.66	9.68	3.64	76.26	54.46	69.36	5.02	8.85
MG	78.70	25.70	20.23	-	-	-	-	-	-	18.50	14.80	10.87	5.06	65.46	25.70	31.46	13.74	27.22
DE	30.78	16.37	17.42	18.17	0.53	10.71	0.33	6.53	0.22	46.44	37.15	15.32	43.96	44.26	54.55	80.94	3.58	4.59

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Resultados de las mediciones FRS positivos en Manizales Septiembre-Diciembre 2020

N = 136		Características de magnitud								Características temporales						Derivada		
Parámetro=	Distancia (km)	Ep (V/m)	EpN (V/m)	Esf (V/m)	$\frac{Esf}{Ep}$	Eopo (V/m)	$\frac{Eopo}{Ep}$	Esmo (V/m)	$\frac{Esmo}{Ep}$	T0a100 (µs)	T10A90 (µs)	tsf (µs)	tft (µs)	tzc (µs)	topo (µs)	tsmo (µs)	(dE_dt)p (V/m/µs)	FWHM (µs)
Min	12.42	-153.69	-73.73	-153.86	0.01	-29.03	-0.89	-48.72	0.08	1.76	1.40	2.36	3.54	0.99	1.02	1.71	1.03	1.56
Max	160.57	-2.56	-1.21	-0.25	1.82	77.34	0.76	-0.08	1.48	111.49	89.19	44.62	66.87	96.53	171.80	346.91	54.07	49.70
MA	74.44	-26.21	-18.88	-23.50	0.88	9.35	-0.36	-6.20	0.25	82.87	66.30	16.00	67.78	54.50	41.83	54.14	7.50	12.57
MG	66.45	-	-	-	0.75	-	-	-	0.11	54.25	43.40	12.44	38.34	37.11	25.27	20.69	5.58	10.10
DE	32.41	17.09	13.19	18.47	0.31	9.78	0.30	9.46	0.30	100.12	80.10	13.92	98.29	63.37	40.41	85.39	7.50	8.78

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Media aritmética de los parámetros del CE de FRS negativos agrupados en rangos de distancia para Manizales Septiembre-Diciembre 2020

Rango de Distancias (km)	N	Características de magnitud								Características temporales						Derivada		
		Ep (V/m)	EpN (V/m)	Esf (V/m)	$\frac{Esf}{Ep}$	Eopo (V/m)	$\frac{Eopo}{Ep}$	Esmo (V/m)	$\frac{Esmo}{Ep}$	T0a100 (µs)	T10A90 (µs)	tsf (µs)	tft (µs)	tzc (µs)	topo (µs)	tsmo (µs)	(dE_dt)p (V/m/µs)	FWHM (µs)
0 - 50	152	29.41	10.17	12.19	0.35	-8.63	-0.26	3.37	0.10	39.51	31.61	12.25	27.27	78.55	59.38	84.21	4.54	10.14
50 - 100	585	28.96	22.20	13.22	0.45	-7.80	-0.26	4.43	0.17	26.09	20.88	14.62	11.54	74.30	51.04	65.21	4.97	8.91
100 - 150	400	29.58	33.90	13.97	0.50	-8.59	-0.31	4.77	0.18	24.10	19.28	14.95	9.34	77.43	57.87	70.88	5.17	8.30
150 - 200	19	33.10	52.31	15.78	0.50	-7.52	-0.22	3.06	0.09	27.20	21.76	21.53	5.67	92.89	48.01	42.19	7.11	8.17
0 - 100	737	29.05	19.72	13.01	0.43	-7.98	-0.26	4.20	0.15	28.86	23.09	14.13	14.79	75.20	52.81	69.25	4.88	9.16

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Media aritmética de los parámetros del CE de FRS positivos agrupados en rangos de distancia para Manizales Septiembre-Diciembre 2020

Rango de Distancias (km)	N	Características de magnitud								Características temporales						Derivada		
		Ep (V/m)	EpN (V/m)	Esf (V/m)	$\frac{Esf}{Ep}$	Eopo (V/m)	$\frac{Eopo}{Ep}$	Esmo (V/m)	$\frac{Esmo}{Ep}$	T0a100 (µs)	T10A90 (µs)	tsf (µs)	tft (µs)	tzc (µs)	topo (µs)	tsmo (µs)	(dE_dt)p (V/m/µs)	FWHM (µs)
0 - 50	34	-29.78	-10.31	-23.54	0.70	10.36	-0.30	-11.30	0.40	69.63	55.70	19.84	50.50	46.85	20.66	35.20	11.30	10.13
50 - 100	71	-25.47	-18.84	-23.88	0.92	8.58	-0.38	-4.61	0.19	76.58	61.26	14.75	62.93	47.17	47.34	51.31	6.47	13.00
100 - 150	30	-24.00	-28.07	-22.57	0.99	9.84	-0.39	-5.27	0.27	113.80	91.04	14.64	99.87	83.14	50.04	85.19	5.58	14.50
150 - 200	1	-23.47	-37.69	-23.49	1.00	16.13	-0.69	-0.24	0.01	51.89	41.51	14.62	37.27	37.06	96.16	5.81	9.02	7.63
0 - 100	105	-26.87	-16.08	-23.77	0.85	9.15	-0.35	-6.52	0.25	74.33	59.46	16.40	58.91	47.07	39.04	46.71	8.03	12.07

Fuente: Elaboración propia

4.4 Comparación de los resultados con otros estudios similares

En el presente apartado se realizan comparaciones y comentarios acerca de los resultados obtenidos en este estudio con el realizado por Rojas en la ciudad de Bogotá (Rojas Cubides, 2018), quien a su vez realizó comparativos de sus resultados con los de otras zonas tropicales así como también en latitudes templadas; dichos comparativos se utilizarán para tener insumos al momento de documentar las observaciones que surgen a partir de los resultados obtenidos por este estudio y otros de similares características.

4.4.1 Polaridad en función de los rangos de distancia

En la Tabla 14 se listan las cantidades de strokes positivos y negativos capturados en el marco de este trabajo. Se puede observar que el 64% de los strokes negativos registrados en la ciudad de Manizales, se presentaron a menos de 100 km de la estación de medida; caso similar ocurre con los impactos positivos registrados en la ciudad de Manizales, donde un mayor porcentaje de impactos (77%) fueron registrados dentro del mismo rango de distancia. En cuanto al rango comprendido entre los 200 y los 250 km, en el caso de Manizales, no se obtuvieron eventos registrados coincidentes con la base de datos de Keraunos, esta situación se debe a que los registros facilitados por Keraunos para la presente investigación, contemplaban una región cuadrada de 100x100 km², por lo que no se registraron datos para impactos más allá de los 200 km de distancia de la antena.

Es importante resaltar que, aunque el sistema captura eventos de pequeña y mediana longitud y se observa que a partir de los 150 km se reduce el porcentaje de impactos detectados.

Tabla 14. Flashes CG registrados en función de diferentes rangos de distancia

Lugar	Polaridad	0-50 km	50-100 km	100-150 km	150-200 km	200-250 km	Total
Manizales	Negativo	152 (13%)	585 (51%)	400 (35%)	19 (2%)	0 (0%)	1156
Manizales	Positivo	34 (25%)	71 (52%)	30 (22%)	1 (1%)	0 (0%)	136
Bogotá	Negativo	80 (26%)	84 (27%)	47 (15%)	57 (19%)	38 (12%)	306
Sri Lanka	Negativo	31 (18%)	61 (35%)	46 (27%)	14 (8%)	21 (12%)	173

Fuente: Adaptada de (Rojas Cubides, 2018)

4.4.2 Valor pico inicial del campo eléctrico normalizado a 100 km

En la Tabla 15 se muestra el valor pico inicial del CE normalizado a 100 km para estudios realizados en diferentes lugares del mundo, el cual fue recopilado por (Rojas Cubides, 2018). En el caso de Manizales se obtuvo una media aritmética del valor pico inicial normalizado a 100 km de 25.2, dicho valor se encuentra próximo a los reportados por (Haddad et al., 2012) y (Rojas Cubides, 2018) y es mayor entre 3.7 y 4.7 veces a los resultados de (Y. T. LIN, M. A. UMAN, J. A. TILLER, 1979) y (Cooray & Lundquist, 1982) respectivamente.

Tabla 15. Valor pico inicial del campo eléctrico normalizado a 100 km ($E_{P,N}$) – (V/m)

Referencia (año)	Ubicación	Zona de medición	FRS			
			N	MA	MG	DE
Lin et al. (1979)	Florida	Tierra	51	6.7	-	3.8
Lin et al. (1979)	Florida del norte	Tierra	29	5.8	-	2.5
Master et al. (1984)	Florida	Tierra	112	6.2	-	3.4
Rakov & Uman (1990)	Florida	Tierra	76	-	5.9	-
Haddad et al. (2012)	Florida	Tierra	265	28.6	25.3	-
Cooray & (Cooray & Lundquist, 1982)(1982)	Suecia	Tierra	553	5.3	-	2.7
Heidler & Hopf (1998)	Alemania	Tierra	148	5.3	-	3.2
Wooi et al. (2016)	Malasia	Tierra	104	21.8	18.9	11.4
Rojas (2017)	Bogotá, Colombia	Tierra	306	27.6	21.6	19.2
Rojas (2017)	Sri Lanka	Mar/Tierra	173	14.6	12.2	9.3
Este estudio (2020)	Manizales, Colombia	Tierra	1156	25.2	20.2	17.4

Fuente: Adaptada de (Rojas Cubides, 2018)

4.4.3 Amplitud del sobrepico de polaridad opuesta (OPO) con respecto al valor pico

En la Tabla 16 se observa la relación entre el valor del primer sobrepico de polaridad opuesta y el valor pico, esta relación, se calculó teniendo en cuenta la polaridad de ambos términos de la relación, por lo cual el valor de la relación puede tener valores negativos. Tomando el valor de la media aritmética como valor absoluto para compararla con los resultados de Rojas para Bogotá y Sri Lanka, se observa que el valor es menor al reportado tanto para Bogotá, como para Sri Lanka. Los tres estudios presentan desviaciones estándar similares. Complementando el análisis con los datos registrados en la Tabla 12, en esta se observa que el valor absoluto de esta relación corresponde al

valor presentado para el rango de 100 km a 150 km, el cual tiene el mayor número de señales.

Tabla 16. Amplitud del sobrepico de polaridad opuesta respecto al valor pico (E_{OPO}/E_p) – adimensional

Referencia (año)	Ubicación	Zona de medición	FRS			
			N	MA	MG	DE
Rojas (2017)	Bogotá, Colombia	Tierra	227	0.51	0.42	0.27
Rojas (2017)	Sri Lanka	Mar/Tierra	144	0.43	0.35	0.25
Este estudio (2020)	Manizales, Colombia	Tierra	1100	-0.3	-	0.33

Fuente: Adaptada de (Rojas Cubides, 2018)

4.4.4 Tiempo de ascenso de cero al pico

El tiempo de ascenso determinado para este estudio presentó una media aritmética de 13.3 μ s para el total de 1156 eventos negativos registrados en Manizales, esta medida es 25% mayor que el reportado para Bogotá, lo cual puede deberse a la presencia de zonas montañosas tal como se muestra en la Tabla 17, lo que trae consigo atenuaciones y pérdidas de propagación por terrenos irregulares, también se presentan atenuaciones debidas a las diferencias de altura de los eventos registrados.

Tabla 17. Tiempo de ascenso de cero al pico (0-100%) (t_{zp}) – Valores en μ s

Referencia (año)	Ubicación	Zona de medición	FRS			
			N	MA	MG	DE
Rojas (2017)	Bogotá, Colombia	Tierra	306	10.6	9.9	4.1
Rojas (2017)	Sri Lanka	Mar/Tierra	173	7.7	7.2	2.7
Este estudio (2020)	Manizales, Colombia	Tierra	1156	13.3	18.5	46.4

Fuente: Adaptada de (Rojas Cubides, 2018)

4.4.5 Tiempo de ascenso 10-90%

Al igual que para el tiempo de cero al pico (0-100%), en el consolidado de tiempo de ascenso 10-90, se presentan valores mucho mayores en la ciudad de Manizales que en Bogotá y Sri Lanka, por las mismas razones expuestas con anterioridad (terreno más irregular y mayores diferencias de altura).

Tabla 18. Tiempo de ascenso 10-90% (t_{10-90}) – Valores en μ s

Referencia (año)	Ubicación	Zona de medición	FRS			
			N	MA	MG	DE
Rojas (2017)	Bogotá, Colombia	Tierra	306	7.1	6.3	3.6
Rojas (2017)	Sri Lanka	Mar/Tierra	173	4.7	4.2	2.3
Este estudio (2020)	Manizales, Colombia	Tierra	1156	10.7	14.8	37.1

Fuente: Adaptada de (Rojas Cubides, 2018)

4.4.6 Duración del frente lento y del frente rápido

Las tablas Tabla 19 y Tabla 20 muestran la duración del frente lento (t_{SF}) y la duración del frente rápido (t_{FT}) respectivamente. El frente lento está asociado con el proceso de enlace, es decir, el momento cuando el líder escalonado ascendente hace contacto con el líder descuente, mientras que el frente rápido se da después del frente lento y ocurre cuando la descarga ascendente alcanza el líder que viene descendiendo por su canal.

La media aritmética del frente lento fue mayor para Manizales que para Bogotá y Sri Lanka excediendo sus valores en 116% y 106% respectivamente. La media aritmética del frente rápido es superior a la reportada para Bogotá, excediéndola en un 28% y es menor al reportado para Sri Lanka, representando un 83% del valor reportado.

Tabla 19. Duración del frente lento (t_{SF}) – Valores en μs

Referencia (año)	Ubicación	Zona de medición	FRS			
			N	MA	MG	DE
Santamaria et al. (2006)	Bogotá, Colombia	Tierra	68	4.5	-	-
Rojas (2017)	Bogotá, Colombia	Tierra	306	6	5.3	2.9
Rojas (2017)	Sri Lanka	Mar/Tierra	173	4.7	4.1	2.3
Este estudio (2020)	Manizales, Colombia	Tierra	1156	9.7	10.9	15.3

Fuente: Adaptada de (Rojas Cubides, 2018)

Tabla 20. Duración del frente rápido (t_{FT}) – Valores en μs

Referencia (año)	Ubicación	Zona de medición	FRS			
			N	MA	MG	DE
Rojas (2017)	Bogotá, Colombia	Tierra	306	4.6	4.1	2.3
Rojas (2017)	Sri Lanka	Mar/Tierra	173	3	2.4	2.1
Este estudio (2020)	Manizales, Colombia	Tierra	1156	3.6	5.1	44.0

Fuente: Adaptada de (Rojas Cubides, 2018)

4.4.7 Tiempo de cruce por cero

En la Tabla 21 se muestran los datos de la duración del frente lento obtenidas para Manizales, Bogotá y Sri Lanka. Este parámetro es asociado a diferentes fenómenos y aspectos como: distribución de la carga en el canal y la longitud del canal, así como a la velocidad del frente, entre otras.

Para Manizales se obtuvo un tiempo de cruce por cero de 76.26 μs , con una media geométrica de 65.5 μs . Se observan diferencias en este parámetro entre lo reportado para Bogotá (entre 62 y 72.6 μs promedio) y lo reportado en Sri Lanka (100.1 μs promedio).

Tabla 21. Tiempo de cruce por cero (t_{zc}) – Valores en μs

Referencia (año)	Ubicación	Zona de medición	FRS			
			N	MA	MG	DE
Santamaria et al. (2006)	Bogotá, Colombia	Tierra	68	62	60	-
Santamaria et al. (2006)	Bogotá, Colombia	Tierra	57	72	78	-
Rojas (2017)	Bogotá, Colombia	Tierra	227	72.6	69	23.4
Rojas (2017)	Sri Lanka	Mar/Tierra	144	100.1	95	33.9
Este estudio (2020)	Manizales, Colombia	Tierra	1106	76.3	65.5	44.3

Fuente: Adaptada de (Rojas Cubides, 2018)

4.4.8 Características de la derivada del campo eléctrico

En las tablas Tabla 22 y Tabla 23 se muestran los parámetros valor pico de la derivada de CE y el ancho completo a media altura de la derivada de CE (FWHM), la derivada es usada al interior del script de clasificación para estimar la posición del inicio del frente rápido, por su parte el FWHM se ha empleado como complemento a la derivada y mejora a la información de la derivada, ya que tiene en cuenta tanto el frente como la cola de la forma de onda (Wooi et al., 2016) (Willett & Krider, 2000). Los valores del valor pico de la derivada presentan valores promedio de 5.9 V/m/ μs y 5 V/m/ μs para Bogotá y Manizales respectivamente, por su parte para Sri Lanka se reportó un valor de 6.9 V/m/ μs . Con respecto al FWHM se obtuvo una media aritmética de 3.42 μs y 8.8 μs para Bogotá y Manizales respectivamente; para Sri Lanka se tiene una MA de 1.86 μs .

Los datos presentados son congruentes con los tiempos menores de cero al pico y 10-90 presentados en Sri Lanka por lo que se puede afirmar con base a estas observaciones que en Sri Lanka se presentan eventos de mayor rapidez (tiempo de ascenso y FWHM menores) que los que se presentan en Colombia.

Tabla 22. Valor pico de la derivada del campo eléctrico $(dE/dt)_p$ – Valores en V/m/ μs

Referencia (año)	Ubicación	Zona de medición	FRS			
			N	MA	MG	DE
Rojas (2017)	Bogotá, Colombia	Tierra	306	5.9	5	3.6
Rojas (2017)	Sri Lanka	Mar/Tierra	173	6.9	6	3.9
Este estudio (2020)	Manizales, Colombia	Tierra	1156	5	13.7	3.6

Fuente: Adaptada de (Rojas Cubides, 2018)

Tabla 23. Ancho completo a media altura de la derivada de CE (FWHM) – Valores en μs

Referencia (año)	Ubicación	Zona de medición	FRS			
			N	MA	MG	DE
Rojas (2017)	Bogotá, Colombia	Tierra	306	3.42	3.11	1.25
Rojas (2017)	Sri Lanka	Mar/Tierra	173	1.86	1.33	1.59
Este estudio (2020)	Manizales, Colombia	Tierra	1156	8.8	27.2	4.6

Fuente: Adaptada de (Rojas Cubides, 2018)

4. Conclusiones y trabajo futuro

5.1 Conclusiones

En esta tesis se realizó una caracterización preliminar de las descargas eléctricas atmosféricas en zona tropical montañosa para la ciudad de Manizales. Las principales características que se determinaron: Polaridad, Valor pico inicial del campo eléctrico normalizado a 100 km, Amplitud del sobrepico de polaridad opuesta (OPO) con respecto al valor pico, Tiempo de ascenso de cero al pico, Tiempo de ascenso 10-90% , duración del frente lento y del frente rápido, Tiempo de cruce por cero y Características de la derivada del campo eléctrico.

Se diseñó y se construyó un sistema de medida de bajo costo de placas paralelas, con una mejora al diseño del circuito de control del sistema de medida, alimentado desde una fuente DC con baterías de plomo que permiten una autonomía de 6 horas al sistema de medida. Un sistema de este tipo, tiene un valor comercial del orden de las decenas de miles de dólares; el sistema construido tiene un valor cercano a los 1.500 dólares.

El presente trabajo es el primer estudio que se realiza para la caracterización de campo eléctrico radiado por rayo utilizando una antena de placas paralelas para la ciudad de Manizales; con este se caracterizaron las señales de campo eléctrico radiadas por rayo desarrollando un software en Python que permitiera de manera automática identificar parámetros en las señales capturadas, tales como polaridad, valores pico, cruces por cero, tiempos de ascenso, tiempos de frente lento, tiempos de frente rápido, entre otras. Con el desarrollo de este software se lograron procesar aproximadamente 15.000 señales de campo eléctrico radiado y finalmente se analizaron 1.292 señales, debido a la coincidencia de estos eventos con los reportados en los sistemas de localización de rayos como LINET.

Se realizaron comparaciones con estudios recientes realizados en zona tropical como lo es Bogotá y Sri Lanka. De las diferencias encontradas se puede resaltar las presentadas en los tiempos de cero al pico y 10-90%, en donde se evidencia variaciones considerables entre las reportadas para Sri Lanka con respecto a las encontradas para Manizales y Bogotá; también se resalta las variaciones presentadas en los tiempos de frente lento y rápido, encontrando mayores valores para Colombia que en Sri Lanka, las dos observaciones pueden atribuirse a atenuaciones por las condiciones topográficas de Colombia.

Se obtuvieron y analizaron una cantidad considerable de señales, comparadas con los estudios referenciados de Bogotá y Sri Lanka, se destaca la obtención de señales con características de rayos positivos, ausentes en los estudios citados.

Se pudo observar que el sistema implementado presenta un mejor desempeño en el rango de los 50 km a los 100 km, con un 51% para los rayos de polaridad negativa y un 52% para la polaridad positiva. Al compararlo con Bogotá y Sri Lanka se observó un 27% y un 35% respectivamente. En el rango de 100 km a 150 km se encontró que el 35% del total de rayos son de polaridad negativa y el 22% de polaridad positiva, siendo también porcentajes superiores a los reportados en Bogotá y Sri Lanka. No se reportaron eventos en el rango entre los 200 km y 250 km, ya que en la base de datos de comparación (LINET) no se tenían datos más allá de los 200 km de distancia a la antena de placas paralelas.

Se observó concordancia con las mediciones reportadas en zona tropical en el parámetro Valor pico inicial del campo eléctrico normalizado a 100 km (E_{P_N}) encontrando que el valor promedio obtenido para este parámetro (25.2), es segundo más alto comparado con los valores reportados por otros estudios en zona tropical, como lo son Bogotá (27.6), Malasia (21.8) y Sri Lanka (14.6).

Se encontró que el valor absoluto de la amplitud del sobrepico de polaridad opuesta respecto al valor pico de los rayos de polaridad negativa ($E_{OP0}/E_p=0.3$) es menor que las reportadas para Bogotá (0.51) y Sri Lanka (0.43), lo cual puede atribuirse a un factor del sistema subdimensionado.

Se encontraron los mayores tiempos de ascenso, Tiempo de ascenso de cero al pico (t_{zp}) y Tiempo de ascenso 10-90% (t_{10-90}), con respecto a los estudios de Bogotá y Sri Lanka. En términos de tiempo de cero al pico (t_{zp}), se obtuvo un valor mayor en porcentaje 25% y 73% con respecto a Bogotá y Sri Lanka respectivamente. Por su lado el valor obtenido para el tiempo de ascenso 10-90% (t_{10-90}), fue mayor en un 51% y 128% para Bogotá y Sri Lanka respectivamente. Lo anterior puede deberse a la presencia de zonas montañosas, lo que trae consigo atenuaciones y pérdidas de propagación por terrenos irregulares y atenuaciones debidas a las diferencias de altura de los eventos registrados.

Se encontraron los mayores tiempos de duración del frente rápido (t_{FT}) y un valor intermedio para la duración del frente lento (t_{SF}) con respecto a los estudios de Bogotá y Sri Lanka. En términos de duración del frente lento (t_{SF}) se obtuvo un valor que cercano a los valores reportados para Bogotá y Sri Lanka representado un 128% y un 83% respectivamente. En términos de la duración del frente lento (t_{FT}) se encontró un valor mucho mayor que los demás estudios de referencia, siendo un 62% mayor que el reportado en Bogotá (Rojas) y un 116% y 106% mayor a los reportados en Bogotá (Santamaria) y Sri Lanka respectivamente. El mayor valor obtenido para la duración del frente lento es coherente con los mayores valores de tiempo de ascenso encontrados y puede tener que ver la ubicación del punto cero (E_0) en el script desarrollado.

Se encontraron tiempos de cruce por cero similares a los estudios realizados en Bogotá siendo el valor promedio (76.3) superior entre un 5% y un 19% a los reportados por diferentes autores para la ciudad de Bogotá, y menor un 31% con respecto al reporte de Sri Lanka, destacándose que este último tiene mediciones de impactos tanto en tierra, como en el mar, lo cual puede explicar el exceso del valor reportado para Sri Lanka en relación con el encontrado para Colombia.

5.2 Trabajo futuro

Respecto al sistema de medida, se recomienda realizar dos mejoras, una de ellas es mejorar la ganancia del sistema con un sistema de variación automática de la ganancia con el fin de capturar eventos cercanos minimizando la saturación del circuito electrónico. Otra mejora importante es cambiar el sistema de carga por uno con baterías de litio.

Realizar el procesamiento de las señales adquiridas durante el primer semestre de 2021 considerando la multiplicidad de los eventos eléctricos atmosféricos.

Desarrollar un software que permita determinar la corriente de rayo utilizando modelos de corriente que hagan uso de las mediciones de campo eléctrico.

Desarrollar una red de alerta temprana por rayo utilizando tres dispositivos de bajo costo como los propuestos en esta tesis.

Anexos

Anexo A: Modulo de alimentación ininterrumpida

A1. DISEÑO SISTEMA DE ALIMENTACIÓN ININTERRUMPIDA

Introducción:

Una vez energizado o activado el sistema DC-UPS, se ejecuta un primer procedimiento de arranque (boot mode) cuyo funcionamiento se describe a continuación al igual que el modo de operación continuo (continuous mode). Estos dos modos de funcionamiento conforman el núcleo principal de la operación del sistema DC-UPS y se pueden diferenciar en el código fuente.

Componentes:

Baterías:

Se usan 4 baterías de 12 Voltios: Valve regulator lead acid battery 12v 4.5 A/h

Es decir, baterías de plomo ácido, con regulador de válvula.

Cargador de baterías de Plomo-acido con regulador de válvula:

Para preservar la vida útil y la capacidad de la batería, lo mejor es usar la carga constante de voltaje-corriente limitada.

Básicamente para realizar el proceso de carga de la batería, es necesario tener una fuente de corriente DC, con un voltaje mayor que el voltaje de circuito abierto de la batería.

El correcto establecimiento de los límites de voltaje de carga está entre 2.3V a 2.45V por celda.

El equipo de carga Techman TC-121 12V Lead Acid Battery Charger, permite la carga de las baterías con un voltaje de 13.8 V.

Diseño:

Se plantea un esquema que permite controlar 4 baterías. El sistema de alimentación debe ser capaz de cargar 2 baterías, mientras se usa 1 batería restante.

Fuente:

Las fuentes usadas (Techman TC-121 12V Lead Acid Battery Charger), poseen un voltaje de 13.8V y una corriente de 1A. Dichas fuentes permiten cargar la batería de 4.5A en mínimo 4.5 horas, suponiendo una corriente de carga de 1A/h.

Interruptores:

En electrónica, los interruptores convencionales son transistores, para este caso tecnología MOSFET, comparándolos con los relés tradicionales son bajos en ruido y algunas referencias como el IRL540 permiten su fácil control por medio de voltajes muy bajos en la compuerta.

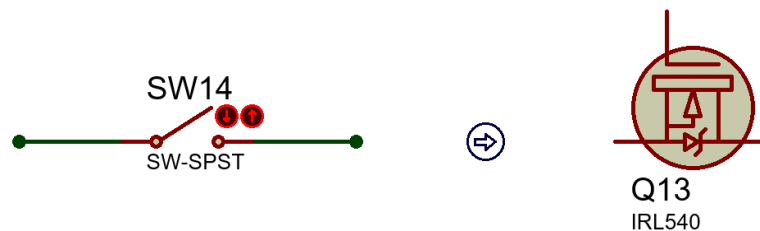


Figura 50. Mosfet como Interruptor

Para que el transistor MOSFET trabaje como interruptor, debe trabajar en los modos de saturación y corte.

Para el modo saturación: $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$

Para el modo corte: $V_{GS} < V_T$

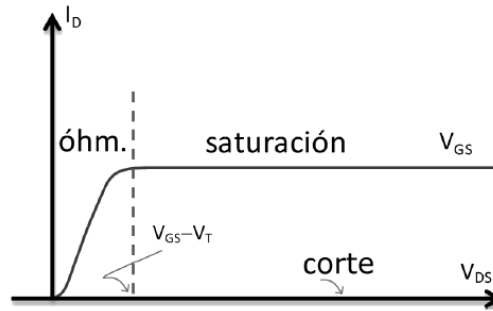


Figura 51. Regiones de funcionamiento de un MOSFET canal n cuando $V_{GS} \geq V_T$

Fuente:

https://www.diarioelectronico hoy.com/blog/imagenes/2012/11/regiones_mosfet.gif

La siguiente gráfica presenta el diseño esquemático del sistema:

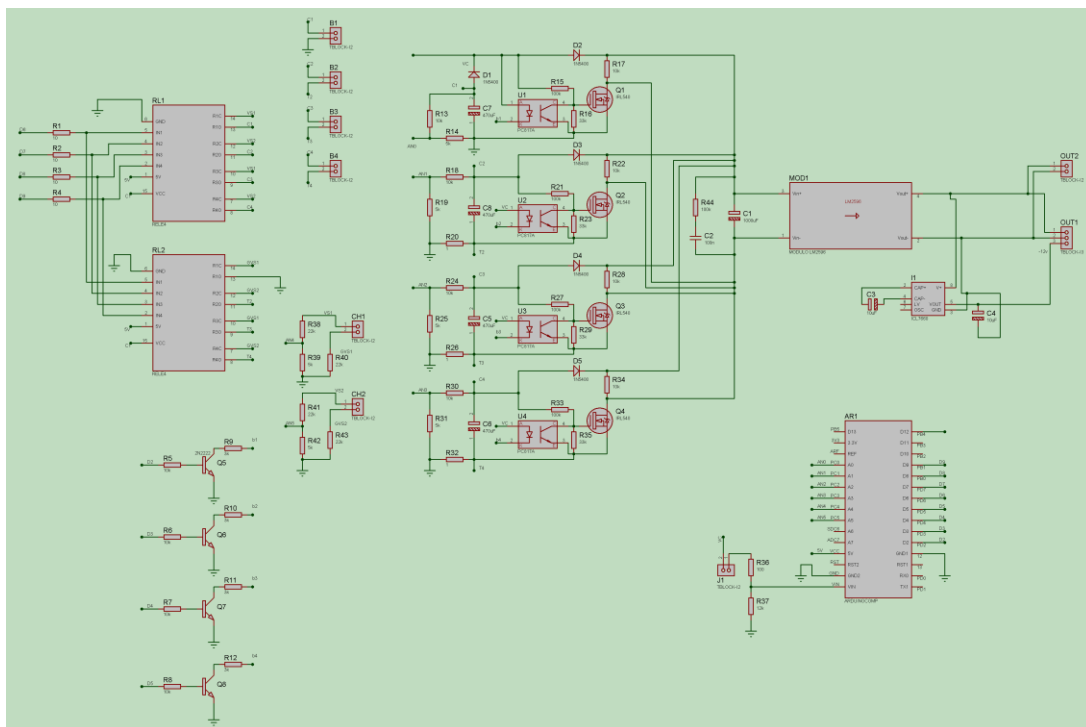
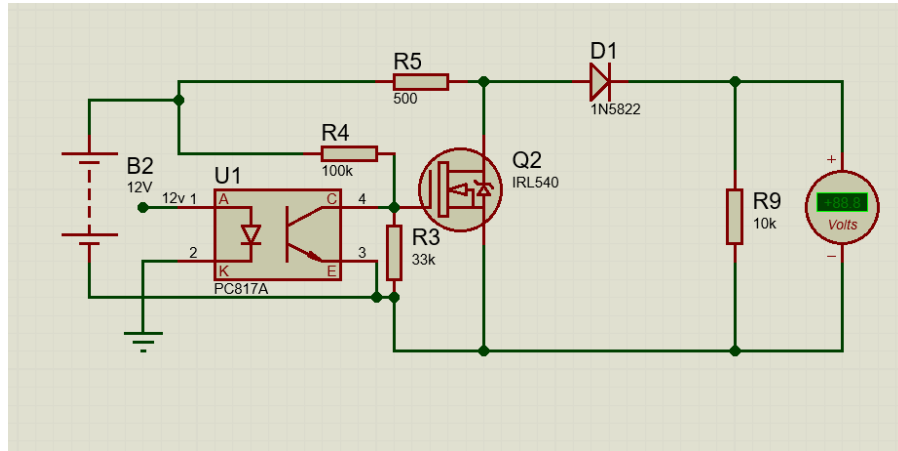
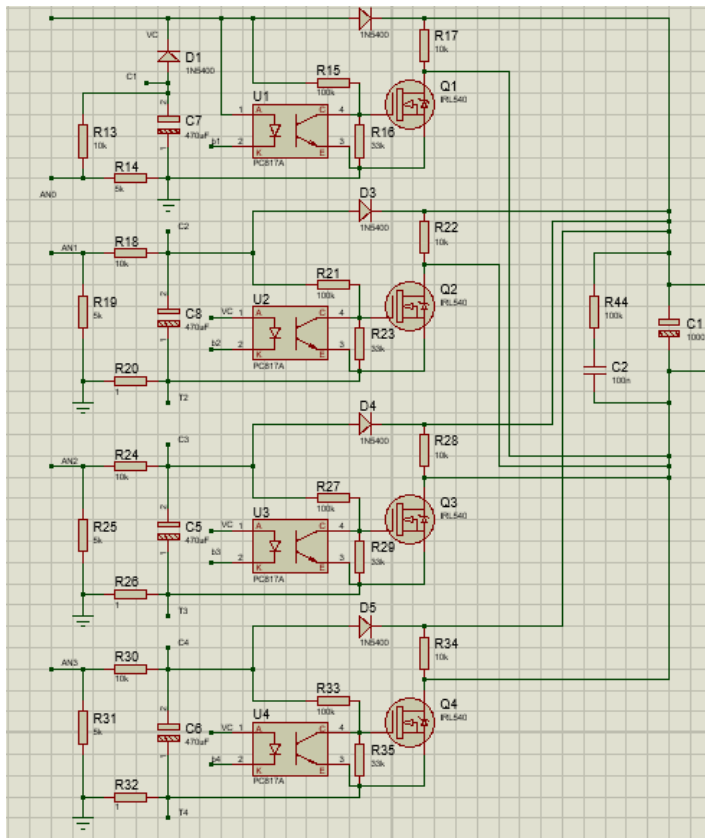


Figura 52. Esquemático placa principal

Una de las ventajas en el uso los transistores MOSFET de potencia como el IRL540, que se usa en este diseño, es la posibilidad de manejar cargas de hasta 6 amperios, con la posibilidad de ser controlado por niveles de voltaje a nivel lógico.



El esquema anterior, en conjunto, forma en total una red de conexiones de 4 baterías. El diodo led del optoacoplador PC817A al activarse con una señal de voltaje, obtenida de un transistor 2n2222A polariza el transistor para que se vuelva corto circuito y pase el voltaje a través del diodo. A continuación, se presenta el esquema en conjunto:



El sistema usado para alternar la carga de las baterías se basa en el uso de un módulo de 4 relés activado mediante voltajes TTL obtenidos del microcontrolador Arduino Nano.

Para monitorear el estado de carga en las baterías, un metodo no muy eficiente pero práctico, es el de la observación del voltaje.

El sistema funciona usando una máquina de estados finita, la cual permite, para el estado 1, mandar el voltaje de la batería 1 a la salida, cargando las siguientes baterías (2,3 y 4).

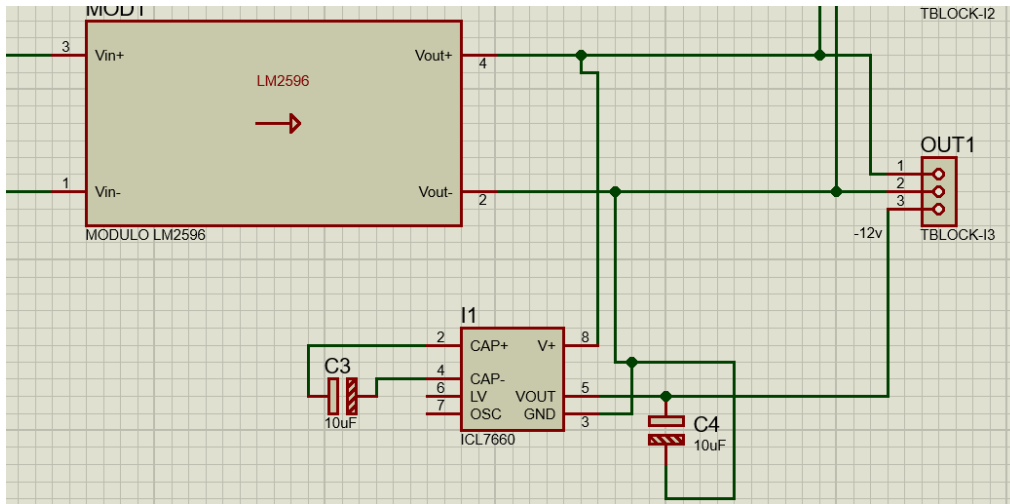
Para los otros 2 estados, el sistema funciona de la misma manera, cargando las dos baterías siguientes, a excepción del estado 4, en el que se cargan las baterías 1 y 2, de esta forma se obtiene el ciclo completo del sistema, llegando al estado inicial.

Un caso extremo en la máquina de estados, es el estado en el cual las 4 baterías se quedaron sin carga, por lo cual, el sistema automáticamente enciende el piloto led L integrado en la placa del Arduino Nano.

Lo que determina los estados, para dicha máquina de estados, es el voltaje de las baterías, el cual se mide a través de un divisor de voltaje, la transición de los estados depende del agotamiento de la carga que se ve directamente relacionada con el voltaje medido de cada batería.

Normalmente, posterior a la carga de una batería, el voltaje de dicha, será mucho mayor a 12 voltios, por lo tanto es necesario regular el voltaje de salida, para que no vaya a afectar los equipos que funcionan a 12V. El módulo LM2596 permite regular el voltaje de entrada con una eficiencia óptima, ya que usa el modelo Step-Down converter, el cual permite reducir el voltaje entrante mediante una señal de reloj que conecta y desconecta un capacitor.

Para la obtención del voltaje negativo -12V se usa un TC7660S, el cual es un conversor elevador de voltaje (Charge Pump) , que conectado al módulo LM2596, permite obtener el voltaje negativo correspondiente. El esquema de conexiones es el siguiente:



El sistema, permite manejar una carga total de máximo 2 Amperios, limitado por la corriente de entrada total en el sistema para cuando las baterías están cargando.

A2. MODOS DE FUNCIONAMIENTO

A2.1. MODO DE ARRANQUE (BOOT MODE):

Se ejecuta en el bloque de código `void setup(){ }` por lo que solo se ejecuta únicamente al iniciar el sistema, realiza las siguientes tareas:

1) Detección de los cargadores, es posible que se presenten fallos en la conexión de los cargadores o en los mismos cargadores por daños o ausencia de alimentación AC.

* En el caso de fallar la detección de uno o ambos cargadores, se emitirá un sonido compuesto por dos beeps (pitidos).

* La ausencia de cargadores no es factor bloqueante en el funcionamiento (el sistema puede funcionar con la carga de las baterías siempre y cuando tengan carga suficiente).

Por lo que se debe estar atento en el arranque para realizar ajustes y correcciones debidas a inconvenientes con los cargadores si este es el caso.

* Para casos en que el problema con los cargadores no sea fácilmente detectable o se requieran más detalles, el programa está diseñado para que pueda ver un reporte por medio de un monitor serial en el computador, por lo que podrá conectarse a través de cable USB al Arduino, seleccionar el puerto COM correspondiente y usar un baud rate de 9600. (puede usar el monitor serial del Arduino IDE.)

2) Detección de baterías, las baterías deberán tener un valor mínimo de tensión ($> 6V$ aproximadamente) para ser consideradas como seguras y ser aceptadas para la puesta en marcha del sistema.

* En el caso de fallar la detección de una o varias baterías, se emitirá un sonido compuesto por cuatro beeps (Pitidos).

* La falla o ausencia de baterías es bloqueante para el sistema, esto quiere decir que el sistema no entrará en servicio. En este caso el sistema gestionará la carga de las baterías detectadas, pero permanecerá en este estado hasta que se solucione el problema detectado con la batería o baterías no detectadas y sus conexiones.

* Las baterías pueden estar descargadas por debajo de la tensión de detección debido a una descarga excesiva, por deterioro o por un prolongado periodo de almacenamiento entre otras.

Puede intentar recuperarlas conectando el cargador directamente a cada batería con el fin de alcanzar el nivel de detección.

* Para casos en que el problema detectado por no detección de baterías, no sea fácilmente detectable o se requieran más detalles, el programa está diseñado para que pueda ver un reporte por medio de un monitor serial en el computador, por lo que podrá conectarse a través de cable USB al Arduino, seleccionar el puerto COM correspondiente y usar un baud rate de 9600. (puede usar el monitor serial del Arduino IDE.)

3) Elegir la primera batería a ser puesta en servicio, una vez detectadas las baterías, se determina un estimado del nivel de carga mediante la medida del valor de tensión.

* Se seleccionará la batería con mayor carga para ser puesta en servicio, en el caso en que las baterías se encuentren descargadas, se realizará una precarga de 30 minutos.

* Las baterías descargadas son un factor bloqueante, por lo que durante la precarga de 30 minutos no sucederá ninguna otra acción, podrá ver información de tiempo restante en el computador mediante un monitor serial como se ha descrito en ítems anteriores.

Además, podrá ver un parpadeo en los LEDs del Arduino con una cadencia de 1 min aproximadamente que le indicará que el Arduino está en un ciclo de ejecución (No bloqueado).

NOTA: Una vez completado este proceso de verificación y preparación el sistema seleccionará la batería más cargada y pasará a el funcionamiento de modo continuo.

A2.2. MODO CONTINUO (CONTINUOUS MODE):

Se ejecuta en el bloque de código `void loop(){ }` por lo que se ejecuta iterativamente realizando las siguientes tareas:

1) Gestionar el ciclo de uso de las baterías. Midiendo continuamente la batería en uso y cambiando a la batería siguiente cuando ya se haya agotado la batería en uso.

* Puede llegar a ocurrir el caso en que la batería a ser usada no tenga la carga suficiente, esto puede suceder por exceso de demanda de energía, esto provoca que no se proporcione el tiempo suficiente para cargar las baterías. También puede ocurrir por falta de retención de energía en las baterías por deterioro. En este caso el sistema saldrá de brindar servicio y realizará una precarga de 30 minutos para nuevamente entrar en servicio. Además, para este caso se emite un mensaje de alerta por el puerto serie, por lo que, para el caso de realizar una depuración de fallas, podrá detectar en pantalla este fallo por excesiva demanda de energía desde la DC-UPS.

2) Gestionar el ciclo de carga de las baterías, se realizan medidas continuamente del nivel de carga de las baterías preparando la próxima batería a ser puesta en servicio. y nivelando la carga de las baterías que recientemente se han usado.

* Se verifica periódicamente el estado de los cargadores, si no son detectados se emitirá un pitido cada minuto aproximadamente, hasta que se detecte la presencia de los cargadores o hasta agotar las baterías.

* También se hace reporte por el puerto serie para facilitar la depuración de fallos y errores cuando se requiera.

NOTA: En términos generales los parámetros y el funcionamiento se pueden ver reflejado desde un monitor serial en el computador a través de los reportes generados por el sistema DC-UPS. Allí se muestran los valores leídos para cargadores y baterías, por lo que puede ser de gran ayuda para la detección de fallas.

A3. CÓDIGO ARDUINO:

@Brief: This file contains the main program to manage a bank of 4 lead acid batteries controlling which battery is in service and which battery will be charging, it does under the below considerations:

1) The battery or batteries in charging state haven't to be used or connected to provide energy to the load.

2) Note: The Firmware has been compiled for the Arduino Duemilanove or Diecimila, it is sometimes labeled as Nano.

```

*/
// Verificar que los dos cargadores estén
conectados. (ok)
  /* si no están conectados emitir
alarma y mensaje uart solicitándolo. (ok)
  /* verificar disponibilidad y luego
estado de carga de las baterías. (ok)
  /* si suficiente carga:
  /* iniciar descarga en secuencia
definida y con beeps de alerta.
  /* + bucle while hasta terminar
baterías o hasta nueva conexión de
cargadores.
  /* si no hay suficiente carga: blink
destello.
*/
//Si los cargadores se conectan o están
conectados:
// verificar presencia de las baterías y
verificar estado de carga de baterías.
/**
 * si totalmente descargadas entonces
iniciar precarga 1 hora o hasta alcanzar
 * voltaje de batería cargada.
 * Si baterías suficiente mente cargadas
habilitar funcionamiento continuo.
*/
#include "UPS_HW_Controller.h"
bool Begining_Stage = true;
float Battery_Level = 0;
void setup() {
  Serial.begin(9600);

UPS_HW_Serial_Sent_Welcome_Messa
ge();

```

```

if( UPS_HW_Chargers_Availability() ==
FAILURE){
  UPS_HW_Beep( 2 );
}
if (UPS_HW_Batteries_Availavility() !=
ALL_AVAILABLE)
{
  UPS_HW_Beep( 4 );
}
while( false ){ // pendiente definir.
UPS_HW_Beep( 4 );

UPS_HW_Pre_Charge_Abailable_Batter
ies();
  UPS_HW_Wait_Minutes(1);
}
  Status_UsingBattery =
USING_BATTERY_STAGE_1; //
pendiente definir pocición inicial.
}
void loop() {
  switch (Status_UsingBattery){
  case USING_BATTERY_STAGE_1:
    Battery_Level =
UPS_HW_Get_Battery_level(
Battery_Sequence[USING_BATTERY_S
TAGE_1] );
    if (Begining_Stage){
      Begining_Stage = false;
      Serial.println("Etapa 1");
      HW.Stop_Charging();
      if( Battery_Level <=
MINIMUM_CHARGE ){
        Status_UsingBattery =
ALL_BATTERIES_DISCHARGED;
        Begining_Stage = true;
      }
    }
    else if( Battery_Level >=
MIIMUM_DISCHARGE ){
      Serial.println(Battery_Level);
      UPS_HW_Activate_Battery_Usage(
Battery_Sequence[USING_BATTERY_S
TAGE_1] );
    }
  }
  else{

```

```

    Status_UsingBattery =
    USING_BATTERY_STAGE_2;
    Begining_Stage = true;
    }
    break;
    case USING_BATTERY_STAGE_2:
        Battery_Level =
        UPS_HW_Get_Battery_level(
        Battery_Sequence[USING_BATTERY_S
        TAGE_2] );
        if (Begining_Stage){
            Begining_Stage = false;
            Serial.println("Etapa 2");
            HW.Stop_Charging();
            if( Battery_Level <=
            MINIMUM_CHARGE ){
                Status_UsingBattery =
                ALL_BATTERIES_DISCHARGED;
                Begining_Stage = true;
            }
        }
        else if( Battery_Level >=
        MIIMUM_DISCHARGE ){
            Serial.println(Battery_Level);
            UPS_HW_Activate_Battery_Usage(
            Battery_Sequence[USING_BATTERY_S
            TAGE_2] );
        }
        else{
            Status_UsingBattery =
            USING_BATTERY_STAGE_3;
            Begining_Stage = true;
        }
        break;
        case USING_BATTERY_STAGE_3:
            Battery_Level =
            UPS_HW_Get_Battery_level(
            Battery_Sequence[USING_BATTERY_S
            TAGE_3] );
            if (Begining_Stage){
                Begining_Stage = false;
                Serial.println("Etapa 3");
                HW.Stop_Charging();
                if( Battery_Level <=
                MINIMUM_CHARGE ){
                    Status_UsingBattery =
                    ALL_BATTERIES_DISCHARGED;
                    Begining_Stage = true;
                }
            }
        }
    }

    else if( Battery_Level >=
    MIIMUM_DISCHARGE ){
        UPS_HW_Activate_Battery_Usage(
        Battery_Sequence[USING_BATTERY_S
        TAGE_3] );
    }
    else{
        Status_UsingBattery =
        USING_BATTERY_STAGE_4;
        Begining_Stage = true;
    }
    }
    break;
    case USING_BATTERY_STAGE_4:
        Battery_Level =
        UPS_HW_Get_Battery_level(
        Battery_Sequence[USING_BATTERY_S
        TAGE_4] );
        if (Begining_Stage){
            Begining_Stage = false;
            Serial.println("Etapa 4");
            HW.Stop_Charging();
            if( Battery_Level <=
            MINIMUM_CHARGE ){
                Status_UsingBattery =
                ALL_BATTERIES_DISCHARGED;
                Begining_Stage = true;
            }
        }
    }
    else if( Battery_Level >=
    MIIMUM_DISCHARGE ){
        UPS_HW_Activate_Battery_Usage(
        Battery_Sequence[USING_BATTERY_S
        TAGE_4] );
    }
    else{
        Status_UsingBattery =
        USING_BATTERY_STAGE_1;
        Begining_Stage = true;
    }
    }
    break;
    default : //ALL BATTERYES
    DISCHARGED.
        if (Begining_Stage){
            Begining_Stage = false;
            Serial.println("!!! WARNING:
            Discharge rate is over charge rate.");
        }

    UPS_HW_Disable_All_Battery_Usage();

```

```

//
UPS_HW_Pre_Charge_Available_Batter
ies();
//ir a precarga y esperar hasta nivelar
baterias. y Begining_Stage = true;
break;
}
/***** Testear baterias y cargador
cada cierto tiwmpo *****/

/**
 * Maquina de estados de carga de
battery.
 * Para banco uno:
 * cargar prioritaria hasta nivel de
suficiencia. 60%
 * cargar la menor hasta 40%
 * cargar nivelando ambas baterías del
banco (si están disponibles para cargar
ambas)
 */
// mismo sistema para controlar banco
2 //
switch( Stat_BatteryBank_1 ){
case CHARGING_BATT_A:
if (Battery_Test[BATTERY_1] ==
OK){ //y no se esta usando
Stat_BatteryBank_1 =
CHARGING_BATT_B;
// havilitar carga de bateria

HW.Enable_Charge_Battery_2(false);

HW.Enable_Charge_Battery_1(true);
//if battery A cargada mas de 70%
y tiempo cumplido ->
Stat_BatteryBank_1 =
CHARGING_BATT_B;
}

break;
case CHARGING_BATT_B:
if (Battery_Test[BATTERY_2] ==
OK){
Stat_BatteryBank_1 =
CHARGING_BATT_A;

HW.Enable_Charge_Battery_1(false);

HW.Enable_Charge_Battery_2(true);
}
break;
default:
Stat_BatteryBank_1 =
CHARGING_BATT_A;

HW.Enable_Charge_Battery_2(false);
break;
}

switch( Stat_BatteryBank_2 ){
case CHARGING_BATT_A:
if (Battery_Test[BATTERY_3] ==
OK){
Stat_BatteryBank_2 =
CHARGING_BATT_B;

HW.Enable_Charge_Battery_4(false);

HW.Enable_Charge_Battery_3(true);
}

break;
case CHARGING_BATT_B:
if (Battery_Test[BATTERY_4] ==
OK){
Stat_BatteryBank_2 =
CHARGING_BATT_A;

HW.Enable_Charge_Battery_3(false);

HW.Enable_Charge_Battery_4(true);
}

break;
default:
Stat_BatteryBank_2 =
CHARGING_BATT_A;

HW.Enable_Charge_Battery_3(false);

HW.Enable_Charge_Battery_4(false);
break;
}

HW.Blink(10);
delay(2000);
}

```

A4. PRECAUCIONES, MONTAJE Y MANTENIENDO

Ensamble inicial:

- Asegurarse que el interruptor frontal esté en posición descendente, es decir, el sistema está apagado.
- Observando el dibujo de la placa, conectar el Arduino asegurándose que no quede ningún pin por fuera. El Arduino debe quedar dispuesto de tal forma, en que el puerto mini USB apunte hacia afuera de la placa.
- Conectar el módulo LM2596 según la disposición de las salidas Out - y Out + en dirección a la flecha.
- Conectar cada una de las 4 baterías, teniendo en cuenta que deben ir conectadas a las borneras con las etiquetas B1, B2, B3 y B4. El positivo de cada batería viene señalado para su correcta conexión.
- Conectar cada una de las salidas en las borneras: la salida 1 (Out 1), permite obtener 12V (Rojo), Tierra (**Negro**) y -12V (Azul), la salida 2 (Out 2), permite obtener 12V (Rojo) y Tierra (**Negro**).
- Conectar los dos cargadores referencia Techman TC-121 12V Lead Acid Battery Charger, el positivo de cada cargador va conectado al color rojo, el negativo al color negro.
- Los dos cargadores deben estar conectados siempre a la corriente eléctrica.

Mantenimiento:

Módulos relés: Es necesario reemplazar anualmente los módulos de los relés, ya que estos tienen una duración estimada de ese lapso, por ende, es fundamental realizar el mantenimiento para el correcto funcionamiento del sistema. Los módulos deben contener relés de referencia, FL-3FF-S-Z de 12 VDC.

Cable: El cable para usar debe ser cable calibre 22 trenzado. (El uso de un cable de distinto calibre en los periféricos puede causar un fallo en el sistema.

Precauciones:

- El sistema está diseñado solo con una protección de un diodo Schottky, para el caso en que la batería de la bornera B1 se conecte de manera errónea. Llegado el caso en que se conecte alguna de las otras baterías mal, el sistema deberá necesitar reemplazo de los capacitores.
- No exceder la corriente de salida total del sistema a más de 2 Amperios; podría provocar un fallo en el sistema.
- Conservar en un sitio libre de humedad.

5. Bibliografía

- Albrecht, R. I., Goodman, S. J., Buechler, D. E., Blakeslee, R. J., Christian, H. J., Albrecht, R. I., Goodman, S. J., Buechler, D. E., Blakeslee, R. J., & Christian, H. J. (2016). Where are the lightning hotspots on Earth? *Bulletin of the American Meteorological Society*, BAMS-D-14-00193.1. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00193.1>
- Anderson, R. B., Eng, B. S., Ph, D., & Niekerk, H. R. Van. (1984). Development and field evaluation of a lightning earth-flash counter. *IEE Proceedings*, 131(2), 118–124.
- Aranguren, D. (2011). *Desempeño de Sensores de Campo Eléctrostático en Sistemas de Alerta de Tormentas*. 203.
- Baharudin, Z. A., Ahmad, N. A., Fernando, M., Cooray, V., & Mäkelä, J. S. (2012). Comparative study on preliminary breakdown pulse trains observed in Johor, Malaysia and Florida, USA. *Atmospheric Research*, 117, 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.01.012>
- Baharudin, Zikri Abadi. (2014). *Characterizations of ground flashes from tropic to northern region (PENTING 30122014 page 23 the work of wilson....)*.
- Betz, H. D., Schumann, U., & Laroche, P. (Eds.). (2008). *Lightning: Principles, Instruments and Applications: Review of Modern Lightning Research*. Springer.
- Camilo Younes Velosa. (2002). Caracterización Espacio-Temporal de las Descargas Eléctricas Atmosféricas. *Tesis de Maestría*.
- Cooray, V. (2008). The Lightning Flash. In *Energy*. <https://doi.org/10.1049/PBPO034E>
- Cooray, V. (2015). *An Introduction to Lightning*. Springer Netherlands.

<https://doi.org/10.1007/978-94-017-8938-7>

- Cooray, V., & Lundquist, S. (1982). *On the Characteristics of Some Radiation Fields From Lightning and Their Possible Origin in Positive Ground Flashes*. 87, 203–214.
- Cooray, V., & Lundquist, S. (1985). *Characteristics of the Radiation Fields From Lightning in Sri Lanka in the Tropics*. 90(5), 6099–6109.
- D. MACKERRAS, R. A. B. (1972). Vertical-aerial cigre-type lightning-flash counter. *Electra*, 8(19), 480–482.
- Díaz-Cadavid, L. F., Cano, E., & Younes, C. (2011). A LEMP Generator-Simulator Circuit. *Ingeniería e Investigación*, 31(2), 27–35.
- Díaz Cadavid, L. F. (2014). *Caracterización espectral del pulso electromagnético radiado por el rayo atmosférico (LEMP) mediante un Detector-Receptor de RF tipo SDR (Software-Defined Radio)*. <http://www.bdigital.unal.edu.co/47144/1/7908501.pdf>
- Edirisinghe, C. M., Fernando, I. M. K., & Sonnadara, D. U. J. (2001). Construction of a High Speed Buffer Amplifier to Measure Lightning Generated Vertical Electric Fields. *Technical Sessions*, 17(May), 21–29.
- Fernando, A. G. and M. (2000). *OperativeParallelPlateAntenaGalvan.pdf*. Universidad de Upsala.
- Granados Vivas, C. A. (2019). Producidas Por Rayos Nube-Tierra En. In *CARACTERIZACIÓN DE DESCARGAS PRELIMINARES PRODUCIDAS POR RAYOS NUBE-TIERRA EN BOGOTÁ, COLOMBIA*. Universidad Nacional de Colombia.
- Haddad, M. A., Rakov, V. A., & Cummer, S. A. (2012). New measurements of lightning electric fields in Florida: Waveform characteristics, interaction with the ionosphere, and peak current estimates. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 117(10). <https://doi.org/10.1029/2011JD017196>
- Herrera Murcia, J. G., & Velosa, C. Y. (2020). *INFORME FINAL Proyecto: Plataforma experimental para la medición sistemática de parámetros de*

descargas eléctricas atmosféricas.

- Horner, F. (1960). The design and use of instruments for counting local lightning flashes. *The Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 109(34), 129–136.
- Instrument, T. (2019). *Data Sheet BUF634A 36-V , 210-MHz , 250-mA Output , High-Speed Buffer* (Issue February 2019).
- Leal, Adonis F.R., & Rakov, V. A. (2021). Characterization of Lightning Electric Field Waveforms Using a Large Database: 2. Analysis and Results. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 63(6), 1989–1997. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2021.3062172>
- Leal, Adonis F.R., Rakov, V. A., Alves, E. R., & Lopes, M. N. G. (2019). Estimation of -CG lightning distances using single-station E-field measurements and machine learning techniques. *2019 15th International Symposium on Lightning Protection, SIPDA 2019, 2019-January*(February 2020). <https://doi.org/10.1109/SIPDA47030.2019.9004484>
- Leal, Adonis F.R., Rakov, V. A., Filho, J. P., Rocha, B. R. P., & Tran, M. D. (2018). A Low-Cost System for Measuring Lightning Electric Field Waveforms, its Calibration and Application to Remote Measurements of Currents. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 60(2), 414–422. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2017.2723524>
- Leal, Adônis Ferreira Raiol, Rakov, V. A., & Filho, J. A. P. (2018). On Calibration of Lightning Electric Field Measurement Systems. *International Lightning Protection Symposium (ILPS), 2018, October, 2–5.*
- López Trujillo, J. A. (2011). *Metodología para predicción de tormentas eléctricas a partir de mediciones de campo electrostático ambiental y sistemas de localización de rayos en zona montañosa.* 164. <http://www.bdigital.unal.edu.co/6213/>
- MacGorman, D. R., & Rust, W. D. (1998). *The Electrical Nature of Storms.* Oxford

University Press.

- Mackerras, D. (1985). AUTOMATIC SHORT-RANGE MEASUREMENT OF THE CLOUD FLASH TO GROUND FLASH RATIO IN THUNDERSTORMS. *Journal of Geophysical Research*, 90, 6195–6201.
- Mackerras, D., Darveniza, M., & Hettrick, P. (2009). *The CGR4 lightning sensor*. 58, 263–273.
- Nag, A., & Rakov, V. A. (2014). Parameters of electric field waveforms produced by positive lightning return strokes. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 56(4). <https://doi.org/10.1109/TEMPC.2013.2293628>
- Niño, M. I. (2019). *Caracterización de descargas de retorno (return strokes) positivas producidas por rayos nube-tierra a partir de la medición de los campos eléctricos en la Sabana de Bogotá, Colombia*.
- Perez Perez, D. de J. (2014). *Eficiencia de los sistemas de localización del rayo en zonas montañosas*. 195. <http://www.bdigital.unal.edu.co/23553/>
- Prentice, P. S. A., Sc, B., Aust, F. I. E., Eng, C., Mackerras, D., Sc, B., Ed, D., Ph, D., Aust, M. I. E., & Tolmie, R. P. (1975). Development and field testing of a vertical-aerial lightning-flash counter. *PROC. IEE*, 122(5), 487–491.
- Pulgarín, J. D. (2010). *Análisis De Un Modelo De Descarga De Retorno, Con Neutralización De La Carga De Corona, Usando Geometrias Irregulares Del Canal*.
- Rakov, M. A. U. and V. A. (2005). *Lightning Physics and Effects*.
- Rakov, V. (2001). Characterization of lightning electromagnetic fields and their modeling. *14th Int. Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1979*, 1–14. <http://www.lightning.ece.ufl.edu/PDF/Zurich/1T01.pdf>
- Rakov, V. A., & Uman, M. A. (2003). *Lightning. Physics and Effects*. Cambridge University Press.
- Ríos, E. A. S. (2014). Lightning induced voltages study on overhead distribution networks placed over non-flat terrains. *Tesis de Doctorado*.
- Robert B. Schmunk (NASA/GSFC GISS). (2016). *Climate Change: Climate*

- Resource Center - Graphic: Global warming from 1880 to 2016.*
https://climate.nasa.gov/climate_resources/139/
- Rodriguez, C. A. M., Neves, J. R., Anselmo, E. M., Rabak, C. S., Mathias, M. A., Camara, K. S., Rodrigues, N., Gondim, R. S., & Dos Santos, F. L. C. (2015). Lightning warning system based on a slow antenna. *2015 International Symposium on Lightning Protection, XIII SIPDA 2015*, 153–156.
<https://doi.org/10.1109/SIPDA.2015.7339319>
- Rojas Cubides, H. E. (2018). Técnicas avanzadas para el tratamiento y procesamiento de señales de campos electromagnéticos generados por rayos. In *Tesis de Doctorado*. Universidad Nacional de Colombia.
- Santamaria Piedrahita, F. (2006). Caracterización de las Descargas Eléctricas Atmosféricas en Bogotá y Comparación con Registros Tomados en Otros Lugares del Mundo. In *Tesis de Maestría*. Universidad Nacional de Colombia.
- Soto Ríos, E. A. (2010). *Cálculo de campo electromagnético producido por rayo para terreno no plano y su efecto en las tensiones inducidas en líneas de distribución*. Universidad Nacional de Colombia.
- Thottappillil, M. A. U. and R. (1993). Comparison of Lightning Return-Stroke Model. *Journal of Geophysical Research*, 98(1), 22,903-22,91.
- Torres-Sánchez, H. (2002). *El rayo: mitos, leyendas, ciencia y tecnología*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería.
- Torres-Sánchez, H. (2010). ¿ Qué rayos sabemos? *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*
http://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-07-13_10-54-06106912.pdf
- Uman, M A. (2001). *The Lightning Discharge*. Dover Publications.
- Uman, Martin A. (1987). The lightning discharge. In W. L. DONN (Ed.), *International Geophysics Series* (Vol. 39, Issue 3568). INTERNATIONAL GEOPHYSICS SERIES. <https://doi.org/10.1119/1.2339288>
- Vargas, F. M. (2006). *Nuevo modelo integral del canal de la descarga eléctrica*

atmosférica y su enlace con estructuras en tierra. Universidad Nacional de Colombia.

- Velosa, C. Y. (2006). Metodologías para la correlación de parámetros del rayo con características geográficas y meteorológicas. Caso Colombiano. *Tesis de Doctorado*.
- Vernon Cooray. (2015). An Introduction to Lightning. In *Springer* (Vol. 9, Issue 2). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511623806>
- Willett, J. C., & Krider, E. P. (2000). Rise times of impulsive high-current processes in cloud-to-ground lightning. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 48(9), 1442–1451. <https://doi.org/10.1109/8.898779>
- Wooi, C. L., Abdul-Malek, Z., Ahmad, N. A., & El Gayar, A. I. (2016). Statistical analysis of electric field parameters for negative lightning in Malaysia. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 146, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.05.007>
- Y. T. LIN, M. A. UMAN, J. A. TILLER, R. D. B. A. W. H. B. (1979). Characterization of Lightning Return Stroke Electric and Magnetic Fields From Simultaneous Two-Station Measurements. *Journal of Geophysical Research*, 84(9), 6307–6314.
- Younes, C., & Torres-Sánchez, H. (2010). *Caracterización de los parámetros del rayo en Colombia*. Universidad Nacional De Colombia Sede Manizales.