

**Ensamble y caracterización de los componentes de un equipo para la medición de tensiones inducidas por rayos en redes de distribución.**

**Juan Camilo Viviecas Ortega**

**Isnardo Gómez Mejía**

**Tesis de Grado en la modalidad de investigación para optar al título de Ingeniero  
Electricista**

**Director:**

**Edison Andrés Soto Ríos**

**Doctor en Ingeniería Eléctrica**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas**

**Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones**

**Bucaramanga**

**2020**

## Dedicatoria

A Dios,

Por permitirme alcanzar mis metas

A mi madre,

Por su apoyo, amor, sabiduría y fortaleza a lo largo de este camino profesional, y sobre todo por sus enseñanzas para formarme, ante todo, como persona

A mi padre,

Por darme la oportunidad de cumplir esta meta a pesar de las adversidades

A mis hermanos,

Por su compañía y apoyo incondicional en cada momento personal y académico

A mis amigos,

Por su compañía a lo largo de estos años y formar parte de mi segunda familia

*Juan Camilo Viviescas Ortega*

A Dios,

Por darme la fortaleza para superar las adversidades

A mis Padres:

Por mostrarme el camino hacia la superación.

A mis hermanos,

por el apoyo brindado a lo largo de mi carrera universitaria.

A mis amigos,

por las experiencias vividas y por permitirme aprender mas de la vida a su lado.

*Isnardo Gómez Mejía*

### **Agradecimientos**

A los profesores que desde nuestra niñez han venido acompañando nuestro proceso de formación por compartir sus enseñanzas y experiencias de vida, a nuestro director Edison Andrés Soto Ríos por su inmenso aporte al desarrollo de este trabajo, a Jesús Alberto López Trujillo y Julio Cesar Chacón Velasco por su contribución y ayuda en el presente proyecto, a los compañeros, amigos, y comunidad E3T con los que se compartió una grata experiencia y buenos momentos durante la carrera.

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	16
1. Descripción del proyecto .....	18
1.1 Objetivos propuestos.....	18
1.1.1 Objetivo general.....	18
1.1.2 Objetivos específicos .....	18
1.2 Alcance .....	19
1.3 Motivación .....	19
1.4 Metodología .....	20
1.4.1 Selección y adquisición de componentes.....	20
1.4.2 Ensamble y configuración de componentes.....	21
1.4.3 Caracterización de componentes.....	21
2. Fundamentos .....	22
2.1 Introducción al fenómeno del rayo .....	22
2.1.1 Proceso de formación del rayo.....	23
2.1.2 Categorización del rayo .....	26
2.2 Tensiones inducidas generadas por rayos en líneas de distribución aéreas .....	27
2.2.1 Corriente de retorno de la descarga atmosférica.....	27
2.2.2 Campo electromagnético producido por la descarga de retorno.....	28

2.2.3 Acople del campo electromagnético con las líneas de distribución aérea .....	28
2.2.4 Forma de onda normalizada del impulso de tensión atmosférico .....	29
2.3 Antecedentes en la medición de tensiones inducidas a nivel mundial.....	30
3. Selección de componentes para implementar un sistema de medición de tensiones inducidas por descargas atmosféricas en líneas de distribución .....	33
3.1 Acondicionamiento de la señal .....	34
3.1.1 Clases de dispositivos para acondicionar impulsos de tensión .....	34
3.1.1.1 Divisores de alto voltaje.....	35
3.1.1.2 Sensores de campo capacitivos.....	36
3.1.1.3 Sensores electroópticos.....	36
3.1.2 Selección del componente acondicionador .....	37
3.1.3 Protección del divisor capacitivo .....	41
3.1.3.1 Disrupción eléctrica ante un impulso de voltaje. ....	41
3.1.3.2 Dimensionamiento de los cuernos de arco.....	43
3.2 Adquisición y referencia de tiempo de la señal .....	47
3.2.1 Selección del osciloscopio digital.....	48
3.2.2 Selección del sistema de referencia de tiempo. ....	50
3.2.2.1 Funcionamiento del GPS 18x LVC. ....	52
3.2.2.2 Aumento en la resolución de la hora UTC del GPS. ....	53
3.3 Almacenamiento y acceso remoto de la señal .....	54
3.3.1 Alimentación.....	56
3.3.2 Acceso remoto .....	57
3.4 Interferencia electromagnética.....	57

3.4.1 Conceptos teóricos .....	58
3.4.1.1 Compatibilidad electromagnética. ....	58
3.4.1.2 Blindaje. ....	59
3.4.1.3 Eficiencia. ....	59
3.4.1.4 Aperturas. ....	60
3.4.2 Cofre de intemperie.....	61
3.4.3 Conductores .....	64
3.4.4 Sistema de puesta a tierra.....	65
3.5 Simulación del equipo de medición.....	67
3.5.1 Caso de simulación: no ocurre disrupción eléctrica .....	68
3.5.2 Caso de simulación: ocurre disrupción eléctrica .....	70
4. Configuración, ensamble y caracterización de componentes. ....	72
4.1 Configuración de componentes.....	72
4.1.1 Configuración del GPS .....	72
4.1.2 Configuración del osciloscopio.....	74
4.1.2.1 Configuración de la barra de herramientas. ....	75
4.1.2.2 Decodificación de la señal de tiempo. ....	76
4.1.2.3 Configuración de la señal de disparo. ....	77
4.1.3 Configuración del computador .....	78
4.1.3.1 Instalación de software. ....	79
4.1.3.2 Parámetros en la BIOS.....	79
4.2 Caracterización de componentes.....	80
4.2.1 Caracterización de osciloscopio.....	80

4.2.1.1 Verificación del ancho de banda del osciloscopio PicoScope 5242D. ....	81
4.2.1.2 Comprobación de la señal de disparo. ....	82
4.2.2 Caracterización sistema GPS-Arduino .....	83
4.2.3 Caracterización de los cuernos de arco .....	85
4.2.3.1 Metodología para realizar la prueba Up and Down. ....	85
4.2.3.2 Montaje de los equipos para realizar la prueba UP and Down. ....	88
4.2.3.3 Datos experimentales y cálculo de la tensión de chispa. ....	90
4.3 Ensamble de componentes.....	92
4.3.1 Detalles de montaje.....	93
5. Conclusiones .....	97
6. Recomendaciones .....	99
Referencias Bibliográficas .....	100
Appéndices.....	103

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Esquema general para el registro de la señal de tensión inducida en redes de distribución. ....	21
Figura 2. Proceso de formación del rayo. ....	24
Figura 3. Categorización del rayo. (1) Rayo descendente polaridad negativa. (2) Rayo ascendente polaridad positiva. (3) Rayo descendente polaridad positiva. (4) Rayo ascendente polaridad negativa. ....	26
Figura 4. Forma de onda normalizada del impulso de tensión atmosférico. ....	29
Figura 5. Etapas para la implementación del equipo de medición. ....	34
Figura 6. Modelo del divisor de alto voltaje. ....	35
Figura 7. Sensor de campo capacitivo. ....	37
Figura 8. Divisor Pearson Modelo VD-305A a) Dimensiones físicas, B) Modelo circuital. ....	39
Figura 9. Disrupción eléctrica ante un impulso de tensión. ....	43
Figura 10. Tensión crítica de flameo ante impulsos de tensión para una configuración punta-punta. ....	44
Figura 11. Dimensiones de los cuernos de arco implementados. ....	45
Figura 12. Simulación de campo eléctrico para a) configuración electródica seleccionada b) configuración electródica de referencia (IEEE). ....	46
Figura 13. Campo eléctrico en la separación de los electrodos seleccionados y los de	

referencia..... 47

Figura 14. Osciloscopio PicoScope 5242D. .... 49

Figura 15. GPS Garmin 18x LVC junto a sus respectivos pines de comunicación..... 51

Figura 16. Transmisión de datos del GPS GARMIN 18x LVC. .... 52

Figura 17. Diagrama de bloques del sistema de adquisición implementado por Daelman ..... 54

Figura 18. Ordenador seleccionado Fit PC4 PRO. .... 56

Figura 19. Elementos de un problema de compatibilidad electromagnética. .... 59

Figura 20. Aplicación blindaje de protección de receptor. .... 60

Figura 21. Diseño caja de intemperie-Material lamina de aluminio calibre #16..... 61

Figura 22. Efectividad del blindaje para los escenarios de simulación. .... 64

Figura 23. Esquema general del equipo de medición de tensiones inducidas. .... 67

Figura 24. Simulación en Matlab-Simulink del equipo de medición de tensiones inducidas. .... 68

Figura 25. Tensión en el divisor capacitivo para el caso de simulación sin interrupción. .... 69

Figura 26. Corriente en el divisor capacitivo para el caso de simulación sin interrupción. .... 70

Figura 27. Tensión en el divisor capacitivo para el caso de simulación con interrupción. .... 71

Figura 28. Corriente en el divisor capacitivo para el caso de simulación con interrupción. .... 71

Figura 29. Conexión para la comunicación entre el GPS y el PC, ..... 73

Figura 30. Configuración del GPS 18X LVC..... 74

Figura 31. Configuración de la barra de herramientas del PicoScope6..... 76

Figura 32. Configuración para la decodificación serial de la señal de tiempo. .... 76

Figura 33. Ejemplo de la decodificación serial de la señal de tiempo. .... 77

Figura 34. Configuración del disparador. .... 77

Figura 35. Configuración de las alarmas del osciloscopio. .... 78

Figura 36. Respuesta en frecuencia osciloscopio. ....	81
Figura 37. Registro del osciloscopio ante la prueba con señal tipo impulso. ....	82
Figura 38. Tiempo transcurrido desde el PPS mostrado por el PicoScope6. ....	84
Figura 39. Montaje de los equipos necesarios para realizar la prueba Up and Down. ....	88
Figura 40. Montaje de los cuernos de arco para realizar la prueba Up and Down. ....	89
Figura 41. Vista frontal equipo de medición de tensiones inducidas. ....	93
Figura 42. Detalles de ensamble divisor capacitivo y cuernos de arco. ....	94
Figura 43. Detalle de ensamble osciloscopio. ....	95
Figura 44. Detalles de ensamble PC y estampa de tiempo. ....	95
Figura 45. Detalles de montaje UPS. ....	96
Figura 46. Detalles de cableado ingreso al cofre de intemperie. ....	97

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Especificaciones técnicas del divisor VD305A .....	40
Tabla 2. Especificaciones técnicas del PicoScope 5242D .....	50
Tabla 3. Especificaciones técnicas del GPS Garmin 18x LVC. ....	51
Tabla 4. Características técnicas ordenador.....	55
Tabla 5. Datos de simulación software CST.....	62
Tabla 6. Retraso en la hora transmitida por el sistema GPS-Arduino .....	84
Tabla 7. Datos de la prueba Up and Down. ....	90
Tabla 8. Condiciones atmosféricas del laboratorio de alta tensión.....	91

### Lista de Apéndices

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Diagrama circuital comunicación GPS-Arduino .....	103
Apéndice B. Ups interactiva monofásica 600VA .....	104
Apéndice C. Interfaz de la configuración del software PicoScope6.....	105
Apéndice D: Precisión en la hora transmitida por el sistema GPS-Arduino. ....	106
Apéndice E. Costos de componentes del equipo de medición.....	109

## Resumen

**Título:** Ensamble y caracterización de un equipo para la medición de tensiones inducidas en líneas de distribución\*.

**Autor:** Juan Camilo Viviescas Ortega, Isnardo Gomez Mejia\*\*.

**Palabras Clave:** Descargas atmosféricas, tensiones inducidas por rayos, líneas de distribución, equipos de medición.

### Descripción:

En esta tesis de pregrado se seleccionó, caracterizó y ensambló los dispositivos necesarios para implementar un sistema de medición de tensiones inducidas en una línea de distribución. Los dispositivos esenciales que fueron seleccionados para el sistema son: divisor capacitivo VD305A de Pearson Electronics, que acondicionará la señal de tensión en la línea de distribución, además, para su protección se diseñaron e implementaron unos cuernos de arco que ubicados en sus terminales evitan sobretensiones que superen el BIL; osciloscopio PicoScope 5242D de PicoTechnology, el cual es el encargado de la adquisición (digitalización) de la señal de tensión; computador FITPC4, que almacenará los datos registrados por el osciloscopio; GPS 18x LVC, el cual es el sistema de referencia de tiempo de la señales almacenadas en el computador. Los equipos fueron ubicados en el interior de un cofre de aluminio para exteriores, con el fin de evitar interferencias electromagnéticas en la señal de medición. Cada uno de los dispositivos fueron configurados en base a las características de la señal a medir en la línea de distribución, además, se realizaron pruebas a éstos para verificar su correcto funcionamiento. Durante el ensamble de los componentes se tuvieron en cuenta aspectos como la compatibilidad electromagnética del equipo y la referencia o masa del sistema de medición.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones  
Director: Edison Andrés Soto Ríos Doctor en Ingeniería Eléctrica

## Abstract

**Título:** Assemble and characterization an equipment to measure induced voltages in distribution lines\*.

**Autor:** Juan Camilo Viviescas Ortega, Isnardo Gomez Mejia\*\*.

**Palabras Clave:** Atmospheric discharges, lightning induced voltages, distribution lines, measurement equipment.

### Description:

In this undergraduate thesis, it was selected, characterized and assembled the necessary devices to implement a measurement system for induced voltages in a distribution line. The essential devices selected for the system are: capacitive divider VD305A from Pearson Electronics, it will change the signal voltage level in the distribution line, furthermore, arc horns were designed and implemented to avoid overvoltage that exceed the divider's BIL; PicoScope 5242D oscilloscope from PicoTechnology, it will digitize the signal voltage; FITPC4 computer, it will store the data recorded by the oscilloscope; GPS 18x LVC, it's the time reference system of the signals stored in the computer. The devices were located inside an aluminum outdoor box, in order to avoid electromagnetic interference in the measurement signal. The device's configuration was based on the characteristics of the signal to be measured in the distribution line, furthermore, tests were carried out to verify their correct operation. During the assembly of the components was considered aspects such as the electromagnetic compatibility of the equipment and the reference of the measurement system.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenieria Físico Mecánicas Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones  
Director: Edison Andrés Soto Ríos Doctor en Ingeniería Eléctrica

## Introducción

Las descargas eléctricas atmosféricas son una de las principales causas de perturbación electromagnética en las líneas de distribución de energía, debido a que generan sobretensiones de gran magnitud en los conductores de fase que, a su vez, ocasionan el deterioro y fallas de los equipos eléctricos. Por ello, es importante la investigación de este fenómeno natural en zonas tropicales, como Colombia, donde su actividad eléctrica es elevada.

El impacto directo de un rayo sobre la línea de distribución frecuentemente genera flameo en los conductores de fase, lo que ocasiona fallas eléctricas fase-tierra o discontinuidad del servicio de energía eléctrica (**“IEEE guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines,” 2011**). Por otro lado, cuando el rayo impacta en la cercanía de una línea de distribución (impacto indirecto), se generan campos electromagnéticos que se acoplan a las fases de la línea, causando sobretensiones que afectan la calidad de la energía eléctrica.

La tesis de pregrado que se presenta, se basó en la construcción de un equipo de medición de tensiones inducidas en líneas de distribución de energía, teniendo en cuenta trabajos similares documentados en la literatura. El diseño del equipo de medición consistió en seleccionar los componentes necesarios para el acondicionamiento, adquisición y almacenamiento de la señal de tensión tomada de la línea de distribución. En la elección de los componentes se consideraron aspectos como: confiabilidad, autonomía, dimensiones y economía. Así mismo, se aplicaron algunos métodos que permitieran la compatibilidad electromagnética del equipo en el medio en que se ubicará.

Posteriormente se adquirieron los componentes seleccionados y se realizó la configuración que permitiera una medición confiable de la señal en la línea de distribución. Se llevaron a cabo pruebas aisladas en cada uno de los componentes para caracterizar su funcionamiento. Finalmente se realizó el montaje del equipo teniendo en cuenta las características analizadas a lo largo de todo el trabajo.

Este documento está dividido en 4 capítulos: en el primer capítulo se encuentra la descripción del proyecto que se requiere realizar y la metodología necesaria para llevarlo a cabo; el segundo capítulo describe brevemente el proceso de formación del rayo y cómo es su interacción con las líneas de distribución de energía, además se hace una revisión bibliográfica de los equipos de medición que ya fueron construidos e implementados en varias partes del mundo; el tercer capítulo aborda la selección de componentes esenciales para implementar un sistema de medición confiable de las tensiones inducidas en las líneas de distribución; el cuarto capítulo describe la respectiva configuración, caracterización y ensamble de cada uno de los componentes elegidos que conforman el equipo de medición.

La presente tesis fue realizada con el fin de que en trabajos futuros sea posible, con las mediciones realizadas en campo, validar modelos y conseguir datos estadísticamente confiables del fenómeno. De esta manera contribuir al mejoramiento en el funcionamiento de los sistemas de distribución de energía.

## 1. Descripción del proyecto

### 1.1 Objetivos propuestos

La finalidad de este proyecto es realizar el ensamble de un equipo que permita la medición de parámetros relacionados con el rayo, específicamente de tensiones inducidas en líneas de distribución. Para su realización se plantearon los siguientes objetivos.

#### *1.1.1 Objetivo general*

Ensamblar y caracterizar los componentes de un equipo para la medición de tensiones inducidas por rayos en redes de distribución.

#### *1.1.2 Objetivos específicos*

El cumplimiento del objetivo general comprende:

- Seleccionar y adquirir los componentes para implementar un equipo de medición de tensiones inducidas por descargas atmosféricas en una línea de distribución.
- Ensamblar y configurar los componentes seleccionados para la implementación del equipo de medición de tensiones inducidas por descargas atmosféricas en una línea de distribución.

- Caracterizar el desempeño de componentes del equipo de medición de tensiones inducidas por descargas atmosféricas en una línea de distribución.

## **1.2 Alcance**

El presente trabajo de grado abordará una forma de integrar las tecnologías disponibles para ensamblar un equipo para la medición de tensiones inducidas por descargas atmosféricas en líneas de distribución. Así mismo será posible almacenar y observar, vía web, las mediciones hechas por el equipo. Se pretende que con el equipo ya ensamblado y caracterizado sea posible, en otro proyecto, la puesta en funcionamiento y el posterior análisis de las mediciones hechas por el dispositivo.

## **1.3 Motivación**

La NTC 4552 establece las características de protección de estructuras ante las descargas atmosféricas, tomando como referentes los parámetros de rayos de algunas normas IEC y mediciones indirectas hechas en Colombia. Por ello algunos sistemas de protección no logran totalmente sus funciones debido a que en su diseño no se ha tenido en cuenta el total comportamiento de las descargas en el lugar de ubicación. Por ejemplo, las protecciones para las tensiones inducidas en redes de distribución están diseñadas bajo el estándar IEEE 1410, por tanto, se sugiere que para un mejor diseño es necesario conocer las características de estas tensiones en cada zona geográfica.

Con el objetivo de mejorar los sistemas de protecciones ante rayos, haciéndolos más eficientes y seguros, se hace necesario obtener información que permita la caracterización de las descargas atmosféricas en zonas específicas, buscando garantizar la integridad de los equipos y de las personas que puedan llegar a verse afectadas por este tipo de descargas. Para ello es indispensable la caracterización de los rayos por medio de mediciones directas.

## **1.4 Metodología**

El presente trabajo de investigación se desarrolla en 3 etapas que se describen en el esquema de la **figura 1**, en la cual se aborda el problema general que consiste en la medición de tensiones inducidas en redes de distribución. La primera etapa comprende la selección de los componentes (capítulo 3) necesarios para implementar el equipo de medición, en la segunda etapa se ensambla y configura los componentes del equipo anteriormente seleccionados, y finalmente en la etapa tres se caracterizan los componentes para verificar su correcto funcionamiento (capítulo 4).

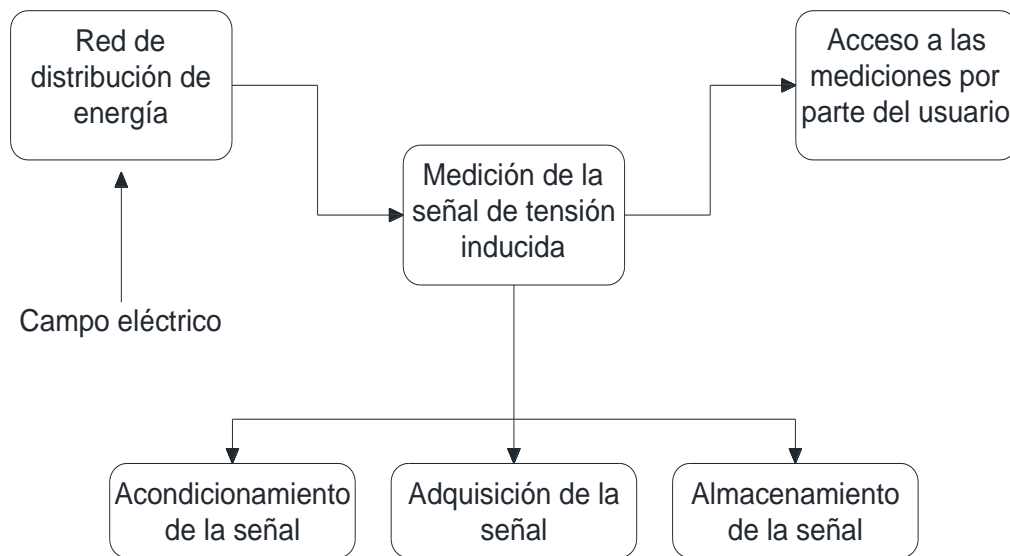
### ***1.4.1 Selección y adquisición de componentes***

Se realizará una exploración de la bibliografía de los equipos construidos que midan parámetros relacionados con las descargas atmosféricas. Con base en las características de la señal que se requiere medir se seleccionan los componentes para lograr el acondicionamiento, adquisición y almacenamiento de las tensiones inducidas en la línea bajo prueba. Además, se tiene

en cuenta el apantallamiento y la compatibilidad electromagnética del equipo para que factores externos no afecten las mediciones.

**Figura 1.**

*Esquema general para el registro de la señal de tensión inducida en redes de distribución.*



#### ***1.4.2 Ensamble y configuración de componentes***

En esta etapa se ensamblan los componentes seleccionados y adquiridos, se definen los parámetros a medir y se realiza la respectiva configuración de los componentes de acuerdo con las necesidades y características de medición que se requieren.

#### ***1.4.3 Caracterización de componentes***

Para esta última etapa se realizan pruebas individuales a los componentes del equipo para verificar su funcionamiento, evaluando el desempeño del equipo, y garantizando su correcto funcionamiento.

## 2. Fundamentos

### 2.1 Introducción al fenómeno del rayo

Las nubes de tormenta se forman por el proceso de ascenso, enfriamiento y condensación del aire; al calentarse la superficie de la tierra con la radiación solar, el aire de la capa inferior se calienta por conducción y parte del agua se convierte en vapor, que comienza a ascender por ser más ligero que el de la capa superior. Este flujo de vapor realiza un recorrido vertical en medio del aire más frío, que permite la transferencia de calor hasta igualarse a la temperatura circundante. Con esta corriente de aire húmedo, se forman gotas de agua al alcanzar el punto de rocío, así el aire condensado genera la nube. Las corrientes de aire al ser secuenciales permiten que la nube ejerza un movimiento hacia arriba, alcanzando puntos donde la temperatura es más baja que el punto de congelación, allí gotas de agua se solidifican dando origen a cristales de hielo y granizo suave (Daelman, 2018).

Dentro de estas nubes de tormenta y debido a los gradientes de temperatura, las corrientes de aire se mueven hacia arriba y hacia abajo, causando colisiones entre hielo-granizo y gotas de agua en una atmosfera de temperaturas entre los  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  y los  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Estas interacciones generan

transferencia de carga, al colisionar las grandes partículas de precipitación y las gotas de agua y granizo blando, por conservación de la carga total, los cristales de hielo se cargan positivamente mientras que la neblina y el granizo blando se cargan negativamente. Por diferencia de densidades se crea un campo eléctrico positivo en la región superior de la nube seguido de una carga negativa, adicionalmente se crea otro campo positivo de menor tamaño en la base de la nube donde la temperatura está cerca a los 0°C. La distribución eléctrica de una nube de tormenta suele ser más compleja que una simple distribución de carga en tres capas y puede variar durante la tormenta (Horacio Torres, 2002).

### ***2.1.1 Proceso de formación del rayo***

El rayo nube-tierra se origina cuando un campo eléctrico de grandes magnitudes logra romper la rigidez dieléctrica del medio, campo que se crea por la carga negativa de la nube y la positiva de la superficie de la tierra. Su magnitud es del orden de un millón de voltios por metro (Horacio Torres, 2002). El proceso físico que explica la transferencia de la carga entre la nube y tierra no se conoce en su totalidad. Existen teorías que explican detalles de alguna etapa de la descarga, pero aún no existe una teoría unificada entre los investigadores. Sin embargo, se documenta la existencia de 5 etapas que componen una descarga atmosférica (figura 2).

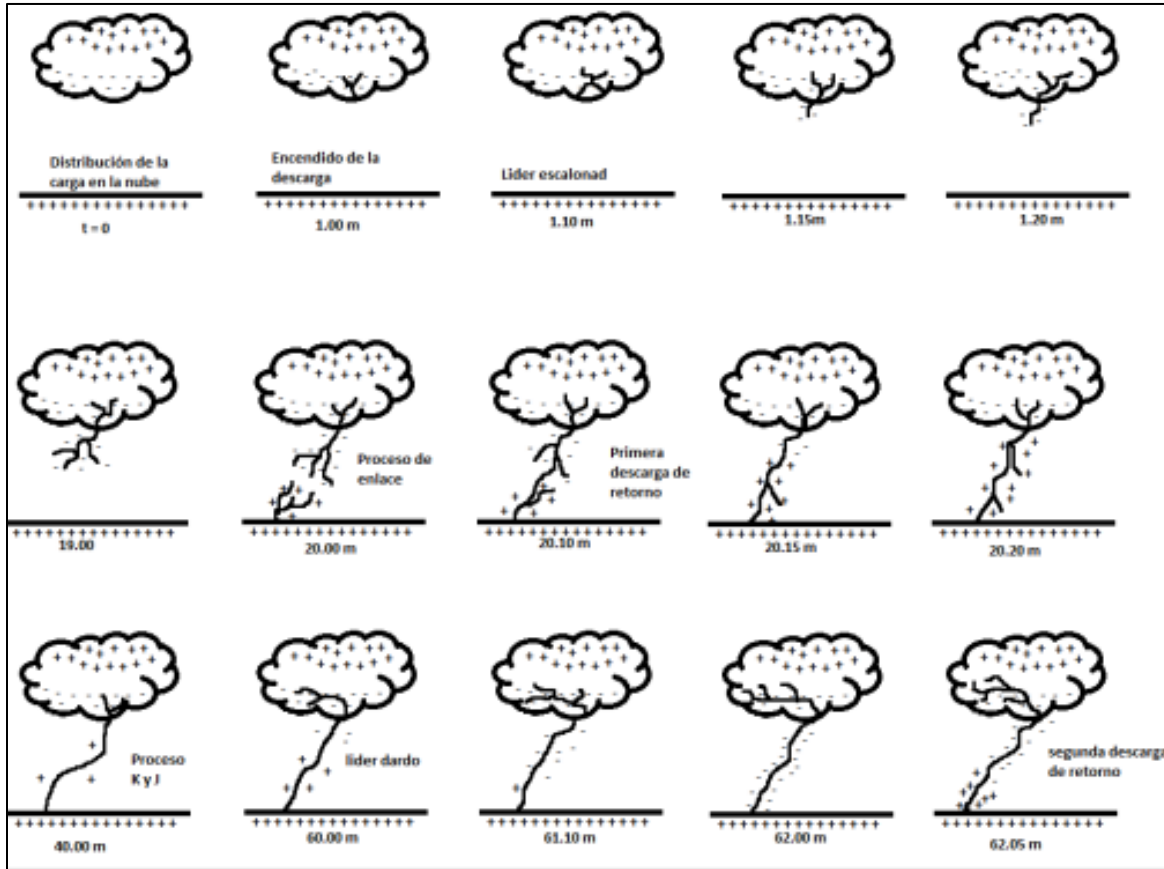
- Encendido de la descarga.

Antes de desarrollarse el líder escalonado, se produce una recombinación de cargas en la base de la nube, en el transcurso de unos 150  $\mu$ s, en los cuales las gotas de lluvia con cargas positivas se alargan en la dirección del campo eléctrico y dan inicio a los *streamers*. La velocidad de crecimiento de estos es del orden de  $5 \times 10^6$  cm/seg, en aproximadamente 50  $\mu$ s los *streamers*

habrán penetrado unos 10 metros en la parte negativa de la nube, ocasionando a su vez nuevos *streamers* en forma de corona (Horacio Torres, 2002).

**Figura 2.**

*Proceso de formación del rayo.*



Nota. Tomado de (Horacio Torres, 2002).

- Líder escalonado

Inicia cuando ocurre el encendido de la descarga dentro de la nube, su trayectoria se da en una serie de pasos discretos de duración de 1 us y decenas de metros de longitud, con pulsos de corriente de al menos 1 kA, asociado con pulsos de campo eléctrico y magnético. El líder

escalonado se caracteriza por tener una velocidad promedio mínima para líderes negativos descendentes de  $1 \times 10^5$  m/s, con una longitud de pasos entre 10 y 200 metros (**Horacio Torres, 2002**).

- Proceso de enlace

Cuando el líder escalonado está cerca de tierra, el campo eléctrico en objetos puntiagudos o en irregularidades propias de la tierra, supera el valor de tensión disruptiva y se presenta la descarga que se eleva desde estos puntos al encuentro del líder, generando el proceso de enlace (**Horacio Torres, 2002**).

- Descarga de retorno

Se define la descarga de retorno como una onda de campo eléctrico que asciende por el canal del líder escalonado, alcanzando a penetrar en la base de la nube. Es la fase más energética de un rayo porque descienden de la nube unos 10 culombios de carga eléctrica, con corrientes de hasta 100 kA. Luego del proceso de enlace, se presenta la primera descarga de retorno, con ello el camino nube-tierra queda totalmente ionizado, y alcanza una corriente pico de alrededor de 30 kiloamperios, en pocos milisegundos (**Horacio Torres, 2002**).

- Líder dardo

La descarga de retorno alcanza la base de la nube y se expande lateralmente, con ello, se aumenta el campo eléctrico y produce un nuevo drenaje de carga mediante penachos que penetran la nube hasta unos 300 metros, aun cargada. Debido a la propagación dentro de la nube de la onda ionizante, se presenta una intensa descarga corona de las gotas de agua.

Los líderes dardo se propagan en forma continua, desde la nube hasta la tierra, siguiendo el camino preionizado. En caso de que el intervalo de tiempo desde la descarga de retorno sea muy largo, se ocasiona tortuosidad al líder dardo cuando se aproxima a tierra (**Horacio Torres, 2002**).

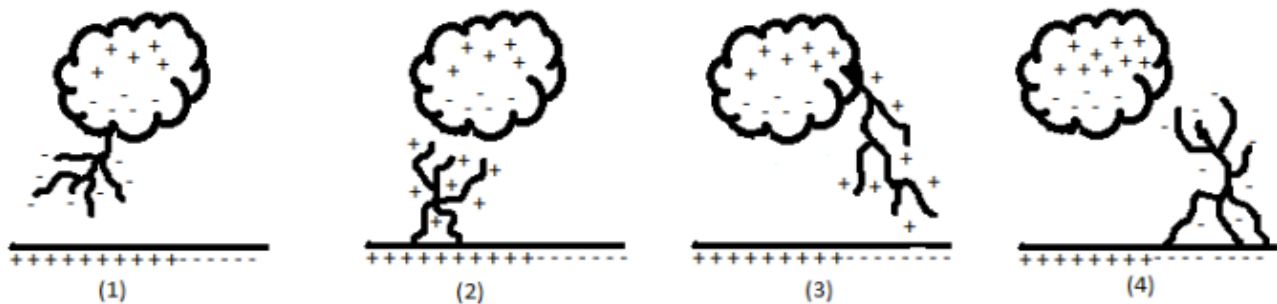
**2.1.2 Categorización del rayo**

Los inicios de la caracterización del rayo datan del año 1978, donde Berger presenta cuatro tipos: según la dirección del movimiento se clasifican en, ascendentes o descendentes y según la carga del líder escalonado pueden ser, de polaridad positiva o negativa, como se muestra en la **figura 3**.

A nivel mundial los rayos descendentes de polaridad negativa son hasta el momento los más comunes, pero en Colombia ocurre algo diferente, de acuerdo con un análisis espacial (zona central colombiana) y temporal (1992-1993) se encontró que las descargas atmosféricas en Colombia son en un 100% rayos descendentes de polaridad positiva (**Horacio Torres, 2002**).

**Figura 3.**

*Categorización del rayo. (1) Rayo descendente polaridad negativa. (2) Rayo ascendente polaridad positiva. (3) Rayo descendente polaridad positiva. (4) Rayo ascendente polaridad negativa.*



Nota. Tomado de **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

## 2.2 Tensiones inducidas generadas por rayos en líneas de distribución aéreas

La descarga de retorno del rayo es la principal causa de las tensiones inducidas en las líneas de transporte de energía (Golde, 2013). Por ello, el estudio de estas tensiones se centra en la descripción y modelación de la descarga de retorno, el campo electromagnético generado por la descarga y su acople electromagnético con la línea de transmisión o distribución. En las secciones 2.2.1 a 2.2.3 se mencionan algunos modelos adoptados en la actualidad sobre estos tres aspectos. En la sección 2.2.4 se muestra la forma de onda normalizada del impulso de tensión atmosférico.

### 2.2.1 Corriente de retorno de la descarga atmosférica

La base para modelar la corriente de retorno, es asumirla como un pulso de corriente que se propaga desde la tierra a la nube por medio de una línea de transmisión que es originada por el líder escalonado. Así, es posible representar matemáticamente una variación espacio temporal de la corriente y posteriormente calcular el campo electromagnético que genera. Algunos modelos formulados con esta base teórica fueron los siguientes: modelo de línea de transmisión (MTL), desarrollado por Uman & McLain; modelo de línea de transmisión modificada con decaimiento exponencial (MTLE), desarrollado por Nucci; Modelo de línea de transmisión modificada con decaimiento lineal (MTLL), desarrollado por Rakov & Dulzon; Modelo de Cooray & Orville. La diferencia que existe entre estos modelos radica en el valor que establece cada autor para la velocidad del pulso de corriente y la atenuación de su magnitud a lo largo del canal de propagación.

### *2.2.2 Campo electromagnético producido por la descarga de retorno*

Conocida la expresión matemática de la variación espacio-temporal de la descarga de retorno, es posible hallar los campos electromagnéticos generados por ésta. Thottappillil & Rakov (**Thottappilli Rajeev & Vladimir A. Rakov, 1997**), describen tres enfoques equivalentes para realizar dicho cálculo utilizando la condición de Lorentz y la ecuación de continuidad. Uno de los enfoques, utilizando la condición de Lorentz, se puede resumir de la siguiente manera:

- Calcular la densidad de corriente  $\vec{J}$ , con base al modelo de la descarga de retorno.
- Calcular el potencial magnético  $A$  utilizando  $\vec{J}$ .
- Calcular el potencial escalar  $\Phi$ , utilizando  $A$  y la condición de Lorentz.
- Calcular el campo eléctrico  $\vec{E}$ , utilizando  $A$  y  $\Phi$ .
- Calcular el campo magnético  $\vec{B}$ , utilizando  $\vec{A}$ .

### *2.2.3 Acople del campo electromagnético con las líneas de distribución aérea*

Existen dos enfoques en el análisis del acople entre los campos electromagnéticos producidos por el rayo y las líneas de transporte de energía. El primer enfoque emplea la teoría de antenas, lo cual requiere una aplicación rigurosa de las ecuaciones de Maxwell y extensos periodos de computación. El segundo enfoque consiste en una aproximación de la línea de transmisión con fuentes distribuidas, para ello es necesario asumir que la dimensión de la sección transversal de la línea es eléctricamente pequeña, lo que implica que la propagación de la onda ocurre solo a lo largo del eje de la línea (**Pérez gonzález, 2006**).

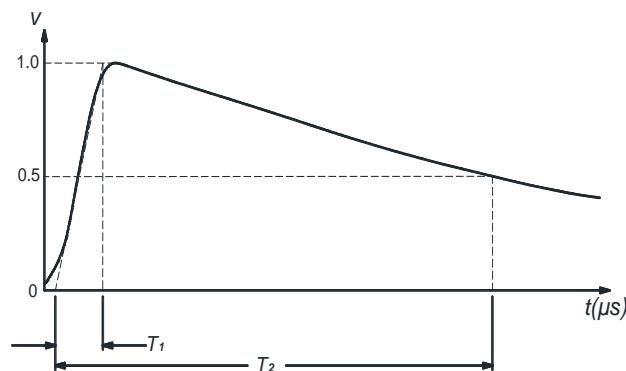
El primer modelo realizado con el enfoque de fuentes distribuidas fue realizado por Rusck, quién planteó la expresión matemática para calcular la tensión inducida máxima en la línea, asumiendo un solo conductor de línea y un conductor de tierra perfecto, es decir, la resistividad del terreno se desprecia. Otros modelos planteados con el mismo enfoque fueron desarrollados por: Agrawal, Price y Gurbaxani (1980); Taylor, Scatterwhite y Harvison (1965); Rachidi (1993); Chowdhuri (1969) (Pérez gonzález, 2006). Se puede llegar a errores apreciables si en la aplicación de dichos modelos no se tienen en cuenta aspectos como: la conductividad finita de la tierra, la presencia de cables de apantallamiento, la cantidad de conductores por fase, entre otros.

#### 2.2.4 Forma de onda normalizada del impulso de tensión atmosférico

En la IEEE Std 4-1995 (Instrumentation & Committee, 1995), se recomienda utilizar la forma de onda presentada en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, para realizar pruebas referentes a impulsos de tensión atmosférico. La onda normalizada tiene un tiempo de frente ( $T_1$ ) de 1.2  $\mu\text{s}$  y un tiempo al valor de medio ( $T_2$ ) de 50  $\mu\text{s}$ , por ello, también es mencionada como una onda impulso 1.2/50  $\mu\text{s}$ .

#### Figura 4.

*Forma de onda normalizada del impulso de tensión atmosférico.*



Nota. Tomado de: (Instrumentation & Committee, 1995).

### 2.3 Antecedentes en la medición de tensiones inducidas a nivel mundial

A nivel mundial se han realizado estudios experimentales para determinar o modelar el comportamiento de los parámetros del rayo. Una de las primeras caracterizaciones se llevó a cabo en Sur África (1979-1982) por Erikson (**Eriksson, Meal, & Stringfellow, 1982**), quien determinó un modelo teórico que predice satisfactoriamente las amplitudes de los voltajes inducidos en una red de distribución de 10 km de longitud. Para la medición de las tensiones se utilizó divisores de voltaje compensados, oscilógrafos fotográficos automáticos y sistemas digitales de grabación transitoria. El divisor empleado tenía un ancho de banda de 15 MHz, un soporte al impulso de 250 kV y un tiempo de subida de 0.2  $\mu$ s. Se registraron alrededor de 300 sobretensiones superiores a 12 kV, la mayoría de polaridad positiva, además de 20 descargas directas.

En Florida (1984), Master et al. (**Master & Uman, 1984**) utilizó una línea desenergizada de 460 m de longitud para realizar mediciones de campo eléctrico, magnético y de tensiones inducidas. La medición del campo eléctrico vertical permitió concluir que la tensión inducida en la línea contenía un aporte significativo del campo eléctrico horizontal, asociado con una conductividad finita de la tierra. Durante las cerca de 100 mediciones, se encontraron tensiones inducidas que variaron entre 150 kV y -40 kV para la primera descarga, y para las descargas subsecuentes entre 90 kV y -30 kV. Se encontró que la polaridad de las tensiones inducidas podría ser positivas o negativas para el mismo valor pico del campo eléctrico vertical, esto se le atribuyó al punto de medición y al ángulo de incidencia.

En 1983 Yokoyama et al. (**Yokoyama, Mitani, & Miyake, 1983**) realizó mediciones simultáneas de la onda de corriente del rayo y las tensiones inducidas sobre una línea de distribución desenergizada, con el fin de validar modelos existentes del fenómeno. Para la medición de las tensiones inducidas redujeron el voltaje con un divisor resistivo 20000/100 Ohm, posteriormente se transmitió la señal a través de fibra óptica a un conversor A/D y finalmente, la señal digitalizada fue conducida a un registrador transitorio. Una conclusión importante de este trabajo fue la demostración de la reducción de las tensiones inducidas en la línea de distribución por medio de conductores de apantallamiento aterrizados.

En 1986 Rubinstein et al. (**Rubinstein, Uman, Thomson, & Medelius, 1994**) en el centro espacial Kennedy, realizó mediciones de campo eléctrico, campo magnético y tensiones inducidas, originadas por rayos iniciados artificialmente, sobre una línea de distribución desenergizada de 448 metros de longitud. Obtuvieron mediciones de tensiones inducidas a 30 m y 500 m de distancia con formas de onda de tipo oscilatorias y de tipo impulso. Para la medición de las tensiones inducidas se utilizó un divisor resistivo de carbón de 10.8 k $\Omega$ , que proporcionaba una reducción del voltaje de 0.025% del valor total y con un tiempo de subida de 500 nanosegundos. Posteriormente, la señal reducida de tensión fue enviada por fibra óptica a un registrador analógico con ancho de banda de 400 Hz a 2 MHz.

En California (1996), Barker et al. (**Barker, Short, Eybert-Berard, & Berlandis, 1996**) utilizó una línea de distribución desenergizada de 682 m de longitud, para la medición de tensiones inducidas ocasionadas por rayos iniciados artificialmente. La línea consistía de dos conductores separados verticalmente 1.82 m; el conductor superior fue usado como fase para la medición de las tensiones por medio de un divisor resistivo de tiempo de subida de 30 ns; el conductor inferior fue empleado como neutro y aterrizado en las terminales de la línea. La señal de tensión del divisor

fue conducida por medio de fibra óptica a un osciloscopio digital Nicolet, el cual muestreó la señal en intervalos de 100 ns. Se tomaron más de 60 mediciones, las cuales arrojaron formas de onda de tensión entre los 8 kV y 100 kV, generadas por corrientes desde los 4 kA hasta los 44 kA. El análisis de dichas mediciones concluyó que la tensión pico es 63% mayor que la tensión predicha por la teoría de Rusck.

En Colombia, específicamente en la zona rural de la Palma (Cundinamarca), se implementó una línea experimental de distribución energizada (**Pérez González, 2006**), la cual fue equipada con molinos de campo eléctrico y medidores de tensiones inducidas, los registros mostraron una actividad predominante de rayos con polaridad positiva y una media, en las tensiones inducidas, de 15 kV en media tensión (13.2 kV) y de 31 kV en baja tensión (120 V).

Posteriormente, Horacio et al. (**Horracio Torres, 2000**), realizó un montaje de una línea de distribución energizada trifásica de 3 km de longitud, en disposición horizontal con neutro. Obtuvieron más de 200 mediciones, con una tensión inducida máxima de 47 kV. Las mediciones fueron comparadas teóricamente con los modelos de Rusck y Agrawal, consiguiendo similitudes en los resultados. El equipo utilizado para las mediciones estuvo compuesto por: un osciloscopio digital Fluke con ancho de banda de 25 MHz; un divisor capacitivo Pearson modelo VD305A, con relación de transformación de 4975:1, frecuencia máxima de 4 MHz y capacitancia total de 18 pF. Más adelante se realizaron mediciones de tensiones inducidas sobre un modelo a escala (1:200) de una red de distribución ubicada sobre un terreno no plano (**Ríos, 2014**).

En el 2019 Aranguren et al. (**Aranguren, Soto, Perez, & Torres, 2019**), implementó un sistema de medición de tensiones inducidas sobre una línea rural de distribución en Cundinamarca (Colombia). Se obtuvieron 55 mediciones de cuatro diferentes lugares: tres ubicados en media tensión (13.2 kV) y el otro en baja tensión (120 V), Las mediciones realizadas en media tensión

tuvieron un promedio de 15.5 kV con una duración media de 940  $\mu$ s, además el espectro de frecuencias de algunas mediciones mostró altas componentes en el rango de 1 a 40 kHz y alrededor de 130 kHz. Por otro lado, las mediciones en baja tensión, tuvieron un promedio de 30.7 kV con una duración media de 34.5  $\mu$ s, así mismo, el espectro de frecuencias de las mediciones mostró altas componentes entre 1 a 10 kHz, y alrededor de los 300 kHz.

Aunque ha habido grandes progresos a nivel de investigación y experimentación de los eventos relacionados con el rayo, los resultados obtenidos aún son escasos para su correcto modelamiento en distintas zonas del mundo. Esto hace necesario seguir experimentando en este campo para lograr avances en la caracterización de las descargas atmosféricas, y con ello, la implementación de sistemas de protección eficientes para las redes de energía eléctrica.

### **3. Selección de componentes para implementar un sistema de medición de tensiones inducidas por descargas atmosféricas en líneas de distribución**

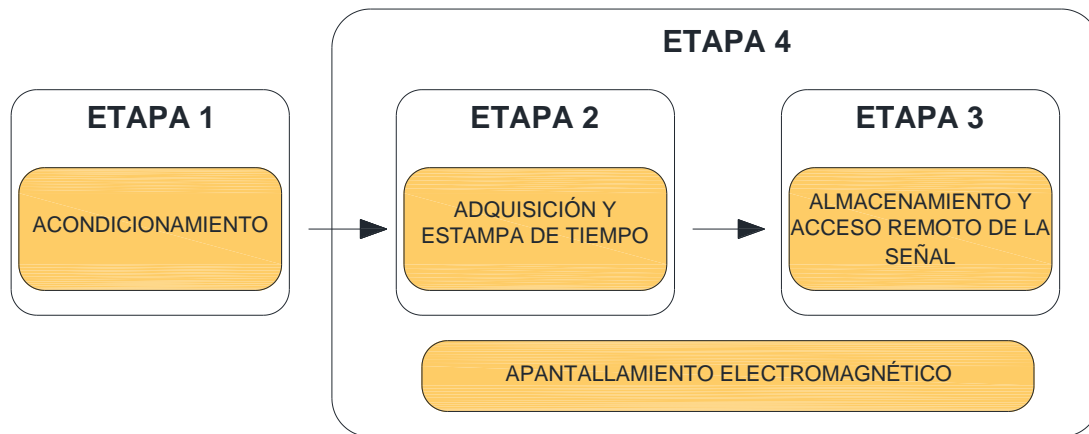
En este capítulo se aborda la selección de los componentes necesarios para implementar un sistema de medición de tensiones inducidas por descargas atmosféricas, teniendo en cuenta equipos similares construidos a nivel mundial (Sección 2.3) y que dichos elementos sean comerciales y de bajo costo.

La elección de los componentes se divide en cuatro etapas (figura 5). En la primera etapa se selecciona el componente que será el encargado de acondicionar la tensión de la línea de distribución, de manera que se realice la medición a bajos niveles de voltaje. En la segunda etapa

se escoge el instrumento que digitalizará la señal de tensión y se establece la referencia de tiempo que tendrán las mediciones adquiridas. En la tercera etapa se elige el equipo que almacenará digitalmente las mediciones, y se establece el sistema de comunicación remota a dicha información. Finalmente, en la cuarta etapa se aplican algunos métodos que permitirán el correcto funcionamiento del equipo en un ambiente contaminado electromagnéticamente.

### Figura 5.

*Etapas para la implementación del equipo de medición.*



### 3.1 Acondicionamiento de la señal

Para la medición de impulsos de alta tensión es necesario un dispositivo que envíe, a escala reducida, la señal de voltaje a un instrumento de medida (por ejemplo, un osciloscopio). En esta sección se exponen las distintas clases de dispositivos utilizados para dicha función, y posteriormente, se elige uno de ellos de acuerdo con los requerimientos del presente proyecto.

#### 3.1.1 Clases de dispositivos para acondicionar impulsos de tensión



$$\text{Factor de atenuación} = \frac{U_1(t)}{U_2(t)} = \frac{C_1+C_2}{C_1} \quad (3.1)$$

Donde:

- U1: es la tensión de entrada.
- U2: es la tensión de salida.
- C1: es la capacitancia de alta tensión (corresponde a Z1 de la figura 6).
- C2: es la capacitancia de baja tensión (corresponde a Z2 de la figura 6).

Los divisores de voltaje resistivo se utilizan cuando una impedancia específica es requerida en su entrada o salida. Debido a la disipación de energía y elevación de temperatura, estos divisores poseen limitados anchos de banda (**Ríos, 2014**). Los valores típicos de la resistencia de alta tensión son de 1-20 k $\Omega$ , y los de la resistencia de baja tensión se encuentran entre 0.5-10  $\Omega$ , sin embargo, estos valores dependen de la relación de tensión que se requiere. La resistencia de valor más alto del divisor es la que recibe la mayor parte de la tensión de entrada.

**3.1.1.2 Sensores de campo capacitivos.** La estructura general de un sensor de campo capacitivo se muestra en la figura 7. El capacitor C2 (1), se ubica en el centro de una placa metálica aterrizada (3), a su vez, éste capta el campo eléctrico que causa el impulso de tensión del conductor bajo prueba (3). La separación entre el conductor y la placa aterrizada debe ser lo más reducida posible, de manera que otras fuentes de campo eléctrico no interfieran en la medición. En general estos sensores poseen grandes dimensiones y limitados ancho de banda (**Schon, 2013**).

**3.1.1.3 Sensores electroópticos.** Otra opción para la medición de impulsos de alta tensión es por medio de sensores electroópticos, los cuales hacen uso de los efectos que causan los campos eléctricos sobre propiedades ópticas de ciertos cristales y líquidos (efecto Kerr y efecto Pockels).

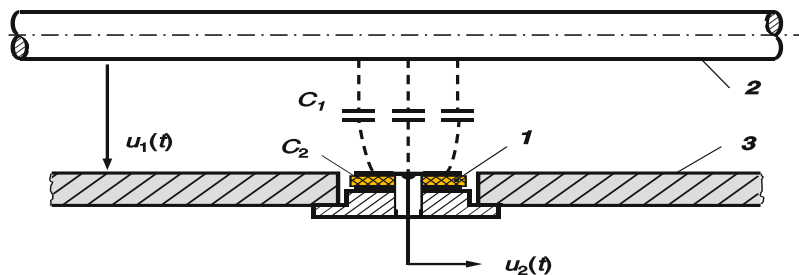
El principio de estos sensores consiste en polarizar un rayo de luz de tal forma que, al atravesar un objeto electroóptico, se divida en dos rayos linealmente polarizados (birrefringencia). La diferencia de fase entre los dos rayos es una función del voltaje que produce el campo eléctrico externo.

Estos sensores superan los inconvenientes de los dispositivos convencionales debido a su peso liviano, dimensiones pequeñas, ancho de banda amplio, alta precisión e inmunidad a la interferencia electromagnética (Schon, 2013). Sin embargo, poseen las siguientes desventajas:

- Influencia de la temperatura ambiente en la precisión de las mediciones, lo que hace necesario complicadas técnicas de compensación.
- Comercialmente poseen un alto costo y poca variedad en sus especificaciones técnicas.
- Baja Confiabilidad a largo plazo en sus mediciones.

**Figura 7.**

*Sensor de campo capacitivo.*



Nota. Tomado de (Schon, 2013).

### 3.1.2 Selección del componente acondicionador

En la cercanía de una línea de distribución se puede presentar diversas fuentes de campos electromagnéticos ajenos a la línea, como lo son: descargas atmosféricas, otras líneas de energía, torres de telecomunicaciones. Por tanto, no es conveniente utilizar un sensor de campo capacitivo para el equipo de medición proyectado, ya que el sensor actuará como una antena de dichas fuentes no deseadas en la medición. Por otra parte, tampoco es adecuado implementar los sensores electroópticos, a causa de las variaciones de temperatura que se pueden llegar a presentar en la ubicación del equipo de medición y, además, a sus elevados costos comerciales.

Debido a la gran variedad en características físicas y eléctricas, de divisores de alto voltaje en el mercado, se elige este tipo de dispositivo acondicionador para el sistema de medición de tensiones inducidas. Así mismo, se implementa un divisor tipo capacitivo con el fin de disminuir su influencia en la impedancia de la línea de distribución.

Para obtener una medición confiable de la señal y viabilidad en la instalación del equipo, se deben considerar las siguientes características mínimas en la elección del divisor:

- **Tensión de soporte al impulso mínimo de 50 kV:** este valor fue seleccionado considerando mediciones de tensiones inducidas hechas en Colombia (**aranguren et al., 2019; Pérez gonzález, 2006; Horracio Torres et al., 2000**), en donde la máxima tensión que se presentó fue de 48 kV. Sin embargo, la tensión inducida máxima que se puede dar en una línea de distribución es difícil de establecer debido a los escasos datos experimentales relacionados con las descargas atmosféricas en el país. Por ende, es necesario la protección del equipo de posibles tensiones que sobrepasen su soporte al impulso (sección 3.1.3).

- **Ancho de banda mínimo de 1 MHz:** el espectro de frecuencias que presenta la onda normalizada del impulso de tensión (**figura 4**) se encuentra entre los 0 Hz a 0.5 MHz (**Kuffel & Zaengl, 2000**). Por otra parte, las frecuencias más significativas de las mediciones hechas en la

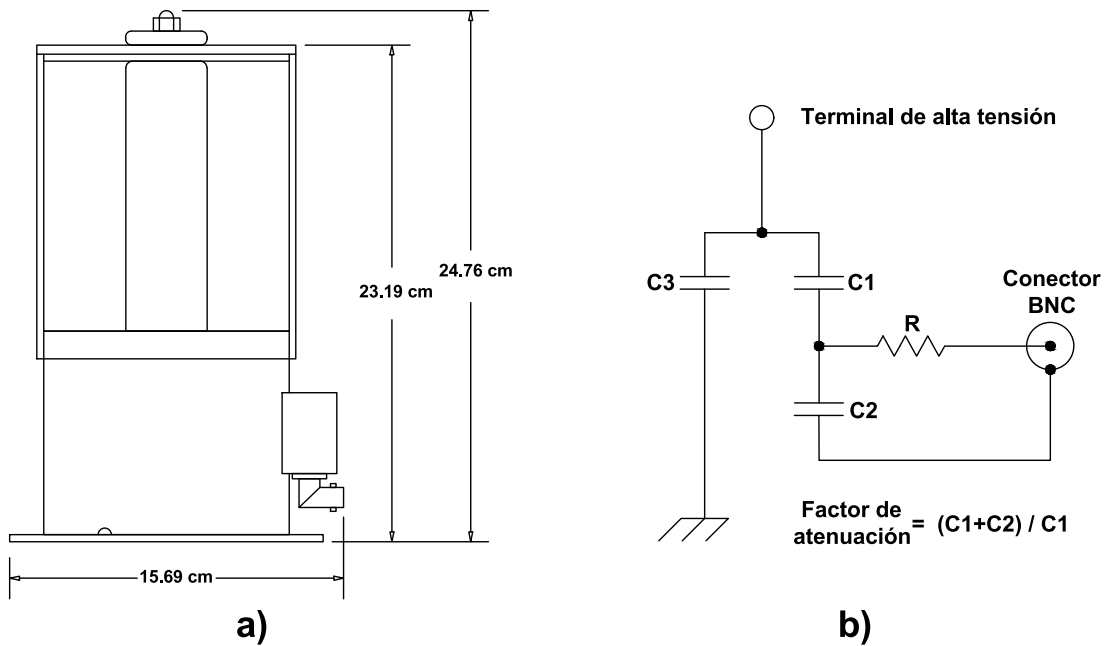
Palma (Cundinamarca), se encontraron en el rango de 0 Hz a 600 kHz (Aranguren et al., 2019; Pérez gonzález, 2006). De lo anterior se determina que el ancho de banda mínimo del divisor es de 1 MHz.

- **Características físicas:** el equipo de medición se ubicará cerca de una línea de distribución, por tanto, se requiere que el divisor sea portable y pueda soportar la intemperie.

Con base en los requerimientos mencionados, se escoge el divisor VD-305A de Pearson Electronics. En la figura 8 se muestra las dimensiones físicas y el circuito equivalente del divisor. En la **tabla 1** se encuentran sus características principales.

**Figura 8.**

*Divisor Pearson Modelo VD-305A a) Dimensiones físicas, B) Modelo circuital.*



Nota. Adaptado de (Electronics Pearson, 1999).

El terminal de alta tensión del divisor es un electrodo que se ubica en el centro de dos anillos, que junto al aire (dieléctrico) forma la capacitancia C1. En baja tensión se encuentra un capacitor cerámico C2, con un valor de capacitancia de 6.6 nF. La capacitancia total C3, que introduce el divisor al circuito bajo medición, es de 18 pF. La resistencia de acoplamiento a la salida del divisor R, tiene un valor de 50 Ohm y evita las reflexiones en la conducción de señales de alta frecuencia que se puedan presentar entre el divisor capacitivo y el conductor coaxial que enviará la señal de tensión al correspondiente equipo. El circuito de baja tensión del divisor viene apantallado por un cofre metálico que reduce la interferencia electromagnética con el medio circundante.

El divisor cuenta con una superficie de metacrilato que aísla el electrodo de alta tensión con su base metálica (referencia de tensión). Por tanto, el acrílico contribuye a la estabilidad mecánica y rigidez dieléctrica del dispositivo.

**Tabla 1.**

*Especificaciones técnicas del divisor VD305A*

<b>Característica</b>	<b>Especificación</b>
Máxima tensión al impulso	50 kV
Relación de transformación	11500:1, ±5%
Capacitancia de AT	0.57 pF (estimado)
Capacitancia de BT	6.6 nF (aproximado)
Ancho de banda	30 Hz a 4 MHz
Tiempo de subida	100 nanosegundos
Capacitancia añadida al circuito bajo prueba	18 pF (aproximado)
Rango de temperatura	20°C a 80°C

### 3.1.3 Protección del divisor capacitivo

Debido a que no se cuenta con los suficientes datos para realizar un análisis estadístico de las descargas atmosféricas en distintas zonas del país (Colombia) y a la variación espacio-temporal del fenómeno (**Horacio Torres, 2002**), no es posible estimar la tensión máxima que se puede presentar en el sitio de ubicación del divisor capacitivo. Por tanto, se implementan cuernos de arco en el divisor, de manera que no sea afectado por una sobretensión que supere su soporte al impulso.

Los cuernos de arco consisten en dos platinas (electrodos) que en un extremo se conectan eléctricamente al equipo a proteger y en el otro extremo se encuentran separadas una distancia preestablecida (figura 11). Su funcionamiento se basa en producir una chispa entre sus terminales cuando se supera la tensión necesaria para causar una ruptura del aire. De esta forma, es posible calibrar la distancia de separación de las platinas para que ocurra una disrupción eléctrica antes de alcanzar la tensión de soporte al impulso del divisor (50 kV).

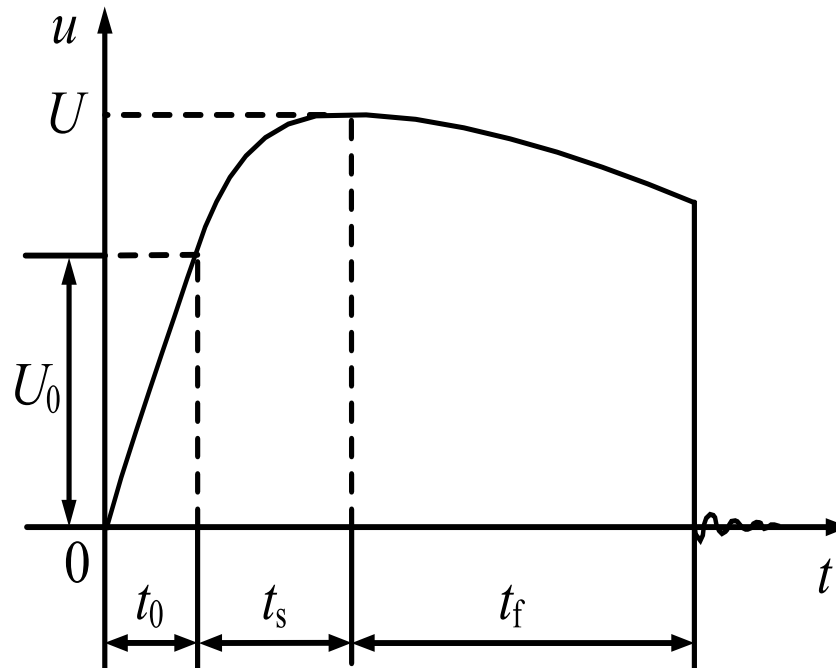
**3.1.3.1 Disrupción eléctrica ante un impulso de voltaje.** El campo eléctrico entre los electrodos energizados ocasiona que los electrones libres en el aire colisionen con átomos a su alrededor, generando una avalancha de electrones. Si la avalancha crece a una velocidad específica, debido a que se alcanza un campo eléctrico crítico, la punta de uno de los electrodos se ionizará causando el inicio de un flujo eléctrico llamado *streamer*. Cuando la distancia de los electrodos es corta y el campo se mantiene en ciertos límites, entonces el *streamer* llegará al otro electrodo provocando la disrupción eléctrica entre las platinas (**Qui, Ruan, & Shu, 2019**).

La figura 9 muestra la tensión en los cuernos de arco cuando se produce una disrupción eléctrica por un impulso de tensión. Cuando se alcanza la tensión  $U_0$ , se originan colisiones entre

los electrones, pero no es hasta la tensión  $U$  la que causa el campo suficiente para generar un *streamer* en uno de los electrodos. Es necesario un periodo de tiempo  $t_f$  y ciertos límites en la tensión, para que el *streamer* arribe en el otro electrodo y ocurra, finalmente, la descarga eléctrica.

**Figura 9.**

*Disrupción eléctrica ante un impulso de tensión.*



Noa. Tomado de (Qui et al., 2019).

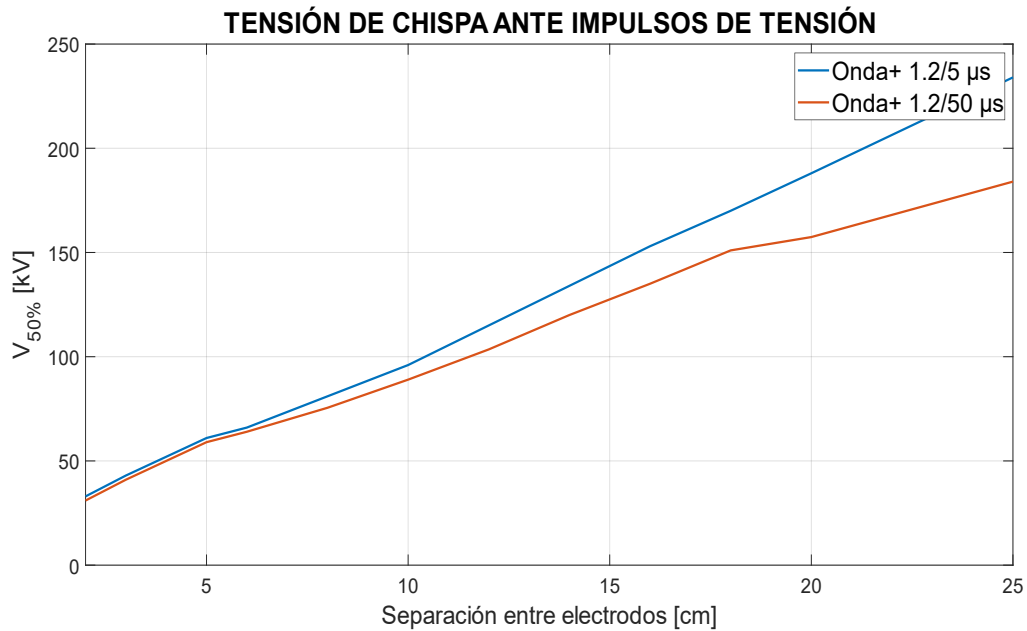
El valor de tensión  $U$  que se muestra en la figura 9 tiene una variación estadística, es decir, para un valor de tensión existe una determinada probabilidad de que ocurra una disrupción eléctrica. Por tanto, para definir la tensión de ruptura de una configuración de electrodos se emplea un término conocido como tensión crítica de flameo o CFO. La IEEE Std 4-1995 (**Instrumentation & Committee, 1995**), define la tensión crítica de flameo como el valor de voltaje aplicado en los electrodos, que tiene una probabilidad del 50% de producir una disrupción eléctrica. Además, en el estándar se encuentran los distintos métodos estadísticos para estimar dicho valor.

**3.1.3.2 Dimensionamiento de los cuernos de arco.** Debido a que las dimensiones del divisor capacitivo son cortas, se implementa una configuración punta-punta en los cuernos de arco

con el fin de facilitar su posterior instalación en la cercanía de la línea de distribución. Para determinar las dimensiones de los electrodos, se toma como referencia la caracterización de un arreglo de electrodos cuadrados de 12.5 mm, documentado en la IEEE Std 4-1995. La caracterización consistió en hallar la tensión crítica de flameo ante impulsos de tensión, bajo condiciones estándar. Los datos documentados en la IEEE se muestran en la figura 10.

**Figura 10.**

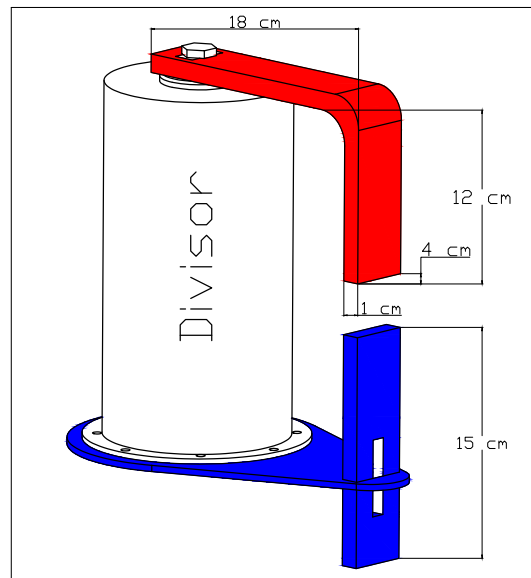
*Tensión crítica de flameo ante impulsos de tensión para una configuración punta-punta.*



La figura 11 muestra las dimensiones de los cuernos de arco implementados. El electrodo de color rojo irá conectado a la fase de la línea de distribución y el de color azul irá conectado a la referencia (tierra). A causa de las limitaciones en el mercado local, el grosor de las platinas fue de 10 mm.

**Figura 11.**

*Dimensiones de los cuernos de arco implementados.*



Para conocer la diferencia entre los electrodos implementados con los electrodos de referencia (IEEE Std 4), se halla la distribución de campo eléctrico en la separación electródica por medio del software de simulación CST (figura 12). Al realizar la simulación se tuvo en cuenta los siguientes aspectos:

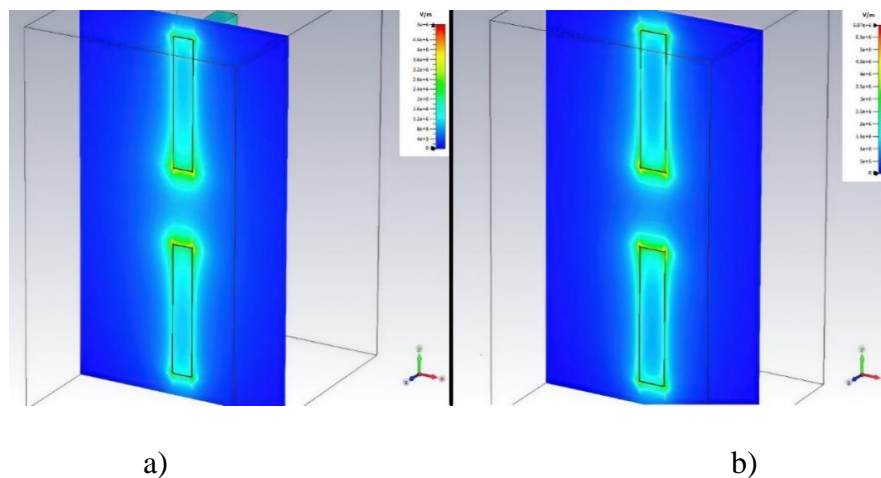
- Se simula solo una parte de los electrodos, ya que el campo eléctrico de interés se encuentra en las cercanías de la separación electródica en donde se produce la disrupción eléctrica.
- Se observa el campo eléctrico presente en los laterales de los electrodos, a causa de que hay mayor probabilidad de descarga en esta zona debido a la alta concentración de campo eléctrico.
- Se define una tensión de 50 kV en el electrodo de fase, de 0 V al electrodo de referencia, y el potencial en el infinito se establece como flotante y libre de carga, de esta manera las condiciones frontera quedan definidas. La separación electródica es de 3.5 cm.
- La malla utilizada para la simulación está compuesta por 94,000 celdas hexaédricas.

Los resultados de la simulación se muestran en la figura 12. Para la configuración electrónica seleccionada se observa que el campo eléctrico es ligeramente más bajo y homogéneo que el de la configuración electrónica de referencia (IEEE). Con el fin de detallar esta diferencia, se gráfica en la figura 13 la magnitud del campo eléctrico a lo largo de una línea que va desde la esquina de un electrodo a la esquina colineal del otro electrodo.

En general, para una misma separación electrónica, la tensión crítica de flameo será más baja cuando el campo eléctrico es menos **uniforme** (Instrumentation & Committee, 1995; Qui et al., 2019). Esto ocurre debido a que la no uniformidad del campo eléctrico origina, en pequeñas zonas de la separación electrónica, altos campos que facilitan el inicio de una avalancha de electrones (condición necesaria para la disrupción eléctrica). La distribución de campo eléctrico de la configuración implementada en este proyecto es más uniforme que la configuración de referencia (figura 13). Por tanto, la tensión crítica de flameo para los electrodos seleccionados es mayor que los de referencia, para una igual distancia en la separación electrónica.

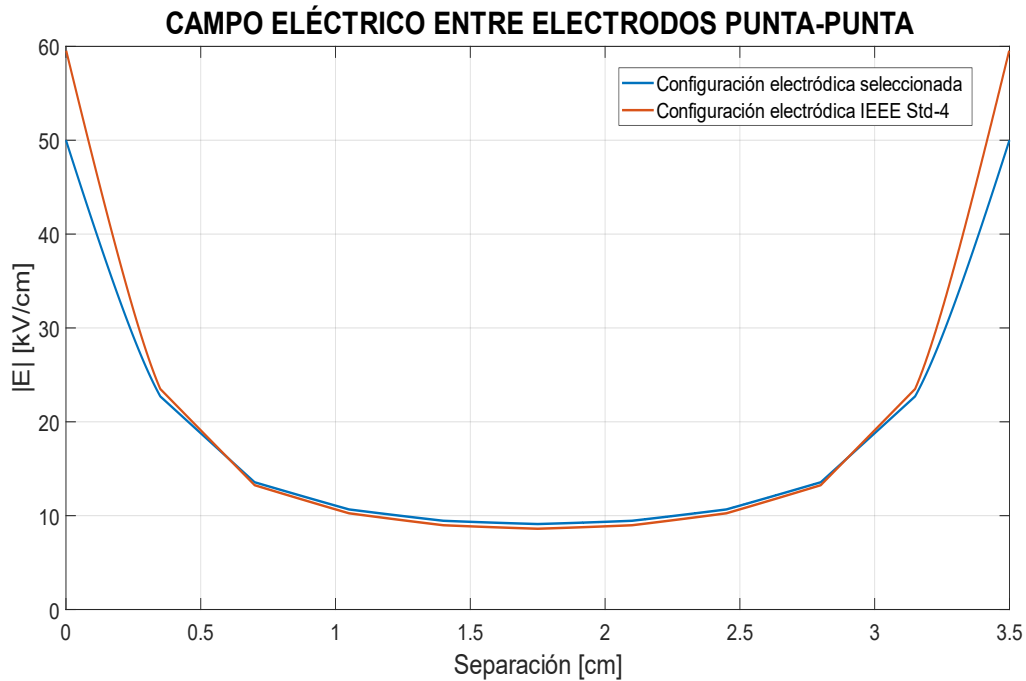
Figura 12.

*Simulación de campo eléctrico para a) configuración electrónica seleccionada b) configuración electrónica de referencia (IEEE).*



**Figura 13.**

*Campo eléctrico en la separación de los electrodos seleccionados y los de referencia.*



### 3.2 Adquisición y referencia de tiempo de la señal

Acondicionada la señal del impulso de tensión en la línea de distribución, se requiere un equipo que registre la señal con la mayor exactitud. Para tal fin, se implementa un osciloscopio digital, el cual es seleccionado con base en las características que tendrá la señal de entrada. Además, las señales registradas tendrán una referencia de tiempo precisa por medio de un GPS, para que en trabajos futuros sea posible la comparación de las mediciones con otros sistemas de medición relacionados con las descargas atmosféricas (por ejemplo, la red LMA y LINET).

### 3.2.1 Selección del osciloscopio digital

Teniendo en cuenta las características de la señal de entrada al osciloscopio (señal de salida del divisor capacitivo), y que el equipo de medición debe ser autónomo (no estará siendo operado por una persona), se consideran las siguientes características mínimas en la elección del osciloscopio:

- **Amplitud de tensión mínima de 4.5 V:** este valor corresponde a la conversión en baja tensión de la máxima amplitud de voltaje que el divisor capacitivo puede soportar.

- **Ancho de banda mínimo de 4 MHz:** este valor corresponde al ancho de banda máximo de la señal de salida del divisor capacitivo.

- **Velocidad de muestreo mínima de 16 MS/s:** de acuerdo al criterio de Nyquist, la velocidad de muestreo debe ser mayor a dos veces la frecuencia máxima posible de la señal de entrada, sin embargo, la norma IEEE-1122 (**“IEEE Standard for Digital Recorders for Measurements in High-Voltage Impulse Tests,” 1998**) sugiere que la velocidad de muestreo para la medición de impulsos de tensión debe ser mayor a cuatro veces la frecuencia máxima de la señal de entrada, entonces:

$$\text{velocidad de muestreo} > 4 * \text{frecuencia máxima}$$

$$\text{velocidad de muestreo} > 4 * 4 = 16 \text{ [MS/s]}$$

- **Profundidad de memoria mínima por canal de 8 MS:** teniendo en cuenta los resultados de sistemas de medición de tensiones inducidas (**Aranguren et al., 2019; Pérez gonzález, 2006; Horracio Torres et al., 2000**), se espera que la duración de las tensiones inducidas por un rayo sea menor a 500 ms. Por tanto, la profundidad de memoria mínima debe ser:

$$\text{profundidad de memoria} = \text{Velocidad de muestreo} * \text{Intervalo de tiempo}$$

Profundidad de memoria =  $16 * 0.5 = 8$  [MS]

- **Resolución vertical mínima de 9 bits:** la norma IEEE-1122 (“IEEE Standard for Digital Recorders for Measurements in High-Voltage Impulse Tests,” 1998), establece que la resolución vertical para un equipo de medición de impulsos de tensión debe ser mínimo de 9 bits.
- **Tiempo de subida mínimo de 100 ns:** este valor equivale al tiempo de subida máximo que puede tener la señal de salida del divisor capacitivo.
- **Disparo automático:** el osciloscopio debe tener la posibilidad de configurar una señal de disparo, la cual indique la presencia de una tensión inducida en la línea, para que a partir de allí se registren y almacenen las muestras de la señal en un intervalo de tiempo.
- **Portabilidad:** el osciloscopio debe ser portable para que su instalación sea sencilla ya que se ubicará cerca de una de una línea de distribución.
- **Dos canales mínimos de entrada:** debido a que la referencia de tiempo de las mediciones almacenadas es por medio de un GPS, se requiere otro canal de recepción de datos.

Con base a los requerimientos mencionadas, se escoge el osciloscopio PicoScope modelo 5242D del fabricante Pico Technology (figura 14). En la tabla 2 se encuentra las principales especificaciones técnicas del osciloscopio cuando se encuentran activos los dos canales de entrada analógica BNC.

**Figura 14.**

*Osciloscopio PicoScope 5242D.*



- 1) Canales de entrada analógica BNC.
- 2) Punta de compensación de sonda.
- 3) Entrada para disparador externo BNC.
- 4) Salida del generador de funciones/AWG BNC.
- 5) Terminal de tierra.
- 6) Puerto USB 3.0.

Para el funcionamiento y alimentación del osciloscopio, éste debe ir conectado por medio de un cable USB 3.0 a una computadora, la cual determinará mediante el software ‘PicoScope6’ su configuración adecuada. La señal del divisor capacitivo y la referencia de tiempo de las mediciones (GPS) se transmitirán por cables coaxiales con terminales BNC a las entradas analógicas del osciloscopio. Sin embargo, solo se almacenarán en la computadora las mediciones de la línea de distribución que superen un intervalo de tensión preestablecido (señal de disparo).

**Tabla 2.**

*Especificaciones técnicas del PicoScope 5242D*

<b>Características</b>	<b>Especificación</b>
Rangos de entrada	$\pm 10$ mV a $\pm 20$ V
Ancho de banda	60 MHz
Velocidad de muestreo máxima*	500 MS/s - 250 MS/s - 125 MS/s
Tamaño de búfer*	128 MS - 64 MS
Resolución vertical	8, 12, 14, 15 ó 16 Bits
Tiempo de subida	5.8 ns
Sensibilidad de entrada	2 mV/div a 4 V/div
Acoplamiento de entrada	AC / DC
Características de entrada	1 M $\Omega$ $\pm 1\%$ // 14 $\pm 1$ pF
Protección contra sobretensiones	$\pm 100$ V (DC + AC pico)

Nota: \*De acuerdo a la resolución establecida por el usuario

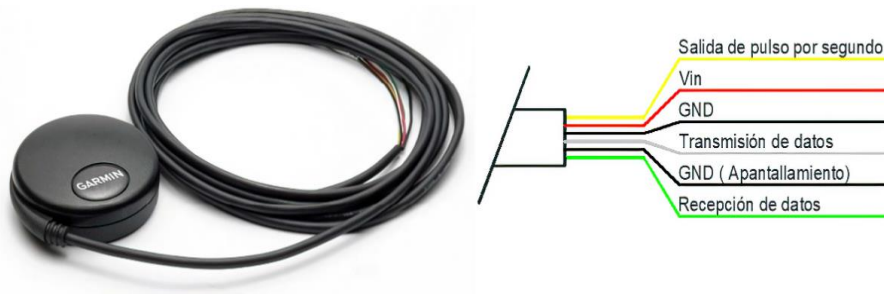
### 3.2.2 Selección del sistema de referencia de tiempo.

Al registrar y almacenar los datos de un evento por el osciloscopio (PicoScope 5242D), por defecto, se le asignará al archivo una etiqueta de la fecha y hora local del computador. Sin embargo, la hora de un computador es bastante imprecisa debido a defectos de fábrica, cambios de temperatura, antigüedad del cristal de cuarzo, entre otros (“**Sincronización horaria con GPS - Orolia.**”). Una solución es sincronizar la hora del PC con servidores NTP, no obstante, es necesaria una constante conexión a internet, lo cual no será posible en algunas circunstancias.

De acuerdo con lo anterior, se selecciona el GPS Garmin 18x LVC (figura 15) para sincronizar las mediciones almacenadas en el computador con una precisa etiqueta de tiempo. En la tabla 3 se encuentra las principales especificaciones técnicas del GPS.

**Figura 15.**

*GPS Garmin 18x LVC junto a sus respectivos pines de comunicación.*



**Tabla 3.**

*Especificaciones técnicas del GPS Garmin 18x LVC.*

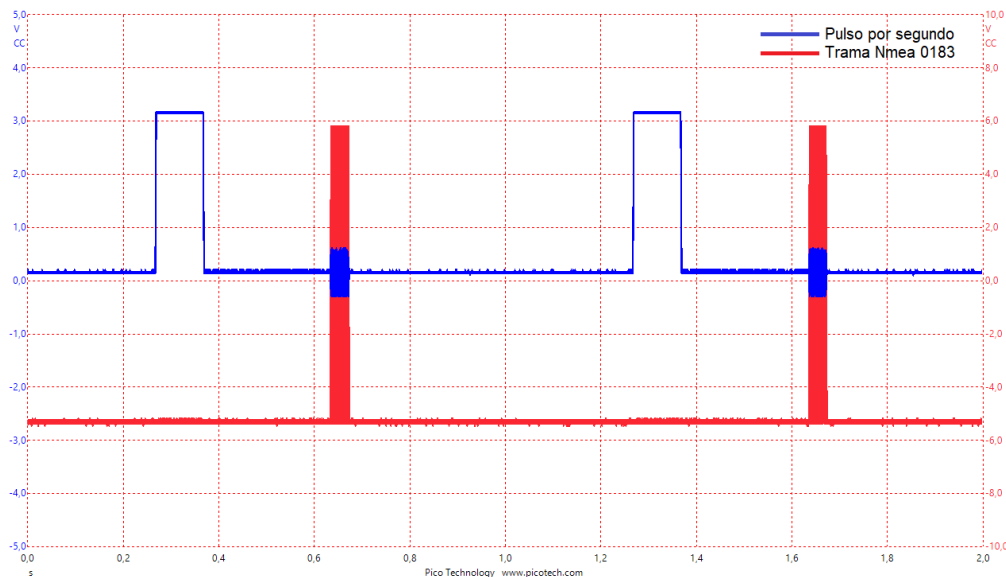
Características	Especificación
Material de la cobertura	Polycarbonato a prueba de agua (Protección IPX7)
Receptor	Sistema de Aumento de Área amplia (WAAS)
Sensibilidad del receptor	(-)185 dBW mínimo
Voltaje de alimentación	4.0-5.5 Vdc

Corriente de entrada	90 mA @ 5.0 Vdc
Precisión de tiempo	1 μs
Interfaz de comunicación	RS-232
Rango de temperatura	(-)30°C a +80°C

**3.2.2.1 Funcionamiento del GPS 18x LVC.** El receptor GPS rastrea y usa continuamente múltiples satélites para determinar su posición y la hora UTC (Universal Time Coordinated). Una vez sincronizado con los satélites, comienza a transmitir información en dos de sus terminales por cada segundo transcurrido: por el cable amarillo enviará pulsos por segundos (PPS) que indican el inicio de un nuevo segundo en la hora local; por el cable blanco transmitirá de forma serial una trama de datos con el protocolo NMEA 0183. En la figura 16 se observa que la trama NMEA transmitida por el GPS, es enviada tiempo después del pulso por segundo.

**Figura 16.**

*Transmisión de datos del GPS GARMIN 18x LVC.*



La trama de datos NMEA 0183 son sentencias con caracteres ASCII separadas por comas. La segunda sentencia de la trama contiene la información correspondiente a la hora UTC con el formato HHMMSS (Hora-Minutos-Segundos). Las demás sentencias contienen información sobre la posición del GPS. La trama se transmite de forma serial con el estándar RS232, a velocidades entre 4800 bits/s hasta 19200 bits/s, según la configuración del usuario. A continuación, se muestra un ejemplo de una trama NMEA:

```
$GPRMC,235959,A,3851.3651,N,09447.9382,W,000.0,221.9,071103,003.3,E*69
```

El GPS Garmin cuenta con el software ‘SNSRXCFG’ para la configuración de algunos parámetros de operación, como lo son: la velocidad de transmisión de la trama NMEA, el ancho del pulso por segundo, entre otros.

**3.2.2.2 Aumento en la resolución de la hora UTC del GPS.** Aunque la precisión del pulso por segundo del GPS sea de 1  $\mu$ s, la resolución de la hora UTC es de 1 s, siendo un tiempo bastante prolongado comparado a la duración de un evento relacionado con la descarga atmosférica.

Daelman, en la Universidad Politécnica de Cataluña (**Daelman, 2018**), implementó un sistema de adquisición en el que obtuvo una resolución de 10 ms en la hora UTC a partir de un GPS con PPS y un Arduino (figura 17). En base a dicho trabajo, se realizó el siguiente procedimiento:

- Para conseguir una resolución en la hora UTC de 10 ms, se configura la tasa de baudios del GPS 18x LVC a su valor máximo de 19200 bits/s (sección 4.1.1).

- Se utiliza un Arduino Uno para leer la trama NMEA y el PPS transmitido por el GPS. Debido a los niveles de voltaje de la comunicación serial RS232, no es posible transmitir

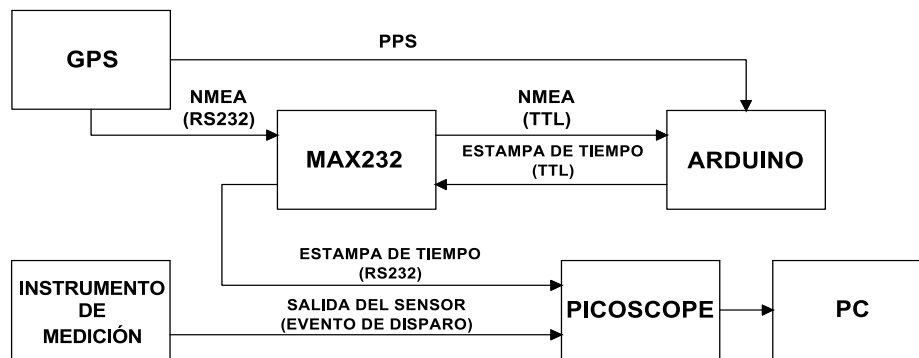
directamente la trama NMEA al Arduino. Por lo tanto, se utiliza el circuito MAX232 que permite la conversión de la trama a niveles de voltaje TTL compatibles con el Arduino. En el **Anexo A** se archiva el diagrama circuital implementado para la comunicación entre el GPS y el Arduino.

- Posteriormente se programa en el Arduino un oscilador cada 10 ms que transmitirá la hora UTC con el formato HHMMSSmmm (horas, minutos, segundos y milisegundo). La señal de salida se conecta al circuito integrado MAX232 para obtener nuevamente una señal serial RS232.

- Finalmente, la señal codificada es enviada al PicoScope, quien tiene la opción de decodificarla y realizar una estampa de tiempo en la medición del canal restante (Sección 4.1.2).

**Figura 17.**

*Diagrama de bloques del sistema de adquisición implementado por Daelman*



Nota. Tomado de(Daelman, 2018).

### 3.3 Almacenamiento y acceso remoto de la señal

Seleccionado el equipo encargado de recibir la señal y digitalizarla (PicoScope modelo 5242D), se utiliza un ordenador para el almacenamiento de las señales y posterior acceso remoto,

además, será la fuente de alimentación de algunos componentes del equipo de medición. Los criterios a tener en cuenta en la selección del mismo, son: los requerimientos del software PicoScope6, un bajo consumo de energía, tamaño reducido y disponibilidad de diferentes tipos de entradas para conectores. Se opta por un ordenador Fit PC4 PRO (figura 18) que cumple los criterios de procesador, memoria RAM, disco duro, sistema operativo y bajo consumo de energía. En la tabla 4 se detallan las características requeridas del equipo y las ofrecidas por el ordenador seleccionado.

**Tabla 4.**

*Características técnicas ordenador.*

Fit PC4 PRO		
Criterio	Necesario	Ofrecido
Procesador	300 MHz	Soc AMD GX-420CA 2GHz
Memoria RAM	Mínimo 256 MB	16 GB
Disco duro	Mínimo 1 GB	SSD mSATA de 120 GB
Sistema operativo	Windows 7 o posterior	Windows 7 Professional
Consumo	Menor a 30 W	6W-24W
Alimentación	AC/DC	DC 10-15 V
Temperatura de funcionamiento	10 °C a 40 °C	0 °C a 70 °C
Humedad relativa	Mayor a 50%	10% a 90%
Material	Carcasa en aluminio	Aluminio fundido a presión
Puertos USB 3.0	1	2
Puerto USB 2.0	4	6
Antenas Wifi	1	2
Puerto HDMI o VGA	1	2 HDMI

Puerto Ethernet	1	2
Puerto COM	N/A	1
SD	N/A	Ranura Micro-SD
Auto Encendido	Si	Si
Dimensiones	Compacto	19cm x 16cm x 4cm

**Figura 18.**

*Ordenador seleccionado Fit PC4 PRO.*



### 3.3.1 Alimentación

Para efectos de la alimentación, protección del computador y demás componentes del equipo, se selecciona una UPS interactiva modelo POWER BACK 600 VA (**Anexo B**), con una capacidad de 240 W, que brinda la eliminación de las posibles perturbaciones de la red, además de proporcionar continuidad en la alimentación del equipo ante cortes no prolongados del suministro de energía. Esta UPS cuenta con las siguientes características.

- Voltaje de salida: 120 V<sub>AC</sub>.

- Técnica automática en la regulación de tensión AVR.
- Cierre avanzado para la sobrecarga y batería baja.
- Técnica automática de recarga.
- Indicadores de funcionamiento LED.
- Diseño confiable conectado con la red.
- Reinicio automático después de una falla en la red.
- Tamaño compacto, peso ligero.
- Proporciona protección contra sobrecarga.

### **3.3.2 Acceso remoto**

Se requiere el acceso a los datos y archivos del disco del computador para extraer las mediciones realizadas. De manera presencial se dificulta por la ubicación del equipo y por la poca viabilidad que esto genera. Por tanto, se instala en el computador el software TeamViewer con licencia de uso no comercial, esto posibilita su monitorización y acceso a programas y datos desde cualquier otro equipo de cómputo o celular con acceso a internet. Así mismo, a través del software es posible modificar la configuración realizada al software 'PicoScope6', en caso de ser necesario. Esto obliga a garantizar la conexión a una red de internet por parte del equipo, para ello se implementa en el Fit PC4 PRO tres fuentes de conexión; wifi, red de comunicación 3G por medio de modem y conexión directa Ethernet.

### **3.4 Interferencia electromagnética.**

El equipo en construcción estará ubicado en un ambiente contaminado por campos electromagnéticos causados por descargas atmosféricas. El ruido emitido puede perjudicar la forma de onda de la señal medida. Los campos electromagnéticos penetran directamente el blindaje imperfecto del osciloscopio o del computador, afectando su funcionamiento normal. Para evitar esto se diseña un cofre de intemperie que funcione como blindaje ante los campos exteriores, al mismo tiempo que proteja los equipos de factores climáticos (sección 3.4.2). Los cables son otra fuente de contaminación electromagnética, ya que los campos eléctricos y magnéticos penetran su apantallamiento, induciendo directamente tensiones y corrientes en el conductor central debido al acoplamiento capacitivo e inductivo, efecto que disminuirá con la adecuada selección y organización de los conductores que interconectan los equipos (sección 3.4.3). Finalmente, la existencia de referencias de tierra de seguridad y de señal, las cuales, se pueden manejar desde una adecuada conexión (sección 3.4.4). En la sección 3.4.1 se introducirá un resumen teórico que facilitará la comprensión de los resultados obtenidos y métodos implementados para abordar el tema de compatibilidad electromagnética del equipo.

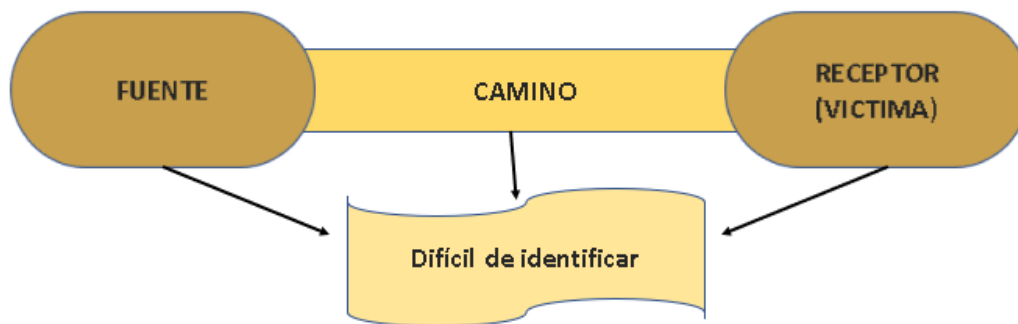
### ***3.4.1 Conceptos teóricos***

**3.4.1.1 Compatibilidad electromagnética.** La compatibilidad electromagnética (EMC, por sus siglas en inglés) es la capacidad de un sistema electrónico de cumplir correctamente su función y de no ser una fuente de contaminación electromagnética para el entorno en el que se ubica. Se puede definir que un sistema es electromagnéticamente compatible con su entorno, cuando no provoca interferencias con otros sistemas, no es susceptible a las emisiones de otros componentes y no ocasiona interferencias consigo mismo (**Henry W. Ott, 2009**). En la figura 19

se muestran los elementos de análisis en un problema de compatibilidad electromagnética. Para abordar este tipo de problemas se presentan tres opciones: la supresión de la emisión de actuación de la fuente, la disminución de la eficiencia del camino o de la susceptibilidad del receptor.

**Figura 19.**

*Elementos de un problema de compatibilidad electromagnética.*



**3.4.1.2 Blindaje.** El blindaje electromagnético se define como una pared metálica que atenúa el flujo de los campos eléctricos y magnéticos entre las dos regiones que separa. Se utiliza para proteger todos los equipos susceptibles situados fuera del blindaje si rodea la fuente de ruido, o para mantener una región aislada de la radiación electromagnética (**Henry W. Ott, 2009**), como se muestra en la figura 20.

**3.4.1.3 Eficiencia.** El blindaje electromagnético se utiliza para mejorar la inmunidad de los equipos electrónicos o reducir sus emisiones, su capacidad se caracteriza por la eficiencia, que se expresa en términos de atenuación en dB y se define como una relación de las intensidades de campo en presencia y ausencia del recinto como se muestra a continuación.

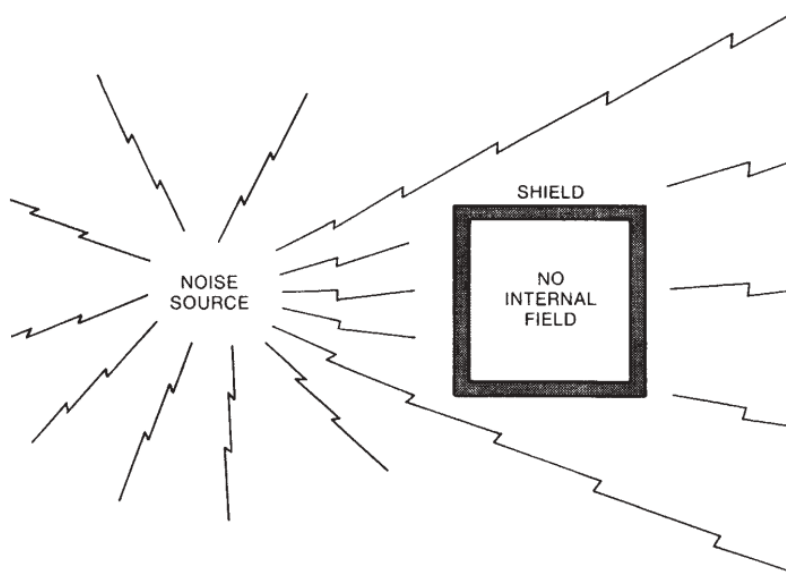
$$SE = 20 \log \left( \frac{E_o}{E_i} \right) [dB] \text{ Campo eléctrico}$$

$$SM = 20 \log \left( \frac{H_o}{H_i} \right) [dB] \text{ Campo magnético}$$

Donde el campo incidente es el que traspasa el blindaje ( $E_i$ ,  $H_i$ ) y el campo saliente ( $E_o$ ,  $H_o$ ) es el campo en el mismo punto con ausencia del blindaje.

**Figura 20.**

*Aplicación blindaje de protección de receptor.*



Nota. Tomado de (Henry W. Ott, 2009).

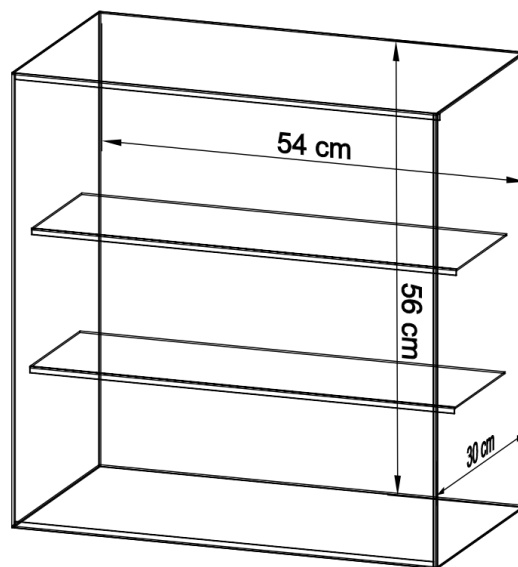
**3.4.1.4 Aperturas.** La eficiencia electromagnética del escudo disminuye considerablemente con la existencia de cubiertas de acceso, puertas, orificios para cables y la juntas y uniones. Estas aperturas tienen mayor efecto sobre la penetración de campos magnéticos, sin embargo, los métodos utilizados para la reducción del efecto por las aperturas permiten la disminución del flujo del campo eléctrico y magnético. La penetración de los campos debido a los orificios depende principalmente de la frecuencia del campo, la impedancia de onda del campo electromagnético y el dimensionamiento lineal de la apertura (Henry W. Ott, 2009).

### 3.4.2 Cofre de intemperie

El mejor blindaje contra campos eléctricos es una jaula de Faraday; un envolvente metálico que protege a los equipos del campo exterior ya que en su interior el campo eléctrico es nulo. Hoy en día el material más utilizado en este tipo de envoltentes o cajas para equipos electrónicos es el aluminio, por ser altamente conductor presenta un alto porcentaje de pérdidas de reflexión para campos eléctricos y a altas frecuencia tienen mayor efectividad de apantallamiento magnético, efectividad que aumenta al incrementarse la frecuencia(Henry W. Ott, 2009). Debido a estas propiedades se diseñará e implementará un cofre en aluminio para el blindaje de los componentes, contendrá tres compartimientos que servirán de soporte y separación entre ellos, las dimensiones están determinadas por la capacidad para contener los componentes como se muestra en la figura 21.

**Figura 21.**

*Diseño caja de intemperie-Material lamina de aluminio calibre #16.*

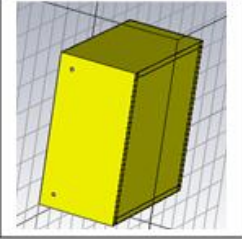
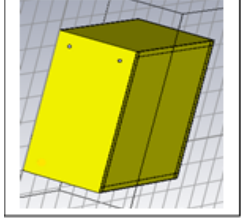
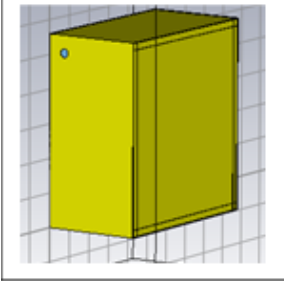
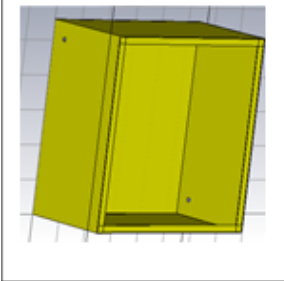


Parte indispensable del diseño de este blindaje es la ubicación de agujeros para la conexión de componentes exteriores, más específicamente 7 conductores entre cables coaxiales, multiconductor y par trenzado, por los cuales circulan señales de diferentes características. El diseño se lleva a cabo por medio de simulaciones con el objetivo de determinar la posición y las dimensiones de estos orificios, garantizando la máxima eficiencia. El software utilizado para este fin es CST Studio Suite 2019 edición estudiantil. Se elabora el modelo 3D en el software, estableciendo que la distancia entre la fuente de campo (descarga atmosférica) y el punto de observación (osciloscopio) es mayor a la longitud de onda dividida por  $2\pi$ , se excita el modelo de simulación con una onda plana, con un barrido de frecuencia de 1Hz hasta 200 MHz y se selecciona un punto de medición de eficiencia en el centro del cofre.

Se realizan 4 escenarios de simulación variando la posición, diámetro y cantidad de agujeros, en el primer escenario se hacen dos agujeros de media pulgada en la parte lateral, con una distancia vertical entre ellos de 46 cm y a 5 cm de las aristas de la cara. Para el segundo se cambió la ubicación de los dos agujeros colocándolos a una distancia horizontal de 20 cm, para el tercero se realiza un orificio de una pulgada en la parte superior de la cara lateral a 5 cm de las aristas, y finalmente en el último escenario se simula el cofre con dos orificios de media pulgada ubicados al extremo de cada cara lateral, la tabla 5 presenta los datos de ingreso para simulación acompañados de la figura 22 que muestra la eficiencia del blindaje para los escenarios de simulación.

**Tabla 5.**

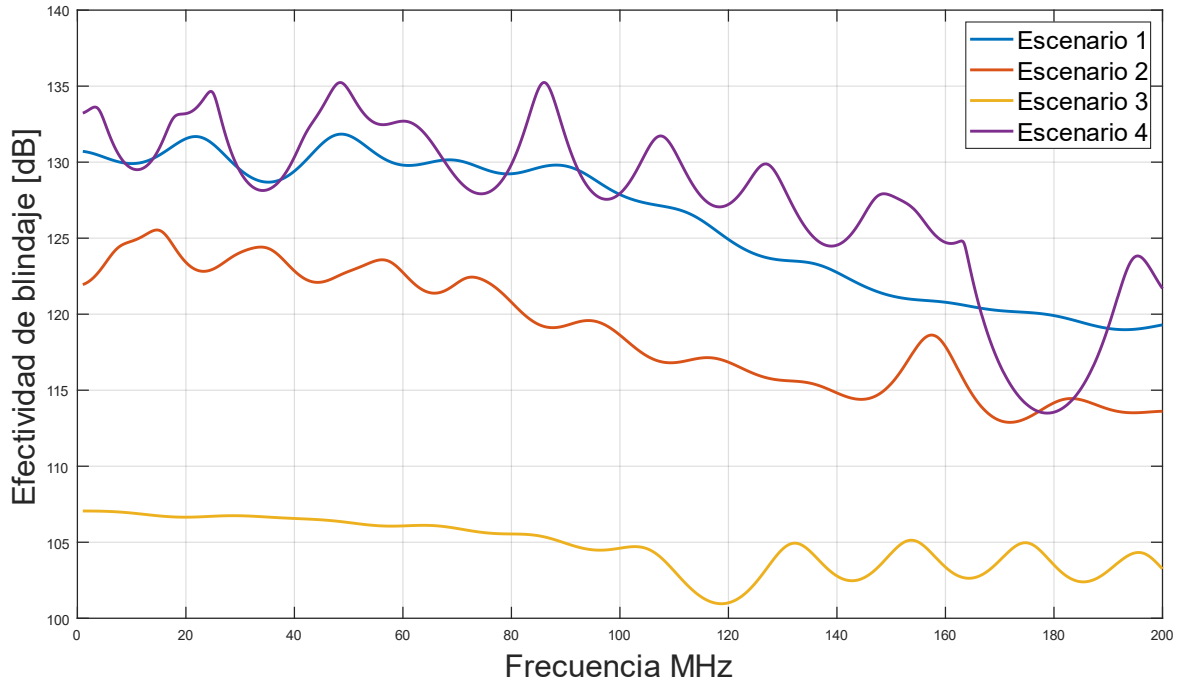
*Datos de simulación software CST.*

Datos de simulación		Esquema de simulación	
Escenario 1	Tiempo de simulación	596 s	
	Celdas por longitud de onda	29	
	Numero de celdas	94464	
	Precisión del solucionador	-80dB	
Escenario 2	Tiempo de simulación	615 s	
	Celdas por longitud de onda	25	
	Numero de celdas	98648	
	Precisión del solucionador	-80dB	
Escenario 3	Tiempo de simulación	517 s	
	Celdas por longitud de onda	29	
	Numero de celdas	97498	
	Precisión del solucionador	-80dB	
Escenario 4	Tiempo de simulación	635 s	
	Celdas por longitud de onda	29	
	Numero de celdas	91140	
	Precisión del solucionador	-80dB	

Obtenidos los resultados de simulación se definen las ubicaciones y el diámetro de las aperturas conforme el escenario de simulación cuatro, el cual, presenta una mayor efectividad de blindaje. Durante el proceso de fabricación se garantiza la continuidad eléctrica entre el cofre y la tapa, al mismo tiempo en los orificios se instalan prensaestopas para hacer más efectivo el blindaje y disminuir el efecto causado por estos.

**Figura 22.**

*Efectividad del blindaje para los escenarios de simulación.*



### 3.4.3 Conductores

Se presta atención al cableado, por ser el componente más extenso del sistema, que capta y/o irradia el ruido, se considera para este equipo estrategias que permitan la reducción del acoplamiento de los campos eléctricos, magnéticos y la combinación de estos conocidos como electromagnéticos.

Para el ensamble de los componentes es necesario el uso de conductores de diferentes tipos. Se usarán conductores coaxiales y cables de tipo par trenzado o multiconductor, recubiertos por una capa conductora común para evitar el acoplamiento de ruidos del entorno hacia el cable o del

cable al entorno. La longitud de estos conductores no sobrepasa un veinteavo de la longitud de onda de las frecuencias en medición, garantizando que las corrientes de los conductores se encuentren en fase.

Los cables multiconductor utilizados para la transmisión de información digital consisten en pares trenzados, blindados con una pantalla general, por los cuales, circulan señales de características eléctricas similares. Un caso, es la señal digital enviada del osciloscopio al computador, la cual, debe mantenerse completamente limpia de interferencias, por ende, se utiliza un conductor USB 3.0 de doble blindaje, que permite la transmisión de datos con rapidez, brindando disponibilidad a la memoria del osciloscopio para un nuevo evento.

Con relación a los cables de potencia utilizado para la alimentación de la UPS, se ubicarán alejados de las señales sensibles, y deben ir muy próximos entre sí para lograr la cancelación mutua de los campos magnéticos generados por los conductores.

Para disminuir la distancia de cable sin apantallamiento en los terminales de entrada o salida de los componentes a interconectar, se utiliza la herramienta crimpadora para la adaptación de los respectivos conectores.

#### ***3.4.4 Sistema de puesta a tierra***

El sistema de puesta a tierra es importante para el control de ruido e interferencia, de acuerdo con su diseño proporciona protección contra la emisión y la interferencia electromagnética, la clave está en determinar dónde y cómo conectarla. Cabe aclarar que no siempre los sistemas de puesta a tierra son una salida definitiva a los problemas de compatibilidad electromagnética.

El equipo que se implementa para la medición de tensiones inducidas está formado por subsistemas con tierras independientes que se deben interconectar. Por seguridad, es necesario la conexión a tierra del cofre encargado del blindaje de los componentes, así mismo, esto ayudara a que el voltaje inducido en la superficie del cofre, a causa de los campos electromagnéticos exteriores, se desvíe y no alcance la instrumentación del interior.

Para el equipo de medición se implementará un sistema de puesta a tierra derivado separado, esto quiere decir que la tierra de los componentes vinculados a la etapa de adquisición y procesamiento de la señal, no tienen una conexión eléctrica directa con la tierra de la red de alimentación. Esto se logra al evitar la conexión entre la tierra de la red y la vinculada a la UPS seleccionada. Separando estos dos sistemas se asegura que el ruido que contenga la tierra de la red de potencia no ocasione interferencias en las señales del equipo de medición y al mismo tiempo, se evite realizar un bucle de tierra con la tierra física designada para el divisor.

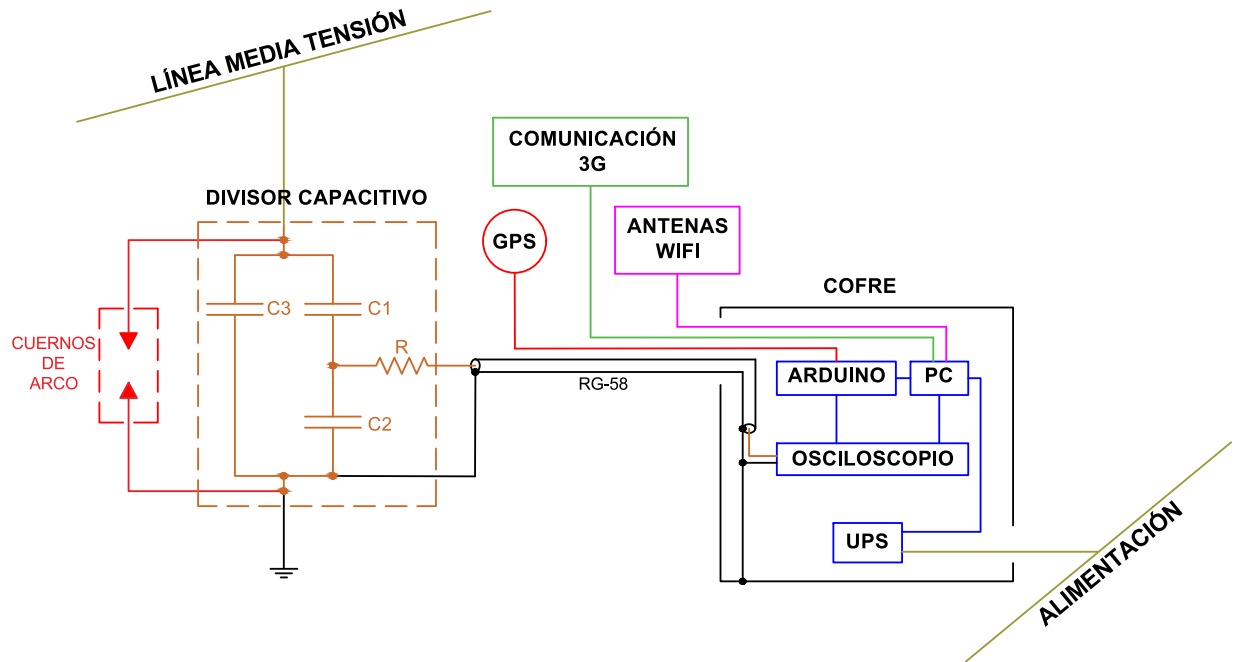
La figura 23 muestra el esquema general de conexionado del equipo y su organización, conformado por el sistema de alimentación alterna y los componentes de acondicionamiento, adquisición y procesamiento de la señal. En éstos se genera un punto común a masa que se une a la carcasa metálica del cofre, y se conecta al sistema de puesta a tierra exterior. La ventaja de esta estrategia de interconexión es que si la referencia a tierra exterior no fuese perfecta (0 V), varía el nivel de voltaje de todo el conjunto, y el equipo seguirá funcionando correctamente.

Para lograr el objetivo del esquema de la figura 23, es necesario la interconexión de la referencia de los componentes asociados al tratamiento de la señal y así, generar un punto común para su unión con la tierra física y el cofre. Esto se logra al ejecutar una conexión en serie entre las referencias de los componentes: partiendo del cofre, se pasa al osciloscopio, continuando al divisor capacitivo y finalmente se conecta a la tierra física. En todas las conexiones se tendrá en cuenta

aterrizar las pantallas de los conductores garantizando que se encuentren al mismo nivel de referencia de las señales.

**Figura 23.**

*Esquema general del equipo de medición de tensiones inducidas.*



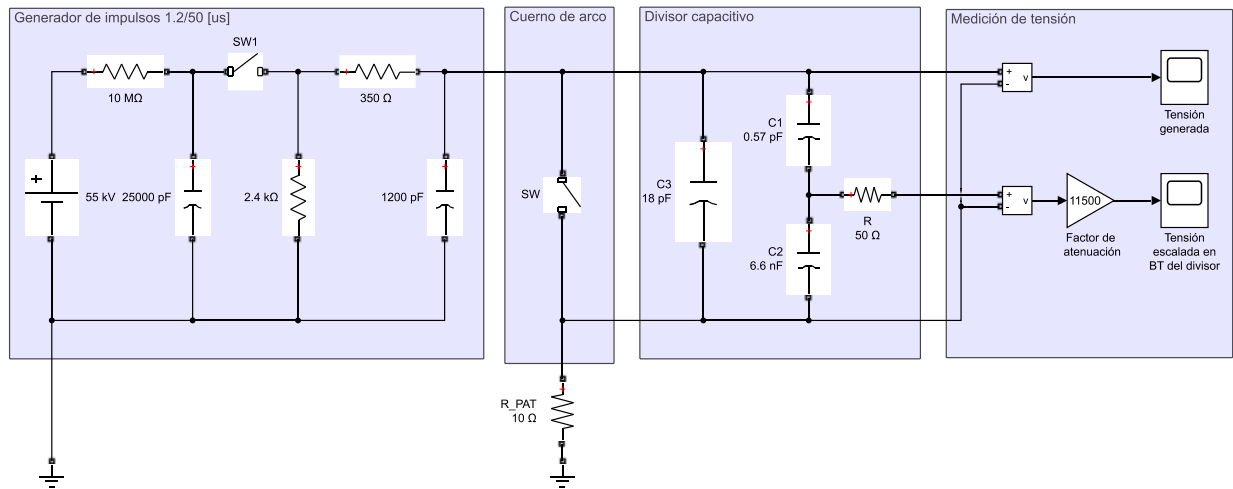
### 3.5 Simulación del equipo de medición

Con el fin de simular el funcionamiento del divisor capacitivo ante un impulso de tensión de 1.2/50 us, se realiza en Matlab-Simulink el modelo circuital mostrado en la figura 24. Para simular la forma de onda de tensión se implementa el modelo de un generador de impulsos de una etapa (Mehta, Basak, Anelis, & Paramane, 2018). Los cuernos de arco se modelan simplifícadamente mediante un *switch*, en el cual se establece un tiempo de cierre cercano al pico de tensión del generador. El divisor capacitivo se modela mediante el esquema mostrado en su

hoja de datos (figura 8). Para tener un comportamiento más práctico, se tiene en cuenta la resistencia de puesta tierra ( $R_{PAT}$ ) que tendrá el equipo de medición, ésta se establece en un valor de  $10 \Omega$  similar al encontrado en un sistema de distribución.

**Figura 24.**

*Simulación en Matlab-Simulink del equipo de medición de tensiones inducidas.*



Se realizan dos casos de simulación del circuito de la **figura 24**: en el primer caso los cuernos de arco (*switch*) no presentan disrupción eléctrica, así el impulso de tensión en el divisor no se altera; en el segundo caso ocurre disrupción eléctrica en los cuernos de arco, de manera que la tensión del divisor cae a cero en el instante en que se da el suceso.

### 3.5.1 Caso de simulación: no ocurre disrupción eléctrica

En la figura 25 se muestra la tensión del generador de impulsos junto a la tensión del lado de baja tensión del divisor capacitivo escalada 11500 (factor de atenuación) cuando no ocurre disrupción eléctrica en los cuernos de arco. Se observa que las tensiones son muy idénticas y que

tienen la forma de onda de un impulso de tensión 1.2/50 us, lo cual es el comportamiento que se espera del divisor. En la figura 26 se muestra la corriente que fluye a través de los capacitores (C1 y C2). Aunque en el inicio de la simulación existe un rápido cambio en la tensión de los capacitores, la corriente a través de éstos es despreciable debido a que el valor de sus capacitancias son lo suficientemente bajos (La corriente en un capacitor es proporcional a la tasa de cambio del voltaje en sus terminales y al valor de su capacitancia). De esta manera se garantiza una baja corriente por la resistencia de puesta tierra y por ende un buen comportamiento en la forma de onda del lado de baja tensión del divisor.

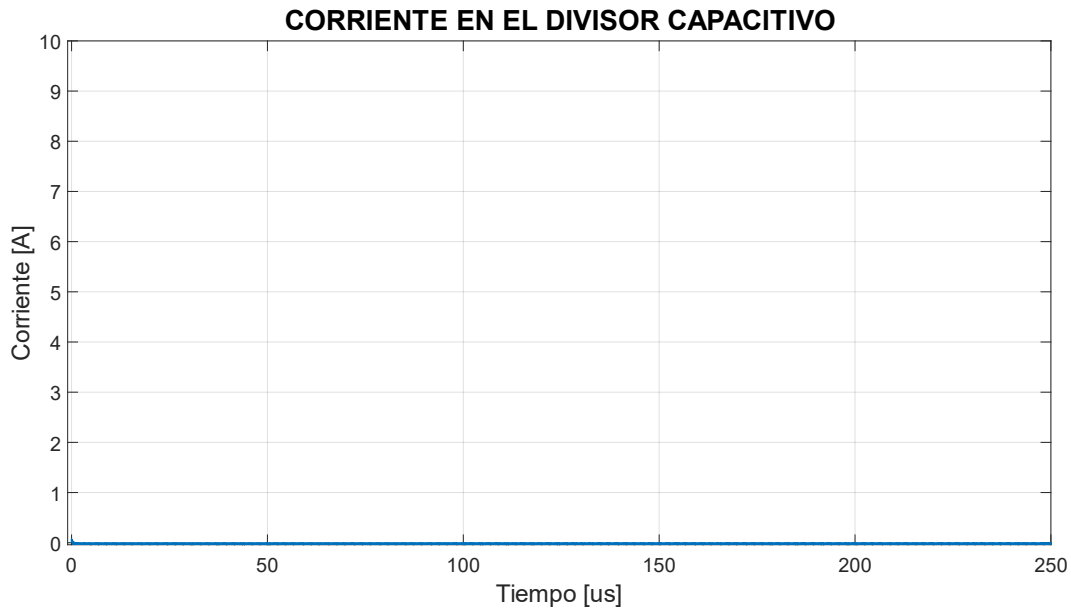
**Figura 25.**

*Tensión en el divisor capacitivo para el caso de simulación sin interrupción.*



**Figura 26.**

*Corriente en el divisor capacitivo para el caso de simulación sin interrupción.*



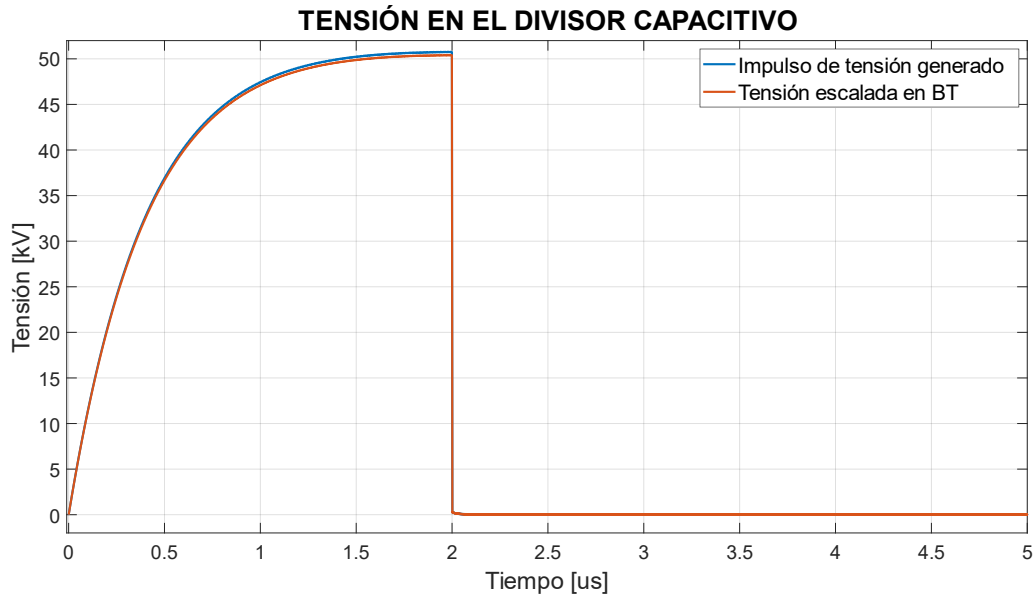
### 3.5.2 Caso de simulación: ocurre interrupción eléctrica

En la figura 27 se muestra la tensión del generador de impulsos junto a la tensión del lado de baja tensión del divisor capacitivo escalada 11500 (factor de atenuación) cuando ocurre interrupción eléctrica en los cuernos de arco. Se observa que ambas tensiones caen a cero volts en el instante en que ocurre la interrupción (2 us). En la figura 38 se muestra la corriente que fluye a través de los capacitores del divisor, la cual tiene un valor muy alto. En este caso las capacitancias del divisor no son lo suficientemente bajas para contrarrestar el cambio abrupto en la tensión, que ocurre en el instante de la interrupción. En la práctica, cuando ocurre la interrupción, la caída de tensión en los terminales del divisor no se da en un tiempo tan corto como el que se modeló en la simulación. Por tanto, se debe implementar un modelo más realista de los cuernos de arco para de

esta manera conocer un comportamiento más acertado de la tensión y corriente en los terminales del divisor capacitivo.

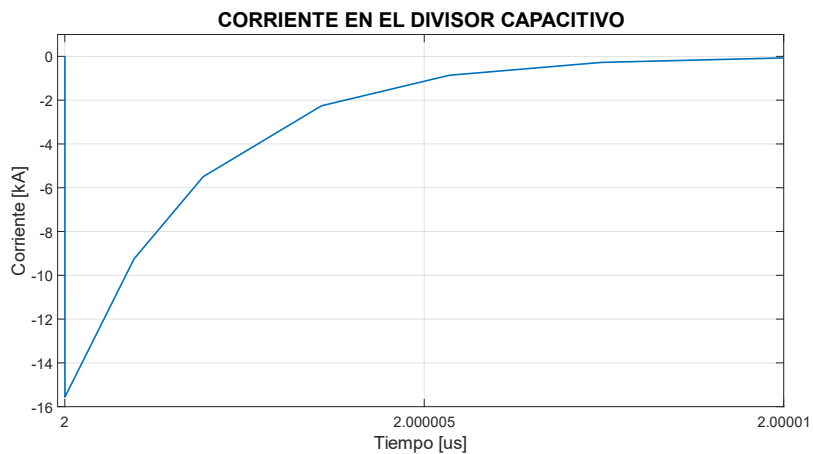
**Figura 27.**

*Tensión en el divisor capacitivo para el caso de simulación con disrupción.*



**Figura 28.**

*Corriente en el divisor capacitivo para el caso de simulación con disrupción.*



## **4. Configuración, ensamble y caracterización de componentes.**

En este capítulo se llevará a cabo la configuración (sección 4.1), caracterización (sección 4.2) y ensamble (sección 4.3) de componentes, siguiendo el diseño y características del sistema de medición desarrolladas anteriormente.

### **4.1 Configuración de componentes**

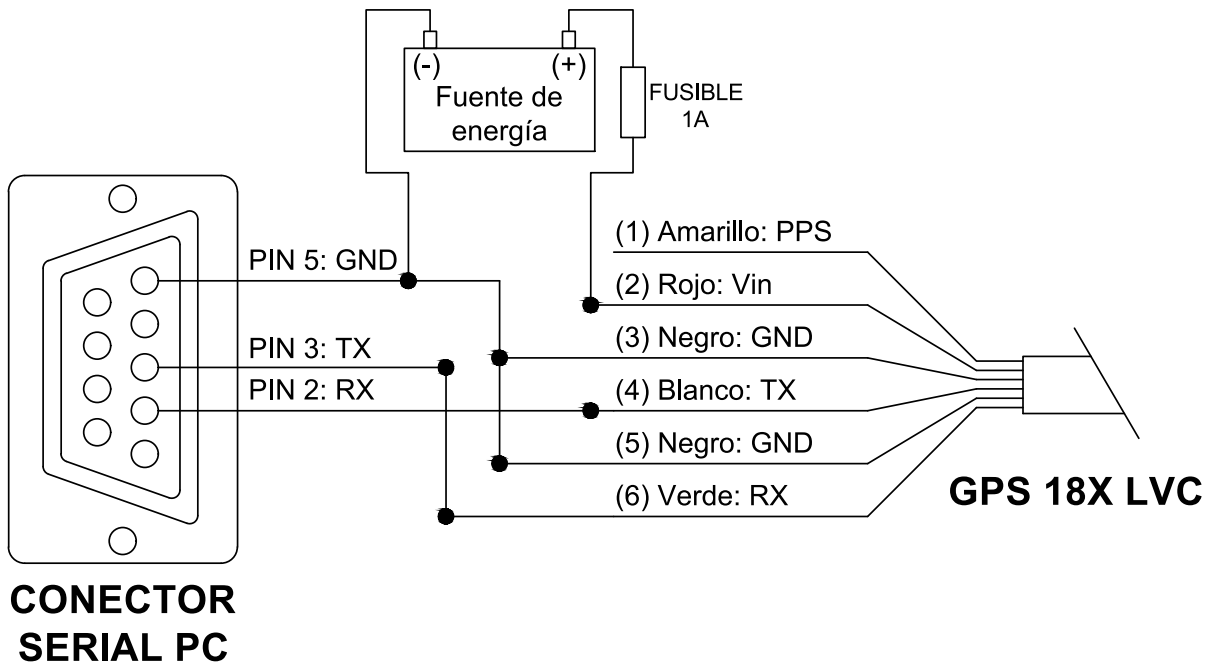
El GPS, el osciloscopio y el computador son los componentes del sistema de medición que necesitan una configuración, de manera que tengan un correcto funcionamiento y así, cumplan con la tarea para la cual fueron seleccionados.

#### ***4.1.1 Configuración del GPS***

La configuración del GPS 18x LVC consiste en establecer el ancho del pulso por segundo (PPS) y la velocidad de transmisión de la trama NMEA, ya que estas son las señales que recibe el Arduino que envía la referencia de tiempo al osciloscopio (sección 3.2.1). Dicha configuración se realiza mediante el software “SNSRXCFG” de Garmin. En la figura 29 se muestra el esquema de conexión entre el PC y el GPS para llevar a cabo la respectiva comunicación.

**Figura 29.**

Conexión para la comunicación entre el GPS y el PC,



Nota. Tomado de (Garmin, 2011).

El ancho del pulso por segundo puede tomar cualquier valor, debido a que el Arduino es programado para detectar el flanco de subida del pulso y no su duración. Por tanto, se establece un valor de 20 ms para el ancho del PPS.

El Arduino envía al osciloscopio, cada 10 ms, la hora UTC con el formato HHMMSSsmsms (Horas, minutos, segundos y milisegundos), lo que corresponde a 9 caracteres ASCII. Además, son necesarios los caracteres de control CRLF para indicar el fin de un paquete de datos (hora). Cada carácter se compone de 8 bits, por tanto, el número total de bits por cada paquete de datos transmitido equivale a:

$$\text{Bits por paquete} = N^{\circ} \text{ caracteres} * ( 8 \text{ bits} + 1 \text{ bit de inicio} + 1 \text{ bit parada})$$

$$\text{Bits por paquete} = 11 * ( 8 + 1 + 1 ) = 110 \text{ bits}$$

Teniendo en cuenta que se requiere transmitir cada 10 ms cada paquete de datos, la tasa mínima de baudios del Arduino debe ser:

$$\text{Tasa de baudios} = \frac{\text{N}^\circ \text{ bits}}{\text{segundos}} = \frac{110 \text{ bits}}{10 \text{ ms}} = 11000 \text{ bits/s}$$

La velocidad estándar más próxima al valor calculado es de 19200 bits/s, lo que corresponde a la tasa de baudios del Arduino y del GPS. En la figura 30 se muestra la configuración establecida para el GPS. Una vez configurado el GPS, se desconecta del PC para posteriormente realizar la comunicación con el Arduino.

**Figura 30.**

*Configuración del GPS 18X LVC.*

The image shows a software configuration window for a GPS device. It is divided into several sections:

- System Configuration:** Contains a dropdown menu for Baud Rate set to 19200, and checkboxes for Power Save Mode and Garmin Binary Output. A note states: "Note: Selecting 'Garmin Binary Output' will disable NMEA output. The device will instead output data in Garmin Binary format."
- NMEA Configuration:** Contains a checkbox for NMEA 2.30 Mode, a spinner for NMEA Output Time set to 1, and a dropdown for Talker ID set to GP.
- Pulse-Per-Second (PPS) Configuration:** Contains a checked checkbox for Enable Pulse Per Second, a checkbox for PPS Auto Off Mode, and a spinner for PPS Length set to 20.
- Commands:** Contains buttons for Reset Unit, Reset NonVol, Set Autolocate, and Test Mode.
- Buttons:** OK and Cancel buttons are located on the right side of the dialog.

#### 4.1.2 Configuración del osciloscopio

La configuración del osciloscopio PicoScope 5242D depende de las características de las señales en sus dos canales de entrada analógicas: el canal A recibe la señal de tiempo transmitida

por el sistema GPS-Arduino, y al canal B se envía la señal en baja tensión del divisor capacitivo. La configuración se debe realizar mediante el software PicoScope6. En el **Anexo C** se muestra la interfaz del software.

**4.1.2.1 Configuración de la barra de herramientas.** La barra de herramientas del software controla las características relacionadas con la captura de las señales de entrada. Teniendo en cuenta los parámetros mencionados en la sección 3.2.1, se escogen los siguientes valores para la barra de herramientas (figura 31):

- El osciloscopio se encuentra en modo tiempo (1), es decir, se capturan las señales en función del tiempo.
- La ventana de tiempo por captura es de 200 ms (2).
- La cantidad de muestras totales por captura corresponde a 7 MS (3). Por tanto, la velocidad de muestreo es de 35 MS/s con un intervalo de muestras de 28 ns.
- El número de bits de hardware usados para el muestreo es de 12 bits (4), lo que equivale a una resolución en tensión de 28.076 V:

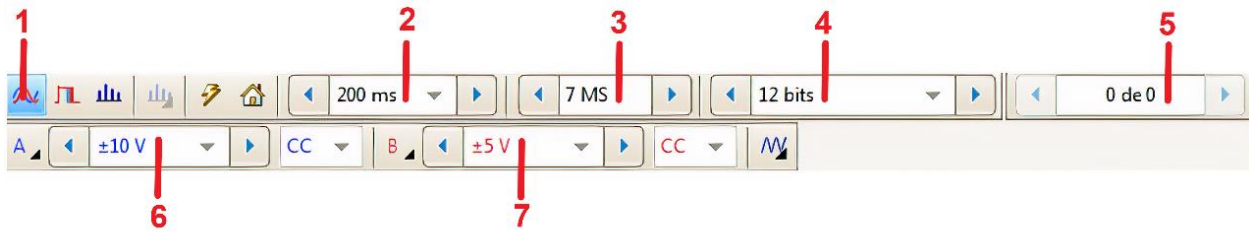
$$\text{Resolución} = \frac{\text{Rango de voltaje}}{2^{\text{número de bits}}} * \text{Relación de transformación}$$

$$\text{Resolución} = \frac{2 * 5V}{2^9} * 11500 = 28.076 \text{ V}$$

- El buffer del osciloscopio guardará dos formas de onda o capturas (5).
- El rango de tensión del canal A se establece entre  $\pm 10V$  (6), debido a que los niveles de voltaje en la comunicación serial del Arduino es de  $\pm 8V$ .
- El rango de tensión del canal B se establece entre  $\pm 5V$  (6), porque la máxima tensión del divisor capacitivo en baja tensión es de  $\pm 4.35 \text{ V}$  ( $\pm 50 \text{ kV}$  en alta tensión).

**Figura 31.**

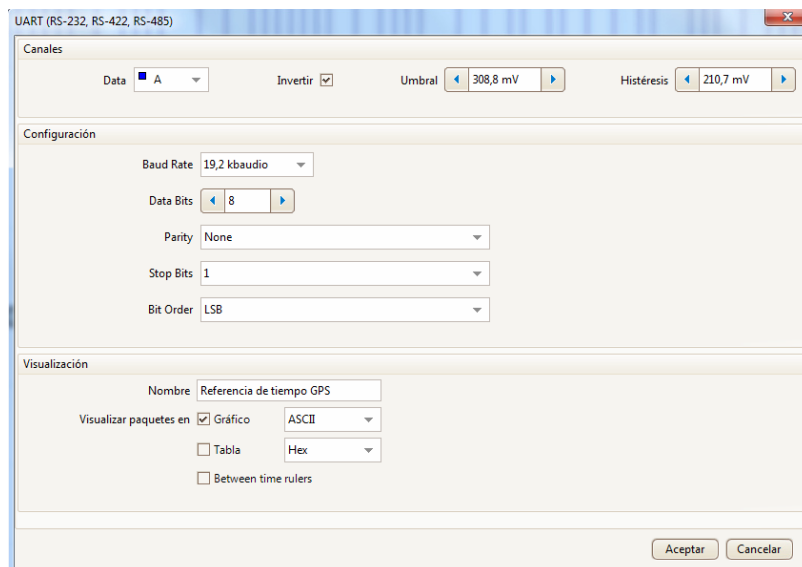
*Configuración de la barra de herramientas del PicoScope6.*



**4.1.2.2 Decodificación de la señal de tiempo.** Para visualizar en el osciloscopio la hora UTC (canal A) transmitida por el sistema GPS-Arduino con el protocolo RS232, se utiliza la decodificación en serie del software. Se realiza la configuración mostrada en la figura 32 teniendo en cuenta las características de la transmisión de datos del Arduino. En la figura 33 se visualiza un ejemplo de la decodificación en pantalla de la hora UTC, la hora mostrada corresponde a: 21 horas; 45 minutos; 15 segundos; 124 milisegundos.

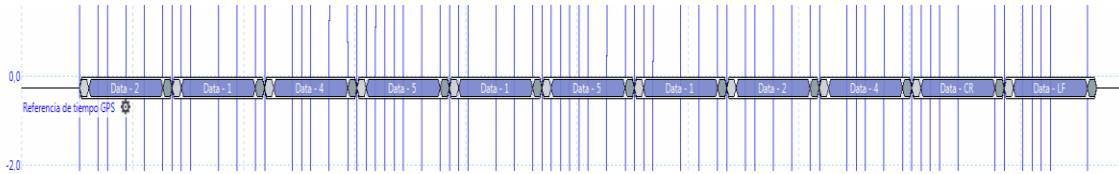
**Figura 32.**

*Configuración para la decodificación serial de la señal de tiempo.*



**Figura 33.**

*Ejemplo de la decodificación serial de la señal de tiempo.*

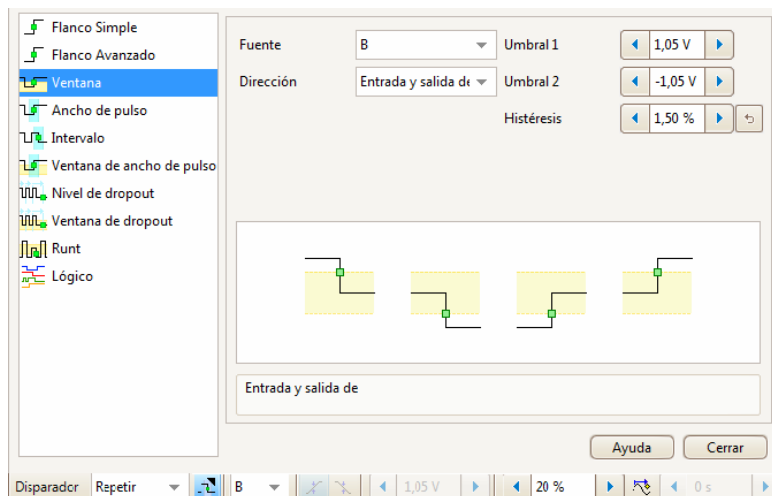


**4.1.2.3 Configuración de la señal de disparo.** El disparador (trigger) le indica al osciloscopio el momento de iniciar a registrar las señales de entrada. Debido a que la señal que se requiere supervisar es la tensión en una línea de distribución, se configura el osciloscopio de tal forma que se dispare cuando se cruce un umbral establecido.

En la figura 34 se muestra la configuración establecida para el disparador del osciloscopio. Cuando la señal del divisor de tensión (canal B) cruza el umbral de  $\pm 1.05 \text{ V}$  (12 kV), el osciloscopio inicia la captura de las señales 40 ms antes del instante de disparo (20% del tiempo total).

**Figura 34.**

*Configuración del disparador.*



Una vez lleno el buffer del osciloscopio (dos capturas), se debe guardar en el PC las formas de onda registradas, siendo posible vaciar la memoria del osciloscopio para obtener nuevas capturas. Para ello, se utiliza alarmas disponibles en el osciloscopio (figura 35).

**Figura 35.**

*Configuración de las alarmas del osciloscopio.*



#### ***4.1.3 Configuración del computador***

Para lograr un funcionamiento óptimo del computador, disminuir la cantidad y posibilidades de fallas, es necesario la instalación y establecimiento de software y parámetros desde la configuración de usuario o desde la BIOS (Basic input/output system).

**4.1.3.1 Instalación de software.** Los programas indispensables en el equipo son mencionados a continuación.

**PicoScope6** Programa que permite la interfaz y la visualización de las señales tomadas por el osciloscopio, en él se deben efectuar las configuraciones para la adquisición de la señal a medir, y su posterior transmisión y almacenamiento de datos al computador.

**TeamViewer** Software que permite el acceso remoto al computador desde cualquier otro dispositivo electrónico, es instalado con licencia de uso no comercial. En caso de ser necesaria la modificación de la configuración del PC se puede realizar por medio de este programa, sin tener que dirigirse al lugar de ubicación del equipo, al tiempo que permite la extracción de las mediciones realizadas.

**SNSRXCFG** Software que permite la configuración de la trama de datos, la sentencia NMEA y los pulsos por segundo generados y enviados por el GPS 18X LVC.

Adicional a esto se instalan los drivers y se configura el modem de tal manera que cada vez que este sea recargado, el equipo automáticamente se conecte a la red y así poder acceder por medio remoto a él. Este procedimiento se lleva a cabo con la red wifi para que cada vez que detecte una red se conecte automáticamente a ella.

**4.1.3.2 Parámetros en la BIOS.** Es necesario que el equipo sea autónomo en la mayoría de las posibilidades, por ello, se establece un encendido automático, esto garantiza que ante un corte prolongado en el que la UPS se descargue y el computador se apague, al retornar el suministro se inicie automáticamente. Para lograr esto, fue necesario ingresar a la BIOS del equipo y seguir los pasos que a continuación se menciona.

- En la BIOS del pc se selecciona el menú “Advanced”, y allí la opción Advanced Configuration and Power Interface (ACPI).
- En ACPI se busca el menú “Restore on AC/power loss” y se configura en Power On.
- Realizados los cambios se pulsa F10 guardando cambios.
- Se enlaza al encendido del equipo los programas PicoScope6 y TeamViewer desde la configuración del sistema.

## **4.2 Caracterización de componentes.**

Se realizó por separado la verificación del funcionamiento de los componentes del equipo de medición: mediante pruebas al osciloscopio se comprueba su ancho de banda y señal de disparo; se evalúa cual es la precisión de la referencia de tiempo del sistema GPS-Arduino ; se determina, en el laboratorio de alta tensión, la tensión de chispa de los cuernos de arco por medio del método de ensayo Up and Down.

### ***4.2.1 Caracterización de osciloscopio***

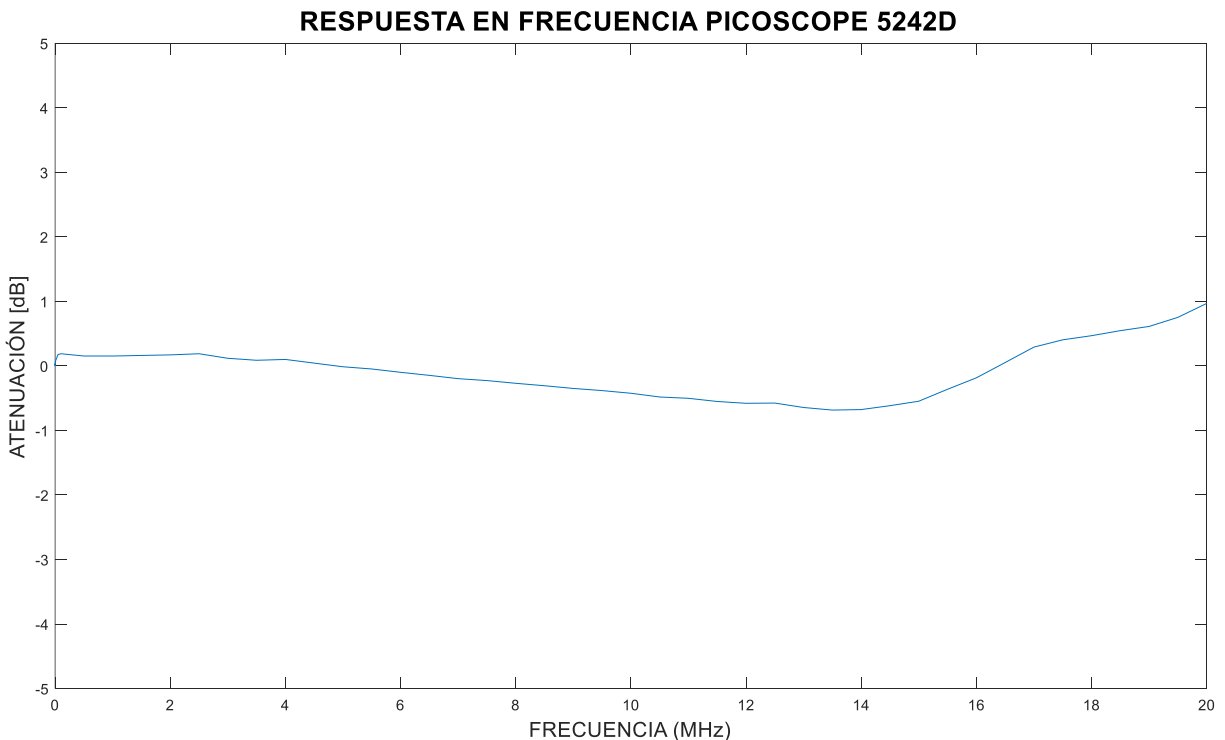
El osciloscopio es un elemento indispensable del equipo de medición, por ello es necesario chequear su funcionamiento, y constatar su configuración, con las dos comprobaciones realizadas a continuación se asegura el correcto desempeño cuando se encuentre en conjunto con los demás elementos.

**4.2.1.1 Verificación del ancho de banda del osciloscopio PicoScope 5242D.** El ancho de banda se especifica como la frecuencia para que una señal de entrada sinusoidal se atenúe hasta un 70% de su amplitud original, conocido también como punto de -3dB.

Para verificar el ancho de banda del osciloscopio y que su respuesta en frecuencia sea constante por lo menos hasta 4 MHz, se realiza una prueba con ayuda de un generador de señales que permite la variación de la frecuencia de 30Hz a 20MHz, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa la respuesta en frecuencia para el osciloscopio PicoScope 5242D, esta se mantiene constante para un rango considerable de frecuencia que incluye de 30 Hz a 4MHz, rango para el que se esperan las mediciones, al tiempo que se valida lo establecido en la hoja de datos del equipo.

**Figura 36.**

*Respuesta en frecuencia osciloscopio.*



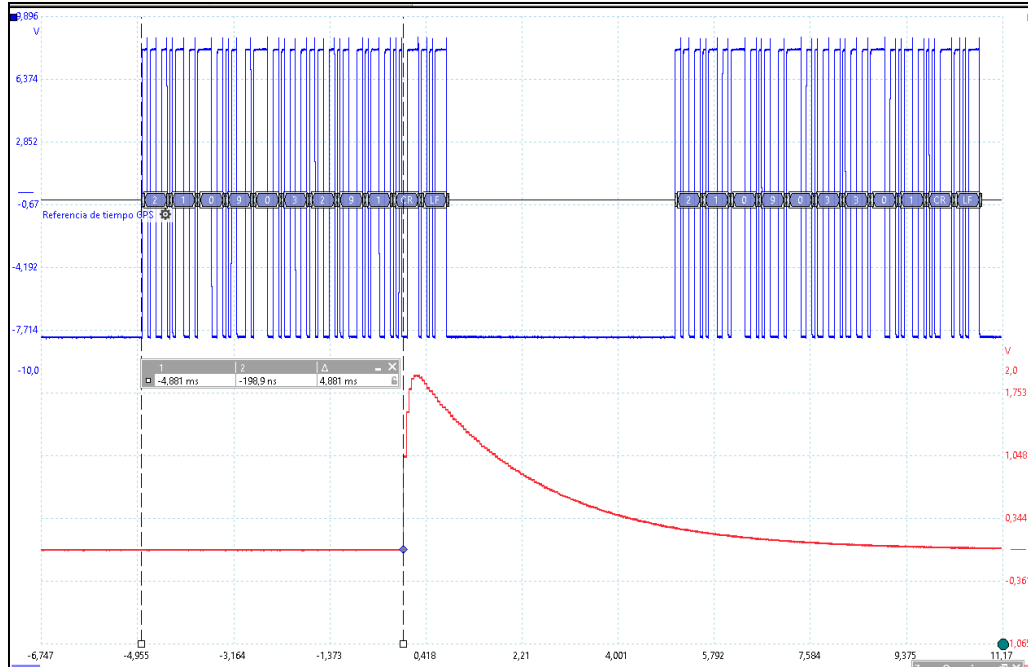
**4.2.1.2 Comprobación de la señal de disparo.** Con esta prueba se verifica la actuación de la señal de disparo y la configuración establecida en el programa PicoScope6. Se ingresa por el canal B una señal tipo impulso como la mostrada en la figura 4, la cual, proviene del generador de señales del osciloscopio, se observa la captura y almacenamiento de la señal (figura 37), evidenciando la actuación del trigger en el momento determinado.

Para establecer la hora exacta en que se da la descarga, se tiene en cuenta la diferencia de tiempo entre la última trama enviada por el GPS y el momento de captura de la señal. Esta es sumada con la hora que precede al evento, registrada en el canal A.

- Estampa de tiempo antes del evento (hh:mm:ss,msmsms) = 21:09:03:291
- Tiempo transcurrido antes del evento (msms:μsμsμs) = 04:881
- Hora de registro de evento (hh:mm:ss:msmsms: μsμsμs) = 21:09:03:295:881

**Figura 37.**

*Registro del osciloscopio ante la prueba con señal tipo impulso.*



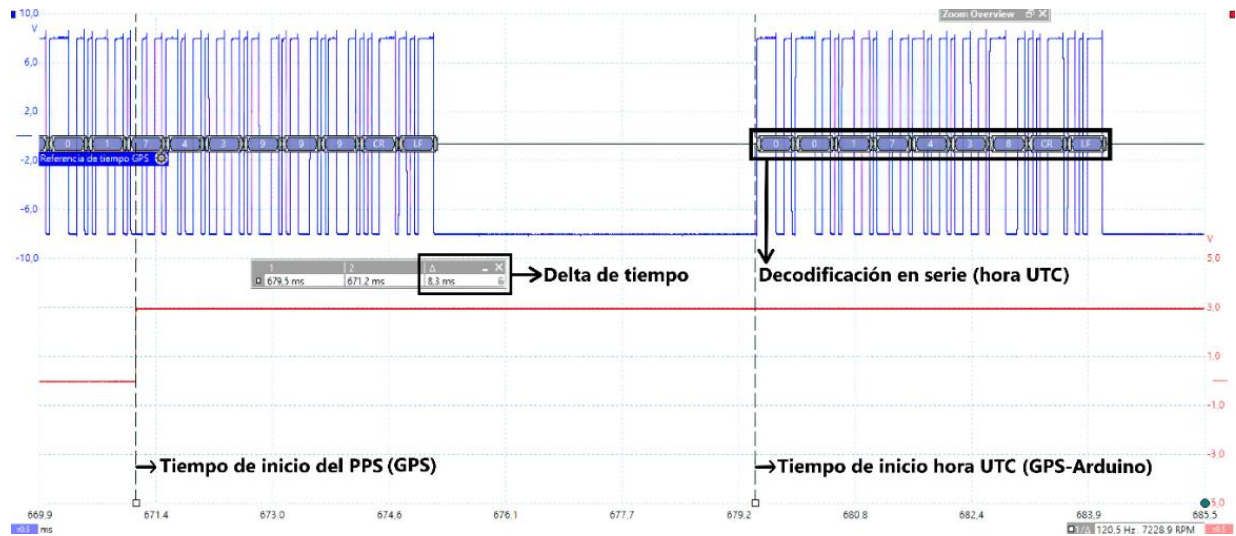
Los registros son almacenados posteriormente al ser tomadas en una carpeta del disco del computador en formato de archivo; ficheros de datos (\* .psdata), este archivo permite variar su formato según los requerimientos de quien analice las mediciones.

#### 4.2.2 Caracterización sistema GPS-Arduino

Para determinar la precisión en la hora UTC enviada por el sistema GPS-Arduino, se halla con el PicoScope6 el instante en que ocurre el PPS enviado por el GPS (inicio de un nuevo segundo), y el tiempo en que inicia la transmisión serial de un paquete de datos del sistema GPS-Arduino, como se muestra en la figura 38.

**Figura 38.**

*Tiempo transcurrido desde el PPS mostrado por el PicoScope6.*



En la tabla 6 se muestra el retraso en la hora de 10 paquetes de datos transmitidos por el sistema GPS-Arduino, que ocurren en un intervalo de un segundo. Este retraso se obtiene al realizar la comparación entre la hora UTC transmitida por el sistema GPS-Arduino y el tiempo transcurrido desde el PPS del GPS (Delta de tiempo mostrado en la **Figura 32**). En el **Anexo D**, se calculan los retrasos en la hora para 5 diferentes PPS, obteniendo un promedio total de 0.6 ms. Por tanto, la precisión en la hora UTC del sistema GPS-Arduino es mayor a 1 ms.

**Tabla 6.**

*Retraso en la hora transmitida por el sistema GPS-Arduino*

<b>Hora UTC del GPS</b>	<b>Hora UTC del sistema GPS-Arduino</b>	<b>Tiempo transcurrido desde el PPS [ms]</b>	<b>Retraso en la hora [ms]</b>
00:17:43	00:17:43,008	8.3	0.3
	00:17:43,108	108.2	0.2
	00:17:43,217	218.2	1.2

00:17:43,338	338.3	0.3
00:17:43,438	438.1	0.1
00:17:43,547	548.1	1.1
00:17:43,668	668.3	0.3
00:17:43,778	778.1	0.1
00:17:43,818	818.3	0.3
00:17:43,978	978.3	0.3
	Promedio	0.422

### 4.2.3 Caracterización de los cuernos de arco

Para caracterizar el funcionamiento de los cuernos de arco ante impulsos atmosféricos, se realiza el método de ensayo Up and Down, descrito en la IEEE Std 4-1995 (**Instrumentation & Committee, 1995**). El objetivo de la prueba consiste en hallar la tensión crítica de flameo, es decir la tensión con forma de onda 1.2/50 us, que estadísticamente tiene una probabilidad del 50% de generar una disrupción eléctrica en los cuernos.

**4.2.3.1 Metodología para realizar la prueba Up and Down.** La prueba consiste en aplicar, con el generador de impulsos, una onda de tensión 1.2/50 us a los cuernos de arco. En caso de que se presente disrupción eléctrica (chispa) entre los electrodos, se debe disminuir el pico de tensión de la onda en un valor  $\Delta V$ . Por el contrario, sino ocurre la disrupción, se aumenta el pico de tensión de la onda en un valor  $\Delta V$ . La cantidad de impulsos aplicados no debe ser menor a 20, considerando como primer impulso aquel que genere una disrupción entre los electrodos.

Por tanto, antes de realizar la prueba, se debe estimar una tensión inicial ( $V_0$ ) y un incremento  $\Delta V$ . La tensión inicial es un valor aproximado de la tensión crítica de flameo de la

configuración electrónica bajo prueba. Por otra parte, en la IEEE-Std 4 (**Instrumentation & Committee, 1995**), se recomienda que el incremento  $\Delta V$  se encuentre entre el 1.5 al 3% de la tensión inicial ( $V_0$ ).

Con los resultados obtenidos experimentalmente, se calcula la tensión crítica de flameo de la siguiente forma:

$$V_{50\%} = \frac{\sum (k_i * V_i)}{n} \quad (4.1)$$

Donde:

- $V_i$ : son los diferentes valores de los impulsos de tensión aplicados.
- $k_i$ : es el número total de impulsos aplicados para una misma tensión  $V_i$ .
- $N$ : es el número total de impulsos de tensión aplicados.

Determinada la tensión crítica de flameo, es posible estimar el voltaje necesario para generar una descarga a cualquier probabilidad, por medio de la siguiente expresión:

$$V_{n\%} = (1 + Z * \sigma_{pu}) * V_{50\%} \quad (4.2)$$

Donde:

- $V_{n\%}$ : es la tensión con una probabilidad “n” de descarga.
- $V_{50\%}$ : es la tensión crítica de flameo (CFO).
- $Z$ : es un parámetro estadístico que varía con el valor de n.
- $\sigma_{pu}$ : es la desviación estándar en por unidad, el cual tiene un valor de 3% para impulsos atmosféricos (**Instrumentation & Committee, 1995**).

Finalmente, se debe medir las condiciones atmosféricas del laboratorio debido a que la tensión crítica de flameo depende de éstas. En general, el CFO aumenta si se incrementa la densidad de aire o humedad. Esto ocurre debido a que, entre mayor densidad de aire, mayor es la cantidad de partículas en el medio y por tanto, aumenta la dificultad en el desplazamiento de los

electrones. Para realizar las respectivas correcciones por densidad de aire y humedad se emplea la siguiente fórmula

$$V_{50\%\_normalizado} = V_{50\%} * \frac{k_h}{k_d} \quad (4.3)$$

Donde:

- $V_{50\%}$ : es la tensión crítica de flameo (CFO).
- $k_h$ : es el factor de corrección por humedad.
- $k_d$ : es el factor de corrección por densidad de aire.

El factor de corrección por humedad, para una separación electródica menor a 1 m, se determina de la siguiente manera:

$$k_h = (0.00813 * h + 1.095)^w \quad (4.4)$$

Donde:

- $h$  es la humedad absoluta bajo las condiciones de prueba.

El factor de corrección por densidad de aire, para una separación electródica menor a 1 m, se determina de la siguiente manera:

$$k_d = \left( \frac{P}{P_0} \right) * \left( \frac{273 + t_0}{273 + t} \right) \quad (4.5)$$

Donde:

- $P$ : es la presión atmosférica bajo condiciones de prueba.
- $P_0$ : es la presión atmosférica estándar (760 mmhg).
- $t$ : es la temperatura en °C bajo condiciones de prueba.
- $t_0$ : es la temperatura en °C estándar (20°C).

**4.2.3.2 Montaje de los equipos para realizar la prueba UP and Down.** En la figura 39 se muestra la conexión de los equipos necesarios para realizar la prueba Up and Down en el laboratorio de alta tensión. El generador de impulsos es empleado para obtener la forma de onda 1.2/50 us, necesaria para realizar la prueba. El divisor capacitivo junto al osciloscopio, es utilizado para medir el pico de tensión que se presenta en los cuernos, para cada uno de los eventos realizados. Algunas de las características de estos equipos se mencionan a continuación:

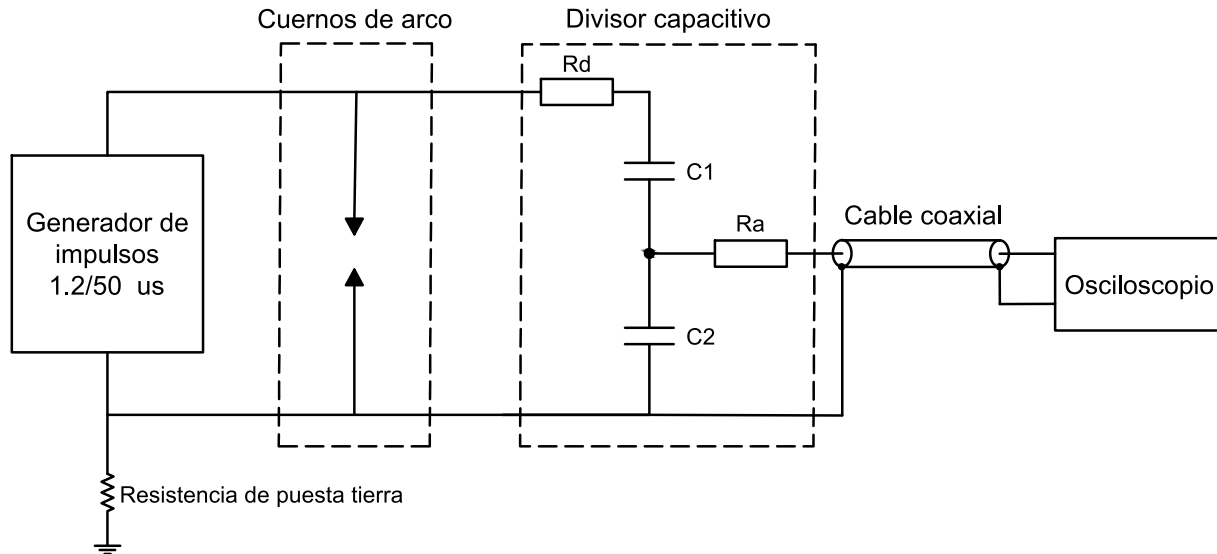
- El generador de impulsos utilizado es del fabricante Haefely modelo SGS 800/20. Este consta de 8 etapas, en la que cada una puede generar hasta 100 kV. Para controlar manualmente el generador se utiliza la consola de mando tipo GC 222.

- El divisor capacitivo es del fabricante Haefely, con una relación de transformación de 720.5:1. En la figura 39 se muestra su circuito simplificado que consta de: resistencia de amortiguamiento ( $R_d$ ) de 100  $\Omega$ ; resistencia de acople ( $R_a$ ) de 75  $\Omega$ ; capacitor de alta tensión ( $C_1$ ) y baja tensión ( $C_2$ ) con capacitancias de 652 pF y 468 nF, respectivamente.

- El osciloscopio digital empleado es el modelo Fluke 105 series II, el cual tiene un ancho de banda de 100 MHz, con resolución vertical de 8 bits y frecuencia máxima de muestreo de 5 GS/s.

**Figura 39.**

*Montaje de los equipos necesarios para realizar la prueba Up and Down.*



Se requiere que la separación electródica de los cuernos, establezca una tensión crítica de flameo por debajo de los 50 kV (tensión de soporte del divisor capacitivo). Para estimar esta distancia se toma como referencia los electrodos de la IEEE mencionados en la sección 2.1.3. Por tanto, se establece la separación electródica de los cuernos en 3.5 cm, que corresponde a una tensión crítica de flameo de 45 kV para los electrodos de referencia (figura 10).

Para separar eléctricamente los electrodos que conforman los cuernos de arco, se ubica un dieléctrico (acetato) entre éstos, el cual tiene la misma altura del divisor. En la figura 40 se muestra el montaje de los cuernos de arco con los respectivos terminales en los que se generan la onda de tensión 1.2/50 us.

#### Figura 40.

*Montaje de los cuernos de arco para realizar la prueba Up and Down.*



**4.2.3.3 Datos experimentales y cálculo de la tensión de chispa.** Para comenzar la prueba, se escoge una tensión inicial ( $V_0$ ) de 45 kV y un incremento en la tensión ( $\Delta V$ ) de 0.87 kV. Para lograr este incremento en la tensión se debe utilizar mínimo 3 etapas del generador de impulsos. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se registra si hubo o no disrupción eléctrica para cada impulso de tensión aplicado en los cuernos. Se realizaron en total 20 impulsos de tensión.

**Tabla 7.**

*Datos de la prueba Up and Down.*

Tensión [kV]	Disrupción	Disrupción	Disrupción	Disrupción	Disrupción
42.94	NO	NO			
43.81	NO	NO	SI	SI	
44.67	SI	SI	SI		
45.54	SI				
46.69	NO	NO	NO	SI	
47.55	NO	SI	SI	SI	SI
48.42	SI				

Con los datos presentados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se calcula la tensión de chispa de la siguiente forma:

$$V_{50\%} = \frac{2*42.94 + 4*43.81 + 3*44.67 + 1*45.54 + 4*46.96 + 5*47.55 + 1*48.42}{20}$$

$$V_{50\%} = 45.68 \text{ kV}$$

En promedio las condiciones atmosféricas del laboratorio en el transcurso de las prueba se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Las mediciones se realizaron con un termohigrómetro digital. Estos datos son utilizados para determinar la tensión crítica de flameo normalizada.

**Tabla 8.**

*Condiciones atmosféricas del laboratorio de alta tensión.*

Condiciones del Laboratorio	
Temperatura	28 °C
Presión	678.5 mmhg
Humedad absoluta	16.6 g/m3
Humedad relativa	62 %

El factor de corrección por humedad, aplicando la ecuación 4.4, es:

$$k_h = 0.00813 * 16.6 + 1.095 = 0.9597$$

El factor de corrección por densidad de aire, aplicando la ecuación 4.5, es:

$$k_d = \left( \frac{678.5}{760} \right) * \left( \frac{273 + 20}{273 + 28} \right) = 0.869$$

Por tanto, la tensión crítica de flameo, aplicando la ecuación 4.3, es:

$$V_{50\%\_normalizado} = 46.68 * \frac{0.9597}{0.869} = 50.45 \text{ kV}$$

La tensión crítica de flameo normalizada de los cuernos de arco es mayor que la de los electrodos de referencia (45 kV), para una misma separación electródica de 3.5 cm. Esto concuerda con la teoría mencionada en la sección 3.1.3.

Con el fin de determinar una tensión estadísticamente más segura de los cuernos de arco, se calcula el voltaje necesario para generar una descarga a una probabilidad del 99%, aplicando la ecuación 4.2 se tiene:

$$V_{99\%} = (1 + 5.1993 * 0.03) * 50.45 = 58.32 \text{ kV}$$

Esto significa que, en condiciones atmosféricas estándar, habrá un 99% de probabilidad de que ocurra disrupción eléctrica en caso de que se presente una onda de tensión tipo impulso con un valor pico mayor que 58.32 kV. Este valor es muy alto comparado a la tensión de soporte del divisor (50 kV). Sin embargo, se debe calcular la tensión crítica de flameo para las condiciones atmosféricas promedio de la zona de ubicación del equipo de medición.

### 4.3 Ensamble de componentes.

Seleccionados, configurados y caracterizados los componentes, se procede a ubicarlos dentro del cofre destinado para su protección, como se muestra en la figura 41.

**Figura 41.**

*Vista frontal equipo de medición de tensiones inducidas.*



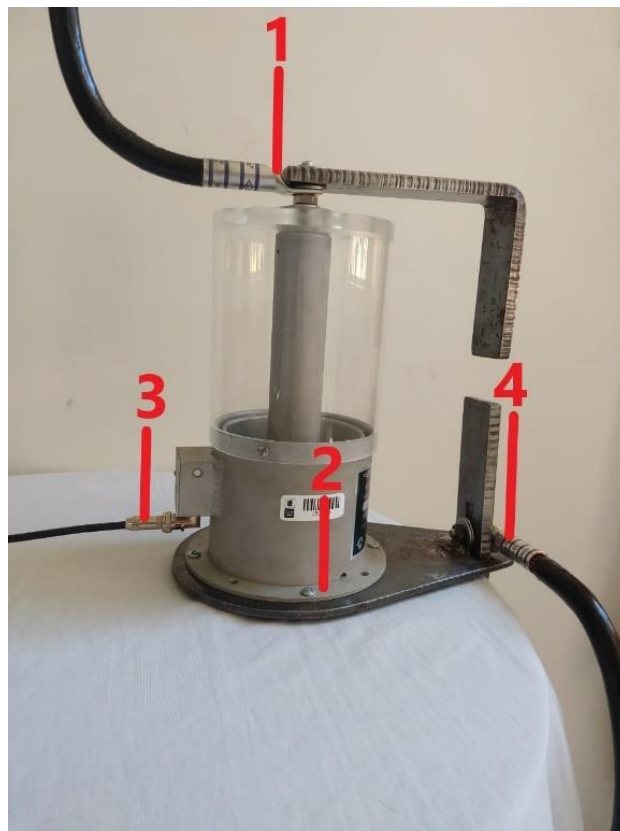
#### ***4.3.1 Detalles de montaje***

La figura 42 muestra el acople de los cuernos de arco con el divisor capacitivo, en la parte superior (1) se ensambla el cuerno al eje vertical del divisor que se soporta con el acrílico, en la

parte inferior (2) fue atornillada la base de los cuernos con la base del divisor capacitivo, logrando estabilidad del conjunto cuernos-divisor. El divisor es conectado al osciloscopio por medio de un cable coaxial con terminal tipo BNC (3). La conexión a la línea de distribución se llevará a cabo desde (1) y a tierra desde el punto (4).

### Figura 42.

*Detalles de ensamble divisor capacitivo y cuernos de arco.*

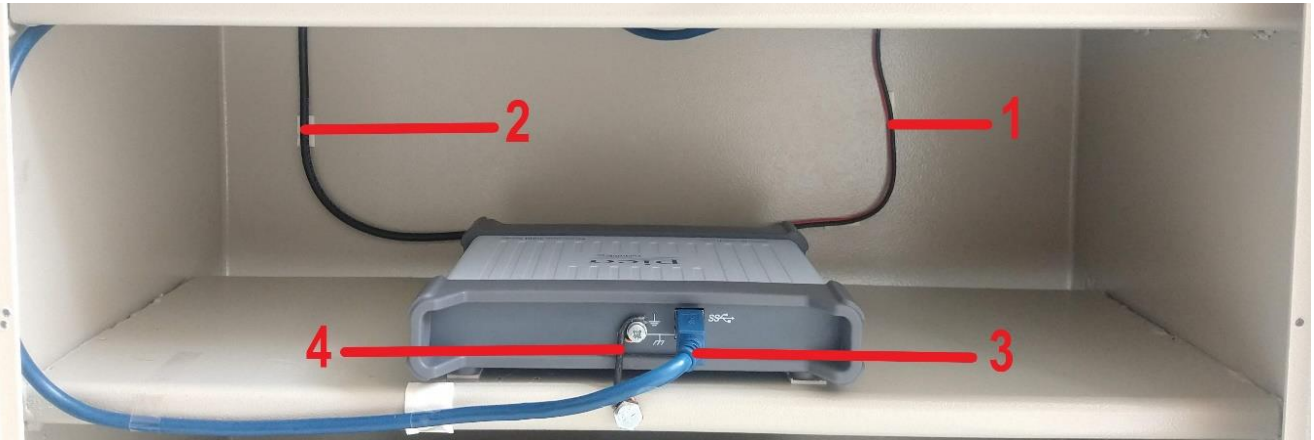


El posicionamiento del osciloscopio es el punto medio del cofre de intemperie como se muestra en la figura 43, siendo este el lugar más alejado de los huecos por donde ingresan los conductores y los campos electromagnéticos del exterior. Las conexiones para este componente son cuatro; la estampa de tiempo (1) ubicada en el canal A, la del divisor capacitivo (2) para el

canal B, ambas con terminaciones BNC, la alimentación y transmisión de datos (3) y la puesta a tierra del equipo (4).

**Figura 43.**

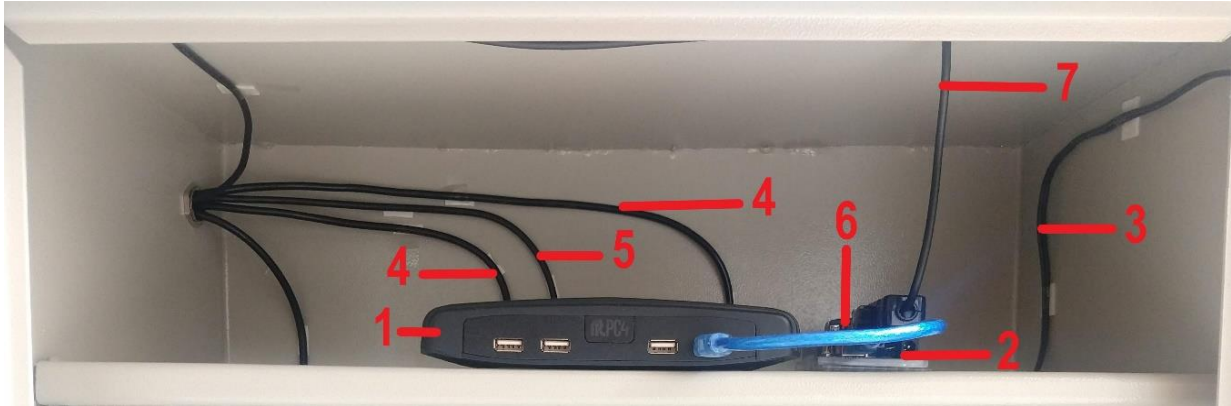
*Detalle de ensamble osciloscopio.*



En el estante superior del cofre fue ubicado el computador (1) junto al sistema de estampa de tiempo (2) como se muestra en la figura 44, las conexiones que llegan a estos componentes son las provenientes del osciloscopio, la alimentación para el computador (3), los conductores de señal de las antenas receptoras de WiFi (4), la señal del modem (5), alimentación para el Arduino (6), y la red de señal proveniente del GPS (7).

**Figura 44.**

*Detalles de ensamble PC y estampa de tiempo.*



El primer estante (figura 45) se utilizó para la ubicación de la alimentación AC (UPS). por la prensaestopa (1) ingresa la energía proveniente de la red, que se conduce a la UPS (2) y luego el rectificador del computador (3) se encarga de entregar la alimentación en DC (12 V) ideal para el computador. Al tiempo se realiza la conexión para garantizar la continuidad eléctrica entre el cofre y su tapa (4).

**Figura 45.**

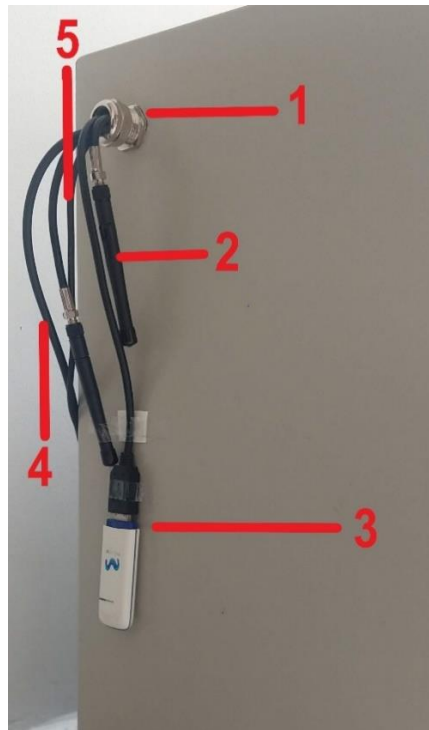
*Detalles de montaje UPS.*



La figura 46 muestra el lateral izquierdo del cofre, en la cual ingresa los conductores, por la prensaestopa (1), de los componentes ubicados en el exterior: antenas receptoras de red wifi (2), modem(3), señal de medida (4) y señal del GPS (5).

**Figura 46.**

*Detalles de cableado ingreso al cofre de intemperie.*



## 5. Conclusiones

Se realizó la selección de los componentes necesarios para construir un equipo que midiera tensiones inducidas en una línea de distribución. En la selección se tuvo en cuenta las

características de la señal de medición y que los componentes fueran portables con el fin de que pueda ser ubicado en lugares remotos y con condiciones geográficas que no son de fácil acceso.

Se consideró el efecto de las perturbaciones electromagnéticas en el equipo, para ello se establecieron métodos de diseño y ensamble de componentes que permiten contrarrestar el impacto sobre éstos y, por tanto, en las señales que se registran. Se tuvo en cuenta la longitud y característica de los conductores que interconectan los equipos, el sistema de puesta a tierra, la ubicación de componentes y su blindaje ante campos externos.

La protección eléctrica del equipo de medición está determinada por los cuernos de arco implementados, los cuales fueron sometidos a una prueba Up and Down en el laboratorio de alta tensión caracterizando su funcionamiento. Se recomienda realizar más pruebas a diferentes separación electródica, teniendo en cuenta las condiciones ambientales del lugar en que se ubicara el equipo, y así, dar un criterio más acertado del nivel de protección adecuado para este.

El equipo construido permite medir la forma de onda de la tensión inducida junto con sus características más relevantes, brindando la posibilidad de fortalecer y profundizar la investigación sobre la eficiencia de las protecciones en las redes de distribución, contribuyendo a la seguridad de las personas y equipos.

La configuración del osciloscopio brinda la disponibilidad de memoria circular para dos mediciones consecutivas con una ventana de tiempo de 200 ms, frecuencia de muestreo de 35MS/s y resolución vertical de 12 bits. Estas mediciones se exportan al ordenador en un tiempo no mayor a 5 segundos.

La hora UTC transmitida por el sistema GPS-Arduino, tiene una precisión mayor que un 1 ms. Esto permitirá la comparación de la señales de tensión medidas, con otros sistemas de

medición relacionados con las descargas atmosféricas que ,a su vez, tengan un rango de cobertura que incluya la ubicación del equipo construido.

La simulación del equipo de medición permitió conocer que las bajas capacitancias del divisor capacitivo, ocasionan bajas corrientes ante impulsos atmosféricos. Así mismo, la caída de tensión por la resistencia de puesta tierra será despreciable y por tanto, las mediciones de la tensión fase-tierra de la línea de distribución serán precisas.

## **6. Recomendaciones**

Se recomienda ubicar el equipo en una zona con alta densidad de descargas atmosféricas (DDT), para que sea posible obtener el mayor número de mediciones en el menor tiempo. Además, el lugar de instalación debe contar con la disponibilidad de una red de baja tensión para ofrecer alimentación al equipo, en el caso de que no sea posible se debe diseñar e implementar una fuente de energía alternativa.

Se recomienda la instalación del equipo en una línea de distribución desenergizada, de esta manera el equipo de medición no registrará perturbaciones electromagnéticas propias de la red de distribución y así, la causa principal de las mediciones registradas será las descargas atmosféricas.

### Referencias Bibliográficas

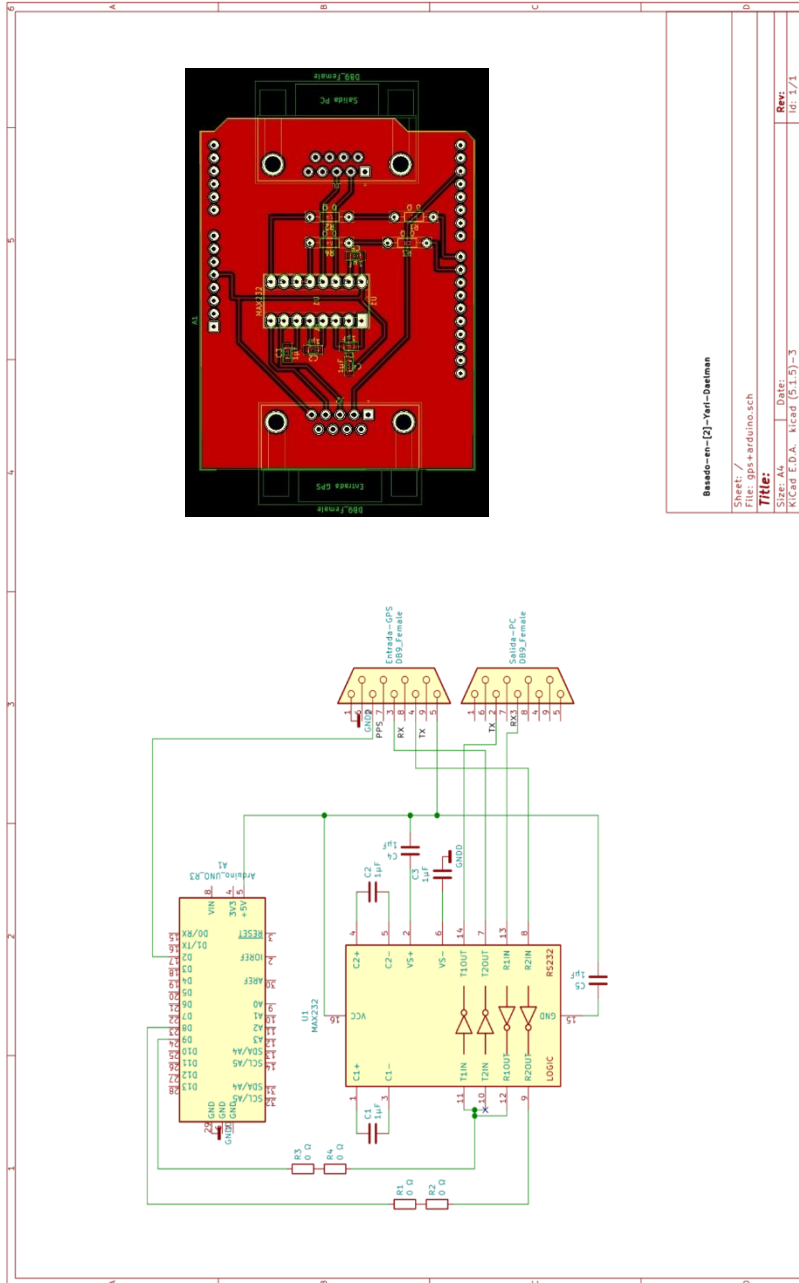
- Aranguren, D., Soto, E. A., Perez, E., & Torres, H. (2019). Lightning Voltages Measurements on an Energized Distribution Line in Colombia. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/temc.2019.2944618>
- Barker, P. P., Short, T. A., Eybert-Berard, A. R., & Berlandis, J. P. (1996). Induced voltage measurements on an experimental distribution line during nearby rocket triggered lightning flashes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(2), 980–990. <https://doi.org/10.1109/61.489360>
- Daelman, Y. (2018). Improved lightning research instrumentation Improved lightning research instrumentation. (June).
- Electronics Pearson. (1999). Model VD-305A Capacitive Voltage. Retrieved from <https://www.pearsonelectronics.com/pdf/VD-305A-10,000.pdf>
- Eriksson, A. J., Meal, D. V., & Stringfellow, M. F. (1982). Lightning — Induced overvoltages on overhead distribution lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101(4), 960–968. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1982.317162>
- Garmin. (2011). GPS 18x TECHNICAL SPECIFICATIONS. Revision D(October), 1–38.
- Golde, R. H. (2013). Lightning surges on overhead distribution lines. *Electrical Engineering*, 73(5), 437–446. <https://doi.org/10.1109/ee.1954.6438770>
- Henry W. Ott. (2009). *Electromagnetic Compatibility Engineering*.
- IEEE guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines. (2011). In *IEEE Std 1410-2010 (Revision of IEEE Std 1410-2004)* (pp. 1–73). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2011.5706451>

- IEEE Standard for Digital Recorders for Measurements in High-Voltage Impulse Tests. (1998). *Computer Standards and Interfaces*, 22(2), 1–21. [https://doi.org/10.1016/S0920-5489\(00\)00036-2](https://doi.org/10.1016/S0920-5489(00)00036-2)
- Instrumentation, P. S., & Committee, M. (1995). Amendment to IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing. *IEEE Std 4a-2001*, 2001, 1–137. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2001.92417>
- Kuffel, E., & Zaengl, W. S. (2000). High Voltage Engineering. In *IEEE Power Engineering Review* (2nd ed., Vol. 1). <https://doi.org/10.1109/MPER.1995.384315>
- Master, M. J., & Uman, M. A. (1984). Lightning induced voltages on power lines: Theory. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-103(9), 2519–2529. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1984.318405>
- Mehta, S., Basak, P., Anelis, K., & Paramane, A. (2018). Simulation of single and multistage impulse voltage generator using matlab simulink. *2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies, GUCON 2018*, 1(1), 641–646. <https://doi.org/10.1109/GUCON.2018.8675054>
- Pérez gonzález, E. (2006). Avances en el modelamiento y experimentación de tensiones inducidas en redes de distribución. universidad nacional de colombia.
- Qui, Z., Ruan, J., & Shu, S. (2019). *Air Insulation Prediction Theory and Applications* (1st ed.). Beijing.
- Ríos, E. A. S. (2014). Lightning induced voltages study on overhead distribution networks placed over non-flat terrains. Universidad Nacional de Colombia.
- Rubinstein, M., Uman, M. A., Thomson, E. M., & Medelius, P. J. (1994). Measurements of the Voltage Induced on an Overhead Power Line 20 m from Triggered Lightning. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 36(2), 134–140. <https://doi.org/10.1109/15.293277>
- Schon, K. (2013). High Impulse Voltage and Current Measurement Techniques. In *High Impulse Voltage and Current Measurement Techniques*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-00378-8>

- Thomas, R. J. (1970). High-Impulse Current and Voltage Measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IM-19(2), 102–117. <https://doi.org/10.1109/TIM.1970.4313872>
- Thottappilli Rajeev, & Vladimir A. Rakov. (1997). Distribution of charge along the lightning channel: Relation to remote electric and magnetic fields and to return-stroke models. *Journal of Geophysical Research*, 102(MARCH 27), 6987–7006.
- Torres, Horacio. (2002). *El rayo: mitos, leyendas, ciencia y tecnología* (2nd ed.; UNIBIBLOS, Ed.). Bogotá.
- Torres, Horacio, Salgado, M., Perez, E., Herrera-Murcia, J. G., Younes, C., Quintana, C., ... Gonzalez, D. (2000). Lightning induced voltages measured in a high lightning activity zone and its comparison with theoretical values. *2000 25th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 5.
- Sincronización horaria con GPS - Orolia. (n.d.). Retrieved February 5, 2020, from <https://www.orolia.com/resources/knowledge-center/gps-clock-synchronization>.
- Yokoyama, S., Mitani, H., & Miyake, K. (1983). Simultaneous measurement of lightning induced voltages with associated stroke currents. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-102(8), 2420–2429.

Apéndices

Apéndice A. Diagrama circuital comunicación GPS-Arduino



Basado-en-(2)-Yari-Dariman	
Sheet: /	
File: gps+arduino.sch	
Title:	
Size: A4	Date:
Kicad: E.D.A. - Kicad (3.1.5)-3	Rev: /
	Rev: 1/1

Apéndice B. Ups interactiva monofásica 600VA

UPS Interactiva Monofásica 600VA



UPS - Interactiva  
PowerBack 600VA

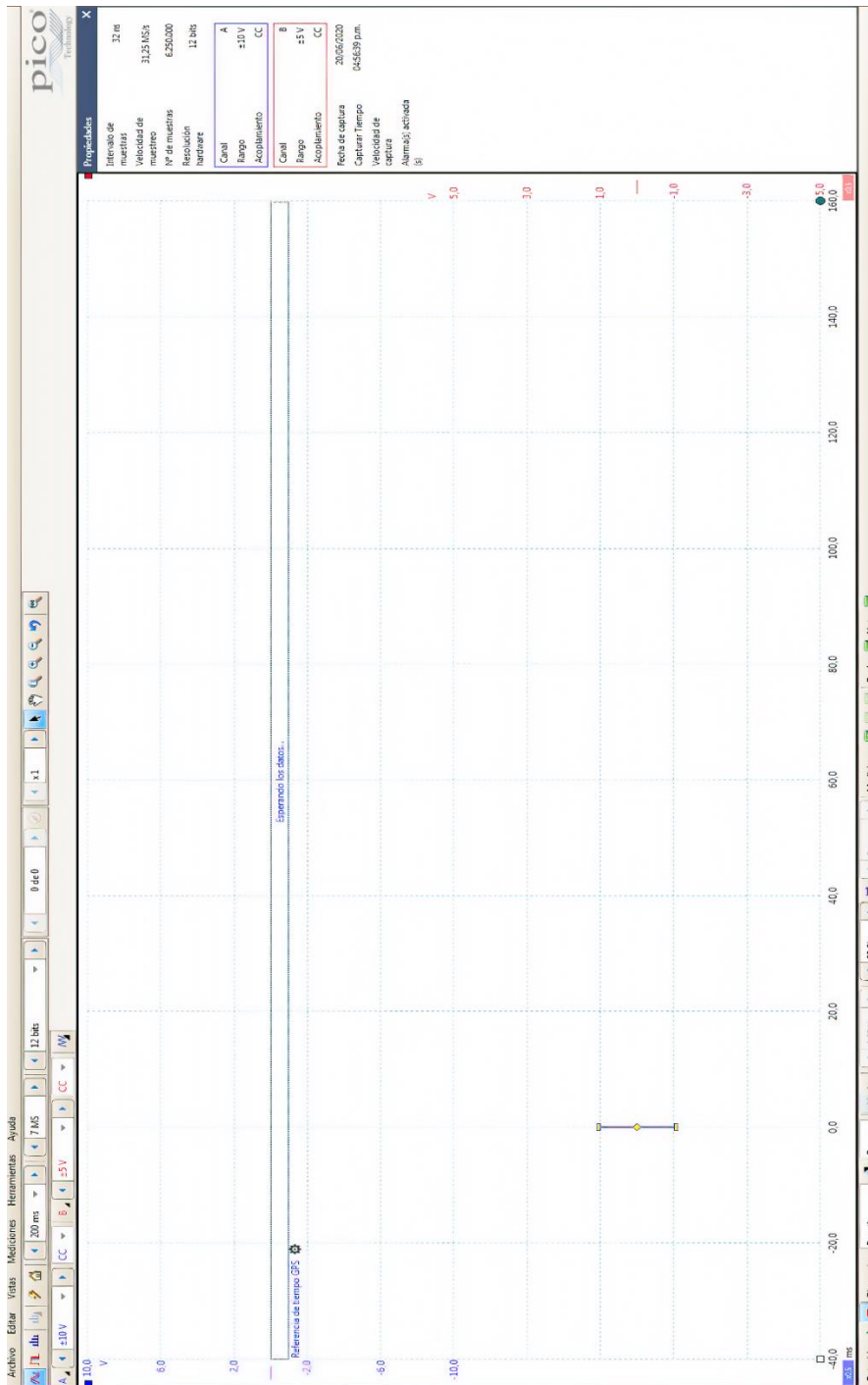


Condiciones de operación	Temperatura de operación (ruido audible a 1m)	0°C a 40°C, de día
	Disempeño - seguridad - EMC	NOH 620004, 620004
Dimensiones Largo\Alto\Profundo	Aprobaciones	Certificado de conformidad ETL, UL, IEC
	Peso	1800 (1400/200)
	Temperatura	0 - 40°C
Humedad	20 - 90% (Sin condensación)	

Exp. Técnicas	<p>Potencia Formatao 600VA</p> <p>Arquitectura Interactiva con cargador de baterías y regulador de voltaje</p> <p>Rango de Voltaje de entrada 80 - 145VAC</p> <p>Voltaje de salida 120VAC +/- 1%, en modo línea y 120VAC +/- 1% en modo batería</p> <p>Tiempo de transferencia &lt; 6ms (sin más)</p> <p>Clasificación de desempeño VFI 333</p> <p>Tiempo de control Microcontrolador</p> <p>Compatibilidad con sistemas de distribución TI, T1N3, T1N4, T1, monofásica, dos líneas + tierra</p> <p>Corriente de fuga a la entrada &lt; 5% de la corriente nominal</p>
Especificaciones de Entrada	<p>Número de fases disponibles a la salida 1 monofásica</p> <p>Desviación del voltaje de salida en condición transiente 0.01% (seg)</p> <p>Capacidad de reserva en sincronización 100% de trabajar de entrada en modo normal</p> <p>Voltaje nominal de salida 120VAC</p> <p>Tiempo de ciclo a la salida en modo batería 30 segundos</p> <p>Frecuencia nominal de entrada 60 Hz +/- 10%</p> <p>Tipo de encendido Switch con encendido</p> <p>Semiconductores para conmutación puente H Mosfets</p>
Especificaciones de Salida	<p>Potencia en IV, disponible en salida 240W</p> <p>Frecuencia de salida 60 Hz +/- 1%, en modo línea +/- 0.2% en modo batería</p> <p>Regulación de voltaje +/- 10%</p> <p>THD voltaje de salida en modo línea &lt; 5%</p> <p>Factor de potencia a la salida 0.7</p> <p>Eficiencia de salida en modo línea al 100% de carga &gt; 95%</p> <p>Tipo de regulador de voltaje AC en modo línea Operación por relé, sistema boost</p> <p>Voltaje nominal a la salida &lt; 5% de la corriente nominal</p> <p>Entradas Carga línea 3-1P</p> <p>Salidas 3 salidas reguladas + 1 By pass</p>
Batería	<p>Tiempos estimados 1 X 12V4.5AH</p> <p>Voltaje DC nominal 3 min / 7 min 12 VDC</p> <p>Administración de batería Protección contra sobrecarga / descarga</p> <p>Tiempo requerido de carga al 90% 6 Horas</p> <p>Máxima corriente de carga 1A</p> <p>Tipo de batería Batería VRLA con tecnología AGM y chasis en ABS</p> <p>Regimen de operación del cargador Tipo ABS, 90% eficiencia, 10% fricción</p> <p>Protección del circuito DC (baterías) Fusible tipo DC</p> <p>Sistema de protección de baterías Sobrecarga, sobre descarga, sobre corriente</p>
Interfaces	<p>Indicadores y parpadeo Led rojo: carga batería, Led amarillo: batería, Led verde: línea</p> <p>Alarma audible en modo batería 1 Hz cada 3 segundos</p> <p>Alarma audible en bajo nivel de carga 1 Hz cada 1 segundo</p> <p>Alarma audible en modo falta o sobrecarga Bip continuo</p>

\*Algunas especificaciones pueden cambiar sin previo aviso

Apéndice C. Interfaz de la configuración del software PicoScope6.



**Apéndice D: Precisión en la hora transmitida por el sistema GPS-Arduino.**

<b>Hora UTC del GPS</b>	<b>Hora UTC del sistema GPS-Arduino</b>	<b>Tiempo transcurrido desde el PPS [ms]</b>	<b>Retraso en la hora [ms]</b>
15:18:33	15:38:33,003	3.2	0.2
	15:38:33,113	113.3	0.3
	15:38:33,223	223.3	0.3
	15:38:33,332	333.1	1.1
	15:38:33,443	443.3	0.3
	15:38:33,553	553.3	0.3
	15:38:33,663	663.2	0.2
	15:38:33,773	773.3	0.3
	15:38:33,882	883.1	1.1
	15:38:33,993	993.3	0.3
17:20:52	17:20:52,005	5.2	0.2
	17:20:52,115	115.3	0.3
	17:20:52,234	235.1	1.1
	17:20:52,305	305.3	0.3
	17:20:52,495	495.3	0.3
	17:20:52,555	555.3	0.3
	17:20:52,644	645.1	1.1
	17:20:52,795	795.3	0.3
18:05:37	18:05:37,008	8.3	0.3
	22:17:47,137	138.1	1.1
	22:17:47,228	228.3	0.3

<b>Hora UTC del GPS</b>	<b>Hora UTC del sistema GPS-Arduino</b>	<b>Tiempo transcurrido desde el PPS [ms]</b>	<b>Retraso en la hora [ms]</b>
	22:17:47,327	328.1	1.1
	22:17:47,448	448.2	0.2
	22:17:47,557	558.1	1.1
	22:17:47,698	698.3	0.3
	22:17:47,718	718.3	0.3
	22:17:47,878	878.2	0.2
	22:17:47,968	968.3	0.3
19:45:15	19:45:15,006	6.3	0.3
	19:45:15,186	186.3	0.3
	19:45:15,236	236.3	0.3
	19:45:15,356	356.2	0.2
	19:45:15,446	446.3	0.3
	19:45:15,535	536.1	1.1
	19:45:15,665	666.3	1.3
	19:45:15,716	716.3	0.3
	19:45:15,876	876.3	0.3
	19:45:15,996	996.3	0.3
20:03:41	20:03:41,003	3.2	0.2
	20:03:41,113	113.3	0.3
	20:03:41,232	233.1	1.1
	20:03:41,343	343.2	0.2
	20:03:41,483	483.3	0.3
	20:03:41,553	553.3	0.3
	20:03:41,623	623.3	0.3
	20:03:41,773	773.3	0.3
	20:03:41,833	833.3	0.3
	20:03:41,983	983.3	0.3
22:55:23	22:55:23,005	3.2	1.8
	20:03:41,113	113.3	0.3

Hora UTC del GPS	Hora UTC del sistema GPS-Arduino	Tiempo transcurrido desde el PPS [ms]	Retraso en la hora [ms]
	20:03:41,232	233.1	1.1
	20:03:41,343	343.2	0.2
	20:03:41,483	483.3	0.3
	20:03:41,553	553.3	0.3
	20:03:41,623	623.3	0.3
	20:03:41,773	773.3	0.3
	20:03:41,833	833.3	0.3
	20:03:41,983	983.3	0.3
0:17:43	00:17:43,008	8.3	0.3
	00:17:43,108	108.2	0.2
	00:17:43,217	218.2	1.2
	00:17:43,338	338.3	0.3
	00:17:43,438	438.1	0.1
	00:17:43,547	548.1	1.1
	00:17:43,668	668.3	0.3
	00:17:43,778	778.1	0.1
	00:17:43,818	818.3	0.3
	00:17:43,978	978.3	0.3
		<b>Promedio</b>	0.45

**Apéndice E. Costos de componentes del equipo de medición**

<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>precio por unidad</b>	<b>total</b>
1	Divisor capacitivo VD-305A	\$ 9.866.841	\$ 9.866.841
1	FitPC4 PRO	\$ 3.819.372	\$ 3.819.372
1	Osciloscopio PicoScope 5242D	\$ 5.537.060	\$ 5.537.060
1	Cofre de intemperie (aluminio)	\$ 600.000	\$ 600.000
1	UPS	\$ 100.000	\$ 100.000
1	Cuernos de arco	\$ 65.000	\$ 65.000
1	GPS 18X	\$ 352.000	\$ 352.000
1	Arduino Uno	\$ 30.000	\$ 30.000
1	Otros	\$ 187.600	\$ 187.600
		<b>SUB TOTAL</b>	<b>\$ 20.557.873</b>